

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗЛИТТЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ВИСОКОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗРІЗНЕННЯ

Впродовж останніх років космічні знімальні системи стрімко розвиваються. На даний момент вони дозволяють отримувати дані з просторовим розрізненням півметра і менше для дослідження стану лісів, морських акваторій, шельфів тощо. Поява знімків високого просторового розрізнення вимагає застосування спеціальних методів їх обробки. Тому в даній роботі проведено аналіз ефективності відомих методів злиття супутникових знімків високого просторового розрізнення. Порівнюються методи: GIHS, Brovey, HPF, HCT, вейвлет-перетворення та комбінований HSV-HCT, з метою знаходження їх відмінностей та подальшого ефективного використання. Оцінка якості зображення відіграє важливу роль в обробці супутникових знімків, особливо при використанні методів підвищення інформативності зображень. Дослідження ефективності методів злиття відбувалися на первинних супутникових знімках високого просторового розрізнення WorldView-2. Одним із критеріїв перевірки спектральних властивостей синтезованих зображень є розрахунок спектрального індексу NDVI. Отриманні значення індексу NDVI для методів «Brovey» та HPF свідчать про колірні спотворення в порівнянні з еталонними даними. Це обумовлено тим, що методи «Brovey» та HPF засновані на злитті трьох каналних зображень та не враховують інформацію, яка міститься в ближньому інфрачервоному діапазоні. Порівняння кількісних показників (RMSE, ERGAS та NDVI) та візуальні результати показали перевагу комбінованого HSV-HCT методу. Це досягається, зокрема, за рахунок попередньої обробки первинних знімків, оброблення даних у локалізованих спектральних базисах, оптимізованого за інформаційними характеристиками, та використання інформації, яку містить зображення інфрачервоного діапазону. Тестування показали, що синтезоване зображення високого просторового розрізнення з максимальною інформативністю досягається при комплексному використанні методів злиття, що дозволяє підвищити просторову розрізненість багатоканального зображення без істотних колірних спотворень. Результати роботи можуть бути використані при подальшому розпізнаванні об'єктів та тематичній обробці знімків.

Ключові слова: злиття; гіперсферичне перетворення; супутникові знімки, високе просторове розрізнення; вейвлет-перетворення; нормалізований індекс вегетації.

V.J. KASHTAN, V.V. HNATUSHENKO

Dnipro University of Technology

AN INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF PAN-SHARPENING METHODS OF HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES

In recent years, satellites imaging systems have been developing rapidly. Nowadays, these satellites allow to obtain data with a spatial resolution of half a meter or less to monitoring the state of forests, sea areas, shelves, etc. Images of high spatial resolution are required to use of special methods of their processing. Therefore, in this paper we analyze the effectiveness of the known methods of fusion high spatial resolution satellite images. The pan-sharpening methods under consideration were the GIHS, the Brovey, the HPF, the HCT, the

wavelet-transform and the combined HSV-HCT for conducts their detailed comparative analysis. Image quality assessment plays an important role in the processing of satellite images, especially when using methods to increase the information content of images. Experimental evaluation performed on eight-primary satellite images of high spatial resolution obtained WorldView-2 satellite. Quantitative characteristics of spectral properties of synthesized images were obtained by calculating the NDVI index. The NDVI index for the methods "Brovey" and HPF indicate color distortion in comparison with the reference data. This is due to the fact that the Brovey and HPF methods are based on the fusion of three channel images and do not include the information contained in the near infrared range. The quantitative (RMSE, ERGAS ma NDVI) and visual results show the superiority of the combined HSV-HCT method over the conventional and state-of-art image resolution enhancement techniques of high resolution satellite images. This is achieved, in particular, by preliminary processing of primary images, data processing localized spectral bases, optimized performance information, and the information contained in the infrared image. The experimental results show that a synthesized high spatial resolution image with high information content is achieved with the complex use of fusion methods, which makes it possible to increase the spatial resolution of the original multichannel image without color distortions.

Keywords: remote sensing; hyperspherical color transform; spatial images; high spatial resolution; wavelet decomposition; normalized difference vegetation index.

