

УДК 515.2:528.71

В.В. ГНАТУШЕНКО, В.Ю. КАШТАН

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

### ТЕХНОЛОГІЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТА СПЕКТРАЛЬНОЇ КОРЕКЦІЙ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

У статті пропонується технологія геометричної та спектральної корекцій багатоспектрального зображення із збільшенням його просторового розрізнення. Метою дослідження є створення нової технології поліпшення візуальної якості багатоканальних зображень з використанням пакетних вейвлет-перетворень. Запропонована технологія була протестована на еталонних супутникових зображеннях. Порівняння кількісних показників (ентропія за Шенноном, сигнальна ентропія, середньоквадратичне відхилення, умовна ентропія за Шенноном, умовна сигнальна ентропія та пікове відношення сигнал-шум) для існуючих методів та запропонованої технології, а також візуальні результати показали перевагу використання запропонованої технології. Результати роботи можуть бути використані при подальшому розпізнаванні об'єктів та тематичній обробці сканерних знімків.

Ключові слова: злиття, оптико-електронні комплекси надвисокого просторового розрізнення, космічні знімки, пакетне вейвлет-перетворення, інформативність.

В.В. ГНАТУШЕНКО, В.Ю. КАШТАН

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

### ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И СПЕКТРАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

В данной статье предлагается технология геометрической и спектральной коррекции многоспектрального изображения с увеличением его пространственного разрешения. Целью исследования является создание новой технологии для улучшения изображения с использованием пакетных вейвлет-преобразований. Предложенная технология была протестирована на эталонных спутниковых изображениях. Сравнение количественных показателей (энтропия по Шеннону, сигнальная энтропия, среднее отклонение, условная энтропия по Шеннону, условная сигнальная энтропия и пиковое отношение сигнал-шум) для существующих методов и предлагаемой технологии, а также визуальные результаты показали преимущество использования предложенной технологии. Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем распознавании объектов и тематической обработке сканерных снимков.

Ключевые слова: слияние, оптико-электронные комплексы сверхвысокого пространственного разрешения, космические снимки, пакетное вейвлет-преобразование, информативность

V.V. HNATUSHENKO, V.J. KASHTAN

Oles Honchar Dnipro National University

### GEOMETRICAL AND SPECTRAL CORRECTIONS TECHNOLOGY OF OPTICAL ELECTRONIC SPACE IMAGES

This article is devoted to technology of geometric and spectral correction of a multispectral satellite image. The aim was the satellite image resolution enhancement technology based on wavelet packet transforms. The proposed technology has been tested on satellite images. Comparison of quantitative indicators (Shannon entropy, signal entropy, mean deviation, Shannon conditional entropy, conditional signal entropy and peak signal-to-noise ratio), as well as the visual results shows the advantage of using proposed technology. The results can be used for further object recognition and thematic processing of scanner images.

Keywords: remote sensing, optoelectronic complexes of ultrahigh spatial resolution, space images, packet wavelet transform, informational content.

#### Постановка проблеми

Оптико-електронні космічні знімки високого просторового розрізнення мають винятково важливу значущість для великої кількості предметних областей (діагностика фізичного стану матеріальних об'єктів зондування, екологічний моніторинг, землекористування, геоінформаційні системи та ін.). На сьогоднішній день одними із найсучасніших супутників оптико-електронних комплексів надвисокого просторового розрізнення є WorldView-2 та WorldView-3, що становлять ядро орбітального угруповання дистанційного зондування Землі. Дані з супутника WorldView-3, завдяки наявності додаткового короткохвильового 8-канального інфрачервоного сенсора SWIR, дозволяють вести зйомку крізь туман, смог і пил з вихідним просторовим дозволом 3,72 м. Він особливо чутливий до наявності вологи, а також до властивостей поглинання електромагнітного випромінювання мінералами і ґрунтами. Поєднання з видимим інфрачервоним сенсором VNIR, який виконує зйомку з високим просторовим дозволом 30 см, забезпечує

