

Przegląd metod oceny jakości wyników integracji obrazów panchromatycznych i wielospektralnych

Review of quality assessment methods of image fusion results

Katarzyna OSIŃSKA-SKOTAK

Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji
i Systemów Informacji Przestrzennej
Wydział Geodezji i Kartografii
Politechnika Warszawska

Abstract

The article presents an overview of different approaches and methods to evaluate spectral and spatial quality of image fusion results. This technique allows integrate the geometric detail of high-resolution panchromatic image and the spectral information of low-resolution multispectral image to produce high-resolution multispectral image. This new image can be used for more detailed analyses. However, in order to carry out a quantitative analysis, e.g. biomass estimation, it is necessary to preserve the spectral characteristics of the original multispectral image. This is among other the reason for the development of new algorithms for image fusion and methods for assessing the quality of their results.

Key words: image fusion, spatial quality, spectral quality

Słowa kluczowe: integracja danych obrazowych, jakość przestrzenna, jakość spektralna

Wprowadzenie

W ciągu ostatnich kilkunastu lat nastąpił bardzo intensywny rozwój wysokorozdzielczych technik satelitarnych. Na orbity okołozemskie wprowadzane są kolejne systemy satelitarne, które umożliwiają dokonywanie rejestracji obrazów o coraz wyższej rozdzielczości przestrzennej. Najwyższą rozdzielczością charakteryzują się obrazy panchromatyczne, niosące informacje w jednym stosunkowo szerokim zakresie widma widzialnego. Ich niewątpliwym atutem jest bardzo wysoka rozdzielczość przestrzenna (obecnie sięgająca 30 cm). Z kolei obrazy wielospektralne, cechujące się niższą rozdzielczością przestrzenną niosą znacznie więcej informacji o naturze i właściwościach obiektu. Aby jak najlepiej wykorzystać potencjał interpretacyjny panchromatycznych obrazów satelitarnych oraz obrazów wielospektralnych stosowane są specjalne procedury obliczeniowe pozwalające na dokonanie łączenia/integracji (ang. *image fusion* lub *image merge*) wysokorozdzielczych obrazów panchromatycznych z obrazem wielospektralnym o niższej

rozdzielczości przestrzennej, ale wyższej rozdzielczości spektralnej. W efekcie uzyskuje się obraz wielospektralny o wyższej rozdzielczości przestrzennej, dzięki czemu uzyskujemy dużą czytelność detali, szczegółów terenowych, przy jednoczesnym zachowaniu właściwości obrazu wielospektralnego. Metod pozwalających na dokonanie tego rodzaju integracji jest bardzo wiele, ale mimo to nieustannie trwają prace nad stworzeniem coraz to lepszych algorytmów.

Z punktu widzenia interpretacji wizualnej zdjęcia satelitarnego najważniejsze jest uzyskanie obrazu barwnego, który pozwoli na jak najlepsze uwypuklenie zróżnicowania różnych obiektów pod względem barwy i tekstury. W tym przypadku nie jest konieczne zachowanie charakterystyki radiometrycznej zestawu danych wejściowych. Istotą jest uzyskanie jak najlepszego efektu wizualnego, bez specjalnej dbałości o zachowanie właściwości spektralnych obiektów, lecz z wyjątkową dbałością o zachowanie kolorystyki bez tzw. zniekształceń barwy oraz z jak najlepszym wzmocnieniem zdjęcia wielospektralnego w sensie przestrzennym.

W przypadku metod automatycznej ekstrakcji informacji na drodze klasyfikacji cyfrowej mamy do czynienia z sytuacją odmienną, niż ma to miejsce przy interpretacji wizualnej. Dane wejściowe do wykonania klasyfikacji cyfrowej, w klasycznym podejściu pikselowym, powinny spełniać określone warunki. Teoretycznie rzecz rozważając, spektralne właściwości obrazu, będącego wynikiem łączenia danych panchromatycznych i wielospektralnych, powinny być takie same jak źródłowego obrazu wielospektralnego. Wówczas klasyfikacja treści obrazu w sposób automatyczny czy półautomatyczny może być realizowana w klasycznym podejściu, wykorzystując znane charakterystyki spektralne obiektów. W przypadku obrazów, które nie zachowują w żadnym stopniu zgodności spektralnej z oryginalnymi danymi wielospektralnymi, trudno przewidzieć, jaki przebieg może mieć klasyfikacja i czy uzyskana klasa reprezentuje ten sam rodzaj obiektu. Wykonując klasyfikację danych, będących wynikiem integracji obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej, należy więc zdawać sobie sprawę z tego, z jakimi danymi mamy do czynienia. Jeśli nie mamy wiedzy na ten temat, najwłaściwszym podejściem będzie próba wykonania klasyfikacji nienadzorowanej, która umożliwi nam uzyskanie wstępnej klasyfikacji oraz ocenę możliwości dokonania delimitacji poszczególnych typów obiektów. Czasami dystrybutorzy obrazów satelitarnych sprzedają gotowy obraz typu *pansharpened*, którego dokładnych właściwości w porównaniu z danymi oryginalnymi nie znamy. W literaturze światowej spotyka się próby wykonywania klasyfikacji na obrazach syntetycznych (PAN+MS), które nie zachowują podobieństwa do oryginalnych danych wielospektralnych, jednak wyniki te nie są najlepsze. Zachowanie jakości spektralnej obrazów wynikowych jest jeszcze ważniejsze w sytuacji, gdy w dalszych badaniach korzystamy z obrazów wskaźnikowych, np. wskaźnika roślinności NDVI. Dlatego dąży się do tego, aby obraz uzyskany w wyniku łączenia danych PAN i MS miał jak najbardziej zbliżoną charakterystykę radiometryczną do oryginalnego obrazu wielospektralnego.

Ważnym elementem oceny skuteczności działania algorytmów integracji danych o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej jest ocena jakości spektralnej i przestrzennej obrazów wynikowych. Jakość obrazów uzyskanych w wyniku integracji obrazu panchromatycznego o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej z obrazem wielospektralnym o niższej rozdzielczości przestrzennej można ocenić w sposób wizualny albo formalny, przy zastosowaniu wskaźników statystycznych.

Ocena wizualna

Ocena wizualna wyniku integracji obrazu panchromatycznego o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej z obrazem wielospektralnym o niższej rozdzielczości przestrzennej polega na wizualnej analizie i porównaniu kompozycji barwnej, stworzonej na podstawie no-

wopowstałego obrazu wielospektralnego o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej zarówno z analogiczną kompozycją barwną, utworzoną na podstawie źródłowego obrazu wielospektralnego, jak również z obrazem panchromatycznym. Ocena wizualna koncentruje się przede wszystkim na określeniu stopnia zachowania barw względem źródłowego obrazu wielospektralnego oraz na ocenie stopnia wzmocnienia przestrzennego obrazu w porównaniu z obrazem panchromatycznym. Tego rodzaju podejście jest oceną subiektywną, zależną od preferencji, doświadczenia i odczucia osoby oceniającej dany obraz. Oznacza to, że ocena wizualna dokonana przez dwie osoby może dać odmienne rezultaty. Czasami – przy ocenie wizualnej – stosuje się technikę zwaną Mean Opinion Score (MOS), w której obliczana jest wartość średnia z ocen wykonanych przez wiele osób, o różnym doświadczeniu: od profesjonalnych interpretatorów począwszy a na amatorach skończywszy. Ocena taka przeprowadzana jest na ogół według określonego wcześniej systemu ocen, np. 5 – bardzo dobra jakość (brak zniekształceń barwnych), 4 – dobra jakość obrazu (nieznaczne różnice barwy), 3 – jakość obrazu dostateczna (dostrzegalne różnice barwy), 2 – zła jakość obrazu (znaczne różnice barw), 1 – bardzo zła jakość obrazu (bardzo duże różnice barwy). Oczywiście kategoryzacja ocen może być bardzo rozbudowana i zawierać szereg cech obrazu, jak np. zniekształcenie barwy, ostrość obrazu.