В.Ю. КАШТАН, В.В. ГНАТУШЕНКО

Национальный технический университет «Днепро́вская политехника»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СЛИЯНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В последние годы космические съемочные системы стремительно развиваются. На данный момент они позволяют получать данные с пространственным разрешением полметра и меньше для исследования состояния лесов, морских акваторий, шельфов и тому подобное. Появление снимков высокого пространственного разрешения требует применения специальных методов их обработки. Поэтому в данной работе проведен анализ эффективности известных методов слияния спутниковых снимков высокого пространственного разрешения. Сравниваются методы: GIHS, Brovey, HPF, HCT, вейвлет-преобразования и комбинированный HSV-HCT, с целью нахождения их различий и дальнейшего эффективного использования. Оценка качества изображения играет важную роль в обработке спутниковых снимков, особенно при использовании методов повышения информативности изображений. Исследование эффективности методов слияния происходили на первичных спутниковых снимках высокого пространственного разрешения WorldView-2. Одним из критериев проверки спектральных свойств синтезированных изображений является расчет спектрального индекса NDVI. Полученные значения индекса NDVI для методов «Brovey» и HPF свидетельствуют о цветовых искажениях по сравнению с эталонными данными. Это обусловлено тем, что методы «Brovey» и HPF основаны на слиянии трех канальных изображений и не учитывают информацию, которая содержится в ближнем инфракрасном диапазоне. Сравнение количественных показателей (RMSE, ERGAS и NDVI) и визуальные результаты показали преимущество комбинированного HSV-HCT метода. Это достигается, в частности, за счет предварительной обработки первичных снимков, обработки данных в локализованных спектральных базисах, оптимизированной по информационным характеристикам, и использования информации, содержащейся в

изображении инфракрасного диапазона. Тестирования показали, что синтезированное изображение высокого пространственного разрешения с максимальной информативностью достигается при комплексном использовании методов слияния, что позволяет повысить пространственное разрешение исходного многоканального изображения без существенных цветовых искажений. Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем распознавании объектов и тематической обработке снимков.

Ключевые слова: слияние; гиперсферическое преобразование; спутниковые снимки; высокое пространственное разрешение; вейвлет-преобразование; нормализованный индекс вегетации

Постановка проблеми

Супутникові знімки високого просторового розрізнення є одним із джерел геопросторової інформації. Однією із проблем використання супутникових знімків, одержаних різними космічними системами є спільна обробка багатоспектрального зображення (БЗ) з низьким просторовим розрізненням (канали: Coastal, Blue, Green, Yellow, Red, Red Edge, NIR1, NIR 2) та панхроматичного зображення (ПЗ) високого просторового розрізнення, який є монохромним. ПЗ мають менший розмір пікселів і фіксуються у достатньо широкому спектральному діапазоні інтенсивності випромінення та мають суттєво вищу просторову розрізненість, ніж БЗ, отримані у вузьких спектральних інтервалах [1]. Сучасний рівень вимог до достовірності інтерпретації зображень зумовлює необхідність подолати фізичні обмеження доступних супутникових датчиків, зокрема, шляхом об'єднання в одному графічному об'єкті високих показників просторової та спектральної розрізненості.

Незважаючи на розроблені методи, призначені для поліпшення якості результуючого зображення, з'являються нові наукові проблеми, які пов'язані із підвищенням вимог до результатів обробки знімків високого просторового розрізнення [2]. Більшість відомих методів розроблялися для об'єднання даних супутника SPOT, на відміну від якого довжина панхром-хвилі сучасних супутників (OrbView, Worldview-2,3 та ін.) була розширена від видимого до ближнього інфрачервоного діапазону. Так, на практиці основною проблемою, пов'язаною зі злиттям супутникових знімків високого просторового розрізнення є поява кольорних спотворень, що знижують точність подальшого розпізнавання та аналізу БЗ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Протягом останніх двох десятиліть розроблено велику кількість методів злиття супутникових знімків, які можна розділити на: заміну компонентів, багатомасштабний аналіз та комбіновані методи [3–6]. Методи заміни компонентів – це перетворення БЗ із заміною деяких компонентів з ПЗ та перетворенні результату в первинний вид. IHS (intensity – яскравість, hue – колірний тон, saturation – насиченість) – це метод, в якому замінюється I-компонент БЗ на ПЗ з високим просторовим розрізненням. Дане перетворення може бути застосовано тільки для трьох зображень; а для зображень з чотирма каналами застосовують модифікований метод GIHS [7–8]. Ефективним є алгоритм перетворення багатоспектрального зображення за допомогою метода аналізу незалежних компонент (PCA), в якому перший головний компонент (PC1) замінюється на зображення PAN [9]. Ще одними розповсюдженими методами заміни компонентів є перетворення Brovey Transform та Gram–Schmidt. Вони дозволяють одержати нове синтезоване зображення з хорошою візуальною якістю, але порушують спектральну якість [10–11]. Основним недоліком методів заміни компонентів є поява спектральних спотворень. Методи на основі багатомасштабного аналізу дозволяють отримати

