НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА УСТАНОВА «НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ»

ЛУБСЬКИЙ МИКОЛА СЕРГІЙОВИЧ

УДК 528.852.1(100)(043.3)

МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ІНФРАЧЕРВОНОГО АЕРОКОСМІЧНОГО ЗНІМАННЯ НА ОСНОВІ СУБПІКСЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у Державній установі "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України".

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Станкевич Сергій Арсенійович**, головний науковий співробітник відділу геоінформаційних технологій у дистанційному зондуванні Землі Державної установи "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України".

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент **Боровицький Володимир Миколайович**, професор кафедри оптичних та оптико-електронних приладів Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник **Пономаренко Сергій Олексійович**, провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту авіації.

Захист дисертації відбудеться 24 жовтня 2017 р. о 10^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.162.03 Державної установи "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України" за адресою: Україна, 01054, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 55-Б.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту геологічних наук НАН України (Україна, 01054, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 55-Б).

Автореферат розіслано 19 вересня 2017 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.162.03
кандидат геологічних наук,
старший науковий співробітник О.В. Седлерова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Визначення розподілу температури поверхні Землі є основною задачею обробки даних довгохвильового інфрачервоного випромінювання (діапазон довжин хвиль 8-14 мкм). Ці дані дозволяють вирішувати різноманітні задачі, які неможливо достовірно вирішити за допомогою дистанційних даних лише видимого та ближнього інфрачервоного діапазону.

Однак, фізичні обмеження, які визначаються природою інфрачервоного випромінювання (порівняно велика довжина хвилі та, відповідно, низька енергія його квантів), суттєво ускладнюють створення інфрачервоних знімальних систем космічного базування із середньою та високою просторовою розрізненністю. На сьогодні є доступними дані, одержувані сенсором AVHRR із просторовою розрізненністю 1,09 км, встановленого на супутниках серії NOAA, сенсором MODIS із просторовою розрізненністю 1 км, яким обладнано супутники системи EOS та дані п'яти каналів сенсора SLSTR, встановленого на супутнику Sentinel-3A із просторовою розрізненністю 1 км.

Інфрачервоні знімальні системи із кращою просторовою розрізненністю почали впроваджуватись із 1982 року. Наразі в архівному вигляді доступні дані сенсорів TM супутника Landsat-5 із просторовою розрізненністю 120 м, ETM+ супутника Landsat-7 (60 м), TIRS супутника Landsat-8 та п'ятиканального інфрачервоного спектрорадіометра ASTER (90 м) супутникової системи EOS.

Значний внесок у розвиток знімальних систем довгохвильового інфрачервоного випромінювання та обробки даних зробили J. M. Lloyd, J. E. Johnson, P. W. Kruse, K.-P. Möllmann, J. C. Jiménez-Muñoz, Zhao-Liang Li. В Радянському Союзі та Україні серед провідних фахівців в даній області є відомі вчені Л. З. Криксунов, М. М. Мирошников, Ю. К. Рєбрін, В. І. Лялько, М. О. Попов та ін.

Методику розрахунку розподілу температур за даними Landsat активно розробляли і вдосконалювали J. A. Sobrino та J. C. Jiménez-Muñoz. E. Valor та ін. (Іспанія) розробили методику відновлення даних коефіцієнта теплового випромінювання за даними вегетаційного індексу NDVI. A. Gillespie (США), Rokugawa S. (Японія) та ін. розробили методику картування коефіцієнта теплового випромінювання на основі багатоканального знімання сенсором ASTER.

Наразі єдиним функціонуючим сенсором довгохвильового інфрачервоного випромінювання є прилад TIRS на супутнику Landsat-8 із просторовою розрізненністю 100 м, інтерпольованих до 30 м. При цьому актуальність використання даних середньої просторової розрізненності значно зросла із активним розвитком міст по всьому світу, оскільки урбанізоване середовище є надзвичайно активним джерелом теплового випромінювання. Для урбанізованого середовища характерною є висока гетерогенність, тому для створення детальних карт теплових полів постала необхідність розробки програмних та апаратних методів підвищення просторової розрізненності даних. З цією метою реалізовано ряд способів підвищення просторової розрізненності даних аерокосмічного знімання, в тому числі і розробки українських фахівців М. І. Лихоліта, В. І. Лялька, М. О. Попова та ін.

Отже, ***актуальною науковою задачею*** є розробка нових методів та технологій підвищення просторової розрізненності даних довгохвильового інфрачервоного діапазону з метою підвищення інформативності зображень просторових розподілів теплового поля за матеріалами супутникового інфрачервоного знімання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень, що проводились у Державній установі "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України" за такими темами: "Методологія комплексного геоінформаційного аналізу матеріалів аерокосмічних спостережень Землі і наземних даних в інтересах підвищення ефективності природокористування" (державний реєстраційний номер 0111U000030), "Методи інформаційного інтегрування даних багатоспектрального аерокосмічного знімання, польової спектрометрії і геолого-геофізичних даних при вирішенні завдань дистанційного пошуку покладів корисних копалин на суходолі і морському шельфі" (державний реєстраційний номер 0112U000702), "Методи дистанційного оцінювання біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів в межах різних ландшафтно-кліматичних зон території України" (державний реєстраційний номер 0115U003682), "Методи і алгоритми обробки даних від перспективного кадрового спектрорадіометра дальнього інфрачервоного діапазону" (державний реєстраційний номер 0115U003674), "Створення прототипу бібліотеки коефіцієнтів відбиття і теплового випромінювання типових об'єктів і фонів у дальньому інфрачервоному діапазоні" (державний реєстраційний номер 0115U003675), "Розробка програмного модуля підвищення просторової розрізненості первинних інформаційних матеріалів" (державний реєстраційний номер 0116U006798), "Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненності за допомогою субпіксельного оброблення зображень" (державний реєстраційний номер 0114U001665), "Технологія підвищення просторової розрізненності зображень, що отримуються матричною знімальною камерою космічної системи "Січ", за допомогою субпіксельного оброблення" (державний реєстраційний номер 0113U000913), "Дослідження впливу урбанізації на мікроклімат міст (за матеріалами теплових аерокосмічних зйомок)" (державний реєстраційний номер 0114U005309), "Розроблення алгоритмів і відповідного програмного забезпечення субпіксельної обробки кадрів підстилаючої поверхні Землі, що формуються СДІЧ" (державний реєстраційний номер 0116U008458).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення інформативності космічних зображень довгохвильового інфрачервоного діапазону шляхом розробки методики субпіксельної обробки супутникових даних.

Для досягнення поставленої мети потрібне розв'язання наступних наукових *завдань*:

– огляд існуючих засобів формування і методів обробки даних дистанційного зондування в інфрачервоному діапазоні, а також відомих підходів до підвищення просторової розрізненності дистанційних зображень;

– вдосконалення методу розрахунку розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні;

– розробка алгоритмів відновлення теплового поля за даними космічного знімання у видимому, ближньому інфрачервоному та довгохвильовому інфрачервоному діапазоні;

– розробка методики підвищення просторової розрізненності різночасових зображень коефіцієнтів теплового випромінювання та теплового поля шляхом субпіксельної обробки;

– перевірка працездатності розробленої методики та оцінка досягнутого підвищення просторової розрізненності реальних супутникових інфрачервоних зображень;

– розробка рекомендацій щодо практичного застосування розробленої методики.

Об'єкт дослідження – космічні зображення довгохвильового інфрачервоного діапазону.

Предмет дослідження – методи підвищення інформативності космічних зображень довгохвильового інфрачервоного діапазону.

Методи дослідження

Для вирішення поставлених задач використовувалися:

– теорія радіаційного переносу – для створення моделі переносу теплового випромінювання з метою урахування впливу атмосфери на формування зображень довгохвильового інфрачервоного діапазону;

– теорія теплового випромінювання – для обчислення фізичної температури і коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні на основі даних дистанційного зондування;

– теорія інтерполяції та апроксимації функцій – для опису нелінійної регресійної залежності коефіцієнта теплового випромінювання різних типів земних поверхонь від вегетаційного індексу NDVI;

– субпіксельна обробка растрових даних – для оцінки субпіксельних зміщень різночасових супутникових зображень однієї і тієї же сцени та відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності;

– статистична регуляризація – для розв'язання недовизначених систем рівнянь при відновленні зображень підвищеної просторової розрізненності;

– просторово-частотний аналіз – для обчислення та порівняльної оцінки функцій передачі модуляції цифрових зображень при перевірці розробленої методики;

– математична статистика – для статистичної оцінки результатів за вибіркою кількісних даних при оцінці підвищення просторової розрізненності зображень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. ***Вперше*** отримано комплексну дворівневу методику підвищення просторової розрізненності результатів обробки зображень теплового поля, отриманих за допомогою даних дистанційного зондування Землі, коли на першому рівні підвищення досягається залученням даних розподілу коефіцієнта теплового випромінювання, отриманих шляхом обробки зображень видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, а на другому рівні підвищення досягається шляхом субпіксельної обробки пар різночасових розподілів інваріантних даних (коефіцієнта теплового випромінювання) та подальшого відновлення зображень теплового поля підвищеної просторової розрізненності.