Ocena formalna

Ocena formalna jest oceną obiektywną, niezależną od operatora. W literaturze światowej można spotkać różnego rodzaju propozycje sposobów dokonywania formalnej oceny jakości wyników integracji danych o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej. Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane metody oceny jakości obrazów wynikowych integracji obrazu panchromatycznego o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej z obrazem wielospektralnym o niższej rozdzielczości. Ocena formalna jest dokonywana pod względem jakości spektralnej oraz jakości przestrzennej.

Ocena jakości spektralnej. Do określenia jakości spektralnej rezultatów integracji obrazów PAN i MS wykorzystuje się najczęściej porównanie różnych charakterystyk statystycznych opisujących te dwa obrazy, m.in. takich jak: wartość średnia, minimum, maksimum, moda, mediana, odchylenie standardowe, histogram dla poszczególnych zakresów spektralnych, korelacja między poszczególnymi zakresami spektralnymi, macierz wariancyjno-kowariancyjna, współczynnik korelacji pomiędzy danymi oryginalnymi a wynikami poszczególnych przetworzeń. Jednak ich oddzielna analiza nie daje jednoznacznej odpowiedzi na temat jakości wyników integracji.

Korelacja pomiędzy oryginalnymi kanałami spektralnymi obrazu wielospektralnego a kanałami spektralnymi obrazu uzyskanego w wyniku integracji obrazów

panchromatycznego i wielospektralnego wskazuje na podobieństwo obu obrazów. Im współczynnik korelacji jest wyższy, tym większe jest podobieństwo/zgodność spektralna porównywanych obrazów, co nie zawsze oznacza, że wartości radiometryczne w obu obrazach są zbliżone. Korelacja między wspomnianymi obrazami wyraża się następującym wzorem:

$$\text{cor}(MS_k, PMS_k) = \frac{\sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R (MS_{k,i,j} - \mu_{MS_k}) \cdot (PMS_{k,i,j} - \mu_{PMS_k})}{\sqrt{\sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R (MS_{k,i,j} - \mu_{MS_k})^2 (PMS_{k,i,j} - \mu_{PMS_k})^2}}$$

gdzie: μ_{MS_k} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym źródłowego obrazu wielospektralnego, μ_{PMS_k} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym obrazu wielospektralnego o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej, $MS_{k,i,j}$ – wartość radiometryczna piksela w i-tym wierszu i j-tej kolumnie w k-tym kanale spektralnym źródłowego obrazu wielospektralnego, $PMS_{k,i,j}$ – wartość radiometryczna piksela w i-tym wierszu i j-tej kolumnie w k-tym kanale spektralnym obrazu wielospektralnego o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej (PAN+MS), R – liczba wierszy w obrazie, C – liczba kolumn w obrazie.

Inną możliwością porównania dwóch obrazów jest obliczenie różnicy między wartościami średnimi w poszczególnych kanałach spektralnych obrazu oryginalnego μ_{MS_k} i obrazu uzyskanego na drodze integracji danych panchromatycznych i wielospektralnych μ_{PMS_k} :

$$\Delta\mu_k = \mu_{MS_k} - \mu_{PMS_k}$$

oraz obliczenie różnicy pomiędzy wartością odchylenia standardowego w poszczególnych kanałach spektralnych obrazu oryginalnego σ_{MS_k} oraz odchylenia standardowego obrazu będącego wynikiem integracji danych panchromatycznych i wielospektralnych σ_{PMS_k} :

$$\Delta\sigma_k = \sigma_{MS_k} - \sigma_{PMS_k}.$$

Parametry te wykorzystywali w swoich pracach m.in. Eshtehardi i in. (2007).

Korzystając z podstawowych parametrów statystycznych, jakimi są wartość średnia i odchylenie standardowe można obliczyć również (Bolorani, 2008) dla każdego kanału spektralnego oddzielnie:

– względną różnicę wartości średniej (ang. *relative difference of means*):

$$r\Delta\mu_k = \frac{\mu_{MS_k} - \mu_{PMS_k}}{\mu_{PMS_k}}$$

– względną różnicę wariancji danych (ang. *relative difference of ariances*):

$$r\Delta\delta_k = \frac{\sigma_{MS_k}^2 - \sigma_{PMS_k}^2}{\sigma_{PMS_k}^2}$$

Wald (2002) do oceny jakości spektralnej obrazu wynikowego integracji danych panchromatycznych i wielo-

spektralnych zaproponował zastosowanie następującego parametru:

$$RMS_k = bias_k^2 + \sigma_k^2$$

gdzie:

$$bias_k = \mu_{MS_k} - \mu_{PMS_k}$$

$$\sigma_k = \sigma_{MS_k} + \sigma_{PMS_k}.$$

Interpretacja wymienionych wyżej wskaźników jest następująca: im niższa jest ich wartość, tym lepszej jakości jest obraz wynikowy. Jednakże słabość tych wskaźników polega na tym, że statystyki globalne, jakimi są wartość średnia i odchylenie standardowe, nie zawsze wskazują na występowanie lokalnych zmian w wartościach radiometrycznych.

Jedną z metod proponowanych do oceny zgodności spektralnej dwóch ocenianych obrazów jest obliczenie różnic w wartościach pikseli dla każdego kanału spektralnego pomiędzy wynikiem integracji obrazów PAN+MS a oryginalnym obrazem wielospektralnym. Wówczas miarą jakości spektralnej wyniku integracji obrazu wielospektralnego i obrazu panchromatycznego, mierzoną oddzielnie dla każdego kanału spektralnego może być średnia różnica pomiędzy wartościami pikseli obrazu PAN+MS i obrazu MS (Chaves i in., 1991):

$$\overline{\Delta DN_k} = \frac{1}{C \cdot R} \sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R |DN_{PMS_{k,i,j}} - DN_{MS_{k,i,j}}|.$$

Także odchylenie standardowe obliczone dla obrazu różnic wartości pikseli obrazu wyostrzonego (PAN+MS) i oryginalnego obrazu wielospektralnego (MS) może być kolejną miarą charakteryzującą jakość wyniku integracji obrazów panchromatycznego i wielospektralnego. Im niższa jest wartość odchylenia standardowego dla obrazu różnicowego, tym wyższa zgodność radiometrii obrazu wynikowego i źródłowego obrazu wielospektralnego.

Kolejnym wskaźnikiem, wykorzystywanym m.in. przez Eshtehardi i in. (2007), jest znormalizowana różnica bezwzględna pomiędzy wartościami pikseli obrazu po integracji danych panchromatycznych i wielospektralnych a wartościami odpowiadających im pikseli w obrazie oryginalnym (ang. *Deviation Index*):

$$DI_k = \frac{1}{C \cdot R} \sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R \frac{|PMS_{k,i,j} - MS_{k,i,j}|}{MS_{k,i,j}}$$

Również w tym przypadku, im niższa wartość wskaźnika, tym lepszy jest rezultat działania algorytmu integracji danych panchromatycznych i wielospektralnych.

Munehika i in. (1993) zaproponowali z kolei do oceny jakości spektralnej wyników integracji danych PAN i MS błąd RMS obliczany na podstawie wartości pikseli po integracji danych PAN i MS w odniesieniu do wartości oryginalnego obrazu wielospektralnego MS:

$$RMS_k = \sqrt{\frac{1}{C \cdot R} \sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R (PMS_{k,i,j} - MS_{k,i,j})^2}.$$

Zaproponowali także, aby błąd całkowity dla n-kanalowego obrazu obliczać jako sumę błędów RMS_k dla poszczególnych kanałów spektralnych.

Odmianą propozycją jest proponowany przez Winklera (Bolorani, 2008 za Winkler, 2005) wskaźnik PSNR (ang. *Peak Signal to Noise Ratio*), który można obliczyć następująco:

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{Peak}{\sqrt{MSE_k}} \right)$$

gdzie *Peak* oznacza maksymalną możliwą do osiągnięcia wartość radiometryczną danego zbioru danych (czyli 255 w przypadku zapisu 8-bitowego, a 2048 w odniesieniu do zapisu 11-bitowego), zaś *MSE* jest średnim błędem kwadratowym, który określa stopień dystorsji radiometrycznej, liczonej jako:

$$MSE_k = \frac{1}{C \cdot R} \sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^R (MS_{k,i,j} - PMS_{k,i,j})^2$$

Z kolei Chavez i in. (1991) w swojej pracy do oceny jakości spektralnej obrazu PAN+MS wykorzystali odchylenie standardowe różnic pomiędzy obrazem PAN+MS i oryginalnym obrazem wielospektralnym oraz procent występowania różnic o wartości 0 lub 1. Przy zachowaniu dużej zgodności spektralnej oryginalnego obrazu wielospektralnego oraz obrazu wynikowego łączenia obrazów wielospektralnych i panchromatycznych procent występowania pomiędzy nimi różnic o wartości 0 lub 1 powinien być jak najbardziej zbliżony do 100%. W rzeczywistości sytuacja tego rodzaju występuje niezmiernie rzadko. Jednakże im wyższy udział procentowy takich pikseli, tym wyższa jest zgodność spektralna dwóch porównywanych obrazów.

