

ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 621.396.96

С. Є. Фабіровський, І. Н. Прудіус
Національний університет “Львівська політехніка”

ПІДВИЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЗОБРАЖЕНЬ МЕТОДОМ СУБПІКСЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ

© Фабіровський С. Є., Прудіус І. Н., 2015

Розглянуто методи синтезування багатоспектрального зображення низької роздільної здатності й панхроматичного зображення високої роздільної здатності у високороздільне кольорове зображення, їх переваги та недоліки. Для забезпечення високої роздільної здатності останнього запропоновано метод, оснований на використанні субпіксельної обробки, суть якої полягає в обробці вихідних даних сенсорів у вигляді ПЗЗ лінійок, зсунутих на половину піксела одна відносно іншої. Представлено результати моделювання запропонованого методу та одержано синтезовані кольорові зображення з підвищеною роздільною здатністю.

Ключові слова: комплексування, обробка зображень, субпіксельна обробка зображень, просторова роздільна здатність, багатоспектральні зображення, панхроматичне злиття, оптичний давач, інтерполяція, відновлення, дистанційне зондування Землі.

S. E. Fabirovskyy, I. N. Prudyus
Lviv Polytechnic National University

IMPROVING THE RESOLUTION OF MULTISPECTRAL IMAGES BY SUBPIXEL PROCESSING METHOD

© Fabirovskyy S. E., Prudyus I. N., 2015

The methods, their advantages and disadvantages, of fusion a low-resolution multispectral and panchromatic high-resolution image in high-resolution color image are considered. Is proposed a method to provide high-resolution, which is based on the use of subpixel processing, the essence of which is the handling of input data in the form of a CCD sensor arrays shifted by a half pixel with respect to each other. Using of subpixel imaging technology can improve the device resolution, or in the preservation of the low resolution, to reduce the system focal length and reduce the weight and volume of the optical system, which is very important for monitoring systems.

The flow charts of algorithms to improve the multispectral images resolution using of subpixel image processing are synthesized. The simulation results of the proposed method and the obtained synthesized color images with high resolution are presented. The complexity and speed of the proposed method are calculated.

As a result it was succeeded effectively to improve the resolution and formation quality of multispectral image.

Key words: data fusion, image processing, subpixel image processing, spatial resolution, multispectral images, pan-sharpening, optical sensor, interpolation, restoration, remote sensing of the Earth.

Вступ

Завдання ефективної обробки графічної інформації, отриманої за допомогою дистанційного зондування, сьогодні є одним із актуальних. Із появою супутникових систем дистанційного зондування, що здатні забезпечити безперервний моніторинг земної поверхні з високою роздільною здатністю об'єктів та сцен, попит на використання такої інформації систем з'явився чи не у кожній галузі народного господарства. Прикладами таких галузей є сільське господарство, лісництво, земельне господарство, картографія, геологія, гідрологія тощо [1–4].

Сучасні системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) мають в своєму складі сенсори, які працюють у різних спектральних діапазонах і виділяють інформацію або поканально, або синтезовану комплексуванням даних різних спектральних каналів [3]. Останній вид систем є ефективнішим, оскільки забезпечує поєднання переваг кожного із каналів і підвищує завадозахищеність системи. Переважно у багатьох системах ДЗЗ наявні багатоспектральні канали (синій, зелений, червоний) для побудови кольорових зображень та панхроматичний канал, який формує зображення у вигляді значень інтенсивності випромінювання в усьому оптичному діапазоні, а не в окремому каналі. Серед таких систем є IKONOS-2, QuickBird-2, KOMPSAT-2, GeoEye-1, WorldView-1 [1,3], їх параметри наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри систем ДЗЗ

Супутник (країна)	Роздільна здатність панхроматичного каналу, м	Роздільна здатність багатоспектральних каналів, м	Ширина смуги огляду, км	Висота орбіти, км
IKONOS-2 (USA)	1	4	11	682
QuickBird-2 (USA)	0,6	2,4	16,5	450
EROS-B (Israel)	0,7	-	7	500
KOMPSAT-2 (Korea)	1	4	15	685
Cartosat-2 (India)	0,8	-	10	635
GeoEye-1 (USA)	0,41	1,65	15,2	684
WorldView-1 (USA)	0,41	1,65	15,2	684

Панхроматичний канал має завжди більшу роздільну здатність, ніж багатоспектральні канали. З метою підвищення роздільної здатності останніх сьогодні розроблено методи синтезованих зображень багатоспектральних каналів низької роздільної здатності з високороздільним панхроматичним зображенням [2, 4, 5]. Однак використання цієї процедури призводить до зміни колірності багатоспектрального зображення. Для покращання якості синтезованих зображень розроблено багато алгоритмів, кожен з яких призначений для певного методу синтезу зображення. В статті розглянуті основні методи та алгоритми отримання синтезованих кольорових зображень з підвищеною роздільною здатністю, запропоновано метод, оснований на використанні субпіксельної обробки зображень для одержання кольорового зображення.