зображення, які матимуть високе просторове розрізнення (завдяки ПЗ), високе спектральне розрізнення (завдяки БЗ) та міститимуть інформацію, відсутню у первинних даних (завдяки зображень, що отримані за допомогою мікрохвильової зйомки та активної локації). Прикладом таких методів є метод піраміди Лапласа [12] та методи на основі вейвлет-перетворення [13]. Вейвлет-перетворення дозволяють зберегти спектральну інформацію зображення, але не враховують апріорних і експертних відомостей.

Мета дослідження

Таким чином, виникає необхідність дослідження ефективності існуючих методів злиття супутникових знімків високого просторового розрізнення з отриманням кількісних критеріїв якості синтезованих зображень. Також, необхідно з'ясувати, які методи злиття зображень найменше порушують спектральну структуру каналів, для чого спробуємо використати вегетаційний індекс NDVI.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі було розроблено автоматизований алгоритм порівняння методів злиття супутникових знімків високого просторового розрізнення (рис. 1). Супутникові знімки, отримані супутником WorldView-2 (рис. 2), мають просторову роздільну здатність 1,84 м у мультиспектральному каналі та 46 см у панхроматичному каналі відповідно. Схема запропонованого алгоритму представлена на рис. 1 та складається з наступних основних етапів:

1. Попередня обробка знімка. На цьому етапі було виконано масштабування БЗ до розмірів панхроматичного зображення, та гістограмну еквалізацію багатоспектрального зображення. Це дозволило відкоригувати первинні зображення, вирівнявши інтегральні площі ділянок з різною яскравістю, запропонованим алгоритмом у роботі [14].

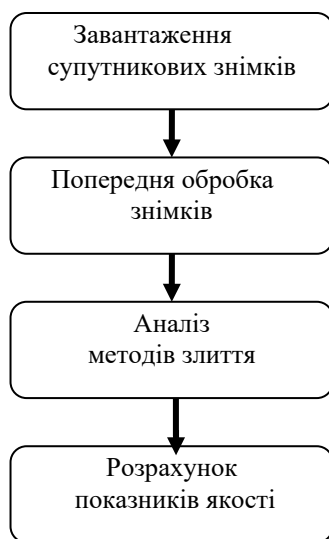


Рис. 1. Схема алгоритму.

2. Аналіз методів злиття. У запропонованому алгоритмі на даному етапі проаналізовано наступні методи: узагальнена інтенсивність – насиченість – тон, метод «Brovey», метод фільтра високих частот, вейвлет-перетворення та комбіновані методи. Ці методи є простими в обробці та можуть бути застосовані з будь-якою кількістю обраних вхідних спектральних каналів.

2.1. Метод узагальнена інтенсивність – насиченість – тон (GIHS) є модифікованим методом IHS, в якому можна вибирати кількість каналів. Канал I містить інформацію про яскравісну складову зображення, інші – відомості щодо спектральних складових. Метод можна представити згідно з наступними виразами [15]:

$$F_i = MS_{i\uparrow} + (P - S), \quad S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MS_{i\uparrow}, \quad (1)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – багатоспектральне зображення, P – панхроматичне зображення, $MS_{i\uparrow}$ – i -й канал зображення MS після масштабування до розмірів P , S – синтезоване зображення, N – загальна кількість каналів MS .

2.2. Метод «Brovey». Цей метод, базується на формоутворенні нових спектральних складових БЗ відповідно з наступним виразом [16]:

$$F_i = \frac{P}{S} MS_{i\uparrow}, \quad S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MS_{i\uparrow}, \quad (2)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – багатоспектральне зображення, P – панхроматичне зображення, $MS_{i\uparrow}$ – i -й канал зображення MS після масштабування до розмірів P , S – синтезоване зображення, N – загальна кількість каналів MS .

2.3. Метод фільтра високої частоти (HPF) підвищує інформативність зображення на основі перенесення високочастотних складових панхроматичного каналу на спектральні канали відповідно з наступним виразом [17]:

$$F_i = \frac{[P * g] + MS_{i\uparrow}}{2}, \quad (3)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – БЗ, P – ПЗ, $MS_{i\uparrow}$ – i -й канал зображення MS після масштабування до розмірів P , $*$ – оператор згортки, g – високочастотний фільтр.