Inną propozycją metody oceny jakości spektralnej wyników łączenia danych PAN i MS jest obliczenie odchylenia standardowego różnic pomiędzy wartościami znormalizowanego różnicowego wskaźnika roślinności NDVI obliczonego na podstawie danych PAN+MS a wartościami NDVI obliczonymi dla oryginalnych danych wielospektralnych MS (Tsakiri-Strati, 2002; Doxani i Stamou, 2004). Jest to jednak metoda, która porównuje jedynie dwa zakresy spektralne – czerwony i bliską podczerwień – a więc nie pozwala ona na przeprowadzenie oceny wyników łączenia danych PAN i MS w odniesieniu do wszystkich kanałów spektralnych. Jej wykorzystanie jest jednak zasadne przy zastosowaniach ukierunkowanych na badania roślinności, gdzie te dwa zakresy spektralne są najistotniejsze z punktu widzenia prowadzonych prac.

Dążenie naukowców do opracowania jak najbardziej wiarygodnych sposobów oceny jakości wyników łączenia obrazów o różnych rozdzielczościach doprowadziło do opracowania kilku wskaźników (Wald i in., 1997; Wang i Bovik, 2002; Alparone i in., 2004), które umożliwiają dokonanie obiektywnej, globalnej oceny jakości spektralnej obrazów typu *pansharpened* w porównaniu do oryginalnych obrazów wielospektralnych.

Obecnie najczęściej stosowanym, a zarazem podstawowym parametrem, który pozwala ocenić w sposób globalny jakość wyniku integracji obrazów wielospektralnego i panchromatycznego jest pierwiastek średniego błędu kwadratowego $RMSE_k$ wyrażony dla k-tego zakresu spektralnego w następujący sposób (Wald i in., 1997; Beaulieu i in., 2004):

$$RMSE_k = \sqrt{\frac{1}{C \cdot R} \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^R (MS_{k,i,j} - PMS_{k,i,j})^2}$$

Jest to wskaźnik stosowany szeroko w wielu dziedzinach, w tym w geodezji, metrologii.

Wald i in. (1997) zaproponowali do globalnej oceny jakości rezultatów integracji danych PAN i MS wskaźnik określony mianem ERGAS. Skrót pochodzi z języka francuskiego – *Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse* – i oznacza bezwymiarowy globalny błąd względny wyniku integracji. Obliczany jest w następujący sposób:

$$ERGAS = 100 \cdot \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{RMSE_k}{\mu_{MSk}} \right)^2}$$

gdzie: *n* – liczba zakresów spektralnych, *h* – rozmiar piksela obrazu panchromatycznego, *l* – rozmiar piksela obrazu wielospektralnego. Według autorów wartość błędu ERGAS mniejsza od 3 świadczy o satysfakcjonującej jakości uzyskanego wyniku integracji obrazów panchromatycznego i wielospektralnego w sensie zachowania spójności spektralnej z oryginalnym obrazem wielospektralnym.

W roku 2000 Ranchin i Wald zaproponowali do oceny jakości spektralnej wyników integracji obrazów PAN i MS parametr nazwany RASE, czyli ang. *Relative Average Spectral Error*, który przedstawia średni błąd względny dla dowolnej liczby kanałów spektralnych:

$$RASE_{\%} = 100 \cdot \frac{1}{\mu_{MS}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RMSE_k^2}$$

gdzie μ_{MS} oznacza wartość średnią dla wszystkich kanałów spektralnych, zaś $RMSE_k$ to pierwiastek średniego błędu kwadratowego k-tego kanału spektralnego.

Kolejną propozycją metody ocenienia jakości spektralnej obrazów uzyskanych w wyniku integracji danych panchromatycznych i wielospektralnych jest współczynnik *nQ%* (ang. *newQuantity*), zaproponowany przez Wald'a (2000), który jest uproszczoną formą wskaźnika ERGAS (nie uwzględnia wymiarów pikseli integrowanych obrazów):

$$nQ\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{RMSE_k^2}{\mu_{MSk}^2}}$$

Inne podejście do oceny jakości spektralnej obrazów PAN+MS stanowi wskaźnik SAM (ang. *Spectral Angle Mapper*), który ocenia zniekształcenia spektralne wpro-

wadzone w procesie integracji danych wielospektralnych i panchromatycznych (Garzelli i in., 2004). Wyraża się go w stopniach, a zdefiniowany jest jako:

$$\text{SAM} \doteq \arccos \left(\frac{\langle v, \hat{v} \rangle}{\|v\|_2 \cdot \|\hat{v}\|_2} \right)$$

gdzie: v oznacza wektor spektralny źródłowego obrazu wielospektralnego MS, a \hat{v} - oznacza wektor spektralny obrazu PAN+MS. Im niższa wartość SAM, tym wyższa zgodność spektralna dwóch porównywanych obrazów.

Wang i Bovik (2002) proponują z kolei do oceny jakości spektralnej wyników łączenia danych PAN i MS wskaźnik jakości zwany wskaźnikiem Q (czasami można spotkać określenie wskaźnik jakości UIQI – od ang. *Universal Image Quality Index*), który oblicza się dla każdego zakresu spektralnego oddzielnie:

$$Q = \frac{\sigma_{\text{MS,PMS}}}{\sigma_{\text{MS}} \cdot \sigma_{\text{PMS}}} \frac{2 \cdot \mu_{\text{MS}} \cdot \mu_{\text{PMS}}}{(\mu_{\text{MS}})^2 + (\mu_{\text{PMS}})^2} \frac{2 \cdot \sigma_{\text{MS}} \cdot \sigma_{\text{PMS}}}{\sigma_{\text{MS}}^2 + \sigma_{\text{PMS}}^2}$$

gdzie: μ_{MS} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym obrazu oryginalnego, μ_{PMS} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym obrazu przetworzonego, σ_{MS}^2 – wariancja w k-tym kanale spektralnym obrazu oryginalnego, σ_{PMS}^2 – wariancja w k-tym kanale spektralnym obrazu typu przetworzonego, $\sigma_{\text{MS,PMS}}$ – kowariancja między k-tym kanałem spektralnym oryginalnego obrazu wielospektralnego a k-tym kanałem spektralnym obrazu przetworzonego.

Ten wskaźnik rozwinięto w wyniku modelowania wszystkich możliwych zniekształceń obrazu. Stanowi on kombinację trzech najważniejszych czynników, jakimi są: korelacja, zniekształcenia radiometrii i zniekształcenia kontrastu (Wang, 2002). Pierwsza składowa mówi o korelacji między obrazem wielospektralnym oraz wynikiem integracji obrazów panchromatycznego i wielospektralnego, drugi jest miarą bliskości średniej jasności (ang. *luminance*) obrazów, zaś trzeci jest miarą podobieństwa kontrastu dwóch analizowanych obrazów. Uwzględnia on kilka różnych parametrów statystycznych charakteryzujących zestaw danych, a wartość średnia tego wskaźnika według jego autorów pozwala na ocenę globalną uzyskanych wyników. Wskaźnik ten najczęściej podawany jest w następującej formie:

$$Q = \frac{4 \cdot \sigma_{\text{MS,PMS}} \cdot \mu_{\text{MS}} \cdot \mu_{\text{PMS}}}{(\sigma_{\text{MS}}^2 + \sigma_{\text{PMS}}^2) \cdot [(\mu_{\text{MS}})^2 + (\mu_{\text{PMS}})^2]}$$

Im jego wartość bliższa jest 1, tym lepszy – pod względem zachowania właściwości spektralnych – jest wynik integracji obrazów wielospektralnych i panchromatycznych.