2. ***Розроблено новий*** метод підвищення просторової розрізненності різночасових зображень теплового поля шляхом субпіксельної обробки окремих частотних компонент зображень.

3. ***Вдосконалено*** методики та алгоритми розрахунку фізичної температури та коефіцієнта теплового випромінювання земних покривів та адаптовано до даних, що одержуються сенсорами супутника Landsat-8 (OLI та TIRS).

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблена методика дозволить отримувати карти теплового поля значно вищої просторової розрізненності у порівнянні із технічними можливостями нині існуючих сенсорів довгохвильового інфрачервоного випромінювання, що дозволить більш детально досліджувати території із високою гетерогенністю поверхонь, наприклад,

урбанізованого середовища, з більшою точністю відслідковувати окремі джерела інтенсивного теплового випромінювання та динаміку теплового поля, обумовлену вирубками лісів, забудовою, намиванням пісків та будь-якими іншими природними чи антропогенними факторами та розробляти більш точні та ґрунтовні прогнози мікрокліматичних змін, що особливо актуально на сьогодні, в умовах інтенсивного розвитку урбанізованих та індустріальних ландшафтів.

Розроблену методику підвищення просторової розрізненності було *впроваджено* в рамках виконання завдань, поставлених Державною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013–2017 рр. та використовувалося в 2016 році при виконанні складових частин дослідно-конструкторських робот (СЧ ДКР) "Розроблення алгоритмів і відповідного програмного забезпечення субпіксельної обробки кадрів підстилаючої поверхні Землі, що формуються СДІЧ", і "Розробка програмного модуля підвищення просторової розрізненності первинних інформаційних матеріалів", що підтверджується відповідним актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Автором проаналізовано існуючі методи визначення температури земних поверхонь та покривів та розподілу їх коефіцієнта теплового випромінювання за допомогою даних дистанційного зондування. Автором особисто було оброблено 24 різночасових зображення видимого, ближнього інфрачервоного та довгохвильового інфрачервоного діапазону, отримано зображення теплового поля та розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання, а при попарному суміщенні різночасових зображень однієї сцени були отримані супутникові дані підвищеної просторової розрізненності.

Дана робота, що базується на публікаціях [1-21], присвячена розробці методики підвищення інформативності результатів обробки даних знімання у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні спектру. Основні наукові результати дисертаційної роботи описано у ряді наукових робіт, опублікованих сумісно зі співавторами, а внесок здобувача, описаний в роботах полягає в наступному:

– у роботах [2-6,9,11,13,15] – запропоновано методику застосування даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону з метою розрахунку розподілу коефіцієнта теплового випромінювання;

– у роботах [1,8,12-15,17] – розроблено методику підвищення просторової розрізненності аерокосмічного знімання шляхом субпіксельної обробки;

– у роботах [18-20] – практично реалізовано спосіб оцінки субпіксельного зміщення різночасових зображень одне відносно одного;

– у роботі [20] – розроблено нову методику підвищення просторової розрізненності різночасових зображень теплового поля шляхом субпіксельної обробки окремих частотних компонент;

– у роботах [20,21] – вдосконалено спосіб розрахунку розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання на основі обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону.

– у роботі [7] – запропоновано та протестовано новий спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень.

Апробація результатів дисертації.

Попередні результати дисертаційного дослідження та основні теоретичні та методичні засади були представлені та обговорені на: VIII Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми телекомунікацій-2014" (Київ, 22-25 квітня 2014 р.), міжнародній науковій конференції "Астрономічна школа молодих вчених"

(Житомир, 22-25 травня 2015 р.), 3-й міжнародній конференції "International Conference on CIS and Remote Sensing" (Цахкадзор, Вірменія, 17-19 листопада 2014 р.), другій Всеукраїнській науково-практичній конференції "Теоретичні та прикладні аспекти використання математичних методів та інформаційних технологій у науці, освіті, економіці та у виробництві" (Маріуполь, 25 квітня 2015 р.), міжнародній науково-практичній конференції "Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури" (Київ, 20-21 квітня 2015 р.), IX міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми телекомунікацій-2015" (Київ, 21-24 квітня 2015 р.), XIV всеукраїнській науково-практичній конференції "Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики" (Київ, 26-28 травня 2016 р.), 16-й науково-практичній конференції з космічних досліджень (Одеса, 22-26 серпня 2016 р.), п'ятій міжнародній конференції "Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки" (GEO-UA 2016) (Київ, 10-14 жовтня 2016 р.), міжнародній конференції "International Conference on Information and Digital Technologies" (IDT 2016) (Жешув, Польща, 5-7 липня 2016 р.), X міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми телекомунікацій-2016" (Київ, 19-22 квітня 2016 р.), 18-й міжнародній науковій конференції "Астрономічна школа молодих вчених" (Київ, 26-27 травня 2016 р.), XI міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми телекомунікацій-2017" (Київ, 18-21 квітня 2017 р.), 19-й міжнародній науковій конференції "Астрономічна школа молодих вчених" (Київ, 24-25 травня 2017 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 21 робота, у тому числі: у фахових виданнях, що внесені до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук – 6 (з яких дві включено у наукометричні бази "РИНЦ" та Scopus); 1 патент на винахід; 14 – у збірниках матеріалів і тез доповідей вітчизняних та міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (157 найменувань на 21 сторінках) і 9 додатків на 32 сторінках. Робота викладена на 179 сторінках, що містять 102 сторінок основного тексту, 21 рисунок і 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність розробки нових методів та технологій підвищення просторової розрізненності даних довгохвильового інфрачервоного діапазону та вторинних даних, необхідних для побудови карти теплового поля за матеріалами супутникового знімання. Описано наукову новизну отриманих результатів дисертації, їхнє практичне значення та подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, список опублікованих за даною тематикою робіт, та перелік наукових програм, пов'язаних із описаними в роботі дослідженнями.

Перший розділ – "*Огляд існуючих методів обробки та підвищення інформативності даних довгохвильового інфрачервоного діапазону*" – присвячений огляду та аналізу наукової літератури, також в ньому розроблена схема проведення дослідження та поставлені наукові задачі.

Проведено аналіз існуючих сенсорних систем, що надають дані знімання у довгохвильовій області інфрачервоного спектру випромінювання.

Проаналізовано існуючі методики розрахунку температури земних покривів, відновлення їх коефіцієнта теплового випромінювання за даними дистанційного знімання. Також проаналізована існуючі методи формування масивів субпіксельно зміщених зображень, їх обробки та відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності.

Визначено завдання дослідження та розроблена схема його проведення яка включає в себе вдосконалення існуючих методик, об'єднання двох різких підходів до підвищення просторової розрізненності в єдину комплексну методику, проведення кількісного оцінювання отриманих результатів та розробку рекомендацій щодо застосування методики та її впровадження.

Визначено, що серед даних теплового інфрачервоного знімання із просторовою розрізненістю <1 км найбільш застосованими є дані супутників серії Landsat. Зображення сенсорів TM та ETM+, які застосовувались на супутниках Landsat-5 та 7, мають просторову розрізненність 120 та 60 м відповідно, радіометричну розрізненність 8 біт та спектральний діапазон 10,4-12,5 мкм. Дані сенсора TIRS супутника Landsat-8 мають просторову розрізненність 100 м, радіометричну розрізненність 16 біт. Сенсор TIRS отримує дані у двох спектральних діапазонах (10 канал – 10,3-11,3 мкм, 11 канал – 11,5-12,5 мкм). Завдяки вільному доступу до даних, отриманих сенсорами супутників Landsat, вони досі є найбільш поширеними для вирішення різноманітних задач.

Другий розділ – "*Розробка методів розрахунку температурного поля та розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання підвищеної розрізненності за даними космічного знімання*", в ньому розвинено теоретичні методи обробки даних космічного знімання з метою отримання розподілу коефіцієнта теплового випромінювання та температури земних поверхонь і покривів, а також описано попередню обробку вхідних даних.

Основним результатом обробки даних довгохвильового інфрачервоного діапазону є зображення розподілу температур, яке розраховується із врахуванням впливу атмосферних ефектів на інфрачервоне випромінювання. Для визначення фізичної температури земних покривів виконується визначення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання шляхом обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, просторова розрізненність яких значно вища за дані знімання у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні 8-13 мкм, що в свою чергу дозволяє значно підвищити просторову розрізненність результуючого температурного зображення.