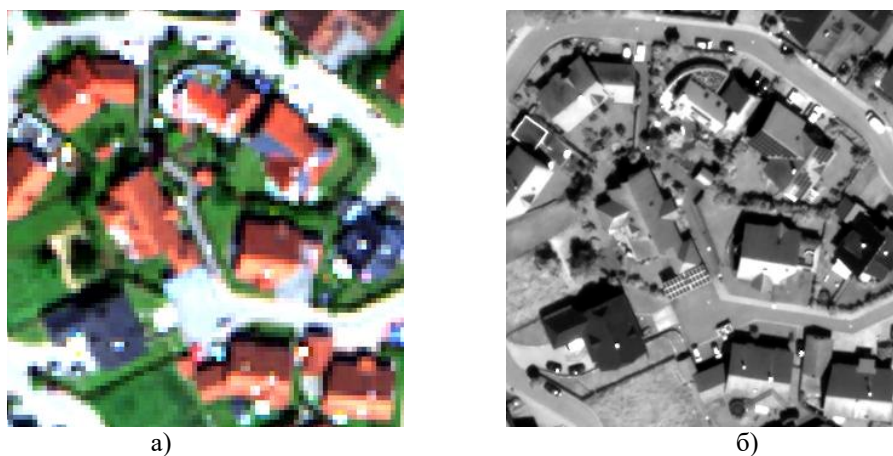


Рис. 2 Еталонні знімки, отримані супутником WorldView-2: а) багатоканальне зображення; б) панхроматичне зображення.

2.4. Гіперсферичне конвертування (НСТ) – перетворення між власним колірним простором з декартовими координатами в гіперсферичний колірний простір, який ефективно працює з будь-якою кількістю вхідних каналів БЗ [18]:

$$F_i^2 = \sum_{i=1}^N MS_i^2, \quad P^2 = (Pan)^2, \quad (4)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – багатоспектральне зображення, P – панхроматичне зображення, MS_i – i -й канал зображення MS , N – загальна кількість каналів MS .

2.5. Методи на основі вейвлет-перетворення реалізуються за допомогою згортки сигналу з декількома смуговими фільтрами та децимацією результату [19]. Для здійснення оберненої операції (синтезу), виконується операція інтерполяції субсмугових сигналів, фільтрація та їх додавання. При синтезі використовуються такі самі фільтри, що й при аналізі, однак коефіцієнти представлені в оберненому порядку:

$$F_i = MS_{i\uparrow} + \frac{MS_{i\uparrow}}{\sum_{i=1}^N MS_{i\uparrow}} \cdot P', \quad (5)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – багатоспектральне зображення, P – панхроматичне зображення, $MS_{i\uparrow}$ – i -й канал зображення MS після масштабування до розмірів P , N – загальна кількість каналів MS , P' – деталізуючі коефіцієнти ПЗ. Панхроматичне зображення розкладається на деталізуючі коефіцієнти n -ого рівня, де $n = \log_2 r$ і r – це відношення розмірів БЗ до ПЗ.

2.6. Комбіновані методи дозволяють поєднати переваги існуючих методів злиття з мінімізацією колірних спотворень та з урахуванням фізичних механізмів фіксації видової інформації [5–6]. В роботі [14] запропоновано метод на основі HSV-перетворення, гіперсферичному конвертуванні і пакетного вейвлет-перетворення (HSV-НСТ), що дозволяє поліпшити просторову здатність первинного цифрового зображення й уникнути спектральних спотворень в локальних областях.

3. Наступним етапом є аналіз якісних та кількісних характеристик розглянутих у роботі методів злиття для супутникових знімків з метою визначення їх стану і значущості. Оцінка якості зображення відіграє важливу роль в обробці супутникових знімків, особливо при використанні методів підвищення якості зображень. Дослідження впливу методів злиття відбувалися на первинних супутникових знімках високого просторового розрізнення WorldView-2. Фрагменти панхроматичного та багатоспектрального знімків подано на рис. 2. Після злиття зображень за розглянутими вище методами були отримані зображення, які навіть візуально у порівнянні з еталонним БЗ відрізняються більшою чіткістю, але мають суттєві колірні спотворення (рис. 3). При цьому, у силу суб'єктивності людського сприйняття зорова система по різному сприймає артефакти на зображенні, багато залежить від досвіду експертів. Тому з метою визначення впливу кожного методу на якість багатоспектрального зображення у роботі проведено кількісний аналіз інформативності первинного та синтезованих БЗ, а саме знайдені середньоквадратична похибка ($RMSE$), відносна безрозмірна глобальна помилка ($ERGAS$) та нормалізований індекс вегетації ($NDVI$).