Wskaźnik SSIM (ang. Structure Similarity Index), zaproponowany przez Wang'a i in. (2004), to z kolei metoda stanowiąca kombinację porównania trzech czynników: jasności, kontrastu i struktury. Metoda stosowana jest lokalnie w oknie o wymiarze 8×8. Okno to jest przesuwane piksel po pikselu przez cały obraz i w każdym

roku (kolejnym położeniu okna) obliczane są lokalne statystyki oraz wartość wskaźnika SSIM. Wartość wskaźnika zmienia się od 0 do 1. Wartość zbliżona do 1 oznacza największe podobieństwo dwóch analizowanych obrazów. Wskaźnik SSIM jest rozszerzoną wersją wskaźnika Q. Filozofia tego wskaźnika bazuje na fakcie, iż jasność powierzchni obserwowanego obiektu jest wynikiem oświetlenia i współczynnika odbicia, ale struktura obiektu jest niezależna od oświetlenia (Wang i in., 2004). We wskaźniku SSIM niezależnie obliczane są trzy składowe: jasność L, kontrast C i struktura S:

$$L_{\text{PMS,MS}} = \frac{2 \cdot \mu_{\text{PMS}} \cdot \mu_{\text{MS}} + C_1}{\mu_{\text{PMS}}^2 + \mu_{\text{MS}}^2 + C_1}$$

$$C_{\text{PMS,MS}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{PMS}} \cdot \sigma_{\text{MS}} + C_2}{\sigma_{\text{PMS}}^2 + \sigma_{\text{MS}}^2 + C_2}$$

$$S_{\text{PMS,MS}} = \frac{\sigma_{\text{PMS}} + C_3}{\sigma_{\text{PMS}} \cdot \sigma_{\text{MS}} + C_3}$$

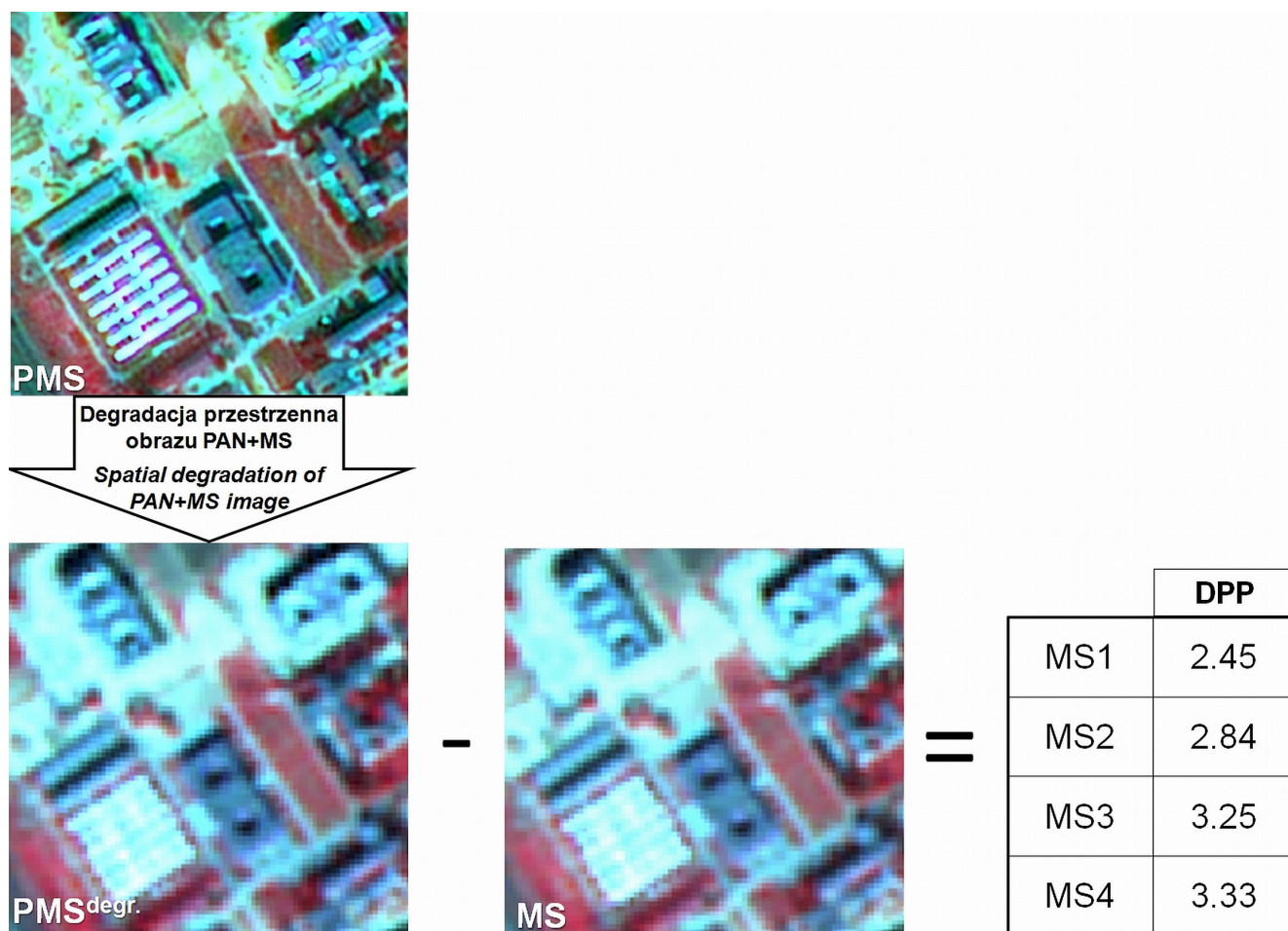
Kombinacja tych trzech składowych prowadzi do uogólnionego wskaźnika jakości obrazu, zwanego podobieństwem strukturalnym (SSIM):

$$\text{SSIM}_{\text{PMS,MS}} = \frac{(2 \cdot \mu_{\text{MS}} \cdot \mu_{\text{PMS}} + C_1)(2 \cdot \sigma_{\text{PMS}} + C_2)}{(\mu_{\text{MS}}^2 + \mu_{\text{PMS}}^2 + C_1)(\sigma_{\text{MS}}^2 + \sigma_{\text{PMS}}^2 + C_2)}$$

gdzie: $C_1 = (K_1 D)$, w którym D oznacza zakres dynamiczny wartości pikseli (np. 255 dla 8bitowego zapisu obrazu), a K_1 to wartość stała. Analogicznie zdefiniowane są C_2 i C_3 , zastosowane do porównania kontrastu i struktury.

Interesujące podejście do oceny jakości spektralnej obrazu PAN+MS zaproponował Wald (2002). Proponuje on, aby określić średnie zniekształcenie spektralne w odniesieniu do pikseli obrazu wielospektralnego, tzw. *Deviation Per Pixel*. Wyszedł on z założenia, iż dwa obrazy mogą być porównywane jedynie wtedy, gdy mają taki sam rozmiar pikseli i tylko tego rodzaju porównanie jest właściwie, jeśli ocena dokonywana jest w odniesieniu do oryginalnego obrazu wielospektralnego. Dlatego najpierw należy dokonać degradacji rozdzielczości przestrzennej obrazu będącego wynikiem integracji danych PAN i MS do rozdzielczości odpowiadającej oryginalnemu obrazowi wielospektralnemu, a następnie obraz ten należy odjąć od oryginalnego obrazu wielospektralnego (Rys. 1). W ten sposób uzyskuje się informację o zniekształceniu spektralnym w obrębie pojedynczego pikseli o wielkości odpowiadającej pikselowi obrazu referencyjnego (MS). Miarą tego zniekształcenia jest średnia różnica pomiędzy wartościami pikseli źródłowego obrazu wielospektralnego i wartościami pikseli zdegradowanego obrazu PAN+MS.

Przytoczone powyżej wskaźniki jakości spektralnej wyników integracji obrazów wielospektralnego i panchromatycznego charakteryzuje różny stopień skomplikowania obliczeń, ale także mają one różną interpretację. Niektóre z nich wykorzystują globalne parametry



Ryc. 1. Idea oceny jakości spektralnej za pomocą wskaźnika *Deviation Per Pixel* (Osińska-Skotak, 2011).