підвищення точності дешифрування на 15-30% порівняно з традиційною 4-канальною зйомкою. Крім того, оптико-електронні комплекси надвисокого просторового розрізнення забезпечують оперативну геоприв'язку одержуваних ними знімків і здатні виносити лінію візування уздовж, перпендикулярно і поперек траси космічного апарату. Це кардинально змінило геометрію, спектральну інформацію (внаслідок різних випромінювальних характеристик об'єкту в окремих спектральних діапазонах), тривалість і інші найважливіші характеристики космічної зйомки [1]. У цих умовах існуючі технології попередньої обробки оптико-електронних космічних знімків є неефективними, оскільки не враховують фізичні механізми фіксації видової інформації, міжканальної кореляції, що знижує точність подальшого розпізнавання та аналізу даних. Проведені дослідження підтвердили необхідність розробки більш ефективної технології геометричної та спектральної корекції космічних зображень з урахуванням специфіки їхнього формування.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час розроблено математичні моделі для різних модифікацій оптико-електронної апаратури; запропоновано методи фотограмметричного калібрування цифрових камер; розроблено методи геометричної та спектральної корекції знімків: аналіз головних і незалежних компонент, зважене усереднення; перехід до інших кольорових просторів та ін. Незважаючи на досягнуті успіхи, з'являються нові наукові проблеми, які пов'язані із підвищенням вимог до змісту і результатів фотограмметричної обробки космічних знімків. Так, спільною та основною проблемою, пов'язаною з підвищення геометричної та спектральної корекції космічних знімків, отриманих сучасними аерокосмічними системами, є поява кольорних спотворень, що знижує точність подальшого розпізнавання та аналізу [2, 3]. Причиною таких спотворень є той факт, що існуючі алгоритми, головним чином, розроблялися для об'єднання зображень супутника SPOT. На відміну від відповідних характеристик зазначеного космічного апарату довжина панхром-хвилі сучасних супутників (Worldview-2,-3 та ін.) була розширена від видимого до ближнього інфрачервоного діапазону. Одним з підходів із розв'язання цієї наукової проблеми є застосування вейвлет-перетворення [4, 5], що на сьогоднішній день є найбільш перспективним і високочутливим методом частотного аналізу різних сигналів, включаючи і зображення. Але існуючі дослідження також не враховують специфіку формоутворення багатоканальних оптико-електронних зображень з сучасних аерокосмічних апаратів. Крім того, не вирішеними залишаються питання по вибору типу вейвлетів та оптимального рівня розкладу.

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка нової технології геометричної та спектральної корекції космічних зображень високого просторового розрізнення з урахуванням фізичних механізмів фіксації видової інформації. У якості вхідних даних використовуються знімки супутника WorldView-3. Для визначення ефективності розробленої інформаційної технології необхідно отримати кількісні оцінки якості синтезованих багатоспектральних зображень, зокрема: ентропія по Шеннону, сигнальна ентропія та інші.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

В роботі пропонується метод об'єднання на основі використання пакетної побудови вейвлет-базисів з декореляцією первинних видових даних, бікубічної інтерполяції, методу HSV та гіперсферичного перетворення (НСТ).

Схема запропонованої технології представлена на рис. 1. Основними етапами перетворення первинних багатоспектральних зображень є:

1. Завантаження фотограмметричних зображень, отриманих зі супутника WorldView-3: панхроматичне – ПЗ і багатоспектральне (БСЗ).

2. Передискретизація багатоспектрального зображення – БСЗ з метою приведення його розмірності до розмірності ПЗ на основі бікубічної інтерполяції [5]:

$$v(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} \cdot P_{ij}, \quad (1)$$

де  $a_{ij}$  – коефіцієнт,  $P$  – інтенсивність зображення, що масштабується.

3. Геометрична, радіометрична та контрастна корекція БСЗ та ПЗ.

$$p(z)dz = \frac{\mu(dS_z)}{S}, \quad (2)$$

де  $dS_z$  – міра Лебега зазначеної множини;  $S$  – загальна площа зображення. В результаті одержуємо зображення БСЗн.