Можливість дистанційного визначення температури ґрунтується на законі теплового випромінювання Планка для "сірого" тіла (тіло, коефіцієнт теплового випромінювання якого не залежить від довжини хвилі випромінювання) – вираз для спектральної густини потоку випромінювання:

$$L(\lambda,\ T) = \varepsilon(\lambda)\ M(\lambda,\ T) = \frac{\varepsilon(\lambda)\ c_1\ \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda\ T}\right) - 1}, \qquad (1)$$

де $L(\lambda, T)$ – спектральна густина енергетичної яскравості земної поверхні, $\varepsilon(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання, $M(\lambda, T)$ – спектральна густина енергетичної яскравості абсолютно чорного тіла, $c_1 = 2hc^2 =$

$1{,}191 \cdot 10^{-16}$ Вт·м^2 и $c_2 = \dfrac{hc}{k} = 1{,}439 \cdot 10^{-2}$ м·К – перша і друга константи закону Планка, $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка, $c = 2{,}998 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі, $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана, λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання.

Значення температури отримується оберненням рівняння вираження спектральної густини енергетичної яскравості Планка для "сірого" тіла (1):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\dfrac{\varepsilon(\lambda) c_1}{\lambda^5 L_s} + 1\right)}, \qquad (2)$$

Обґрунтовано вибір даних супутника Landsat-8 в якості найбільш придатних для використання в рамках роботи та описано процес їх попередньої обробки. Суміщення на одній супутниковій платформі двох знімальних систем допомагає отримувати як зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земних покривів шляхом обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, так і розраховувати фізичну температуру земних поверхонь та покривів шляхом обробки даних довгохвильового інфрачервоного випромінювання.

Описана та обґрунтована методика атмосферного коригування даних знімання у довгохвильовій області інфрачервоного діапазону випромінювання.

Для максимально точної оцінки температури дистанційним методом обов'язковим є врахування впливу атмосфери на інфрачервоне випромінювання, оскільки атмосфера містить в собі велику кількість газових та аерозольних фракцій, здатних поглинати, розсіювати та відбивати електромагнітне випромінювання в залежності від його довжин хвиль. Основними парниковими газами, в порядку їх оцінюваного впливу на тепловий баланс Землі, є водяна пара, вуглекислий газ, метан і озон.

Узагальнена атмосферна модель, яка застосовується для коригування впливу атмосфери на інфрачервоне випромінювання вимагає визначення трьох параметрів: спектральної густини енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери в напрямку сенсора, низхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі та спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери, і має наступний вигляд:

$$L_i = \tau_i[\varepsilon_i L_s + (1-\varepsilon_i)L_i^{\downarrow}] + L_i^{\uparrow}, \qquad (3)$$

де L_s – спектральна густина енергетичної яскравості земної поверхні в i-му діапазоні; L_i – спектральна густина енергетичної яскравості верхньої границі атмосфери в i-му діапазоні; $L_i^{\uparrow}$ – спектральна густина енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери в напрямку сенсора в i-му діапазоні; $L_i^{\downarrow}$ – спектральна густина енергетичної яскравості низхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі в i-му діапазоні; τ_i – зональний коефіцієнт пропускання атмосфери; ε_i – коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні в i-му діапазоні.

Описано програмний інструментарій для визначення параметрів моделі атмосферного коригування. Наразі стандартні web-інтерфейси надають параметри коригування атмосферного впливу на інфрачервоне випромінювання лише для десятого каналу даних супутника Landsat-8 (13,3-11,3 мкм). В умовах незалежного

визначення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання дані одного каналу є достатнім мінімумом для розрахунку теплового поля.

Також описаний метод отримання параметрів коригування атмосферного впливу шляхом екстраполяції кривих розподілу атмосферних параметрів на діапазон спектру, для якого необхідно визначити ці параметри.

Визначення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання за допомогою даних дистанційного зондування виконуються шляхом обробки зображень видимого та ближнього інфрачервоного діапазону.

Принцип розрахунку коефіцієнтів теплового випромінювання поверхонь, вкритих рослинністю заснований на різниці коефіцієнтів теплового випромінювання рослинності та ґрунтів.

Проміжні між порогами відкритого ґрунту $NDVI_0$ і повного покриття рослинністю $NDVI_\infty$ значення *NDVI* трактуються як відповідні величинам проективного покриття рослинності *F* в поточному пікселі:

$$F = \left(\frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_\infty - NDVI_0} \right)^2, \quad (4)$$

де *NDVI* – значення нормалізованого вегетаційного індексу в поточному пікселі зображення; $NDVI_0$ – максимальне значення нормалізованого вегетаційного індексу відкритого ґрунту (або іншій поверхні, де повністю відсутня рослинність); $NDVI_\infty$ – мінімальне значення нормалізованого вегетаційного індексу поверхні, повністю покритою рослинністю.

Далі проводиться розрахунок сумарного коефіцієнта теплового відбиття для змішаних поверхонь:

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_{v\lambda} \cdot F + \varepsilon_{s\lambda}(1 - F) + \Delta\varepsilon_\lambda, \quad (5)$$

де; ε_λ – коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні в даному пікселі; $\varepsilon_{v\lambda}$, $\varepsilon_{s\lambda}$ – коефіцієнти теплового випромінювання в робочому діапазоні електромагнітного випромінювання для поверхні, повністю вкритою рослинністю та відкритого ґрунту або іншій поверхні, де повністю відсутня рослинність відповідно; $\Delta\varepsilon_\lambda$ – поправка, що враховує нерівномірність випромінювання шорсткою поверхнею (стандартне значення для шорсткою поверхні в діапазоні теплового випромінювання $\Delta\varepsilon_\lambda$ = 0,005).

Для поверхонь, повністю вкритих рослинністю в діапазоні 10,3-11,3 мкм (10 канал даних супутника Landsat-8) досягає значення 0,99 для хвойного лісу та 0,985 для типових агроценозів.

Для покривів, відмінних від розглянутих в розділі 2.2.2 подібної функціональної залежності між коефіцієнтом теплового випромінювання та вегетаційним індексом *NDVI* не існує. Однак, при наявності попередньо визначених експериментально значень можливо відновити цю залежність статистичними методами.

Для проміжку $-1 \le NDVI \le NDVI_0$ взято припущення, що коефіцієнт теплового випромінювання буде зростати зі зменшенням вегетаційного індексу до значення 0,99 при значенні $NDVI = -1$, а при $NDVI = NDVI_0$ коефіцієнт теплового випромінювання дорівнює його значенню для відкритого ґрунту. На проміжку $NDVI_\infty \le NDVI \le 1$ припущено, що коефіцієнт теплового випромінювання буде зростати до 0,995 при $NDVI = 1$. Проміжні вузлові точки для обох діапазонів

визначаються на основі регресійної залежності спектрів характерних для досліджуваної території штучних покривів отриманих із бази ASTER Spectral Library від показника вегетаційного індексу *NDVI* за межами його значень, що відповідають рослинним покривам та відкритому ґрунту.

Кожен із отриманих спектрів із бази ASTER Spectral Library скорочується до меж довжин хвиль електромагнітного випромінювання, в яких отримані дані знімання видимого, ближнього інфрачервоного та довгохвильового інфрачервоного діапазону.

На основі отриманих спектрів створюється хмара точок залежності усередненого коефіцієнта теплового випромінювання кожного із типових спектрів від вегетаційного індексу *NDVI* вираженого через зональні сигнали сенсора у червоному та ближньому інфрачервоному каналах

Невелика кількість та близькість значень ε та *NDVI*, одержаних для багатьох природних та штучних поверхонь дозволяють із задовільною точністю описати їх регресійну залежність сплайном, проведеним через оптимально підібрані вузлові точки. Отримана хмара точок усереднюється по обох осях (вісь коефіцієнтів теплового випромінювання та індексу *NDVI*) в межах, які виходять за рамки розподілу вегетаційного індексу для рослинних покривів, і одержані усереднені точки обираються як квазіоптимальні вузлові, через які виконується квазіоптимальна сплайн-апроксимація функцій залежності *NDVI* від коефіцієнта теплового випромінювання (Рис. 1).

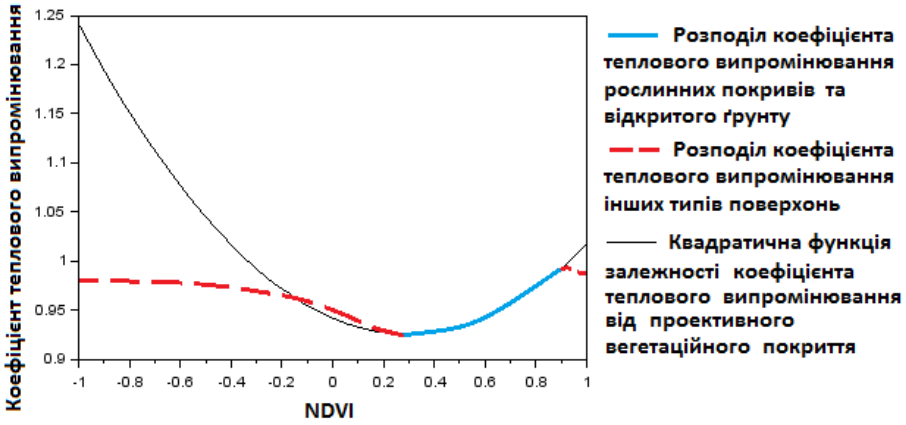


Рис. 1. Розподіл залежності коефіцієнта теплового випромінювання земних покривів від вегетаційного індексу *NDVI*

Об’єднання обох розподілів коефіцієнта теплового випромінювання дає можливість розрахувати узагальнену функціональну залежність коефіцієнта теплового випромінювання від вегетаційного індексу *NDVI* для всіх типів покриттів.