Fig. 1. The idea of the spectral quality assessment using an index *Deviation Per Pixel* (Osińska-Skotak, 2011).

statystyczne, a inne są miarą lokalnych zniekształceń radiometrycznych. Według Wald'a (2000) idealny wskaźnik jakości powinien spełniać trzy kryteria:

1. powinien być niezależny od jednostek (sposobu zapisu danych wejściowych: wartość radiometryczna, radiancja energetyczna, odbicie spektralne);
2. powinien być niezależny od liczby rozważanych zakresów spektralnych;
3. powinien być niezależny od ilorazu h/l , gdzie h oznacza rozmiar piksela obrazu wysokiej rozdzielczości przestrzennej, a l rozmiar piksela obrazu niskiej rozdzielczości przestrzennej.

Wszystkie te kryteria spełnia wskaźnik jakości ER-GAS.

W literaturze światowej od wielu lat toczy się dyskusja na temat sposobów dokonywania oceny jakości wyników integracji obrazów wielospektralnego i panchromatycznego. Dotyczy ona wielu aspektów, w tym stosowanych wskaźników jakości spektralnej, czy metodyki ich obliczania. Z punktu widzenia metodyki dokonywania oceny jakości spektralnej można wyróżnić dwa podejścia:

1. tzw. protokół Wald'a (1997), wg którego, aby dokonać oceny jakości wyniku integracji obrazów wielospektralnego i panchromatycznego, należy go najpierw

zdegradować do rozmiaru piksela oryginalnego obrazu wielospektralnego, a następnie tak przygotowany obraz można poddać ocenie jakości. Wald i in. (1997) uważają, że ocena jakości integracji może być dokonywana jedynie na tym samym poziomie szczegółowości, a ponieważ nie ma możliwości porównania źródłowego wysokorozdzielczego obrazu wielospektralnego z wynikami integracji, to ocena taka powinna być zrealizowana na poziomie rozdzielczości oryginalnego obrazu wielospektralnego;

2. tzw. protokół Zhou (1998), wg którego ocena jakości produktu obrazowego typu *pansharpened* powinna następować w pełnej rozdzielczości przestrzennej, czyli w skali, w której pracuje użytkownik takiego produktu. Dlatego zniekształcenia spektralne są obliczane na podstawie porównania wyniku integracji obrazów wielospektralnego i panchromatycznego oraz oryginalnego obrazu wielospektralnego przepróbowanego do rozmiaru piksela odpowiadającego obrazowi typu *pansharpened*.

Ocena jakości przestrzennej. Metod oceny jakości przestrzennej wyników integracji danych wielospektralnych i panchromatycznych jest znacznie mniej niż ma to miejsce w przypadku oceny ich jakości spektralnej.

Najprostszym podejściem do tej kwestii mogłoby się wydawać zastosowanie współczynnika korelacji pomiędzy obrazem panchromatycznym a każdym z zakresów spektralnych obrazu wyostrzonego PAN+MS. Teoretycznie rzecz ujmując, jeśli współczynnik korelacji między tymi dwoma obrazami jest wysoki, to świadczy to o ich wysokiej zgodności. Jednak tego rodzaju rozwiązanie ma wadę, na wartość współczynnika korelacji wpływ będzie miała zarówno z informacja przestrzenna, jak i spektralna.

Stąd inną metodą dokonania oceny jakości przestrzennej obrazu uzyskanego w wyniku łączenia danych wielospektralnych i panchromatycznych jest wykorzystanie filtracji górnoprzepustowej oraz obliczenie korelacji pomiędzy – podanymi wcześniej filtracji górnoprzepustowej – oryginalnym obrazem wielospektralnym a wynikiem przetworzenia (Chavez i in., 1991, Zhou i in., 1998). Filtracja górnoprzepustowa uwydatnia informację o wysokiej częstotliwości, czyli uwypukla krawędzie (Rys. 2). Stąd wysoka korelacja pomiędzy przefiltrowanym obrazem panchromatycznym oraz obrazem PAN+MS świadczy o znacznej „absorpcji” informacji przestrzennej, którą zawiera obraz panchromatyczny wykorzystany w trakcie procesu integracji danych PAN i MS. Czyli im wyższa wartość bezwzględna korelacji, tym większa jest zgodność obecności krawędzi w obrazie będącym wynikiem integracji danych wielospektralnych i panchromatycznych z krawędziami występującymi w obrazie panchromatycznym. Najczęściej stosowany jest tutaj filtr Laplace’a postaci:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Pirowski (2006) do oceny jakości przestrzennej trypletu kanałów spektralnych zaproponował parametr AIL%, czyli *Average Laplacian Index*, będący rozwinię-

ciem podejścia zaproponowanego m.in. przez Zhou i in., (1998). Jest on średnią arytmetyczną współczynników determinacji korelacji r_{HPk}^2 w wyrażonych w %, tzw. IL% – *Laplacian Index* (Pirowski, 2006):

$$AIL\% = \frac{1}{3} \cdot \sum_{k=1}^3 IL_k\%$$

$$IL_k\% = 100\% \cdot r_{HPk}^2$$

Autor tej propozycji wychodzi z założenia, że wartość parametru IL% można interpretować jako stopień obecności krawędzi na obrazie typu PAN+MS w stosunku do znajdujących się krawędzi w zakresie panchromatycznym. Zatem średnia z trzech takich parametrów obliczonych dla każdego z kanałów spektralnych wchodzących w skład kompozycji barwnej jest miarą średniego wzmocnienia przestrzennego danej kompozycji barwnej. Idąc tą myślą można ten sam wskaźnik zastosować także dla dowolnej liczby kanałów spektralnych:

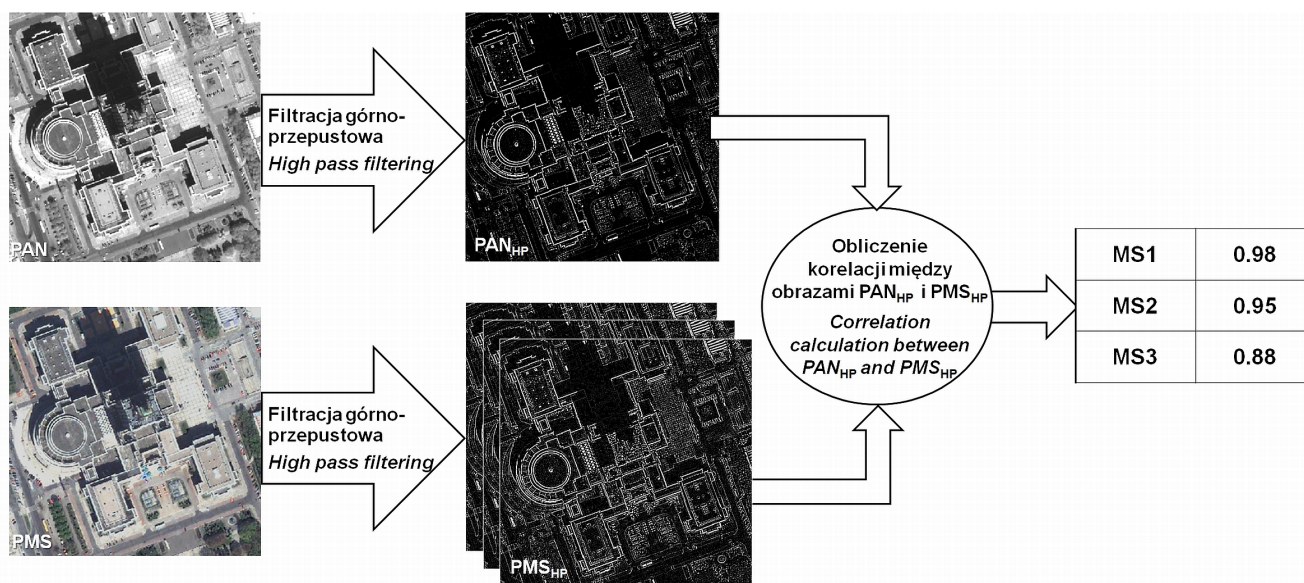
$$AIL\% = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n IL_k\%$$

