Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji Vol. 24, 2012, s. 231 - 244
ISBN 978-83-61576-22-8

OCENA PRZYDATNOŚCI RÓŻNYCH METOD INTEGRACJI OBRAZÓW PANCHROMATYCZNYCH I WIELOSPEKTRALNYCH W ODNIESIENIU DO ZOBRAZOWAŃ WORLDVIEW-2

ASSESSMENT OF DIFFERENT IMAGE FUSION METHODS ON EXAMPLE WORLDVIEW-2 IMAGES

Katarzyna Osińska-Skotak

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

SŁOWA KLUCZOWE: WorldView-2, integracja obrazów, ocena jakości integracji obrazów

STRESZCZENIE: W niniejszym opracowaniu zaprezentowano wyniki prac związanych z kompleksową oceną jakości ogólnodostępnych algorytmów integracji obrazów wielospektralnych i panchromatycznych w odniesieniu do obrazów rejestrowanych przez system WorldView-2. Jest to jedyny system o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej umożliwiający rejestrację obrazów w 8 zakresach promieniowania. Zakresy te dają większe możliwości zastosowania niż ma to miejsce w przypadku danych 4-kanałowych, np. w szczegółowych analizach upraw i zasiewów, czy badaniach wód. Ponieważ na wyniki analiz ilościowych ma wpływ zastosowana metoda integracji danych panchromatycznych PAN i wielospektralnych MS cennym jest dokonanie oceny jakości algorytmów zaimplementowanych w różnych pakietach oprogramowania komercyjnego (ERDAS Imagine, PCI Geomatica, ENVI). Ocena jakości wyników integracji obrazów PAN i MS wykonana została pod względem jakości spektralnej, jak i jakości przestrzennej. Do określenia jakości spektralnej i przestrzennej obrazów przetworzonych wykorzystano m.in. analizę korelacji, RMSE, wskaźniki jakości Q, nQ%, ERGAS i DPP. Najlepsze wyniki – zarówno pod względem jakości spektralnej, jak i przestrzennej – uzyskano za pomocą trzech metod: Zhanga (PCI Geomatica), Grama-Schmidta (ENVI) i Ehlersa (ERDAS Imagine).

1. WPROWADZENIE

Ostatnie lata to intensywny rozwój wysokorozdzielczych technik satelitarnych. Na orbity okołoziemskie wprowadzono satelity nowej generacji, które obecnie umożliwiają dokonywanie rejestracji obrazów o pikselu wielkości mniejszej niż 0.5×0.5 m. Są to jednak monochromatyczne dane panchromatyczne, niosące informacje w jednym stosunkowo szerokim zakresie spektralnym. Ich niewątpliwym atutem jest wysoka rozdzielczość przestrzenna, ale aby jak najlepiej wykorzystać potencjał interpretacyjny wysoko-rozdzielczych obrazów satelitarnych stosuje się procedury przetwarzania cyfrowego pozwalające na dokonanie integracji (z ang. fusion, merge) wysokorozdzielczego obrazu panchromatycznego (PAN) z obrazem wielospektralnym (MS) o niższej rozdzielczości przestrzennej, ale większej rozdzielczości spektralnej. W efekcie uzyskuje się obraz wielospektralny o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Metod pozwalających na

dokonanie tego rodzaju integracji danych jest bardzo wiele, ale mimo to nieustannie trwają prace nad stworzeniem coraz lepszych algorytmów. Część z istniejących algorytmów umożliwia uzyskanie dobrego materiału w sensie wizualnym, ale nie pozwala na zachowanie walorów spektralnych źródłowego obrazu wielospektralnego, co np. znacznie utrudnia wykonanie klasycznej klasyfikacji cyfrowej czy powoduje błędy w obliczanych wartościach wskaźników teledetekcyjnych (np. NDVI). Problemem przy łączeniu danych o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej jest zachowanie zarówno składowej spektralnej, jak i przestrzennej.

Wiele algorytmów integracji danych obrazowych powstało jeszcze w latach 80-tych XX wieku, kiedy to na orbicie pojawił się system satelitarny SPOT. Wraz z pojawieniem się nowych systemów o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej (IKONOS, QuickBird) powstała konieczność dostosowania już istniejących algorytmów oraz opracowanie nowych. Wynikało to z faktu, iż obrazy panchromatyczne rejestrowane z tych systemów obejmowały również zakres bliskiej podczerwieni.

Na rynku jest szereg pakietów oprogramowania (ERDAS Imagine, PCI Geomatica, ENVI, IDRISI), które umożliwiają integrację danych satelitarnych. Zwykle użytkownicy korzystają z tychże algorytmów i nie do końca zdają sobie sprawę z tego jakiej jakości obraz uzyskują. W ramach niniejszej pracy postawiono sobie za cel przetestowanie i ocenę algorytmów integracji obrazów PAN i MS, w dostępnych pakietach oprogramowania.

2. CHARAKTERYSTYKA OBRAZÓW SATELITARNYCH WORLDVIEW-2

Satelita WorldView-2 został umieszczony na orbicie okołobiegunowej, heliosychronicznej w dniu 8 października 2009 r. Orbita przebiega na wysokości 770 km nad powierzchnią Ziemi. Okres obiegu wynosi 100 min. Obrazy rejestrowane są o godz. 10:30 czasu lokalnego, a dzięki możliwości wychylenia do $\pm 45^{o}$ istnieje możliwość uzyskania obrazów tego samego fragmentu powierzchni Ziemi nawet codziennie. Pas skanowania wynosi 16.4 km, a wielkość nominalna sceny satelitarnej 16.4×16.4 km.