Методи багатоспектрального комплексування зображень

Під багатоспектральним комплексуванням зображень (multispectral image fusion, pan sharpening) розуміємо процес, який дає можливість отримати із зображень панхроматичного та багатоспектральних каналів одне зображення кращої якості [2, 5, 9]. Панхроматичний канал, як правило, має високу просторову роздільну здатність, а багатоспектральний – низьку. Наприклад, для супутника QuickBird-2: роздільна здатність панхроматичного каналу – 0,6 метра, а багатоспектрального 2,4 м [3, 5]. На рис. 1 наведено результати комплексування зображень вказаних вище каналів.

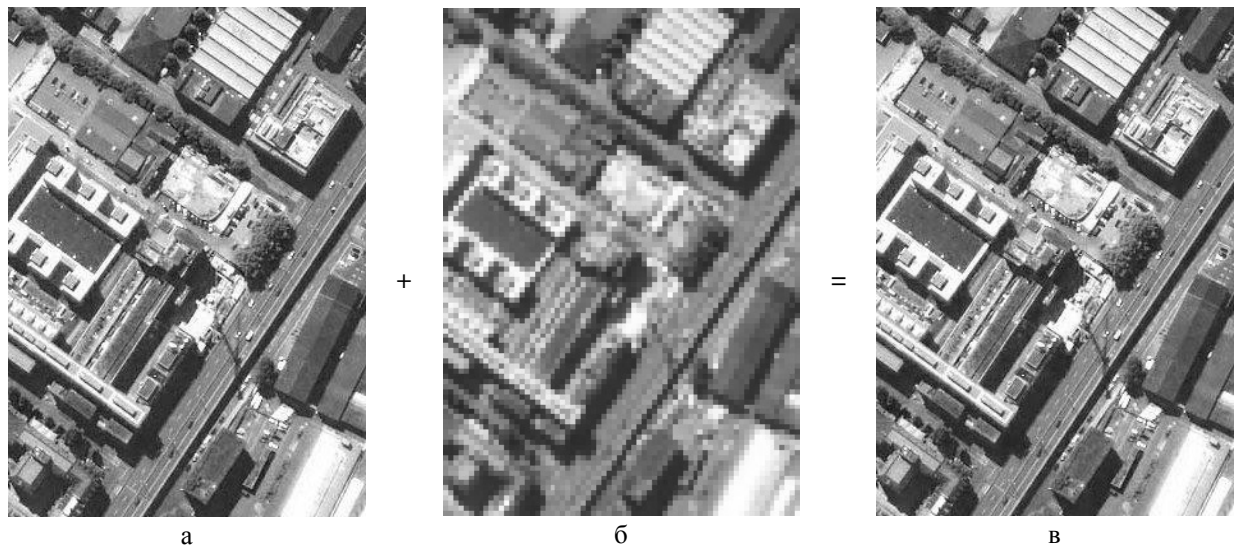


Рис. 1. Багатоспектральне комплексування зображень: а – панхроматичне зображення (роздільна здатність 0,6 м); б – багатоспектральне зображення (три канали: синій, зелений, червоний; роздільна здатність 2,4 м); в – результат комплексування

Процедура формування кольорового зображення високої роздільної здатності складається з таких етапів [6, 9]:

- Перетворення багатоспектрального зображення низької роздільної здатності з базису червоний-зелений-синій (RGB) в трикоординатний базис, в якому одна з координат еквівалентна розподілу яскравості й може бути замінена панхроматичним зображенням.
- Підвищення частоти дискретизації перетвореного зображення до частоти дискретизації панхроматичного зображення. Після цього проводиться процедура інтерполяції, наприклад, метод найближчого сусіда, білінійна, біквадратична, бікубічна інтерполяція, В-сплайн-інтерполяція.
- Заміна компонентів яскравості перетвореного зображення панхроматичним зображенням з високою роздільною здатністю.
- Зворотне перетворення у базис RGB.