3.1. Критерій $RMSE$ визначає відхилення положення точки на знімку по відношенню до її положення у просторі [20].

3.2. *ERGAS* – це індекс якості, який обчислює «кількість» спектральних спотворень синтезованого зображення [20].

3.3. Одним із критеріїв перевірки спектральних властивостей синтезованих зображень є розрахунок спектрального індексу, зокрема було розраховано нормалізований індекс вегетації (*NDVI*) [21]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (7)$$

де *NIR* – значення інтенсивності світла у ближньому інфрачервоному діапазоні, *RED* – відбиття у червоній області спектра, що відповідає відповідно 8 каналу для знімків, отриманих супутником WorldView-2.

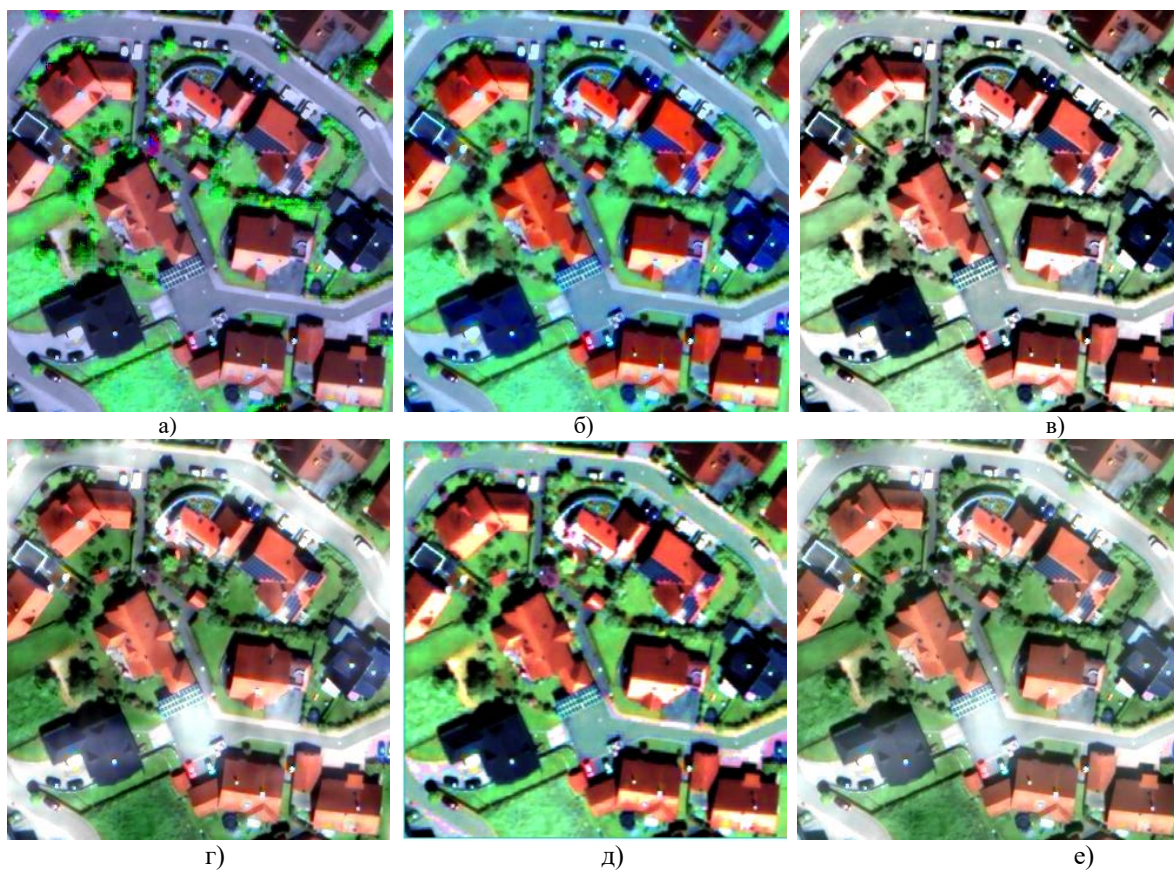


Рис. 3 Фрагменти зображень методами: а) «Brovey»; б) HPF; в) GHS; г) HCT; д) вейвлет-перетворення; е) HSV-HCT.