Основним результатом обробки растрових даних довгохвильового інфрачервоного діапазону є значення температури у кожному пікселі зображення. Інформативність одержаного розподілу можливо виразити через наступні параметри сцени:

– температурний контраст двох ділянок, одна з яких має відносно високу температуру, інша – відносно низьку (дана характеристика є відносною, оскільки залежить від характеру поверхонь, але даний підхід є доцільним при порівняльній оцінці підвищення інформативності двох зображень, коли для порівняння застосовуються одні і ті ж ділянки);

– просторова розрізненність знімальної системи;

– відношення "сигнал-шум".

Отже, оцінка інформативності за Кононовим виражається як:

$$C \cong \frac{\sqrt{K}}{4d^2}\log_2(1+\psi) \qquad (6)$$

де K – температурний контраст ділянок із найвищою та найнижчою температурами в межах сцени; d – просторова розрізненність знімальної системи; ψ – відношення "сигнал-шум". Розмірність інформативності – біт/м^2.

В роботі не удосконалюються такі знімальні можливості інфрачервоних систем космічного базування, як відношення "сигнал-шум", ширина смуги огляду та ін. Тому підвищення інформативності реалізується цілком за допомогою підвищення просторової розрізненності даних знімання програмними методами, зокрема, шляхом спільної субпіксельної обробки пар зображень.

Субпіксельна обробка застосовується до кількох зображень однієї самої сцени, зміщених одно відносно одного на дробову частку геометричного розміру піксела. Підвищення просторової розрізненності досягається за рахунок переходу від всього набору вхідних до нового спільного зображення із субпіксельною сіткою растра.

Субпіксельна реєстрація зображень є єдиним можливим способом підвищення просторової розрізненності дистанційного знімання у випадку, коли обмежені можливості регулювання зображувальних властивостей знімальної апаратури.

Зазвичай підвищення просторової розрізненності складається з наступних етапів:

– оцінка субпіксельного зміщення вхідних зображень низької розрізненності;

– злиття зображень низької розрізненності в спільне пересемпльоване зображення на єдиному субпіксельному растрі;

– відновлення прикінцевого зображення підвищеної розрізненності шляхом покращення різкості пересемпльованого зображення. Субпіксельне зміщення між зображеннями однієї ділянки, отриманих в різний час, наявні завжди через незначні відхилення орбіти супутника, обертання Землі та інші причини. Також субпіксельне зміщення можливо симулювати штучно в лабораторних умовах шляхом зміщення об'єкта знімання або самої знімальної системи.

Методика визначення субпіксельного зміщення будується на основі наступних базових умов:

– визначаються такі значення зміщень, при якому кореляція між суміщеними зображеннями є максимальною;

– для зменшення обчислювальних витрат обробка проводиться в просторово-частотної області за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ);

– використовується придушення високочастотної складової для інтерполяції дискретно заданого зображення.

– виконується інтерполяція цільової функції кореляції для переходу від дискретних значення зміщення до абсолютних.

За дискретне зміщення одного зображення відносно іншого по осях *x* та *y* приймаються такі значення зміщення, при яких значення функції кореляції є максимальним.

Далі виконується уточнення значення зміщення. Для цього отримані показники функцій кореляції у субпікселах інтерполюються і визначається максимум інтерпольованої функції в межах попередньо визначеного дискретного субпіксела із максимальним значенням цільової функції кореляції.

Визначення значень субпікселів зображення підвищеної розрізненності *X* (vec *X* = *x*) зводиться до системи лінійних рівнянь, яка у матричному вигляді записується як

$$Ax = y + e, \tag{7}$$

де *y* – пересемпльоване вхідне зображення, розгорнуте у вектор, *A* – лінійний оператор підвищення розрізненності, *e* – вектор залишкових похибок.

Для відновлення зображення підвищеної розрізненності застосовується метод гауссівської регуляризації. Зображення підвищеної розрізненності та похибки в рівнянні (2.16) *E* (vec *E* = *e*) вважаються стаціонарними випадковими полями. Тоді оцінку *x* можна записати у вигляді

$$\dot{x} = L(y - \bar{y}) + \bar{y}, \tag{8}$$

де

$$L = \Sigma_x A^{\mathrm{T}} (A \Sigma_x A^{\mathrm{T}} + \Sigma_e) \; - \tag{9}$$

оператор регуляризації, Σ_x та Σ_e – коваріаційні матриці векторів *x* та *e*.

Щоб запобігти накопиченню шумів та зменшення обчислювальних витрат (в основному – вимог щодо потрібного об'єму пам'яті), можна застосовувати розв'язок, аналогічний (7), в ковзаючому вікні зображення для лише центрального піксела вікна.

Система лінійних рівнянь (7) є недовизначеною, тобто містить більш невідомих ніж кількість рівнянь. При перерозподілі значень чотирьох сусідніх пікселів відновленого зображення, які складають піксел зображення низької розрізненності, рівність (8) не порушиться. Це дозволяє накласти умови регулярності.

Кожні чотири пікселі зображення підвищеної розрізненності, де ці нерівності порушуються є "шаблонами".

Далі виконується ітеративна реконструкція зображень – послідовне усунення нев'язок відновлюваного зображення з одночасним придушенням шумів. На кожній ітерації обчислюється поточна нев'язка отриманого зображення з попереднім по всьому полю, і за максимальним її значенням приймається рішення про продовження подальшої обробки. При стабілізації величини максимальної нев'язки обробка закінчується.

В **третьому розділі** – "*Розробка методики відновлення зображень теплових полів підвищеної інформативності*" – наведені необхідні алгоритми обробки із покроковим описом дій та опис комплексної методики, що їх поєднує.

Розроблено алгоритм розрахунку розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання на основі його залежності від вегетаційного індексу *NDVI* як для поверхонь, вкритих рослинністю, так і для всіх інших типів поверхонь за допомогою обробки даних багатоспектрального знімання у червоній та ближній інфрачервоній області електромагнітного спектру.

Розроблено алгоритм підвищення просторової розрізненності пари субпіксельно зміщених зображень, розрахованих на основі обробки (квазі)інваріантних в часі даних дистанційного зондування.

Розроблено методику формування теплового поля підвищеної просторової розрізненності на основі багатоспектральних даних дистанційного зондування у видимому, ближньому інфрачервоному та довгохвильовому інфрачервоному діапазонах на основі розроблених алгоритмів.

Розроблено методику підвищення просторової розрізненності різночасових зображень температурного поля в просторово-частотній області на основі розроблених алгоритмів.

Представлені вище алгоритми в сукупності дозволяють отримати зображення розподілу фізичної температури земної поверхні підвищеної розрізненності із застосуванням двох вхідних зображень спектральної щільності енергетичної яскравості випромінювання довгохвильового діапазону інфрачервоного спектру, які одержуються за даними дистанційного зондування. Також в ході виконання алгоритмів забезпечується підвищення просторової розрізненності результуючого зображення. Необхідна послідовність операцій обробки даних дистанційного зондування оформлена у вигляді представленої на рис. 2 схеми методики.

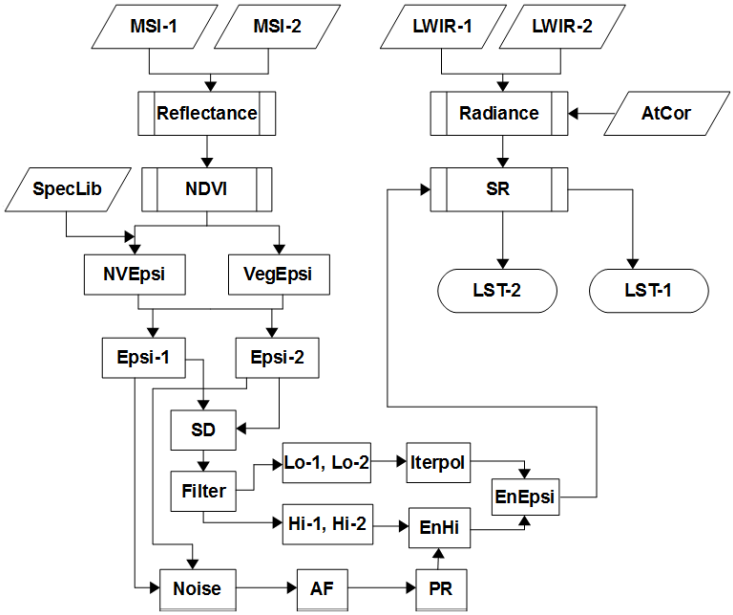


Рис. 2. Схема обробки даних космічного знімання для отримання зображення теплового поля підвищеної просторової розрізненності

Обробка даних дистанційного зондування виконується у два потоки: обробка різночасових даних багатоспектрального знімання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах (MSI-1, MSI-2), що перераховуються на значення спектрального відбиття земної поверхні та обробка зображення довгохвильової області інфрачервоного діапазону (LWIR-1, LWIR-2), які відкалібровано у значеннях

спектральної щільності енергетичної яскравості на сенсорі.