Satelita WorldView-2 rejestruje obrazy w dwóch trybach: panchromatycznym (PAN) i wielospektralnym (MS) z pikselem wielkości odpowiednio 0.46×0.46 m i 1.84×1.84 m, ale produkty obrazowe udostępniane są z pikselem wielkości 0.50×0.50 m (PAN) i 2.00×2.00 m (MS). W wariancie panchromatycznym obrazy pozyskiwane są w zakresie fal o długości 450÷800 nm. W trybie wielospektralnym satelita WorldView-2 rejestruje 8 zakresów spektralnych o długościach fal: 400÷450 nm (coastal), 450÷510 nm (blue), 510÷580 nm (green), 585÷625 nm (yellow), 630÷690 nm (red), 705÷745 nm (red edge), 770÷895 nm (near IR1), 860÷1040 nm (near IR2). Rozdzielczość radiometryczna pozyskiwanych obrazów wynosi 11 bitów, ale najczęściej udostępniane są jako dane 8-bitowe.

3. METODY OCENY JAKOŚCI INTEGRACJI DANYCH OBRAZOWYCH

Jakość obrazów uzyskanych w wyniku integracji obrazu panchromatycznego o wyższej rozdzielczości przestrzennej i obrazu wielospektralnego o niższej rozdzielczości przestrzennej można ocenić w sposób wizualny albo formalny – przy zastosowaniu wskaźników statystycznych.

W ocenie wizualnej operator porównuje kompozycję barwną, stworzoną na podstawie nowopowstałego obrazu wielospektralnego o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej z analogiczną kompozycję barwną, utworzoną na podstawie źródłowego obrazu wielospektralnego oraz z obrazem panchromatycznym. Analiza wizualna koncentruje się przede wszystkim na określeniu stopnia zachowania barw względem źródłowego obrazu wielospektralnego oraz na ocenie stopnia wzmocnienia przestrzennego obrazu. Ocena wizualna zawsze jest oceną subiektywną, zależną od preferencji, doświadczenia i odczucia osoby oceniającej dany obraz. W tym przypadku ocena dokonana przez różne osoby może dać odmienne rezultaty. Czasami stosuje się technikę oceny wizualnej zwaną Mean Opinion Score (MOS), w której obliczana jest wartość średnia z ocen testów subiektywnych prowadzonych przez wiele osób, od profesjonalnych interpretatorów począwszy a na amatorach skończywszy.

Ocena formalna jest oceną obiektywną, niezależną od operatora. W literaturze światowej można spotkać różnego rodzaju propozycje formalnej oceny jakości wyników integracji danych o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej. Ta mnogość proponowanych wskaźników i parametrów pozwala na ich dobór do określonych celów.

3.1. Metody oceny jakości spektralnej

Jedną z metod proponowanych do oceny jakości spektralnej dwóch ocenianych obrazów jest obliczenie różnic w wartościach pikseli w każdym kanale spektralnym oddzielnie pomiędzy wynikiem integracji obrazów PAN+MS i oryginalnym obrazem wielospektralnym. Wówczas miarą jakości spektralnej wyniku integracji obrazu wielospektralnego z obrazem panchromatycznym mierzoną oddzielnie dla każdego kanału spektralnego może będzie średnia różnica pomiędzy wartościami pikseli obrazu PAN+MS i obrazu MS (Chaves *et al*., 1991):

$$\overline{\Delta DN_k} = \frac{1}{C \cdot R} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left| PMS_{k,i,j} - MS_{k,i,j} \right| \tag{1}$$

gdzie: R – liczba wierszy w obrazie o wyższej rozdzielczości przestrzennej, C – liczba kolumn w obrazie o wyższej rozdzielczości przestrzennej, $MS_{k,i,j}$ – wartość piksela w i-tym wierszu i j-tej kolumnie k-tego kanału spektralnego źródłowego obrazu wielospektralnego, $PMS_{k,i,j}$ – wartość piksela w i-tym wierszu i j-tej kolumnie k-tego kanału spektralnego obrazu wielospektralnego o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej.

Kolejny wskaźnik, wykorzystywany m.in. Eshtehardi *et al*. (2007) to znormalizowana różnica bezwzględna pomiędzy wartościami pikseli obrazu PAN+MS a wartościami odpowiadających im pikseli w obrazie oryginalnym (ang. Deviation Index, wskaźnik zniekształcenia spektralnego):

$$DI_k = \frac{1}{C \cdot R} \sum_{i=1}^{C} \sum_{j=1}^{R} \frac{\left| PMS_{k,i,j} - MS_{k,i,j} \right|}{MS_{k,i,j}} \tag{2}$$

Najczęściej obecnie stosowanym a zarazem podstawowym parametrem, który pozwala ocenić w sposób globalny jakość wyniku połączenia obrazów wielospektralnego i panchromatycznego jest średni błąd kwadratowy $RMSE_k$ wyrażony dla k-tego zakresu spektralnego w następujący sposób (Wald *et al.*, 1997; Beaulieu *et al.*, 2004):

$$RMSE_k = \sqrt{\frac{1}{C \cdot R}\sum_{i=1}^{C}\sum_{j=1}^{R}(MS_{k,i,j} - PMS_{k,i,j})^2} \tag{3}$$

W tym miejscu należy nadmienić, że niektórzy autorzy stosują inny wzór na RMSE, co powoduje, iż wartości wskaźnika ERGAS mogą być nieporównywalne pomiędzy różnymi autorami.

Wald *et al.* (1997) proponują do globalnej oceny jakości rezultatów łączenia danych PAN i MS wskaźnik ERGAS (fr. Erreur Relative Globale Adimensionelle de Synthèse) – bezwymiarowy całkowity błąd względny wyniku integracji PAN+MS:

$$ERGAS_{spectral} = 100 \cdot \frac{h}{l}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{RMSE_k}{\mu_k}\right)^2} \tag{4}$$

Według autorów wartość ERGAS mniejsza od 3 świadczy o satysfakcjonującej jakości uzyskanego wyniku integracji obrazów PAN i MS w sensie zachowania spójności spektralnej w porównaniu z oryginalnym obrazem wielospektralnym.