Kolejnym podejściem umożliwiającym ocenę jakości przestrzennej wyników integracji obrazów wielospektralnych i panchromatycznych jest $ERGAS_{spatial}$. Kierując się analogiczną zasadą, jak w przypadku wskaźnika $ERGAS_{spectral}$, Lillo-Saavedra i in. (2005) wskazują, iż o jakości przestrzennej obrazu PAN+MS może świadczyć analogicznie zdefiniowany wskaźnik $ERGAS_{spatial}$:

$$ERGAS_{spatial} = 100 \cdot \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{RMSE_k^{pan}}{\mu_{MS_k}} \right)^2}$$

gdzie:

$$RMSE_k^{pan} = \sqrt{\frac{1}{C \cdot R} \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^R (PAN_k^{MS} - PMS_k)^2}$$



Ryc. 2. Idea oceny jakości przestrzennej z wykorzystaniem filtracji górnoprzepustowej (Osińska-Skotak, 2011).
Fig. 2. The idea of spatial quality assessment using high-pass filtering (Osińska-Skotak, 2011).

gdzie PAN_k^{MS} jest obrazem panchromatycznym dopasowanym radiometrycznie do źródłowego obrazu wielospektralnego, co powoduje ograniczenie wpływu różnic spektralnych, wynikających z różnic w zakresach spektralnych rejestrowanych na obrazie panchromatycznym i w poszczególnych kanałach spektralnych obrazu wielospektralnego.

W niektórych pracach autorzy wykorzystują do oceny jakości przestrzennej wielkość, jaką jest entropia (Lillo-Saavedra i in., 2005; Han i in., 2008). Entropia może przedstawić uśrednioną informację o obrazie i odzwierciedlić jaka informacja szczegółowa została włączona do obrazu PAN+MS. Ogólnie rzecz ujmując, większa wartość entropii obrazu PAN+MS świadczy o bardziej obfitej informacji obrazu i wyższej jakości wyniku integracji obrazów panchromatycznego i wielospektralnego pod względem przestrzennym.

W przypadku obrazu w odcieniach szarości entropia obliczana jest jako (Price, 1987):

$$E = \sum_{l=0}^{DN_{max}} -p_l \log(p_l)$$

gdzie: p_l jest prawdopodobieństwem tego, że dany piksel ma jasność l ; DN_{max} – maksymalna możliwa do osiągnięcia wartość radiometryczna (czyli 255 w przypadku zapisu 8-bitowego, a 2048 w odniesieniu do zapisu

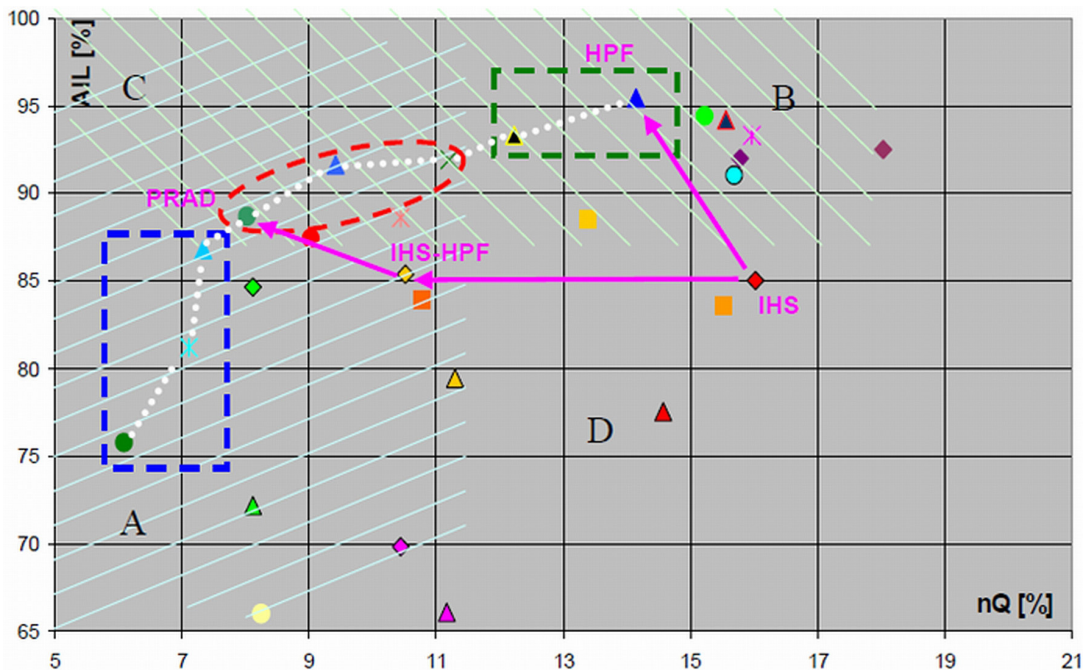
11-bitowego). Do obliczenia entropii niezbędny jest histogram jednowymiarowy, który przedstawia gęstość prawdopodobieństwa występowania pikseli o jasności l .

Guo i in. (2010) do oceny jakości przestrzennej wyników integracji danych o różnej rozdzielczości zastosowali natomiast wskaźnik gradientu średniego. Wskaźnik ten opisuje zmiany funkcji tekstury obrazu i szczegółowość informacji. Im wyższa jest wartość gradientu średniego tym większy jest wpływ obrazu o wyższej rozdzielczości przestrzennej na wynik integracji obrazów. Wskaźnik gradientu średniego dla obrazu wynikowego w każdym kanale spektralnym może być obliczony jako:

$$AG_k = \frac{1}{C \cdot R} \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^R \sqrt{\frac{[\frac{\partial PMS(i,j)}{\partial i}]^2 + [\frac{\partial PMS(i,j)}{\partial j}]^2}{2}}$$

Kompleksowa ocena jakości wyników integracji obrazów panchromatycznego i wielospektralnego

W ciągu ostatnich kilkunastu lat prowadzono bardzo wiele badań dotyczących oceny jakości poszczególnych metod integracji obrazu panchromatycznego o wysokiej rozdzielczości przestrzennej z obrazem wielospektralnym niższej rozdzielczości przestrzennej, ale wyższej rozdzielczości spektralnej. Analizując dostępną literaturę



Ryc. 3. Diagram wyników proponowany przez Pirowskiego (2006). Strefa A – wyniki charakteryzujące się niskim zniekształceniem spektralnym i niskim wzmocnieniem przestrzennym, strefa B – wyniki charakteryzujące się wysokim wzmocnieniem przestrzennym i wysokim zniekształceniem spektralnym, strefa C – obszar o najlepszych wynikach, jeśli chodzi o relację obu wskaźników, strefa D – obszar o wysokim zniekształceniu spektralnym i niskim wzmocnieniu przestrzennym.