Результатом обробки даних багатоспектрального знімання є зображення розподілу коефіцієнта теплового випромінювання (Epsi-1, Epsi-2), який формується на основі його залежності від вегетаційного індексу NDVI відокремлено для поверхонь, вкритих рослинністю (VegEpsi) та для всіх інших типів покриттів (NVEpsi) з врахуванням даних спектральної бібліотеки типових покриттів сцени (SpecLib).

Підвищення просторової розрізненності виконується на основі пари зображень розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання. Для цього за алгоритмом визначення субпіксельного зміщення вхідних зображень одне відносно одного встановлюються значення зміщення (SD), формується шумове зображення (Noise), робиться переведення вхідних зображень та зображення шуму у частотну область застосуванням ДПФ, далі виконуються розкладання вхідних зображень на просторово-частотні низько- (Lo-1, Lo-2) та високочастотні (Hi-1, Hi-2) компоненти, розрахунок автоковаріаційних функцій вхідних зображень та зображення шуму (AF), визначення на їх основі параметрів відновлення високочастотної компонент (PR), власне відновлення високочастотної компоненти підвищеної розрізненності (EnHi), відновлення низькочастотних компонент інтерполяцією (Interpol) та об'єднання відновлених низько- та високочастотних компонент в результуюче зображення (EnEpsi).

Для розрахунку температурного поля підвищеної розрізненності за даними дистанційного зондування у довгохвильовій області інфрачервоного спектру виконується калібрування даних (Radiance), усунення впливу атмосфери на випромінювання шляхом застосування калькулятора атмосферних параметрів (AtCor) та перерахунок скоригованої спектральної щільності енергетичної яскравості поверхні (SR) за оберненим законом Планка на фізичну температуру (LST-1, LST-2) із застосуванням зображень розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання підвищеної просторової розрізненності.

Запропоновано методику підвищення просторової розрізненності двох різночасових зображень теплового поля за допомогою субпіксельної обробки окремих частотних компонент. Підвищення просторової розрізненності зображень розподілу температур ускладнюється її високою динамічністю, що робить відновлення в такий же спосіб зображень температурного поля підвищеної розрізненності на основі різночасових зображень цілком некоректним.

Можливість підвищення просторової розрізненності пари субпіксельно зміщених зображень температур стає можливим завдяки розкладанню їх на частотні компоненти застосуванням ДПФ на основі припущення, що низькочастотна компонента описує розподіл температури, середньочастотна – розподіл коефіцієнта теплового випромінювання, а високочастотна – відповідає дрібним деталям місцевості, які приймаються спільними для обох зображень. За рахунок підвищення саме високочастотної компоненти і виконується підвищення просторової розрізненності обох зображень теплового поля. Схему послідовності операцій методики показано на рис. 3.

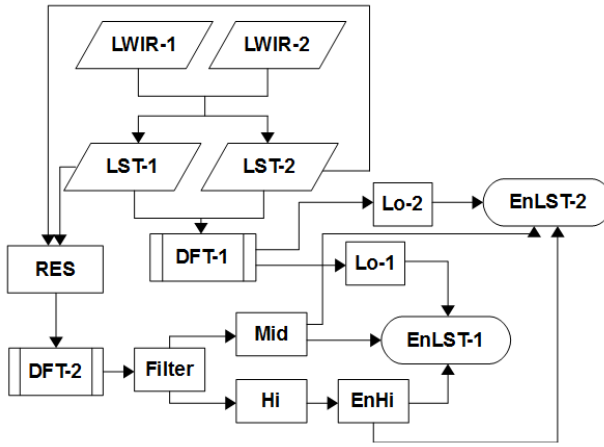


Рис. 3. Схема обробки даних космічного знімання для підвищення просторової розрізненності різночасових зображень температурних полів

Вхідні інфрачервоні зображення (LWIR-1, LWIR-2), перераховуються на температурні поля земної поверхні (LST-1, LST-2) з урахуванням параметрів атмосфери та коефіцієнтів теплового випромінювання за раніше розробленим алгоритмом. Для них розраховуються субпіксельні зміщення та виконується ДПФ для отримання їх Фур'є-образів (DFT-1) з яких за допомогою фільтра низьких частот виділяються низькочастотні компоненти (Lo-1, Lo-2). Далі зображення температурного поля черезрядково поєднуються в пересемпльоване зображення (RES), яке також переводиться у частотну область (DFT-2). Цей спектр за допомогою смугового фільтра (Filter) розділяється на середньочастотну (Mid) та високочастотну компоненти (Hi). Просторова розрізненність високочастотних компонент підвищується за вищеописаним алгоритмом. Одержане спільне відновлення високочастотних компонент підвищеної розрізненності (EnHi), та середньочастотні компоненти додаються до окремих для кожного зображення низкочастотних компонент. Обернене ДПФ кожного із отриманих сумарних зображень дозволяє одержати цільові температурні поля підвищеної розрізненності (EnLST-1, EnLST-2), що відповідають роздільним вхідним інфрачервоним зображенням.

Четвертий розділ – "*Перевірка методу та експериментальна оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності інфрачервоних зображень*" – присвячено оцінці підвищення просторової розрізненності та інформативності зображень, отриманих в результаті застосування розробленої методики, шляхом аналізу їх функцій передачі модуляції (ФПМ) та розробці рекомендацій щодо впровадження методики.

В ході перевірки працездатності методу оброблено 12 пар різночасових зображень, отриманих сенсорами OLI та TIRS супутникової системи Landsat-8. Кількісна оцінка підвищення просторової розрізненності виконувалась шляхом порівняння ФПМ зображень до та після підвищення розрізненності. Було проведено такі порівняльні оцінки:

– підвищення просторової розрізненності зображення розподілу фізичної температури земної поверхні, із застосуванням зображення розподілу коефіцієнтів

теплового випромінювання земних покривів, отриманого за допомогою обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону порівняно із зображенням радіаційної температури, отриманої виключно за даними знімання у довгохвильовій області інфрачервоного спектру;

– підвищення просторової розрізненності зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання, отриманого на основі субпіксельної обробки пари різночасових зображень порівняно із зображенням розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання вхідних зображень;

– підвищення просторової розрізненності зображень теплового поля, в розрахунок якого включено зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання відновлених за допомогою субпіксельної обробки, порівняно із зображеннями теплового поля, розрахованих із застосуванням зображень розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання низької просторової розрізненності;

– підвищення просторової розрізненності пар різночасових зображень температурного поля, відновленого за допомогою субпіксельної обробки окремих частотних компонент.

Середнє значення відносного приросту просторової розрізненності зображення теплового поля, отриманого із використанням розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання, розрахованого за даними багатоспектрального знімання сенсором OLI відносно просторової розрізненності даних сенсору TIRS складає 33,5 %. Підвищення просторової розрізненності досягається тим, що окрім більш високої просторової розрізненності та внесення додаткових деталей зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання також підсилює контрастність результуючого зображення. Середній приріст інформативності склав 52,3%, а показника *MRTD* – 56,7%.

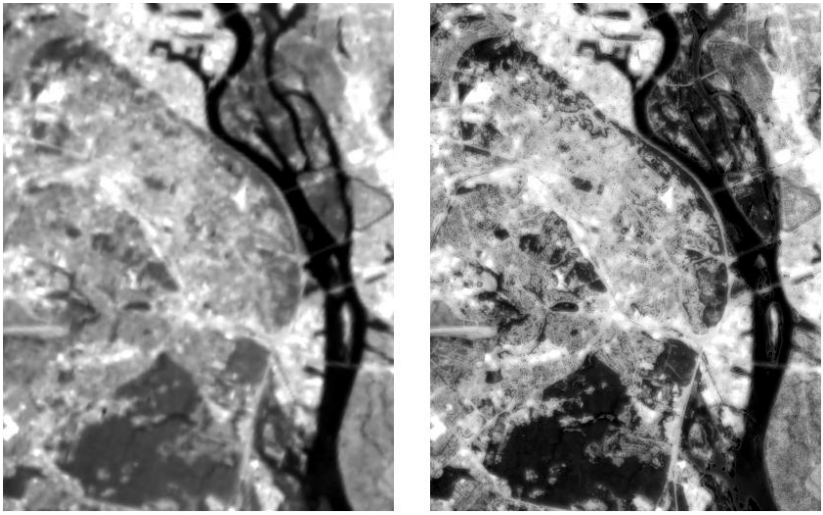
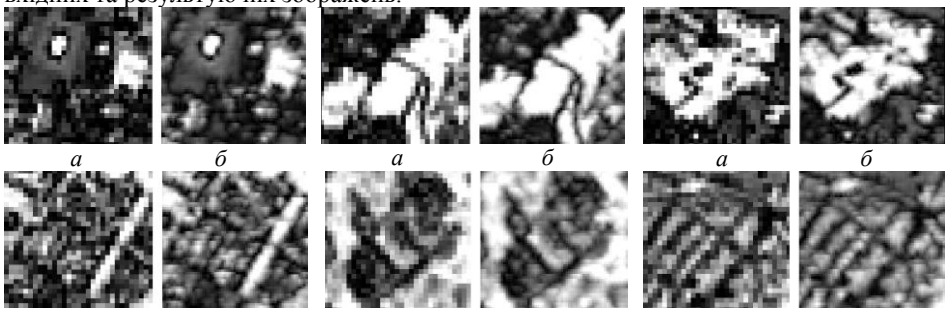