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

$$RASE_{\%} = 100 \cdot \frac{1}{\mu_{sr}}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}RMSE_k^2} \tag{5}$$

Kolejną propozycją oceny jakości spektralnej obrazów wynikowych integracji danych panchromatycznych i wielospektralnych jest współczynnik nQ% (ang. *newQuantity*), zaproponowany przez Wald'a (2000), który jest uproszczoną formą wskaźnika ERGAS:

$$nQ\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{RMSE_k^2}{\mu_k^2}} \tag{6}$$

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

$$Q = \frac{\sigma_{MS,PMS}}{\sigma_{MS} \cdot \sigma_{PMS}} \; \frac{2 \cdot \mu_{MS} \cdot \mu_{PMS}}{(\mu_{MS})^2 + (\mu_{PMS})^2} \; \frac{2 \cdot \sigma_{MS} \cdot \sigma_{PMS}}{\sigma_{MS}^2 + \sigma_{PMS}^2} \tag{7}$$

gdzie: μ_{MS} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym obrazu MS, μ_{PMS} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym obrazu przetworzonego, σ^2_{MS} – wariancja w k-tym kanale spektralnym obrazu oryginalnego, σ^2_{PMS} – wariancja w k-tym kanale spektralnym obrazu typu przetworzonego, $\sigma_{MS,PMS}$ – 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

włączając w to stratę korelacji, zniekształcenia radiometrii i zniekształcenia kontrastu (Wang i Bovik, 2002). Pierwsza składowa mówi o korelacji między obrazem wielospektralnym i wynikiem integracji obrazów panchromatycznego oraz wielospektralnego, drugi jest miarą bliskości średniej jasności obrazów, zaś trzeci jest miarą podobieństwa kontrastu dwóch analizowanych obrazów. Jak widać uwzględnia on kilka różnych parametrów statystycznych charakteryzujących zestaw danych a wartość średnia tego wskaźnika według autorów stanowi pozwala na ocenę globalną uzyskanych wyników.

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. Porównywane są tu wartości odpowiadających sobie pikseli: obrazu wielospektralnego i zdegradowanego obrazu będącego wynikiem integracji obrazów PAN i MS. W wyniku odjęcia obrazów od siebie uzyskiwana jest informacja o zniekształceniu spektralnym w obrębie pojedynczego piksela. Miarą tego zniekształcenia jest średnia różnica pomiędzy wartościami pikseli źródłowego obrazu wielospektralnego i wartościami pikseli zdegradowanego obrazu PAN+MS.

3.2. Metody oceny jakości przestrzennej

Do oceny jakości przestrzennej wyników integracji danych obrazowych PAN+MS wykorzystuje się jedynie kilka sposobów. Najbardziej popularną metodą dokonania oceny jakości przestrzennej jest wykorzystanie filtracji górnoprzepustowej oraz obliczenie korelacji (r_{HP}) pomiędzy – podanymi wcześniej filtracji górnoprzepustowej – oryginalnym obrazem wielospektralnym a wynikiem przetworzenia (Chavez *et al.*, 1991, Zhoua *et al.*, 1998). Filtracja górnoprzepustowa uwydatnia informację o wysokiej częstotliwości, czyli uwypukla krawędzie. Stąd wysoka korelacja pomiędzy przefiltrowanym obrazem panchromatycznym oraz przefiltrowanym obrazem PAN+MS świadczy o znacznej zaadaptowaniu informacji przestrzennej, którą zawiera obraz panchromatyczny.

Pirowski (2006) zaproponował parametr AIL%, czyli Average Laplacian Index, będący rozwinięciem podejścia zaproponowanego m.in. przez Zhoua *et al*. (1998). Jest on średnią arytmetyczną współczynników determinacji korelacji r^2_{HPk} w wyrażonych w %, tzw. IL% - Laplacian Index:

$$AIL\% = \frac{1}{3} \cdot \sum_{k=1}^{3} IL_k\% \tag{8}$$

$$IL_k\% = 100\% \cdot r^2_{HPk} \tag{9}$$

Autor 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 kanale 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.

Kierując się analogiczną zasadą jak w przypadku wskaźnika ERGAS, opisującego jakość spektralną, Lillo-Saavedra *et al*. (2005) wskazują, iż o jakości przestrzennej obrazu PAN+MS może świadczyć analogicznie zdefiniowany wskaźnik $ERGAS_{spatial}$:

$$ERGAS_{spatial} = 100 \cdot \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{k=1}^{K} \left(\frac{RMSE_k^{PAN}}{\mu_k^{PAN}} \right)^2} \tag{10}$$

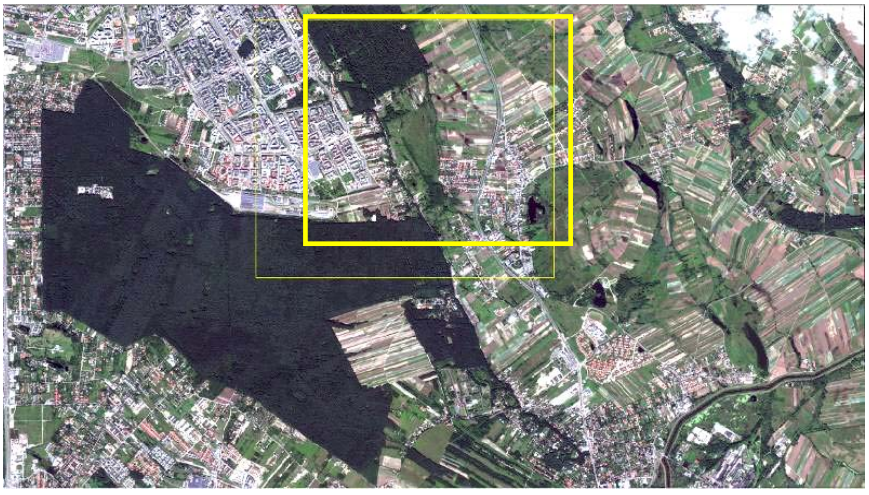
$$RMSE_k^{PAN} = \sqrt{\frac{1}{C \cdot R} \sum_{i=1}^{C} \sum_{j=1}^{R} (PAN_k - PMS_k)^2} \tag{11}$$

gdzie PAN_k jest obrazem otrzymanym w wyniku dopasowania obrazu panchromatycznego do obrazu wynikowego obrazu PAN+MS.