4. Перетворення зображення з формату RGB в кольорову систему HSV [6]. Для панхромного зображення таке перетворення здійснюється з попереднім вибором у якості окремих R-, G-, B-компонент напівтонового PAN-зображення. Для БСЗ таке перетворення здійснюється з попереднім вибором у якості окремих R-, G-, B-компонент відповідних зображень 5-го, 3-го та 2-го каналів.

5. Заміна яскравісної V-компоненти багатоспектрального зображення  $BC3_{HSV}$  V-компонентою панхромного зображення  $P3_{HSV}$ .

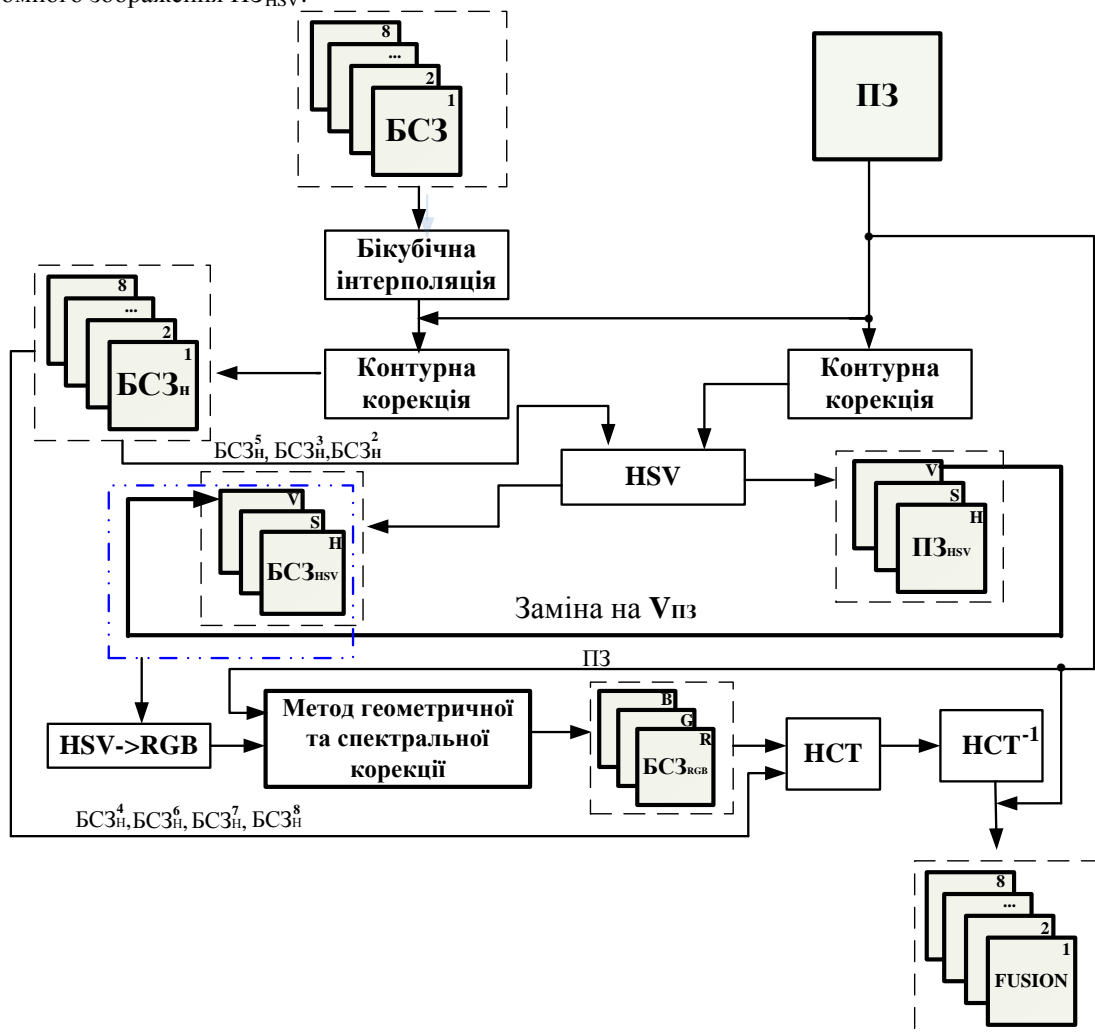


Рис. 1. Схема технології

6. Обернене перетворення отриманого на попередньому етапі зображення з формату HSV в кольорову систему RGB. Отримане зображення вже буде мати підвищене просторове розрізнення у порівнянні з первинним знімком у натуральних кольорах.