Рис. 4. Зображення частини Києва отримане за даними супутника Landsat-8 (13 липня 2016 р.); а – радіаційна температура за даними сенсора TIRS; б – фізична температура із застосуванням розподілу коефіцієнта теплового випромінювання, отриманого за даними результатами обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону

Середнє значення приросту просторової розрізненності, отримане при субпіксельній обробці пар зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання за допомогою субпіксельної реєстрації складає 38,9 %. При цьому найбільше значення приросту складає 76,2 %. Приріст інформативності склав 103,4 % а значення мінімального розрізнювального значення коефіцієнта теплового випромінювання – 29,2 %. На рис. 4 представлена візуальна інтерпретація підвищення просторової розрізненності у вигляді порівняння ділянок поверхні із вхідних та результуючих зображень.



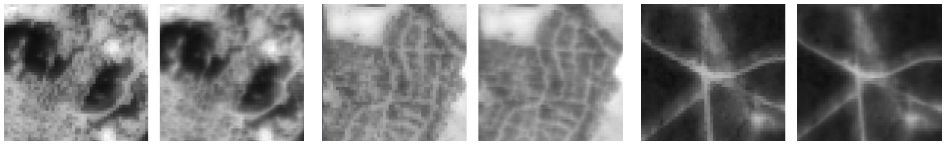
а *б* *а* *б* *а* *б*

а *б* *а* *б* *а* *б*

Рис. 5. Ділянки зображень розподілу КТВ: *а* – вхідного зображення; *б* – зображення підвищеної просторової розрізненності (м.Харків, 28 липня 2014 р.)

Далі виконана оцінка підвищення просторової розрізненності зображень теплового поля при застосуванні зображень коефіцієнта теплового випромінювання підвищеної розрізненності у порівнянні із зображеннями теплового поля із розподілом коефіцієнта теплового випромінювання низької розрізненності. Основний вплив на підвищення просторової розрізненності здійснює збільшення контрастності зображення розподілу спектральної щільності енергетичної яскравості, яке використовується при розрахунку теплового поля, що має інтерпольовану до 30 м просторову розрізненність 100 м. Середнє підвищення просторової розрізненості зображень теплового поля складає 69 %. Розрахункове підвищення інформативності склало в середньому 215,1 % при цьому приріст показника *MRTD* складає 4%.

Приклади зображень теплового поля низької та підвищеної просторової розрізненності наведено на рис. 6.



а *б* *а* *б* *а* *б*

Рис. 6. Ділянки зображення теплового поля: *а* – низької просторової розрізненності; *б* – підвищеної просторової розрізненості (м. Київ, 29 липня 2016 р.)

Вимога часової інваріантності заважає безпосередньому підвищенню просторової розрізненності температурних полів в той же самий спосіб, як і розподілів коефіцієнтів теплового випромінювання. Але можливе підвищення просторової розрізненності окремої частотної компоненти, отриманої із вхідного

зображення. Сама процедура підвищення просторової розрізненності вже описана вище, і вона виконується лише для високочастотної компоненти, що вважається інваріантною для пари зображень, оскільки її фізичний зміст полягає в описі дрібних деталей місцевості, які за часовий проміжок між отриманням зображень вважаються незмінними.

Оцінку підвищення просторової розрізненності проведено для однієї пари зображень (м. Київ, за 13 та 29 липня 2016 р.). Графіки ФПМ зображення низької та підвищеної просторової розрізненності показано на рис. 7.

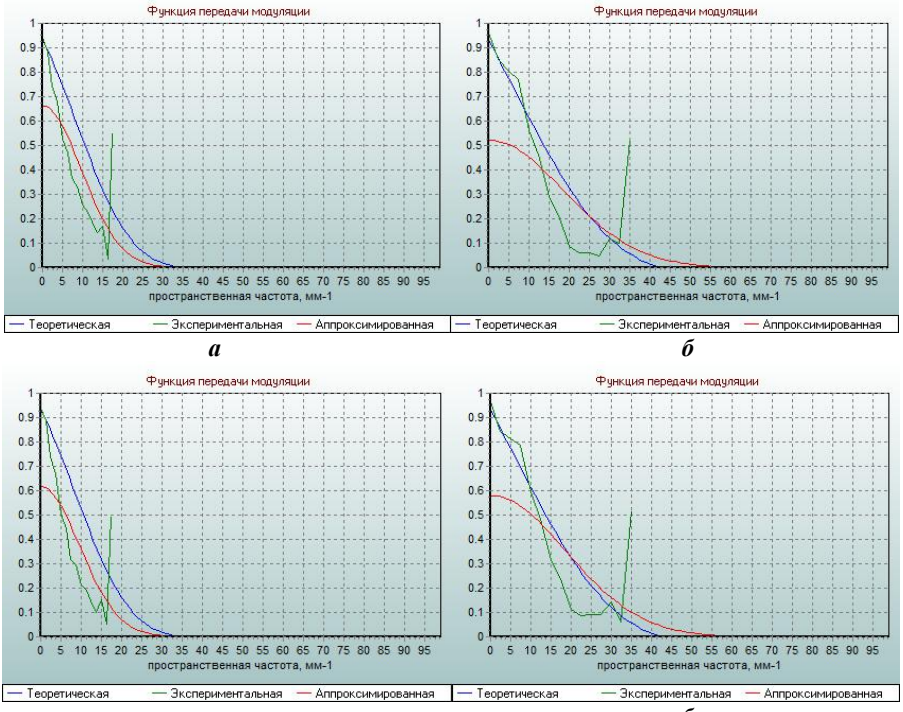


Рис. 7. ФПМ зображень теплового поля: *а* – низької просторової розрізненності; *б* – підвищеної просторової розрізненості шляхом субпіксельної обробки високочастотної компоненти (м. Київ, 13 та 29 липня 2016 р.)

Оцінка виконана на рівні ФПМ = 0,3. Для зображень низької просторової розрізненності порогові просторові частоти дорівнюють 9 та 8, а просторові частоти на цьому ж рівні для зображень підвищеної просторової розрізненності дорівнюють 15 та 15,5 відповідно. Таким чином, середнє підвищення просторової розрізненності складає 76,5 %. Також виконана оцінка приросту інформативності та показника *MRTD* для даної пари зображень. Середнє розрахункове значення приросту інформативності склало 106,5 %, а показника *MRTD* – 85,9 %.

На рис. 8 представлено результати обробки високочастотної компоненти зображень у порівнянні із вхідними зображеннями температурного поля низької просторової розрізненності.

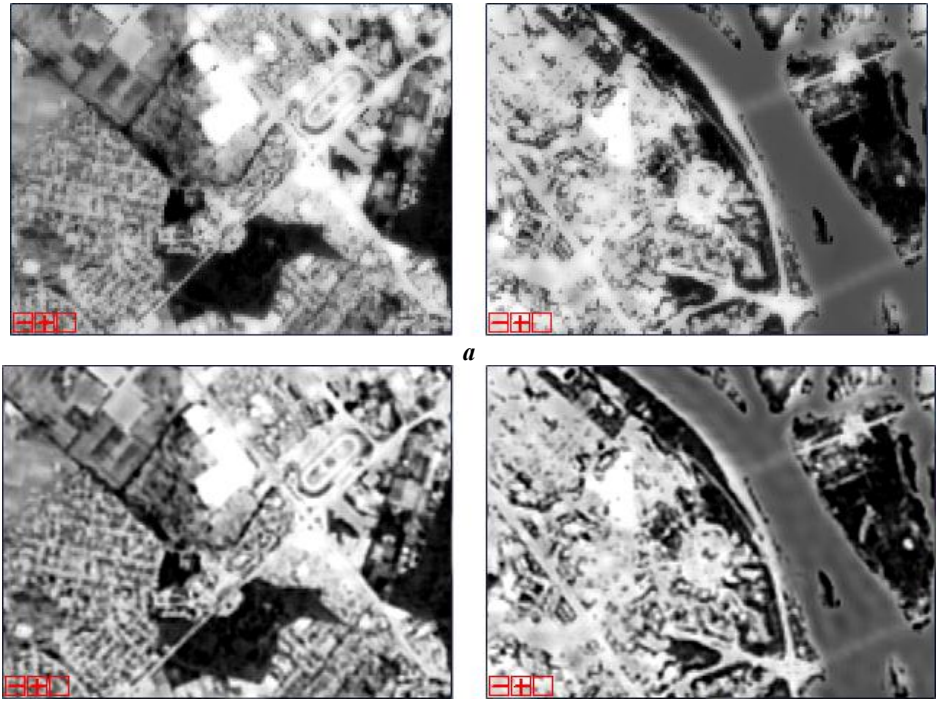


Рис. 8. Зображення температурного поля: *а* – низької просторової розрізненності; *б* – підвищеної просторової розрізненості (м. Київ, 13 липня 2016 р.)