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

4. METODYKA PRACY

Głównym celem niniejszej pracy było określenie przydatności poszczególnych metod integracji danych obrazowych w odniesieniu do obrazów, rejestrowanych przez instrumenty satelity WorldView-2, które charakteryzują się większą – niż w przypadku innych wysokorozdzielczych systemów satelitarnych – liczbą pozyskiwanych kanałów spektralnych oraz szerszy zakres rejestrowanego promieniowania elektromagnetycznego.



Rys. 1. Obraz satelitarny WorldView-2 zarejestrowany dla obszaru Warszawy w dniu 4 sierpnia 2011 r. oraz obszar poddany analizie

Analizę przeprowadzono dla obrazu satelitarnego WorldView-2, który został zarejestrowany w dniu 4 sierpnia 2011 roku. Swoim zasięgiem obejmuje on obszar południowej Warszawy (dzielnice Ursynów, Wilanów, Wawer, rys. 1). Jest to teren o zróżnicowanym krajobrazie, od rolniczego poprzez leśny a skończywszy na terenach zabudowanych o bardzo różnorodnym typie zabudowy (osiedla domów jednorodzinnych, zabudowa blokowa luźna, zabudowa wielkomiejska). Ze względu na wielkość plików obliczeniowych obszar sceny satelitarnej ograniczono do wielkości ok. 7000 × 6000 pikseli (obraz panchromatyczny). Wybrano go tak, aby swoim zasięgiem objął teren jak najbardziej zróżnicowany pod względem pokrycia i użytkowania terenu (rys. 1).

Analizie poddano metody zaimplementowane w trzech ogólnodostępnych oprogramowaniach: ERDAS Imagine, PCI Geomatica oraz ENVI. Do dalszych prac wybrano tylko te metody, które umożliwiają integrację danych wielokanałowych. Były to następujące metody: PC (ERDAS Imagine), Modified IHS (ERDAS Imagine), transformacja falkowa WT-PC (ERDAS), transformacja falkowa WT-Single Band (ERDAS Imagine), Ehlersa (ERDAS Imagine), HPF (ERDAS Imagine), PC Spectral Sharpening (ENVI 4.8), CN Spectral Sharpening (ENVI 4.8), Gram-Schmidt Sensor (ENVI 4.8, ENVI 5.0), Gram-Schmidt Average (ENVI 4.8), Gram-Schmidt Lower PAN (ENVI 4.8) i metoda Zhanga (tzw. pansharpen, PCI Geomatica). Opisy poszczególnych metod można znaleźć w podręcznikach użytkownika oraz w literaturze (m.in. Aiazzi *et al.*, 2006, 2007; Carper *et al.*, 1990; Chavers *et al.*, 1991; Eshteradi *et al.*, 2007; Garzelli *et al.*, 2004; Mróz i Szumiło, 2005; Osińska-Skotak, 2011; Price, 1987; Wang i Li, 1999; Zhang, 1999, 2002, 2004). Okazało się jednak, że w przypadku analizowanych obrazów WorldView-2 nie wszystkie testowane metody działają w pełni poprawnie. Metoda PC Spectral Sharpening (ENVI 4.8 i 5.0) zastosowana dla wszystkich 8 zakresów spektralnych dała niepoprawny wynik i dlatego przetestowano działanie tej metody dla mniejszej liczby kanałów spektralnych. Po wyeliminowaniu kanału 8 uzyskano prawidłowy obraz i ten właśnie obraz poddano ocenie.

Do oceny jakości spektralnej wyników integracji danych obrazowych PAN i MS zastosowano: współczynnik korelacji ($AIL\%_{spectral}$ obliczany analogicznie jak w przypadku AIL%), wskaźniki zniekształcenia spektralnego DI i DPP, średni błąd kwadratowy $RMSE_{spectral}$, bezwymiarowy całkowity błąd względny $ERGAS_{spectral}$, wskaźniki nQ% oraz Q. W odniesieniu do oceny jakości przestrzennej zastosowano współczynnik korelacji r_{HP} oraz wskaźniki AIL% oraz $RMSE_{spatial}$ i $ERGAS_{spatial}$. Są to parametry stosowane najczęściej do oceny jakości wyników integracji danych obrazowych, które uwzględniają największą liczbę czynników. Ponadto, obliczone zostały współczynniki korelacji między obrazem wielospektralnym i obrazem po wzmocnieniu przestrzennym. Należy również nadmienić, że w przypadku oprogramowania ERDAS Imagine – ze względu na inną, niż w większości pakietów oprogramowania (m.in. ENVI, PCI Geomatica, IDRISI), definicję początku układu współrzędnych obrazowych (w środku piksela) – wystąpił problem polegający na tym, że obrazy po integracji były mniejszego rozmiaru (rys. 2), co wpływa na dalsze analizy statystyczne.