7. Наступним етапом є застосування розробленого методу геометричної та спектральної корекції (рис.2), який містить такі етапи:

7.1. Розклад відповідного каналу яскравості  $BC3$  до шостого рівня декомпозиції (L) пакетного вейвлет-перетворення класу *bior 2.2* у відповідності з логарифмічною функцією інформаційної вартості (далі ФІВ) [7]:

$$f_X(r) = Tc_X^L(r) + \sum_{l=1}^L [Td_X^{l,1}(r), Td_X^{l,3}(r)]. \quad (3)$$

7.2. Розклад  $P3$  до шостого рівня декомпозиції (L) пакетного вейвлет перетворення класу *bior 2.2*, побудованого на попередньому етапі:

$$f_P(r) = Tc_P^L(r) + \sum_{l=1}^L [Td_P^{l,1}(r), Td_P^{l,2}(r), Td_X^{l,3}(r)]. \quad (3)$$

7.3. Обчислення ентропії за Шенноном в її розширеному означенні згідно формули (4); вибір максимального значення з двох величин ( $\max$ ), одержаних в п.п. 7.2 та 7.3; обчислення логарифмічної ФІВ та визначення оптимального вейвлет-дерева на базі  $BC3$ , а вейвлет-дерево  $P3$  вирівнюється по отриманому оптимальному дереву [7].

$$E_{sh} = -\sum_i p_i \cdot \log_2 p_i \quad (4)$$

7.4. Формування нових складових розкладу згідно з обраним правилом об'єднання коефіцієнтів в п.7.3:

$$App_{\bar{X}}^L(r) = Tc_{\bar{X}}^L(r),$$

$$Det_{\bar{X}}(r) = \sum_{l=1}^L [Td_P^{l,1}(r), Td_P^{l,2}(r), Td_P^{l,3}(r)] \quad (5)$$

7.5. Зворотний пакетний вейвлет-розклад та одержання зображення БЗС<sub>RGB</sub>:

$$f_{\bar{XYZ}}(r) = App_{\bar{X}}^L(r) + Det_{\bar{X}}(r) \quad (6)$$

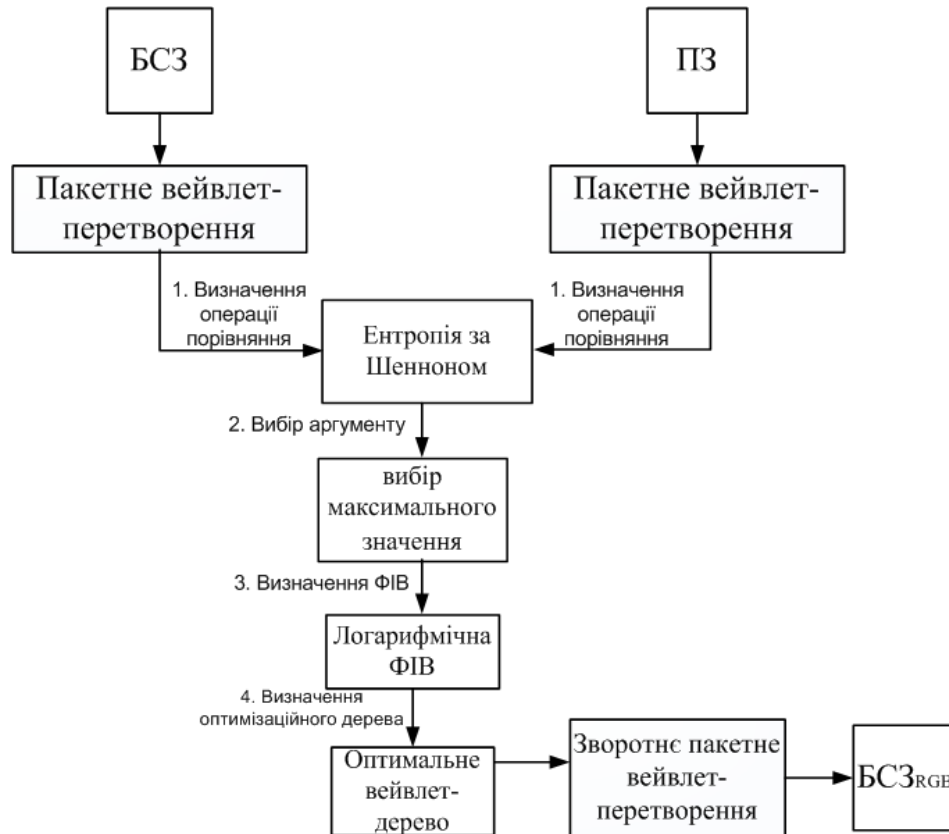


Рис. 2. Схема методу геометричної та спектральної корекції

8. Перетворення восьмиканального мультиспектрального зображення, що складається з БЗС<sub>RGB</sub> і БЗС<sub>H</sub> 1, 4, 6, 7, 8-го каналів після інтерполяції в гіперсферичний колірний простір (НСТ) [8].

9. Зворотнє НСТ-перетворення та отримання результату Fusion.

Запропонований алгоритм був протестований на супутникових зображеннях Worldview-3. На рис. 3 представлено фрагменти зображень: первинне панхромне (рис. 3а), первинне багатоспектральне зображення з вибором у якості окремих R-, G-, B-компонент відповідних зображень 5-го, 3-го та 2-го каналів (рис. 3б), і багатоспектральне зображення після обробки запропонованим у роботі алгоритмом (рис. 3в). Для візуалізації результату (рис. 3в) також використано 5-й, 3-й та 2-й спектральні канали.

У табл. 1 наведено порівняння абсолютних значень інтегральних характеристик: ентропія за Шенноном (Shannon Entropy), сигнальна ентропія (Signal Entropy) середньоквадратичне відхилення (Std2), умовна ентропія за Шенноном (Shannon RelEntropy) та умовна сигнальна ентропія (Signal RelEntropy).

Таблиця 1

Порівняльний аналіз інтегральних характеристик

№	Критерій якості	Існуючі методи		Запропонована технологія	
		Мінімальне значення	Максимальне значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
1	Shannon Entropy	6.10	6.40	6.10	6.50
2	Signal Entropy	7.66	7.76	7.75	7.80
3	Std2	66.20	69.10	65.00	66.70
4	Shannon RelEntropy	5.80	6.36	6.05	6.50
5	Signal RelEntropy	5.30	6.24	6.76	6.87

Аналіз якості зображень (рис. 3), отриманих за запропонованою технологією, при використанні геометричного показника засвідчив відсутність будь-яких афінних спотворень, що підтверджує лінійність запропонованих математичних моделей.