Для підвищення роздільної здатності багатоспектральних кольорових зображень за рахунок панхроматичного каналу розроблено багато методів, наприклад:

- метод прямого синтезу зображення [6];
- метод зваженого усереднення [5];
- перетворення інтенсивність–відтінок–насиченість (Intensity – Hue – Saturation IHS) [7];
- синтез на основі методу головних компонентів (Principal Component Analysis PCA) [5];
- метод арифметичних комбінацій на основі перетворення Брові [8];
- перетворення Грама–Шмідта [9];
- на основі вейвлет-перетворень [6].

Метод прямого синтезу зображення полягає у заміні даних, які відповідають інтенсивності одного з багатоспектральних каналів, даними панхроматичного каналу високої роздільної здатності [6]. Перевагою цього методу є проста реалізація, недоліком – порушення колірності зображення.

Під час реалізації зваженого усереднення проводиться масштабування багатоспектрального зображення до розмірів панхроматичного. Після цього кожний елемент результуючого зображення обчислюється за формулою:

$$F_{i,j} = wP_{i,j} + (w-1)M'_{i,j}, \quad (1)$$

де w – ваговий коефіцієнт; F – результуюче зображення; P – панхроматичне зображення; M – багатоспектральне зображення.

У разі використання методу перетворення інтенсивність–відтінок–насиченість кольорове зображення з базису RGB трансформується в три окремі зображення, кожне з яких має

характеристики – інтенсивності (I), відтінків кольорів (H), насиченості (S). IHS-перетворення описується такими відношеннями [7]:

$$\begin{aligned}
 I &= R + G + B \\
 S &= 1 - \frac{3 \cdot \min(R, G, B)}{I} \\
 H &= \begin{cases} 2 - \arccos \left\{ \frac{(R - G) + (R - B)}{2\sqrt{(R - G)^2 + (R - G)(G - B)}} \right\} & , B > G \\ \arccos \left\{ \frac{(R - G) + (R - B)}{2\sqrt{(R - G)^2 + (R - G)(G - B)}} \right\} & , B \leq G \end{cases}
 \end{aligned} \quad (2)$$

де I, H, S – значення інтенсивності (яскравості) піксела в каналах інтенсивність–відтінок–насиченість; R, G, B – значення яскравості піксела зображень в спектральних каналах.

Основними етапами цього методу є трансформація кольорового зображення з базису RGB в базис IHS, заміна компонента I (інтенсивність) компонентами панхроматичного зображення високої роздільної здатності, зворотна трансформація замічених компонентів з базису IHS у RGB базис для отримання комплексованого зображення високої роздільної здатності [7, 9]. Цей метод незначно спотворює передавання кольору.

Перетворення Брові основане на спектральному моделюванні. Це перетворення використовує метод, в якому значення яскравості кожного піксела багатоспектрального зображення множиться на відношення значення яскравості відповідного піксела панхроматичного зображення до суми яскравостей всіх каналів багатоспектрального зображення.

$$R' = \frac{R}{(R + G + B)} \cdot P, \quad G' = \frac{G}{(R + G + B)} \cdot P, \quad B' = \frac{B}{(R + G + B)} \cdot P, \quad (3)$$

де R', G', B' – значення інтенсивностей спектральних каналів сформованого багатоспектрального зображення високої роздільної здатності [8].

При цьому передбачається, що спектральний діапазон панхроматичного зображення відповідає спектральному діапазону багатоспектрального зображення.

Перетворення Грама–Шмідта розроблено для отримання ортогональних каналів із каналів з відомою кореляцією. Наприклад, для трьох каналів RGB коефіцієнти кореляції:

$$r_{RG} = E[R, G], \quad r_{GB} = E[G, B], \quad r_{RB} = E[R, B]. \quad (4)$$

Першим кроком у цьому методі є створення зображення панхроматичного каналу з низькою роздільною здатністю за допомогою обчислення середнього зваженого багатоспектральних каналів. Потім ці канали декорелюються з використанням алгоритму ортогоналізації Грама–Шмідта, і кожен канал вважається одним багатовимірним вектором. Цей змодельований панхроматичний канал з низькою роздільною здатністю використовується як перший вектор. Надалі він замінюється панхроматичним каналом з високою роздільною здатністю, що дає можливість сформулювати багатоспектральне зображення високої роздільної здатності [9].