Rys. 2. Obraz wielospektralny (pod spodem) i obraz po integracji obrazu panchromatycznego oraz wielospektralnego, uzyskany za pomocą oprogramowania ERDAS Imagine (na wierzchu)

Analizując uzyskany wynik można stwierdzić, iż program ERDAS Imagine jako początek nowo tworzonego obrazu przyjmuje środek piksela obrazu wielospektralnego. Dla przeciętnego użytkownika jest to mało istotna kwestia, nie mniej jednak tego rodzaju podejście powoduje konieczność ponownego próbkowania obrazu panchromatycznego przed dokonaniem integracji PAN i MS i wpływa na dalsze przetworzenia i analizy. Aby tego uniknąć obraz wielospektralny został dostosowany do wielkości matrycy obrazu panchromatycznego (piksel został podzielony na piksele o wymiarach 0.5×0.5 m). Zabieg ten wyeliminował efekt zmniejszenia wymiarów obrazu, będącego wynikiem łączenia obrazów PAN i MS.

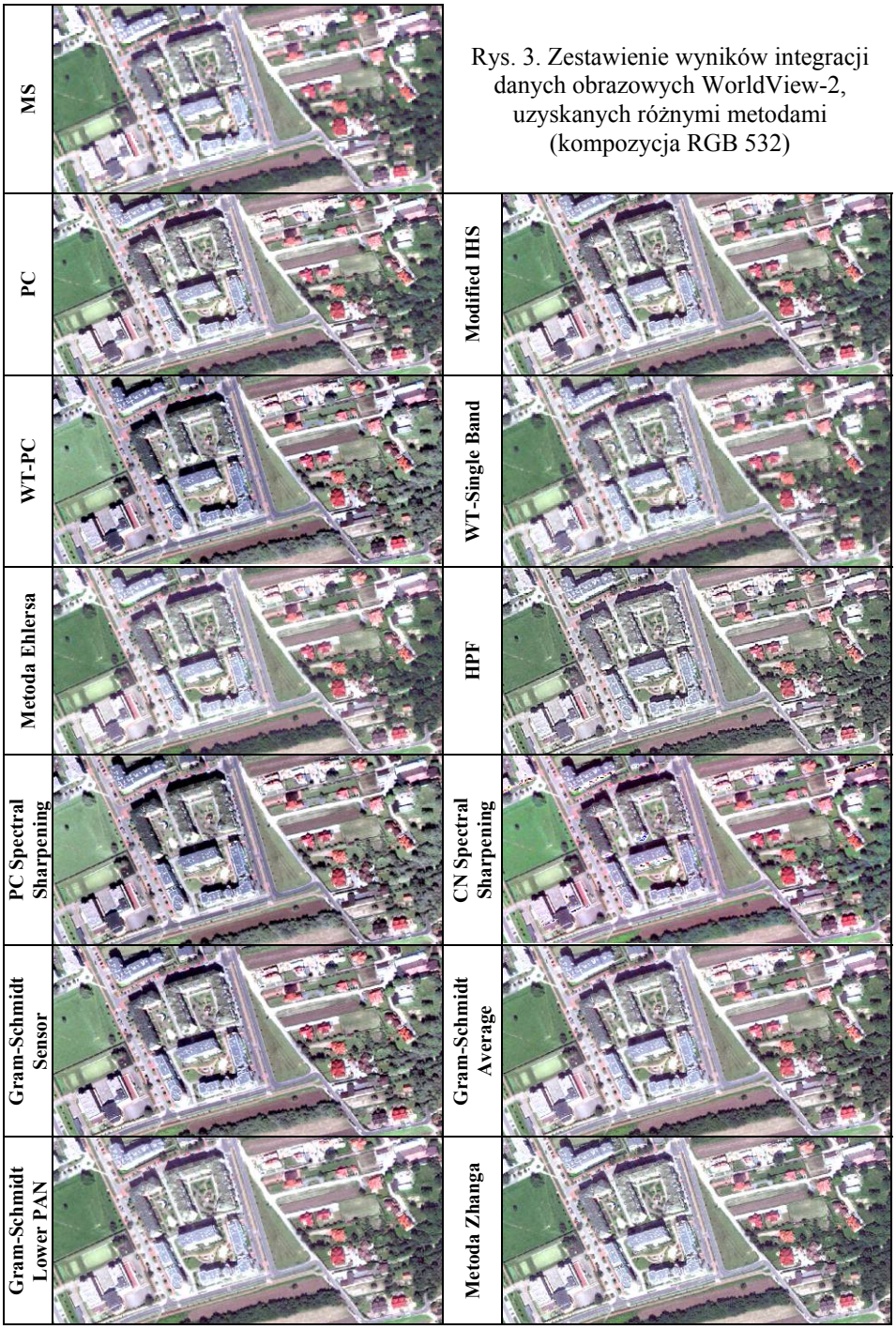
5. ANALIZA WYNIKÓW

5.1. Ocena jakości spektralnej

Poza oceną formalną, statystyczną uzyskanych wyników integracji obrazów panchromatycznych i wielospektralnych dokonano także oceny wizualnej. Zestawienie uzyskanych wyników, w postaci kompozycji w barwach naturalnych (RGB 532) przedstawiono na rys. 3. Porównując otrzymane obrazy wynikowe trudno jednoznacznie stwierdzić, za pomocą którego z algorytmów otrzymywane są produkty o najlepszej jakości spektralnej i przestrzennej. Kolorystyka wszystkich obrazów jest bardzo zbliżona i zgodna z kolorystyką oryginalnego obrazu wielospektralnego. W przypadku metody CN Spectral Sharpening uwidoczniły się błędy w postaci różnokolorowych plam na bardzo jasnych obiektach (ściany budynków, dachy). Pod względem jakości przestrzennej najsłabsze rezultaty (obrazy o najniższej ostrości) dały metody: WT-Single Band i HPF. Do najlepszych metod w tym względzie należą natomiast: algorytm Zhanga, metoda Grama-Schmidta, metoda PC Spectral Sharpening i metoda WT-PC.