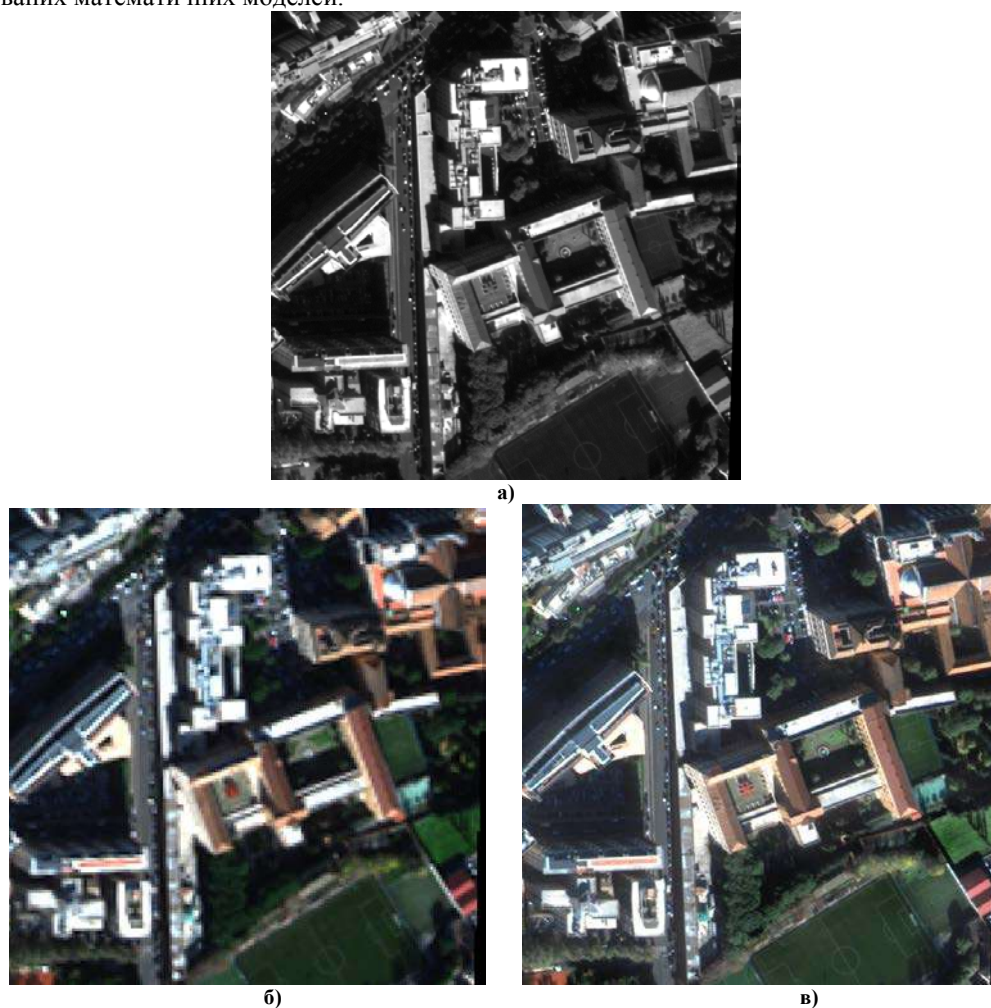


Рис. 3. Фрагменти зображень:

а) первинне панхромне, б) первинне мультиспектральне, в) синтезоване після обробки запропонованою технологією

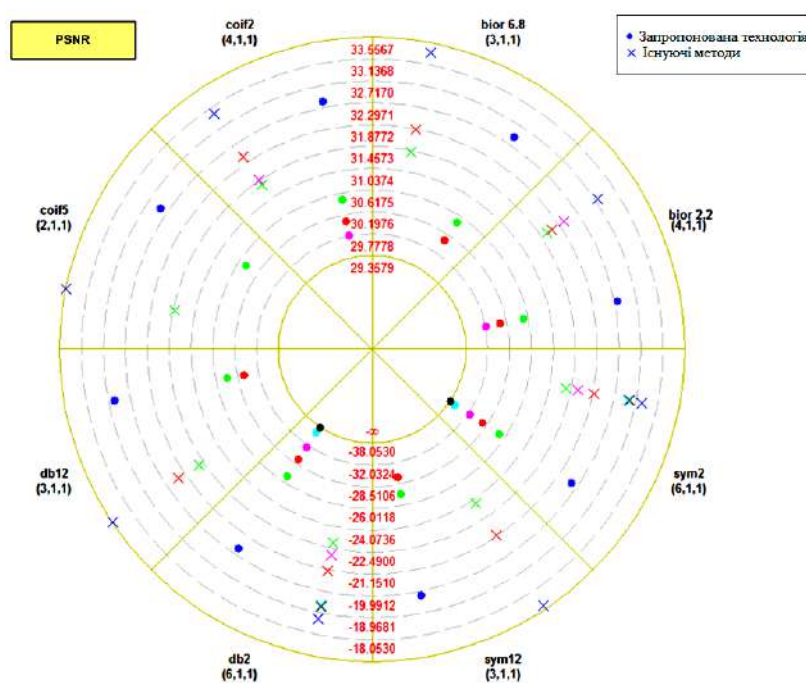


Рис. 4. Результати оцінки якості отриманих зображень за запропонованою технологією та за допомогою існуючих методів