Розроблену методику впроваджено в ході реалізації завдань, поставлених Державною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013–2017 рр. при виконанні в 2016 році складових частин дослідно-конструкторських робот (СЧ ДКР) “Розроблення алгоритмів і відповідного програмного забезпечення субпіксельної обробки кадрів підстилаючої поверхні Землі, що формуються СДІЧ”, і “Розробка програмного модуля підвищення просторової розрізненності первинних інформаційних матеріалів”.

Розроблену методику впроваджено в ході реалізації завдань, поставлених Державною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013-2017 рр. при виконанні в 2016 році складових частин дослідно-конструкторських робот (СЧ ДКР) “Розроблення алгоритмів і відповідного програмного забезпечення субпіксельної обробки кадрів підстилаючої поверхні Землі, що формуються СДІЧ”, і “Розробка програмного модуля підвищення просторової розрізненності первинних інформаційних матеріалів”.

Практичне застосування розробленої методики рекомендується здійснювати для пар інфрачервоних зображень одної ділянки місцевості, одержаних як можна ближче за часом, причому спільну субпіксельну обробку можна застосовувати лише або до просторових розподілів коефіцієнтів теплового випромінювання, або до відокремлених високочастотних компонент температурних полів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукову задачу підвищення інформативності результатів обробки даних дистанційного зондування Землі у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру шляхом підвищення просторової розрізненності розподілів теплового поля досліджуваної території, що описується температурою та коефіцієнтом теплового випромінювання земної поверхні. Дана задача успішно вирішена, мету дисертаційного дослідження досягнуто, на основі отриманих результатів зроблено наступні висновки:

1. Виконано порівняльний аналіз існуючих знімальних систем дистанційного зондування Землі довгохвильового інфрачервоного діапазону 8-14 мкм. Наразі у вільному доступі є дані лише одного сенсора TIRS, розміщеного на супутнику Landsat-8, що забезпечує просторову розрізненність 100 м на місцевості, інтерпольовану до 30 м.

2. Проведено огляд відомих методів оцінки температури та коефіцієнта теплового випромінювання за даними знімання в інфрачервоному діапазоні. Відзначено можливість отримання просторового розподілу коефіцієнта теплового випромінювання за допомогою обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, які мають порівняно вищу просторову розрізненність, ніж дані довгохвильового інфрачервоного діапазону.

3. Проведено аналіз сучасних методів відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності за кількома субпіксельно зміщеними зображеннями нижчої просторової розрізненності. Як найбільш перспективний визначено метод ітераційної гаусівської регуляризації в скануючому вікні.

4. Визначено основні завдання дисертаційної роботи, які включають в себе розробку нових та вдосконалення існуючих методик визначення температури та їх коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні за даними дистанційного зондування, двоетапного підвищення їх просторової розрізненності та кількісної оцінки одержуваних результатів.

5. Обґрунтовано можливість застосування даних знімання видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, одержуваних супутниковим сенсором OLI для отримання розподілу коефіцієнта теплового випромінювання більш високої просторової розрізненності, ніж дані довгохвильового інфрачервоного діапазону, продемонстровано можливість підвищення просторової розрізненності склало 33,5 % із даними знімання сенсором TIRS. Обґрунтовано та описано методику спільної обробки даних видимого, ближнього інфрачервоного та довгохвильового інфрачервоного випромінювання з метою підвищення деталізації теплового поля земної поверхні.

6. Удосконалено метод розрахунку просторового розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання неслинних земних покривів та штучних поверхонь шляхом відновлення регресійної залежності між спектральними коефіцієнтами відбиття та теплового випромінювання на основі бібліотеки типових спектрів, характерних для заданої території.

7. Розроблено алгоритми розрахунку субпіксельного зміщення та підвищення просторової розрізненності зображень розподілу інваріантної в часі величини – коефіцієнта теплового випромінювання, і неінваріантної – температури земної поверхні на основі пари різночасових субпіксельно зміщених зображень шляхом ітераційної субпіксельної обробки в скануючому вікні.

8. Всі розроблені алгоритми увійшли до складу нової двоетапної методики підвищення просторової розрізненності різночасових розподілів теплового поля території дослідження на основі субпіксельної обробки окремих частотних компонент зображення.

9. Розроблена методика тестувалося на 12 зображеннях супутникової системи Landsat-8 із різноманітними ландшафтами, серед яких: урбанізовані, індустріальні, сільськогосподарські, пустельні, а також прибережні території із акваторіями, як річковими так і морськими, знятих протягом 2014-2016 років. Досягнуте підвищення реальної просторової розрізненності оцінювалося порівнянням функцій передачі модуляції вхідних та вихідних зображень, що оцінювалися автоматично за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Підвищення склало в середньому 38,9 % для розподілів коефіцієнта теплового випромінювання і 76,5 % для розподілів температури земної поверхні.

10. Розроблену методика впроваджено в рамках виконання завдань, поставлених Державною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013-2017 рр., що підтверджується відповідними актами, та рекомендовано для створення високодеталізованих карт теплового поля в умовах наявності даних знімання у діапазоні 8-14 мкм із недостатньою просторовою розрізненністю.

Розроблена в ході виконання роботи методика є ефективним інструментом картування теплового поля територій із високою гетерогенністю покривів та ландшафтів (наприклад, урбанізоване середовище) в умовах наявності вхідних даних теплового знімання із низькою просторовою розрізненністю. Особливо актуальною дана методика є на сьогодні, оскільки зараз існує суттєвий брак функціонуючих систем дистанційного зондування в діапазоні 8-14 мкм.

Таким чином, в дисертаційній роботі розроблено комплексну двоетапну методику підвищення інформативності даних знімання у довгохвильовій області інфрачервоного випромінювання, в якій. на першому етапі, застосовується вдосконалена технологія розрахунку просторового розподілу коефіцієнта теплового випромінювання на основі даних видимого та ближнього інфрачервоного випромінювання більш високої розрізненності, а на другому етапі виконується підвищення просторової розрізненності на основі субпіксельної обробки окремих частотних компонент пар різночасових зображень.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Станкевич С. А., Шкляр С. В., Лубський М. С. Підвищення просторової розрізненності аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*, 2013. № 9(16). С. 110-117.

2. Станкевич С. А., Филиппович В. Е., Лубский Н. С., Крылова А. Б., Крицук С. Г, Бровкина О. В., Горный В. И., Тронин А. А. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки. Електронний науковий фаховий журнал "Український журнал дистанційного зондування Землі" №7. URL: http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59/77 (Дата звернення: 18.05.2017).

3. Лялько В. И., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Лубский Н. С., Крылова А. Б., Горный В. И., Давидан Т. А., Киселев А. В., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и LANDSAT). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2016. Т. 13. № 2. С. 176-191.

4. Станкевич С. А., Пилипчук В. В., Лубський М. С., Крилова Г. Б. Оцінка точності визначення температури штучних та природних земних поверхонь за результатами інфрачервоного космічного знімання. *Космічна наука і технологія*, 2016. Т. 101. № 4. С. 19-28.

5. Пазиніч Н. В., Ліщенко Л. П., Крилова Г. Б., Філілпович В. Є., Лубський М. С. Дослідження та моніторинг пожежонебезпечних торфовищ на основі матеріалів дистанційного зондування Землі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека,* 2016. № 1. С. 85-91.

6. Горный В. И., Крицук С. Г. Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Киселев А. В., Бровкина О. В., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Лубский М. С. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съемок Санкт-Петербурга и Киева). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017. Т. 14. № 3. С. 51-66.

Патенти:

7. Спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень за допомогою сканування спектральним вікном: пат. № 109210 України. МПК G01V 8/20, G06K 9/68, G06K 9/46, G06K 9/62. Попов М. О., Станкевич С. А., Козлова А. О., Пєстова І. О., Лубський М. С.; заявл. 14.02.2014. Опубл. 25.07.2015.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Попов М. А., Станкевич С. А., Тягур В. М., Шкляр С. В., Подорван В. Н., Добровольская К. В., Лубский Н. С. Повышение пространственного разрешения путём субпиксельной обработки изображений. *Проблеми телекомунікацій-2014*: Праці VIII Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 22-25 квітня 2014). Київ: НТУУ "КПІ", 2014. С. 57-60.

9. Krylova H. B., Lubskiy N. S. Remote monitoring of the thermal field at urbanized area, taking Kyiv city as an example. *CIS and Remote Sensing*: Proceedings of the 3rd International Conference (Tsaghkadzor, Armenia, 17-19 November 2014). Environmental Research and GIS Center, 2014. P. 149-155.