Отримані значення *RMSE*, *ERGAS* та *NDVI* для синтезованих багатоспектральних зображень представлені в таблиці 1. Бачимо, що комбінований метод (HSV-HCT) у порівнянні з класичними методами злиття дає більш якісний результат. На це вказує значення безрозмірної глобальної помилки *ERGAS*, що є найменшим (*ERGAS*=1,659) у порівнянні з існуючими методами і свідчить про мінімальну «кількість» спектральних спотворень супутникових знімків. Про ефективність комбінованого методу також свідчать отримані в таблиці 2 значення індексу *NDVI*. Отриманні значення нормалізованого індексу вегетації для методів «Brovey» та HPF свідчать про колірні спотворення в порівнянні з еталонними даними. Це обумовлено тим, що методи «Brovey» та HPF засновані на злитті трьох каналних зображень та не враховують

інформацію, яка міститься в ближньому інфрачервоному діапазоні, що впливає на якість спектральної інформації синтезованого зображення.

Таблиця 1

Результати оцінки точності методів злиття за допомогою різних критеріїв

Метод	Значення RMSE	Значення ERGAS
GIHS	16.783	2.826
Brovey	20.637	4.639
HPF	15.637	4.849
НСТ	12.417	2.659
Вейвлет-перетворення	11.504	2.416
HSV-НСТ	9.739	1.659

Таблиця 2

Результати нормалізованого індексу вегетації

Зображення/ Метод	Метрика NDVI	Метрика NDVI для RMSE	Метрика NDV для ERGAS
Еталонне зображення супутника WorldView-2	1	0	0
GIHS	0.9614	0.0586	12.6028
Brovey	0.9725	0.2125	45.7155
HPF	0.9569	0.1526	32.8356
НСТ	0.9578	0.0578	12.4439
Вейвлет-перетворення	0.9573	0.0603	17.568
HSV-НСТ	0.9924	0.0533	11.4107

Висновки

В роботі проведено аналіз відомих методів злиття, зокрема GIHS, Brovey, HPF, НСТ, вейвлет-перетворення та комбінованого HSV-НСТ для супутникових знімків високого просторового розрізнення WorldView-2. Для експериментального дослідження «якості» (інформативності) синтезованих супутникових знімків з урахуванням їх спектральної інформації були розраховані критерії RMSE, ERGAS та NDVI. Результати за даними критеріями дозволяють встановити рейтинговий ряд методів злиття від найгіршого результату: Brovey, HPF, GIHS, вейвлет-перетворення, НСТ та комбінований метод HSV-НСТ. Крім того, окреме використання цих методів призводить до появи спектральних артефактів на синтезованому зображенні в порівнянні з еталонним. Тестування показали, що синтезоване зображення високого просторового розрізнення з максимальною інформативністю досягається при комплексному використанні методів злиття, що дозволяє підвищити просторову розрізненість багатоканального зображення без істотних кольорних спотворень. “Ідеальним” методом злиття є метод, який підвищує просторове розрізнення з мінімізацією викривлення кольору.

Список використаної літератури

1. Zhang Y. Understanding Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2004. Vol. 70. № 6. P. 657–661.
2. Hordiiuk D. M., Hnatushenko V. V. Neural Network and Local Laplace Filter Methods Applied to Very High Resolution Remote Sensing Imagery in Urban Damage Detection. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and*