Ocena wizualna jest jednak oceną subiektywną i dotyczy konkretnego zestawu kanałów, tworzących analizowaną kompozycję barwną. Stąd jej ułomność w stosunku do metod formalnych, które dają informację na temat jakości całej sceny satelitarnej.

Porównując uzyskane wartości różnych wskaźników jakości spektralnej dla poszczególnych kanałów (Tab. 1 i 2) można zauważyć, że w przypadku niektórych metod (np. PCA, CN Spectral Sharpening) największe zniekształcenia spektralne występują w przypadku zakresów promieniowania widzialnego. W przypadku metody Zhanga, Ehlersa czy Grama-Schmidta tego rodzaju sytuacja nie występuje.



Rys. 3. Zestawienie wyników integracji danych obrazowych WorldView-2, uzyskanych różnymi metodami (kompozycja RGB 532)

Tabela 1. Zestawienie wartości wskaźnika zniekształcenia spektralnego DPP dla poszczególnych kanałów spektralnych

METODA	1	2	3	4	5	6	7	8	$DPP_{śr.}$
PC (ERDAS)	17.687	23.800	24.545	27.075	27.679	11.221	-0.107	-0.893	**16.376**
Modified IHS (ERDAS)	-0.558	-0.441	-0.211	-0.468	-0.595	0.111	-0.471	1.274	**-0.170**
WT-PC (ERDAS)	-0.401	-0.535	-0.552	-0.607	-0.621	-0.258	-0.001	0.008	**-0.371**
WT-Single Band (ERDAS)	0.126	0.004	-0.081	-0.120	0.281	0.012	0.068	-0.075	**0.027**
Ehlers'a (ERDAS)	-0.121	-0.199	-0.325	-0.215	-0.185	-0.494	-0.355	-0.317	**-0.276**
HPF (ERDAS)	-0.503	-0.563	-0.560	-0.575	-0.566	-0.521	-0.556	-0.496	**-0.542**
PC Spectral Sharpening (ENVI)	0.026	0.026	0.074	0.105	0.137	0.044	0.050	-	**0.066**
CN Spectral Sharpening (ENVI)	0.048	11.057	13.097	11.314	9.945	25.681	0.060	0.061	**8.908**
Gram-Schmidt Sensor (ENVI)	0.277	0.394	0.483	0.592	0.599	0.140	-0.207	-0.250	**0.254**
Gram-Schmidt Average (ENVI)	0.036	0.126	0.160	0.208	0.185	0.011	-0.085	-0.155	**0.061**
Gram-Schmidt Lower PAN (ENVI)	-0.020	0.056	0.085	0.130	0.109	0.025	-0.076	-0.141	**0.021**
Zhang'a (PCI)	0.031	0.005	0.005	0.007	0.013	0.030	0.029	0.031	**0.019**

Tabela 2. Zestawienie wartości $RMSE_{spectral}$ dla poszczególnych kanałów spektralnych

METODA	1	2	3	4	5	6	7	8	$RMSE_{śr}$
PC (ERDAS)	22.450	30.127	31.062	34.241	34.999	14.329	0.328	0.947	**21.060**
Modified IHS (ERDAS)	9.615	10.285	10.449	10.320	10.051	17.087	12.914	17.892	**12.327**
WT-PC (ERDAS)	4.480	5.985	6.169	6.792	6.941	2.887	0.010	0.092	**4.169**
WT-Single Band (ERDAS)	5.149	6.471	6.231	6.955	7.303	5.959	8.026	6.331	**6.553**
Ehlers'a (ERDAS)	8.703	8.976	9.429	7.950	7.863	11.071	10.323	11.010	**9.416**
HPF (ERDAS)	10.754	13.735	13.629	15.057	15.665	12.058	15.713	12.482	**13.637**
PC Spectral Sharpening (ENVI)	14.644	19.257	19.476	21.550	22.007	12.002	11.593	-	**17.218**
CN Spectral Sharpening (ENVI)	4.074	19.444	21.727	19.514	17.340	37.913	7.232	5.533	**16.597**
Gram-Schmidt Sensor (ENVI)	11.838	15.509	16.217	17.939	18.204	11.679	11.163	8.630	**13.897**
Gram-Schmidt Average (ENVI)	8.384	10.778	11.401	12.295	12.334	10.501	10.813	8.411	**10.615**
Gram-Schmidt Lower PAN (ENVI)	7.833	10.004	10.598	11.433	11.476	10.260	10.714	8.344	**10.083**
Zhang'a (PCI)	8.773	11.244	11.434	12.272	12.654	11.083	13.320	10.297	**11.385**

Aby było możliwe porównanie poszczególnych wskaźników jakości w odniesieniu do całego obrazu (wszystkich kanałów łącznie), w przypadku wskaźników obliczanych dla każdego kanału oddzielnie, obliczono wartość całkowitą każdego ze wskaźników stosując wzór:

$$W = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(W_k)^2} \tag{12}$$

Analizując różne wskaźniki opisujące jakość spektralną obrazu wynikowego widać wyraźnie, że w zależności od zastosowanego wskaźnika uzyskuje się inny ranking metod (Tab. 4). Np. obliczając wskaźnik nQ% czy $ERGAS_{spectral}$ okazuje się, że właściwości spektralne najlepiej zachowują metody: WT-PC i WT-Single Band, metoda Ehlersa, zaś przy wykorzystaniu wskaźnika DPP najlepszą jest metoda Zhanga. Wynika to m.in. z faktu, iż część wskaźników (np. DPP, DI, RMSE) obliczana jest na zasadzie porównania „pixel to

pixel", natomiast inne wykorzystują parametry statystyczne o charakterze globalnym (wartość średnia, odchylenie standardowe, współczynniki korelacji). Widać więc, iż w celu dokonania rzetelnej oceny jakości algorytmów integracji danych należy stosować różnorodne wskaźniki i metody.