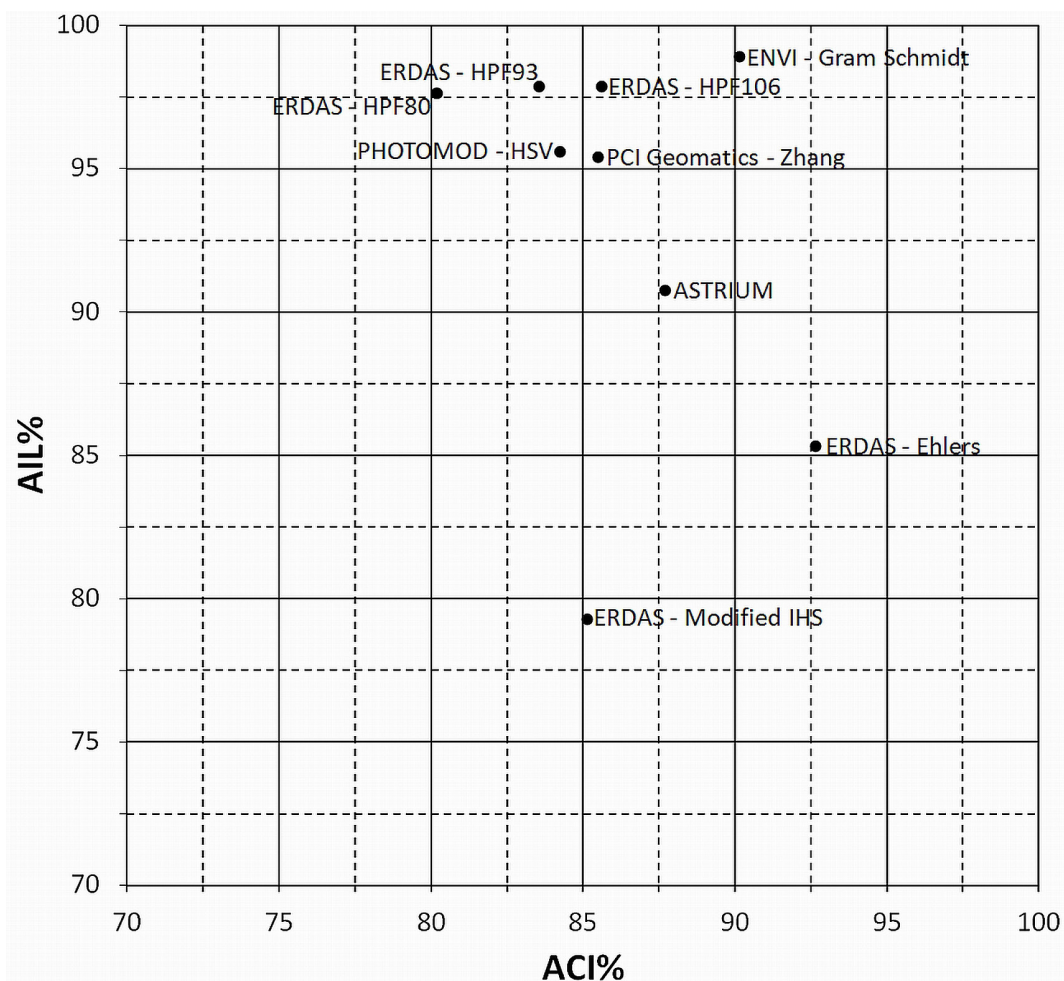
Fig. 3. Diagram results proposed by Pirowski (2006). Zone A - results with low spectral distortion and low spatial enhancement, zone B - the results with high spatial enhancement and high spectral distortion, zone C - the results with the best results for both quality indices, zone D - results with high spectral distortion and low spatial enhancement.

światową można stwierdzić, że szereg badań dotyczył poszukiwania najlepszych metod oceny jakości spektralnej. Ten aspekt zdecydowanie przeważał w prowadzonych pracach naukowych. Niewiele prac dotyczyło aspektu oceny jakości przestrzennej lub oceny kompleksowej obu wymienionych cech.

Próba kompleksowej oceny cech jakości spektralnej i jakości przestrzennej obrazów jest metoda „diagramu wyników”, opracowana przez Pirowskiego (Pirowski, 2005, 2006; Pirowski, Bobek, 2007), która pozwala na graficzne ujęcie wzajemnych relacji wzmocnienia przestrzennego i zniekształcenia spektralnego poszczególnych obrazów syntetycznych, kompozycji barwnych lub pełnego zestawu kanałów spektralnych poddanych integracji z obrazem PAN. Atutem proponowanej metody jest możliwość łatwego porównania dużej liczby wyników i na podstawie analizy graficznej rozkładu punktów wskazanie relatywnie najlepszej metody scallania (Pirowski, Bobek, 2007). Na diagramie (Rys. 3), na osi poziomej (x) przedstawiona jest wielkość zniekształcenia spektralnego, np. wg wskaźnika nQ%, natomiast na osi pionowej (y) wartość uczytelnienia obrazu, np. wg wskaźnika AIL%. W przypadku stosowania

tej metody na danych zdegradowanych idealnie wyniki to nQ%=0 oraz AIL%=100. Metodę integracji obrazów, dla której zanotuje się wartości najbardziej zbliżone do powyższych, należy uznać za potencjalnie najlepszą. Jest taka metoda, która teoretycznie pozwala na uzyskanie najlepszego wzmocnienia przestrzennego obrazu wielospektralnego przy najmniejszym możliwym jego zniekształceniu spektralnym w stosunku do obrazu, jaki teoretycznie byłby rejestrowany przez sensor o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej (Pirowski, Bobek, 2007; Pirowski, 2006).

Metodę diagramu wyników można zastosować do prezentacji wyników różnych wskaźników. Na rys. 4 przedstawiono przykład prezentacji wyników kompleksowej oceny jakości rezultatów integracji obrazów wielospektralnych i panchromatycznych z systemu Pleiades, uzyskanych z zastosowaniem różnych algorytmów zaimplementowanych w oprogramowaniach komercyjnych ERDAS Imagine, ENVI, PCI Geomatica i PHOTOMOD. Zaprezentowano na nim porównanie wskaźnika jakości przestrzennej AIL% oraz wskaźnika jakości spektralnej ACI%, definiowanego jako:



Ryc. 4. Porównanie wyników jakości spektralnej (ACI%) i jakości przestrzennej (AIL%) wyników integracji obrazów panchromatycznego i wielospektralnego z satelity Pleiades (opracowanie własne).
Fig. 4. Comparison of obtained results for Pleiades data fusion – the spectral quality described by means of ACI% and the spatial quality described by means of AIL%.

$$ACI\% = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n r^2 \cdot 100\%$$

gdzie: r – korelacja pomiędzy odpowiadającymi sobie oryginalnymi kanałami spektralnymi obrazu wielospektralnego a kanałami spektralnymi obrazu uzyskanego w wyniku integracji obrazów panchromatycznego i wielospektralnego.

Z analizy rys. 4 wynika, że w tym przypadku najwyższą jakością spektralną i przestrzenną charakteryzuje się obraz uzyskany w wyniku zastosowania algorytmu Gram'a-Schmidt'a. Jakość spektralna tego obrazu, opisana wskaźnikiem ACI%, wynosi 0,90, zaś jakość przestrzenna, charakteryzowana wskaźnikiem AIL%, 0,98. Przykład ten dobrze ilustruje przydatność diagramów wyników, których wykorzystanie ułatwia przeprowadzenie kompleksowej oceny jakości rezultatów integracji danych obrazowych o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej, w szczególności gdy analizowanych jest wiele różnorodnych algorytmów przetwarzania.

Podsumowanie

Przedstawione powyżej wskaźniki stosowane do oceny formalnej jakości spektralnej i przestrzennej obrazów typu *pansharpened* umożliwiają otrzymanie obiektywnej informacji na temat jakości działania algorytmów integracji danych obrazowych o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej. Jednak prowadzone w tym zakresie badania naukowe wskazują, iż w zależności od zastosowanego wskaźnika jakości spektralnej często uzyskuje się odmienne wyniki rankingu badanych metod, czasami są to wyniki sprzeczne z odczuciem wizualnym oka ludzkiego. Zhang (2008) przeprowadził analizę siedmiu wskaźników jakości spektralnej i w wyniku tego opracowania okazało się, że istnieje sprzeczność między wizualną i ilościową oceną jakości. Alparone i in. (2004) również uzyskali analogiczne wyniki podczas swoich wcześniejszych badań. Stąd nadal prowadzone są prace nad opracowaniem optymalnego wskaźnika oceny jakości spektralnej wyników integracji danych obrazowych.

Waga, jaką przywiązuje się do jakości produktów obrazowych, będących wynikiem integracji obrazów panchromatycznych i wielospektralnych wynika głównie z faktu, że aby możliwe było automatyzowanie procedur uzyskiwania wiarygodnych informacji, w tym prowadzenie analiz ilościowych (np. obliczanie wskaźników roślinności, szacowanie biomasy), na podstawie obrazów typu *pansharpened* konieczne jest zachowanie właściwości spektralnych obrazu wielospektralnego. Wiarygodna informacja o środowisku pozwala bowiem na uzyskanie wiedzy o zjawiskach i procesach zachodzących na powierzchni Ziemi.