- Engineering (YSF)*, (Lviv, October 17-20, 2017). P. 363–366. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126648.
3. Basaeed E., Bhaskar H., Al-Mualla M. Beyond Pan-Sharpener: Pixel-Level Fusion in Remote Sensing Applications. *8th International Conference on Innovations in Information Technology (Innovations'12)*. (UAE, Al-Ain, March 18-20, 2012). P. 139–144.
 4. Amro J., Mateos M., Vega R., Molina A., Katsaggelos K. A Survey of Classical Methods and New Trends in Pansharpening of Multispectral Images. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2011. Article 79. 22 p.
 5. Kahtan V. Yu., Hnatushenko V. V. A Wavelet and HSV Pansharpening Technology of High Resolution Satellite Images. *Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS 2020)*: International Conference. (Ukraine, Khmelnytskyi, June 10-12, 2020). Khmelnytskyi, 2020. P. 67–76.
 6. Hnatushenko V., Hnatushenko Vik., Kavats O., Shevchenko V. Pansharpening Technology of High Resolution Multispectral and Panchromatic Satellite Images. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2015. Issue 4. P. 91–98.
 7. Rahmani S., Strait M., Merkurjev D., Moeller M., Wittman T. An Adaptive IHS Pan-Sharpener Method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2010. Vol. 7. Issue 4. P. 746–750.
 8. Tu T., Su S., Shyu H., Huang P. A New Look at IHS-Like Image Fusion Methods. *Information Fusion*. 2001. Vol. 2. № 3. P. 177–186.
 9. Ghassemian H. A Review of Remote Sensing Image Fusion Methods. *Information Fusion*. 2016. Vol. 32. P. 75–89. DOI:10.1016/j.inffus.2016.03.003.
 10. Wang Z., Ziou D., Li D., Li Q. A Comparative Analysis of Image Fusion Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. Vol. 43. № 6. P. 1391–1402.
 11. Zhang J. Multi-Source Remote Sensing Data Fusion: Status and Trends. *International Journal of Image and Data Fusion*. 2010. Vol. 1. Issue 1. P. 5–24.
 12. Li X., Xu F., Lyu X., Tong Y., Chen Z., Li S., & Liu D. A Remote-Sensing Image Pan-Sharpener Method Based on Multi-Scale Channel Attention Residual Network. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 27163–27177. DOI:10.1109/access.2020.2971502.
 13. Aishwarya N., Abirami S., Amutha R. Multifocus Image Fusion Using Discrete Wavelet Transform and Sparse Representation. *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*: International Conference. (India, Chennai, March 23-25, 2016). Chennai, 2016. P. 2377–2382. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566567.
 14. Гнатушенко В. В., Шевченко В. Ю., Кавац О. О. Підвищення просторового розрізнення багатоканальних аерокосмічних зображень високого просторового розрізнення на основі гіперсферичного перетворення. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2015. № 1 (32). С. 73–79.
 15. Meinel G., Neubert M. A Comparison of Segmentation Programs for High Resolution Remote Sensing Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 35. Part B. P. 1097–1105.
 16. Maglione P., Parente C., Vallario A. Pan-Sharpener Worldview-2: IHS, Brovey and Zhang Methods In Comparison. *International Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 8. Issue 2. P. 673–679.
 17. Gangkofner U. G., Pradhan P. S., Holcomb D. W. Optimizing the High-Pass Filter Addition Technique for Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2008. Vol. 74. Issue 9. P. 1107–1118.

18. Li Xu, Mingyi He, Zhang Lei. Hyperspherical Color Transform Based Pansharpening Method for WorldView-2 Satellite Images. *Industrial Electronics and Applications: 8th IEEE Conference*. (Australia, Melbourne, June 19–21, 2013). Melbourne, 2013. P. 520–523. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566424.
19. Aishwarya N., Abirami S., Amutha R. Multifocus image fusion using Discrete Wavelet Transform and Sparse Representation. *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET 2016): International Conference*. (India, Chennai, March 23–25, 2016). Chennai, 2016. P. 2377–2382. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566567.
20. Chen S., Zhang R., Su H., Tian J., Xia J. Scaling-up transformation of multisensor images with multiple resolutions. *Sensors*. 2009. Issue 9. P. 1370–1381.
21. Dr. Mustafa, Mustafa T. Using Water Indices (ndwi, mndwi, ndmi, wri and awei) to Detect Physical and Chemical Parameters by Apply Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Research – GRANTHAALAYAH*. 2017. Vol. 5. Issue 10. P. 117–128. DOI: 10.5281/zenodo.1040209.