Таким чином, набагато менша поява екстремумів в динаміці показників якості (табл.1) свідчить про більшу стабільність запропонованої технології та монотонно зростаючу залежність таких показників якості як ентропія за Шенноном, сигнальна ентропія, умовна ентропія за Шенноном та умовна сигнальна ентропія від рівня вейвлет-розкладу. Аналіз отриманих результатів за інформаційною характеристикою "Пікове відношення сигнал-шум" по відношенню до первинного БСЗ (рис. 4) дозволяє відзначити, що візуальна якість при використанні існуючих методів нижча, ніж при використанні запропонованої технології, що впливає на якість розпізнавання об'єктів та підвищують якість первинних космічних знімків на 10–12%.

#### Висновки

У роботі вирішено актуальну задачу автоматизованого підвищення ефективності геометричної та спектральної корекцій космічних зображень високого просторового розрізнення з урахуванням фізичних механізмів фіксації видової інформації. Наукова новизна роботи та практична цінність отриманих результатів полягає у розробці нового методу геометричної та спектральної корекцій багатоспектральних зображень на основі HSV-, НСТ-конвертування і пакетного вейвлет-перетворення, що дозволяє поліпшити просторову здатність первинного цифрового зображення й уникнути спектральних спотворень в локальних областях. У порівнянні з існуючими методами злиття запропонована технологія дозволяє уникнути істотних кольорних спотворень та підвищити точність подальшого розпізнавання об'єктів на зображеннях. Це досягається, зокрема, за рахунок попередньої корекції первинних знімків та використання інформації, яку містить зображення інфрачервоного діапазону та оброблення даних у локалізованих спектральних базисах, оптимізованого за інформаційними характеристиками.

#### Список використаної літератури

1. Schowengerdt R. (2007), Remote sensing: models and methods for image processing, New York: Academic Press. P.560.
2. Orchard M. T, Schwartz S. C and Zhu. Y, (2001): 'Wavelet Domain Image Interpolation via Statistical Estimation', in Proc. Int. Conf. Image Processing, Vol. 3, pp. 840–843.
3. Temizel A, (2007): 'Image Resolution Enhancement using Wavelet Domain Hidden Markov Tree and Coefficient Sign Estimation', in Proc. ICIP, Vol. 5, pp. V-381–V-384.
4. Hnatushenko V.V. Pansharpening technology of high resolution multispectral and panchromatic satellite images / V.V. Hnatushenko, Vik.V. Hnatushenko, O.O. Kavats, V.Yu. Shevchenko // Науковий вісник НГУ, 2015, № 4 (148), С. 91-98.
5. Гнатушенко В.В. Технологія злиття зображень на основі вейвлет-перетворень та бікубічної інтерполяції / В.В. Гнатушенко, В.Ю. Шевченко, // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2015. – № 3 (54). – С. 229-234
6. Гнатушенко В.В. Злиття аерокосмічних зображень високого просторового розрізнення на основі HSV-перетворення та вейвлет-декомпозиції / В.В. Гнатушенко, В.Ю. Шевченко // Вісник ХНТУ. – Херсон, 2014. – № 2 (47). – С. 100-105.
7. Гнатушенко В.В. Інформаційна технологія підвищення інформативності багатоканальних даних на основі пакетних вейвлет-перетворень / В.В. Гнатушенко, В.Ю. Каштан // Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво". – Луцьк, 2016. – С.77-83.
8. Гнатушенко В.В. Підвищення просторового розрізнення багатоканальних аерокосмічних зображень високого просторового розрізнення на основі гіперсферичного перетворення / В.В. Гнатушенко, В.Ю. Шевченко, О.О. Кавац // Радіoeлектроніка, інформатика, управління: Науковий журнал Запорізького національного технічного університету. – Запоріжжя, 2015. – №1 (32). – С.73-79.