Реалізація дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) за Хааром здійснюється так: виконуючи ДВП над об'єктом P , одержуємо об'єкт P' ; об'єкт M масштабується до розміру P за допомогою апроксимації, утворюючи об'єкт M' ; проміжний результат отримуємо, замінюючи коефіцієнти апроксимації P' на M' . На завершення виконують зворотне ДВП, отримуючи результат.

У [6] представлено результати обробки тестових зображень і фрагментів реальних космічних знімків і визначено методи, що забезпечують підвищення роздільної здатності комплексованого зображення та вносять найменше спотворення у передавання кольору. Найкращим за цими показниками виявився метод Брові, відтак метод IHS, метод Грама–Шмідта і метод головних компонент.

Використання субпіксельної обробки в методах багатоспектрального комплексування зображень

Для підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень пропонується використати субпіксельну обробку з урахуванням впливу апертури пікселя [10, 11]. Процес формування комплексованого зображення з двох низькороздільних зображень полягає у формуванні розрідженої матриці з елементів двох зображень з подальшою фільтрацією низькочастотним фільтром.

Для відновлення зображення використовується регуляризація Тихонова

$$W(w) = \frac{H^*(w)}{|H(w)|^2 + aQ(w)} \quad (5)$$

де $H^*(\omega)$ – комплексно-спряжена функція $H(\omega)$; $Q(\omega)$ – функція регуляризації; a – параметр регуляризації.

Процес формування зображення в частотній області описується так:

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + H(u, v)F(u + 0.5, v) + H(u, v)F(u, v + 0.5) + H(u, v)F(u + 0.5, v + 0.5) + N(u, v) \quad (6)$$

Після застосування регуляризації Тихонова на спектр комбінованого зображення отримують відновлене зображення

$$\hat{F}(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + a|Q(u, v)|^2} G(u, v) \quad (7)$$

де $Q(u, v)$ – функція регуляризації; a – параметр регуляризації.

Так, на рис. 2 зображено блок-схеми алгоритмів підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень з використанням субпіксельної обробки під час формування панхроматичного зображення для методів Брові та IHS. Панхроматичне зображення розміром $2N \times 2M$ (N, M – кількість пікселів зображення одного з давачів) сформоване із двох панхроматичних зображень розміром $N \times M = 500 \times 500$ пікселів за допомогою давачів, зсунутих один відносно другого на половину пікселя. Багатоспектральне зображення сформоване розміром 125×125 пікселів. У результаті моделювання сформовано зображення з розміром 1000×1000 пікселів. Так вдалося ефективно підвищити роздільну здатність багатоспектрального зображення зі збільшенням останнього у вісім разів.