References

1. Zhang, Y. (2004). Understanding Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. **70**, 6, 657–661.
2. Hordiiuk, D. M., & Hnatushenko, V. V. (2017). Neural Network and Local Laplace Filter Methods Applied to Very High Resolution Remote Sensing Imagery in Urban Damage Detection. *Proceedings of the 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)* (Lviv, October 17–20, 2017), pp. 363–366. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126648.
3. Basaeed, E., Bhaskar, H., & Al-Mualla, M. (2012). Beyond Pan-Sharpener: Pixel-Level Fusion in Remote Sensing Applications. *Proceedings of the 8th International Conference on Innovations in Information Technology (Innovations'12)*. (UAE, Al-Ain, March 18–20, 2012), pp. 139–144.
4. Amro, J., Mateos, M., Vega, R., Molina, A., & Katsaggelos, K. (2011). A Survey of Classical Methods and New Trends in Pansharpening of Multispectral Images. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. **Article 79**, 22 p.
5. Kahtan ,V. Yu., & Hnatushenko, V. V. (2020). A Wavelet and HSV Pansharpening Technology of High Resolution Satellite Images. *Proceedings of the Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS 2020): International Conference*. (Ukraine, Khmelnytskyi, June 10–12, 2020). Khmelnytskyi, pp. 67–76.
6. Hnatushenko, V., & Hnatushenko, Vik., Kavats, O., Shevchenko, V. (2015). Pansharpening Technology of High Resolution Multispectral and Panchromatic Satellite Images. *Scientific Bulletin of National Mining University*. **4**, 91–98.
7. Rahmani, S., Strait, M., Merkurjev, D., Moeller, M., & Wittman, T. (2010). An Adaptive IHS Pan-Sharpener Method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. **7**, 4, 746–750.
8. Tu, T., Su, S., Shyu, H., & Huang, P. (2001). A New Look at IHS-Like Image Fusion Methods. *Information Fusion*. **2**, 3, 177–186.
9. Ghassemian, H. (2016). A Review of Remote Sensing Image Fusion Methods. *Information Fusion*. **32**, 75–89. DOI:10.1016/j.inffus.2016.03.003.
10. Wang, Z., Ziou, D., Li, D., & Li, Q. (2005). A Comparative Analysis of Image Fusion Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **43**, 6, 1391–1402.
11. Zhang, J. (2010). Multi-Source Remote Sensing Data Fusion: Status and Trends. *International Journal of Image and Data Fusion*. **1**, 1, 5–24.

12. Li, X., Xu, F., Lyu, X., Tong, Y., Chen, Z., Li, S., & Liu, D. (2020). A Remote-Sensing Image Pan-Sharpener Method Based on Multi-Scale Channel Attention Residual Network. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 27163–27177. DOI:10.1109/access.2020.2971502.
13. Aishwarya, N., Abirami, S., & Amutha, R. (2016). Multifocus Image Fusion Using Discrete Wavelet Transform and Sparse Representation. Proceedings of the *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*: International Conference. (India, Chennai, March 23-25, 2016). Chennai, pp. 2377–2382. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566567.
14. Hnatushenko, V. V., Shevchenko, V. Iu., & Kavats, O. O. (2015). Pidvyshchennia prostorooho rozrznennia bahatokanalnykh aerokosmichnykh zobrazhen vysokoho prostorooho rozrznennia na osnovi hipersferychnoho peretvorennia. Naukovyi zhurnal Zaporizkoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, radioelektronika, informatyka, upravlinnia, Zaporizhzhia. **1**, 32, 73-79.
15. Meinel, G., & Neubert, M. (2014). A Comparison of Segmentation Programs for High Resolution Remote Sensing Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 35, Part B, pp. 1097–1105.
16. Maglione, P., Parente, C., & Vallario, A. (2016). Pan-Sharpener Worldview-2: IHS, Brovey and Zhang Methods In Comparison. *International Journal of Engineering and Technology*. **8**, 2, 673–679.
17. Gangkofner, U. G., Pradhan, P. S., & Holcomb, D. W. (2008). Optimizing the High-Pass Filter Addition Technique for Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. **74**, 9, 1107–1118.
18. Li, Xu, Mingyi, He, & Zhang, Lei. (2013). Hyperspherical Color Transform Based Pansharpening Method for WorldView-2 Satellite Images. Proceedings of the *Industrial Electronics and Applications: 8th IEEE Conference*. (Australia, Melbourne, June 19–21, 2013). Melbourne, pp. 520–523. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566424.
19. Aishwarya, N., Abirami, S., & Amutha, R. (2016). Multifocus image fusion using Discrete Wavelet Transform and Sparse Representation. Proceedings of the *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET 2016)*: International Conference. (India, Chennai, March 23-25, 2016). Chennai, pp. 2377–2382. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566567.
20. Chen, S., Zhang, R., Su, H., Tian, J., & Xia, J. (2009). Scaling-up transformation of multisensor images with multiple resolutions. *Sensors*. **9**, 1370–1381.
21. Dr. Mustafa, Mustafa T. (2017). Using Water Indices (ndwi, mndwi, ndmi, wri and awei) to Detect Physical and Chemical Parameters by Apply Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Research – GRANTHAALAYAH*. 2017. **5**, 10, 117–128. DOI: 10.5281/zenodo.1040209.

Каштан Віта Юріївна – к.т.н, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро), e-mail: vitalionkaa@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0395-5895.

Гнатушенко Володимир Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро), e-mail: vvgnat@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3140-3788.