10. Лубський М. С. Застосування космічних систем дистанційного зондування для глобального теплового моніторингу. *Астрономічна школа молодих вчених*: Праці доповідей міжнародної наукової конференції (Житомир, 22-25 травня 2015). Житомир: Житомирський державний університет ім. І. Франка, 2015. С. 53.

11. Лубський М. С., Крилова Г. Б. Методика розрахунку приповерхневої температури за даними знімання у дальньому інфрачервоному діапазоні. *Теоретичні та прикладні аспекти використання математичних методів та інформаційних технологій у науці, освіті, економіці та у виробництві*: Матеріали ІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції (Маріуполь, 25 квітня 2015). Маріуполь: МДУ, 2015. С. 82-85.

12. Станкевич С. А., Лубський М. С., Добровольська К. В. Технологія підвищення розрізненності інфрачервоних мікроболометричних спектрорадіометрів для задач цивільного захисту. *Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз*

виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури: Праці міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20-21 квітня 2015). Київ: Український науково-дослідний інститут цивільного захисту (УкрНДІЦЗ), 2015. С. 241-247.

13. Лубський М. С. Шляхи підвищення інформативності супутникових зображень теплового інфрачервоного діапазону. *Проблеми телекомунікацій-2015*: Праці IX Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 21-24 квітня 2015). Київ: НТУУ "КПІ", 2015. С. 403-405.

14. Станкевич С. А., Філіпович В. Є., Шкляр С. В., Лубський М. С. Технологія розрахунку температур штучних та природних земних поверхонь за даними космічного знімання у тепловому діапазоні. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики*: Праці XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції (Київ, 26-28 травня 2016). Київ: НТУУ "КПІ", 2016. С.180-184.

15. Лубський М. С. Підвищення інформативності результатів обробки космічних зображень теплового діапазону електромагнітного спектру. *Науково-практична конференція з космічних досліджень*: Праці 16-ї науково-практичної конференції (Одеса, 22-26 серпня 2016). Київ, 2016. С. 205-206.

16. Stankevich S. A., Lubskyi M. S., Krylova H. B. Thermal satellite data processing for prediction of urban heat island's changes. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки (GEO-UA 2016)*: Праці п'ятої міжнародної конференції (Київ, 10-14 жовтня 2016). Київ, 2016, С. 50-52.

17. Stankevich S. A., Shklyar S. V., Podorvan V. N., Lubskyi N. S. Thermal infrared imagery informativity enhancement using sub-pixel co-registration. *2016 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*: Proceedings of the International conference (Rzeszów, Poland, 5-7 July 2016). IEEE, 2016. P. 245-248.

18. Станкевич С. А., Шкляр С. В., Подорван В. М., Лубський М. С. Підвищення інформативності зображень дальнього інфрачервоного діапазону на основі субпіксельної обробки. *Проблеми телекомунікацій-2016*. Праці X Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 19-22 квітня 2016). Київ: НТУУ "КПІ". - 2016. С. 40-42.

19. Лубський М. С. Глобальні продукти обробки зображень теплового діапазону електромагнітного спектру. *Астрономічна школа молодих вчених*: праці 18-ї міжнародної наукової конференції (Київ, 26-27 травня 2016). Київ:, 2016. С.70-71.

20. Станкевич С. А., Лубський М. С., Крилова Г. Б. Підвищення просторової розрізненності дистанційних зображень теплового поля земної поверхні. *Проблеми телекомунікацій-2017*: Праці XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 18-21 квітня 2017). Київ: НТУУ "КПІ", 2017. С. 48-50.

21. Лубський М. С. Застосування супутникового знімання у інфрачервоному діапазоні для картування теплових полів середньої просторової розрізненності. *Астрономічна школа молодих вчених*: праці 19-ї міжнародної наукової конференції (Біла Церква, 24-25 травня 2017). Біла Церква, 2017. С. 65-66.

АНОТАЦІЯ

Лубський М. С. Методика підвищення інформативності інфрачервоного аерокосмічного знімання на основі субпіксельної обробки сигналів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження. – Державна установа "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", Київ, 2017.

Дані дистанційного зондування у довгохвильовій області інфрачервоного спектру дозволили значно розширити спектр задач які можливо вирішувати засобами космічного моніторингу. Однак, фізичні обмеження, які визначаються природою інфрачервоного випромінювання суттєво ускладнюють створення інфрачервоних знімальних систем космічного базування із середньою та високою просторовою розрізненністю.

Низької просторової розрізненності недостатньо для вивчення територій із високою гетерогенністю, наприклад, урбанізованого середовища, розвиток якого останні десятиліття набув дуже високого темпу, що підвищує актуальність отримання зображень теплових полів порівняно високої просторової розрізненності. Технологічне вдосконалення вже виведених на орбіту систем дистанційного зондування фізично неможливе.

В ході виконання дисертаційної роботи розроблено комплексну двоетапну методику підвищення інформативності даних знімання у довгохвильовій області інфрачервоного випромінювання, в якій на першому етапі застосовується вдосконалена технологія розрахунку просторового розподілу коефіцієнта теплового випромінювання на основі даних видимого та ближнього інфрачервоного випромінювання більш високої розрізненності, а на другому етапі виконується підвищення просторової розрізненності на основі субпіксельної обробки окремих частотних компонент пар різночасових зображень.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, довгохвильове інфрачервоне випромінювання, просторова розрізненність, закон Планка, субпіксельна обробка, коефіцієнт теплового випромінювання, функція передачі модуляції.

АННОТАЦИЯ

Лубський Н. С. Методика повышения информативности инфракрасной аэрокосмической съемки на основе субпиксельной обработки сигналов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.12 – Дистанционные аэрокосмические исследования. – Государственное учреждение "Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины", Киев, 2017.

Данные дистанционного зондирования в длинноволновой области инфракрасного спектра позволяют значительно расширить спектр задач, которые возможно решать с использованием средств космического мониторинга. Однако, физические ограничения, которые определяются природой инфракрасного излучения, существенно затрудняют создание инфракрасных съемочных систем космического базирования со средним и высоким пространственным разрешением.

Низкого пространственного разрешения недостаточно для изучения территорий с высокой гетерогенностью, например, урбанизированной среды, развитие которого за последние десятилетия приобрело очень высокого темпа, что повышает

актуальность получения изображений тепловых полей сравнительно высокого пространственного разрешения. Технологическое совершенствование уже выведенных на орбиту систем дистанционного зондирования физически невозможно.

В ходе выполнения диссертационной работы разработана комплексная двухэтапная методика повышения информативности данных съемки в длинноволновой области инфракрасного излучения, в которой на первом этапе применяется усовершенствованная технология расчета пространственного распределения коэффициента теплового излучения, полученного на основе данных видимого и ближнего инфракрасного излучения более высокого пространственного разрешения, а на втором этапе выполняется повышение пространственного разрешения на основе субпиксельной обработки отдельных частотных компонент пар разновременных изображений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, длинноволновое инфракрасное излучение, пространственное разрешение, закон Планка, субпиксельная обработка, коэффициент теплового излучения, функция передачи модуляции.

ANNOTATION

Lubskyi M. S. Method of infrared aerospace imagery informativity enhancement based on subpixel signal processing. – Qualified scientific paper as manuscript copyright.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (PhD) with a degree in 05.07.12 (D 26.162.03 – Remote Sensing Aerospace Research) State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of Institute of Geological Science of National Academy of Sciences of Ukraine”, Kyiv 2017.

The long-wavelength infrared remote sensing data allowed to significantly expand the range of problems that can be solved by means of space monitoring. However, physical constraints, which are determined by the nature of infrared radiation, greatly complicate the creation of space-based thermal infrared imaging systems with moderate and high spatial resolution.

This spatial resolution is insufficient to study areas with high heterogeneity, for example, an urbanized environment, which is rapidly develop in recent decades, which increases the relevance of obtaining images of thermal fields of relatively high spatial resolution. It is physically impossible to upgrade the remote sensing systems that have already been launched.

Thus, the actual scientific task is the development of new methods and technologies for the long-wavelength infrared data’s spatial resolution enhancement of in order to increase the informativity of thermal fields’ spatial distributions images based on satellite infrared data. The application of the Landsat-8 data is substantiated by combining on one platform of visible, near-infrared bands, which allow deriving the emissivity distribution and long-wave infrared radiation sensor, on the basis which allow deriving temperature distribution.

Keywords: Remote sensing of the Earth, long-wave infrared radiation, spatial resolution, Planck's law, subpixel processing, emissivity, modulation transfer function.

Підписано до друку 14.09.17р. Формат 60x90[1]/16
Ум. друк. арк. 0,9. Обл-вид. арк 0,9
Наклад 100 прим. Замовлення № 391
Віддруковано на різографі в видавничому центрі "Принт-центр"
04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16
http:\\www.printc.com.ua. E-mail printcentr@ukr.net