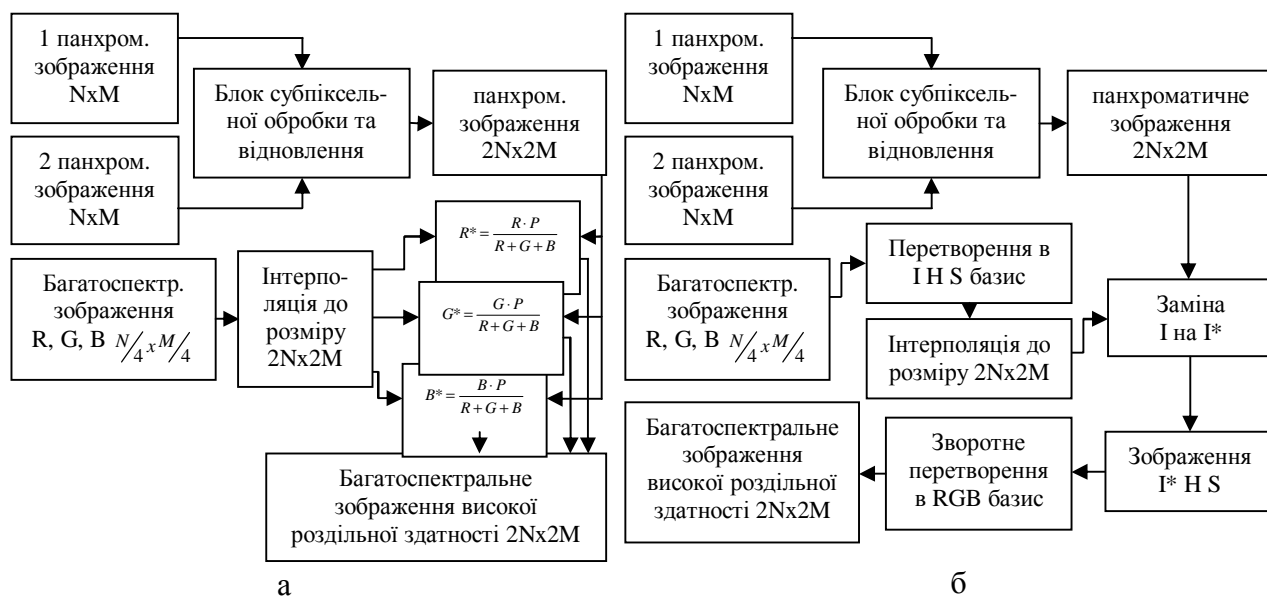


Рис. 2. Блок-схеми алгоритмів підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень з використанням субпіксельної обробки: а – для методу Брові; б – для перетворення інтенсивність–відтінок–насиченість (IHS)

В табл. 2 наведені середньоквадратична похибка формування високороздільного зображення NMSE та коефіцієнт кореляції SSIM між тестовим та синтезованим багатоспектральними зображеннями.

Таблиця 2

Результати моделювання

Метод (зображення) \ Похибка	NMSE, %	SSIM
Метод Брові з субпіксельною обробкою	20,36	0,9793
Метод IHS з субпіксельною обробкою	20,63	0,9761
Метод Брові без субпіксельної обробки	35,09	0,9073
Низькороздільне багатоспектральне зобр.	43,45	0,5018

На рис. 3 наведені результати моделювання двох алгоритмів. Моделювання виконано в середовищі MATLAB. Комп'ютер, на базі якого проводилися дослідження, має процесор AMD A10-6800K з тактовою частотою 4,4 ГГц, чотири фізичні ядра, розмір доступної оперативної пам'яті становить 7,19 Гб. У результаті проведення моделювання доведено, що алгоритм на основі методу Брові має більшу швидкодію, ніж IHS, а саме: для формування багатоспектрального зображення розміром 1000×1000 пікселів методом Брові з двох панхроматичних зображень розміром 500×500 пікселів та багатоспектрального зображення розміром 125×125 пікселів потрібно 0,5215 с, а якщо використовувати метод IHS, за таких самих умов потрібно 0,7433 с.