Literatura

- ALPARONE L., BARONTI S., GARZELLI A., NENCINI F., 2004. *A Global Quality Measurement of Pan-sharpened Multispectral Imagery*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol.1, No. 4, 313-317.
- BEAULIEU M., FOUCHER S., GAGNON L., 2003. *Multispectral Image Resolution Refinement using Stationary Wavelet Transform*. Proceedings of IEEE IGARS'2003, Toulouse, France, July 21-25, vol. VI, 4032-4034.
- BOLOORANI A.D., 2008. *Remotely Sensed Data Fusion as a Basis for Environmental Studies: Concepts, Techniques and Applications*. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Georg-August-Universität zu Göttingen.
- CHAVES P.S., SIDES C., ANDERSON J.A., 1991. *Comparison of Tree Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 57, No. 3, 295-303.
- DOXANI G., STAMOU A., 2004. *Integrated DEM and Pan-sharpened SPOT-4 Image in Urban Studies*. ISPRS Conference proceedings, Istanbul 07/2004, vol. XXXV Part B8, 139-144.
- ESHTEHARDI A., EBADI H., VALADAN ZOEJ M.J., MOHAMMADZADEH A., 2007. *Image Fusion of LANDSAT ETM+ and SPOT Satellite Images using HIS, BROVEY and PCA*. Conference on Information Extraction from SAR and Optical Data, with Emphasis on Developing Countries, 16-18 May 2007, Istanbul.
- GUO Q., CHEN S., LEUNG H., LIU S., 2010. *Covariance intersection based image fusion technique with application to pansharpening in remote sensing*. Information Sciences, vol. 180, No. 18, 3434-3443.
- GARZELLI A., NENCINI F., ALPARONE L., AIAZZI B., BARONTI S., 2004. *Pan-sharpening of Multispectral Images: a Critical Review and Comparison*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol.1, No. 1, 81-84.
- HAN M., SAMADZADEGAN F., 2008. *A Study of Image Fusion Techniques in Remote Sensing*. XXI ISPRS Congress, Vol. XXXVII, Commission IV, WG IV/7, Beijing 2008.
- LILLO-SAAVEDRA M., GONZALO C., ARQUERO A., MARTINEZ E., 2005. *Fusion of Multispectral and Panchromatic Satellite Sensor Imagery based on Tailored Filtering in Fourier Domain*. International Journal of Remote Sensing, vol. 26, No. 6, 1263-1268.
- MUNECHIKA C.K., WARNICK J.S., SALAVAGGIO C., SCHOTT J.R., 1993. *Resolution Enhancement of Multispectral Image Data to Improve Classification Accuracy*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 59, No. 1, 67-72.
- OSIŃSKA-SKOTAK K., 2011. *Integracja satelitarnych danych obrazowych o różnej rozdzielczości*. Opracowanie w ramach zadania 23 Programu Rozwojowego Politechniki Warszawskiej: Opracowanie programów oraz materiałów dydaktycznych i naukowych dla studiów doktoranckich z zakresu technik satelitarnych, materiał niepublikowany, Warszawa.
- PIROWSKI T., 2005. *Ocena przydatności metod integracji zobrazowań teledetekcyjnych pozyskiwanych różnymi sensorami*. Praca doktorska AGH, Wydz. Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, niepublikowana, Kraków.
- PIROWSKI T., 2006. *Integracja danych teledetekcyjnych pochodzących z różnych sensorów -propozycja kompleksowej oceny scalonych obrazów*. Geoinformatica Polonica, Polska Akademia Umiejętności, Kraków, z. 8, 59-76.

- PIROWSKI T., BOBEK G., 2007. *Podwyższanie rozdzielczości przestrzennej obrazów wielospektralnych IKONOS – statystyczne i wizualne porównanie wyników otrzymanych różnymi formułami*. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 17b, 649-660.
- PRICE J.C., 1987. *Combining Panchromatic and Multispectral Imagery from Dual Resolution Satellite Instrument*. *Remote Sensing of Environment*, vol. 21, 119-128.
- RANCHIN T., WALD L., 2000. *Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Images: the ARSIS Concept and its Implementation*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 66, 49-61.
- TSAKIRI-STRATI M., PAPADOPOULOU M., GEORGOULA O., 2002. *Fusion of XS SPOT4 and PAN SPOT2 Images and Assessment of the Spectral Quality of the Products*. *Technika Chronika, Scientific Journal of the Technical Chamber of Greece, Section A*, vol. 22(3), 9-22.
- WALD L., 1999. *Some Terms of Reference in Data Fusion*. *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing*, vol. 37, No. 3, 1190-1193.
- WALD L., 2000. *Quality of High Resolution Synthesised Images: Is There a Simple Criterion?* Proceedings of the third conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images", Sophia Antipolis, France, January 26-28, 2000. Ranchin T., Wald L. (eds.), SEE/URISCA, Nice, France, 99-103.
- WALD L., 2002. *Data Fusion – Definitions and Architectures – Fusion of Images of Different Spatial Resolutions*. Presses des MINES, 2002. 198 p.
- WALD L., RANCHIN T., MANGOLINI M., 1997. *Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing in Quality of Resulting Images*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 63, No. 6, 691-699.
- WANG Z., BOVIK A.C., 2002. *A Universal Image Quality Index*. *IEEE Signal Processing Lett., Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 9, 81-84.
- WANG Z., BOVIK A.C., SHEIKH H.R., SIMONCELLI E.P., 2004. *Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity*. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13 (4), 600-612.
- WANG Z., LI D., 1999. *A Image Fusion Method: Improve the Spatial Resolution While Preserve the Color*. *Asian Conference on Remote Sensing*, 1999.
- ZHOU J., CIVCO D.L., SILANDER J.A., 1998. *A Wavelet Transform Method to Merge Landsat TM and SPOT Panchromatic Data*. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, No. 4, 743-757.
- ZHANG Y., 2008. *Methods for Image Fusion Quality Assessment – a Review, Comparison and Analysis*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7, Beijing, 2008, 1101-1109.



Dr hab. inż. Katarzyna OSIŃSKA-SKOTAK jest absolwentką Wydziału Geodezji i Kartografii (spec. Fotogrametria i Kartografia) oraz Wydziału Inżynierii Środowiska (spec. Ochrona Atmosfery i Meteorologia Techniczna) Politechniki Warszawskiej. W 2001 r. uzyskała z wyróżnieniem stopień doktora, a w roku 2011 stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie naukowej geodezja i kartografia (spec. teledetekcja i fotogrametria). Obecnie jest kierownikiem Zakładu Fotogrametrii, Teledetekcji i SIP na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się zaawansowanymi technikami teledetekcji i GIS, w szczególności w zakresie ich wykorzystania w badaniach środowiska (m.in. w badaniach jakości wód śródlądowych, w planowaniu przestrzennym, w badaniach zjawiska miejskiej wyspy ciepła). Posiada duże doświadczenie w zakresie przetwarzania obrazów satelitarnych i korekcji atmosferycznej zdjęć satelitarnych, opracowała m.in. metodę korekcji atmosferycznej jednokanałowych zdjęć termalnych, metodę obliczania temperatury powierzchni Ziemi na podstawie jednokanałowych zdjęć termalnych oraz zaproponowała metodykę przetwarzania zdjęć superspektralnych do oceny stanu wód śródlądowych. Otrzymała staże naukowe, m.in. w Belgii na Uniwersytecie w Gent (1996), we Francji w GDTA w Toulouse (1997), w Niemczech na Uniwersytecie we Freiburgu (1998-1999, w ramach stypendium Fundacji im. Nowickiego i Fundacji DBU), w Niemieckim Centrum Kosmicznym w Oberpfaffenhofen k. Monachium (1999), w Szwecji na KTH (1999). Współzałożycielka Stowarzyszenia "Środowisko dla Środowiska". Członek Grupy Ekspertów przy Sekcji Teledetekcji Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych przy Prezydium PAN, członek Zarządu Oddziału Teledetekcji i Geoinformatyki PTG, członek Komisji Głównej ds. Zawodu i Kształcenia Zawodowego Stowarzyszenia Geodetów Polskich oraz członek Platformy Technik Kosmicznych Politechniki Warszawskiej.

Katarzyna Osińska-Skotak
Teledetekcja Środowiska
Polskie Towarzystwo Geograficzne
Oddział Teledetekcji i Geoinformatyki • Warszawa 2015

Otrzymano: 12 lutego 2016
Zaakceptowano: 26 lutego 2016
Article first received: 12 February 2016
Accepted: 26 February 2016