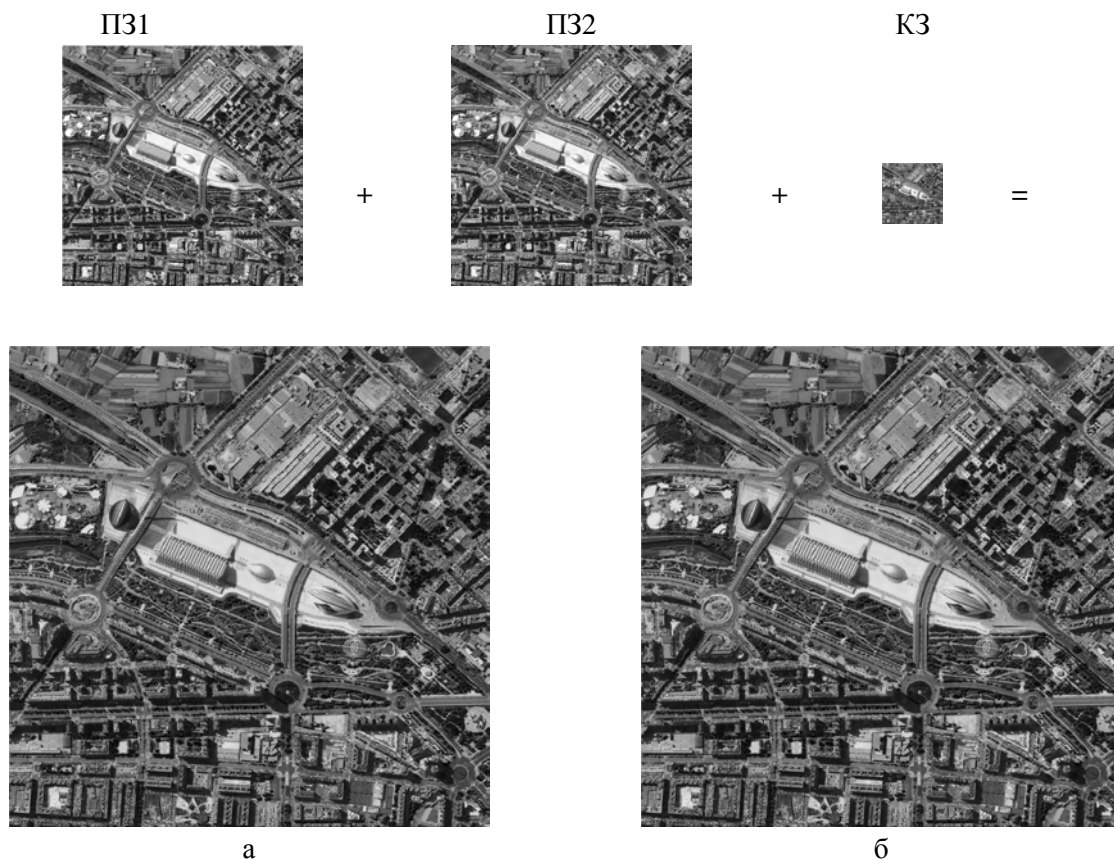


Рис. 3. Результати моделювання та відносні розміри зображень:
 а – метод Брові; б – метод IHS; ПЗ1, ПЗ2 – низькороздільні зображення панхроматичного каналу,
 КЗ – низькороздільне кольорове зображення

Висновки

У роботі проаналізовано способи підвищення роздільної здатності багатоспектральних зображень, вказано переваги та недоліки різних методів, а також запропоновано можливість використання технології субпіксельної обробки зображень. Удосконалено блок-схеми алгоритмів методів Брові та IHS з використанням субпіксельної обробки зображень. Визначено, що метод Брові має більшу швидкодію. Аналізуючи отримані зображення, підтверджено кращу передачу кольору та якість зображення, отриманого методом Брові. Завдяки субпіксельній обробці вдалося ефективно підвищити роздільну здатність багатоспектрального зображення. В майбутньому результати дослідження можна використовувати для підвищення роздільної здатності багатоспектральних систем моніторингу.

1. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений / Р. А. Шовенгердт // *Техносфера*. – М., 2010. – 560 с. 2. Lillo-Saavedra M. Multispectral images fusion by a joint multidirectional and multiresolution representation / M. Lillo-Saavedra, C. Gonzalo // *Int. J. Remote Sens.*, 2007, vol. 28, P. 4065-4079; 3. *Remote sensing data, satellite imagery archives*. – Retrieved from: <http://www.scanex.ru/en/data>; 4. Прудюс І. Н. Багаторівневе комплексування графічної інформації в системах дистанційного зондування / І. Н. Прудюс, Л. В. Лазько, С. О. Семенов // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. “Радіоелектроніка та телекомунікації”*. – 2007. – № 618. – С. 3–11. 5. Бабаков В. С. Слияние мультиспектральных изображений в задаче обработки спутниковых снимков / К. К. Титаренко, В. С. Бабаков // Четверта міжнародна науково-технічна конференція “Моделювання та комп’ютерна графіка – 2011”, Донецьк, ДонНТУ, 5–8 жовтня 2011 р. – С. 25–29. 6. Коберниченко В. Г. Методы синтеза изображений на основе данных дистанционного зондирования Земли различного разрешения / В. Г. Коберниченко, В. А. Тренихин // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2007. – № 4. – С. 22–31. 7. Chena C. M. Fusion of hyperspectral and radar data using the HIS transformation to enhance urban surface features / C. M. Chena, G. F. Hepnerb, R. R. Forsterb // *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003. – Vol. 58, P. 19–30. 8. Ningyu Zhang. Effects of Brovey Transform and Wavelet Transform on the Information Capacity of SPOT-5 Imagery / Ningyu Zhang, Quanyuan Wub // *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007 Proc. of SPIE Vol. 6623 66230W-1*, June 2007, – P.2690–2695. 9. Price J. C. Combining multispectral data of different spatial resolution / J. C. Price // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999. – Vol. 37, No. 3, P. 1199–1203. 10. Фабіровський С. Є. Субпіксельна обробка зображень у системах моніторингу видимого діапазону хвиль / С. Є. Фабіровський // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”* – 2014. – № 796: *Радіоелектроніка та телекомунікації*. – С. 49–53. 11. Fabirovskyy Sergiy. Simulation of subpixel image processing in optical monitoring systems / Sergiy Fabirovskyy, Ivan Prudyus, Victor Tkachenko, Leonid Lazko // *MIKON 2014: intern. conf, June 16–18*. – P. 74–76.