W wyniku analizy wszystkich obliczonych wskaźników jakości spektralnej można stwierdzić, że metody: Zhanga, Grama-Schmidta, Ehlersa, WT-Single Band oraz Modified IHS dają obrazy o radiometrii najbliższej oryginalnego obrazu wielospektralnego. Najsłabiej wypadają tu algorytmy: PC, CN Spectral Sharpening, PC Spectral Sharpening.

5.2. Ocena jakości przestrzennej

Pod względem jakości przestrzennej czyli „absorpcji" szczegółów z obrazu panchromatycznego najwyżej ocenione zostały (Tab. 3 i 4): metoda Zhanga, metoda Gramma-Schmidta we wszystkich wariantach, metoda PC Spectral Sharpenning oraz metoda Ehlersa. Najsłabsze wzmocnienie przestrzenne uzyskane w przypadku obrazów przetworzonych metodami (Tab. 5 i 6): WT-PC oraz WT-Single Band, CN Spectral Sharpenning oraz PC. W przypadku metod PC i CN Spectral Sharpenning o wyniku decydują zakresy bliskiej podczerwieni (kanały 7 i 8), dla których wartości korelacji r_{HP} między obrazem panchromatycznym po filtracji górnoprzepustowej a wynikami integracji danych PAN oraz MS, poddanymi filtracji górnoprzepustowej są bardzo niskie, zaś $RMSE_{spatial}$ i $ERGAS_{spatial}$ wysokie. Analizując tabelę 3 można zauważyć, że podobne wzmocnienie przestrzenne dla poszczególnych kanałów, niezależnie od rejestrowanego zakresu promieniowania, dały: metoda Zhanga, metoda Grama-Schmidta w wariantach Lower PAN i Average, metoda Ehlersa, algorytmy HPF i Modified IHS. Metoda PC Spectral Sharpening, mimo wysokiej ogólnej wartości wszystkich wskaźników jakości przestrzennej, nie zachowuje podobnego wzmocnienia przestrzennego we wszystkich kanałach spektralnych. Bardzo niska wartość np. korelacji r_{HP} występuje w przypadku zakresu bliskiej podczerwieni (kanał 7).

Tabela 3. Korelacja (r_{HP}) między obrazem panchromatycznym po filtracji górnoprzepustowej a wynikami integracji danych PAN i MS, poddanymi filtracji górnoprzepustowej

METODA	1	2	3	4	5	6	7	8	$r_{HPśr.}$
PC (ERDAS)	0.666	0.731	0.759	0.757	0.755	0.317	0.031	0.018	**0.504**
Modified IHS (ERDAS)	0.688	0.714	0.803	0.685	0.719	0.620	0.644	0.550	**0.678**
WT-PC (ERDAS)	0.289	0.300	0.313	0.314	0.308	0.195	0.027	0.019	**0.221**
WT-Single Band (ERDAS)	0.258	0.274	0.319	0.307	0.292	0.303	0.294	0.292	**0.292**
Ehlers'a (ERDAS)	0.823	0.798	0.821	0.752	0.696	0.808	0.833	0.864	**0.800**
HPF (ERDAS)	0.763	0.755	0.743	0.759	0.762	0.670	0.682	0.708	**0.730**
PC Spectral Sharpening (ENVI)	0.979	0.988	0.989	0.985	0.987	0.884	0.090	-	**0.843**
CN Spectral Sharpening (ENVI)	0.094	0.707	0.799	0.759	0.741	0.636	0.078	0.079	**0.487**
Gram-Schmidt Sensor (ENVI)	0.961	0.971	0.976	0.973	0.974	0.923	0.435	0.387	**0.825**
Gram-Schmidt Average (ENVI)	0.956	0.970	0.981	0.976	0.975	0.964	0.859	0.839	**0.940**
Gram-Schmidt Lower PAN (ENVI)	0.938	0.953	0.966	0.962	0.960	0.965	0.899	0.884	**0.941**
Zhang'a (PCI)	0.950	0.945	0.953	0.948	0.944	0.960	0.938	0.942	**0.948**

Tabela 4. Zestawienie wartości analizowanych wskaźników

METODA	Jakość spektralna								Jakość przestrzenna			
	AIL%$_{spec.}$	DI	$Q_{spec.}$	DPP	$\Delta DN_{spec.}$	$RMSE_{spec.}$	$ERGAS_{spec.}$	nQ%	$r_{HPSr.}$	AIL%	$RMSE_{spat.}$	$ERGAS_{spat.}$
PC (ERDAS)	79.629	0.127	0.306	6.968	6.968	8.821	8.168	32.672	0.504	29.450	6.888	3.760
Mod. IHS (ERDAS)	87.086	0.001	0.329	0.216	0.219	4.496	3.348	13.391	0.678	40.506	9.601	6.242
WT-PC (ERDAS)	97.839	0.001	0.350	0.157	0.157	1.753	1.623	6.491	0.221	5.262	8.587	6.544
WT-Single (ERDAS)	96.118	0.002	0.347	0.044	0.044	2.335	1.884	7.535	0.292	8.570	8.482	6.467
Ehlers'a (ERDAS)	91.481	0.001	0.338	0.105	0.116	3.356	2.648	10.591	0.800	64.172	11.036	9.873
HPF (ERDAS)	83.676	0.005	0.323	0.192	0.203	4.858	3.981	15.923	0.730	53.458	7.275	5.422
PC Spectral (ENVI)	73.747	0.013	0.323	0.029	0.020	6.688	5.621	22.483	0.843	80.668	5.685	1.294
CN Spectral (ENVI)	83.766	0.059	0.318	4.294	4.281	6.924	5.246	20.982	0.487	33.609	8.915	5.550
G-S Sensor (ENVI)	82.376	0.012	0.320	0.143	0.132	5.050	4.405	17.621	0.825	73.828	7.109	4.296
G-S Average (ENVI)	89.813	0.007	0.335	0.049	0.045	3.787	3.149	12.595	0.940	88.649	7.734	5.456
G-S Low PAN(ENVI)	90.864	0.005	0.337	0.032	0.031	3.592	2.954	11.817	0.941	88.625	7.948	5.918
Zhang'a (PCI)	88.614	0.006	0.333	0.008	0.006	4.053	3.284	13.134	0.948	89.800	7.820	5.813

6. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że metodami, które najlepiej zachowują właściwości spektralne źródłowego obrazu wielospektralnego przy jednocześnie najmocniejszym wzmocnieniu przestrzennym okazały się: metoda Zhanga (zaimplementowana w PCI Geomatica), metoda Gramma-Schmidta (zaimplementowana w ENVI) oraz metoda Ehlersa (zaimplementowana w ERDAS Imagine). Pozostałe metody albo dobrze zachowują radiometrię źródłowego obrazu wielospektralnego (np. WT-PC), albo dają obrazy o dużym wzmocnieniu przestrzennym. Wymienione powyżej metody dają gwarancję uzyskania obrazów o najwyższej jakości spektralnej i przestrzennej. Wyniki uzyskane w przypadku obrazów z satelity WorldView-2 potwierdzają wcześniejsze badania (Osińska-Skotak, 2006), w których oceniano jakość spektralną i przestrzenną metod integracji obrazów panchromatycznego i wielospektralnego z satelity QuickBird. Wówczas najlepszymi metodami integracji danych obrazowych okazały się metoda Zhanga i metoda Grama-Schmidta[1]. Wykonana analiza potwierdza uniwersalność działania obu metod niezależnie od danych wejściowych.

7. LITERATURA

Aiazzi B., Baronti S., Selva M., Alparone L., 2006. Enhanced Gram-Schmidt Spectral Sharpening based Multivariate Regression of MS and Pan Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, s. 3806-3809.

[1] Metoda Ehlersa została zaimplementowana w późniejszych wersjach programu ERDAS Imagine.

Aiazzi B., Baronti S., Selva M., 2007. MS+Pan Image Fusion by an Enhanced Gram-Schmidt Spectral Sharpening. *New Developments and Challenges in Remote Sensing*, Z. Bochenek (ed.), 2007 Millpress, Rotterdam.

Beaulieu M., Foucher S., Gagnon L., 2003. Multi-Spectral Image Resolution Refinement using Stationary Wavelet Transform. *Proceedings IGARS2003*, Toulouse.

Carper W., Lillesand T., Kiefer R., 1990. The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data. *Photogrammetric Engineering of Remote Sensing*, Vol. 56, No. 4, s. 459-467.

Chaves, P.S., Sides, C., Anderson, J.A., 1991. Comparison of Tree Different Methods to Merge Multiresolution and Mulstispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 57, No. 3, s. 295-303.

Ehlers M., Klonus S., Åstrand P.J., 2008. Quality Assessment for Multi-Sensor Multi-Date Image Fusion. *The International Archives of the Photogrammetry*, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII. Part B4., Beijing 2008.

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.

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, s. 81-84.

Han S.H., Kang J.M., 2004. Image Fusion of LANDSAT and Korean Satellite KOMPSAT. *XX ISPRS Congress*, Vol. XXXV, Commission I, WG I/3, Istambul 2004.

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, s. 1263-1268.

Mróz M., Szumiło M., 2005. Metody i podejścia stosowane w integrującym przetwarzaniu obrazów teledetekcyjnych pozyskanych za pomocą różnych sensorów. *Acta Scientiarum Polonorum, seria: Geodezja i Kartografia*, Wrocław, 4 (1), s. 17-28.

Osińska-Skotak K., 2006. Potencjał interpretacyjny zdjęć wysokorozdzielczych – wpływ metody łączenia danych MS i PAN na wartość interpretacyjną zdjęć VHR. *Materiały z sesji naukowej 85-lecia Wydziału Geodezji i Kartografii*.

Osińska-Skotak K., 2011. Integracja obrazów panchromatycznych i wielospektralnych, Opracowanie w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki: Zadanie 23 - Opracowanie programów oraz materiałów dydaktycznych i naukowych dla studiów doktoranckich z zakresu technik satelitarnych, Wydział Geodezji i Kartografii.

Pirowski T., 2006. Integracja danych teledetekcyjnych pochodzących z różnych sensorów – propozycja kompleksowej oceny scalonych obrazów. *Geoinformatica Polonica*, 8, Kraków

Price J. C., 1987. Combining Panchromatic and Multispectral Imagery from dual Resolution Satellite Instruments. *Remote Sensing of Environment*, 21, s. 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*, 66, s. 49-61.

Wald, L., 1999. Some Terms of Reference in Data Fusion. *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing*, vol. 37, No. 3, s. 1190-1193.

Wald, L., 2002. Data fusion - Definitions and architectures - Fusion of images of different spatial resolutions. École deMines de Paris.

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, s. 691-699.

Wang Z., Li D., 1999. A Image Fusion Method: Improve the Spatial Resolution While Preserve the Color. *Asian Conference on Remote Sensing*.

Zhang Y., 1999, A new merging method and its spectral and spatial effects, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, No. 10, 2003–2014.

Zhang, Y., 2002, Problems in the Fusion of Commercial High-resolution Satellite Images as well as LANDSAT 7 Images and Initial Solutions, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IASPRS), vol. 34, part 4, "GeoSpatial Theory. Processing and Applications", Ottawa, July 2002.

Zhang, Y., 2002, A New Automatic Approach for Effectively Fusing Landsat 7 images and IKONOS Images, IEEE/IGARSS'02, Toronto, Canada, June 24-28, 2002.

Zhang, Y., 2004, Understanding Image Fusion, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, June 2004, 657-661.

Zhoua, 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.

ASSESSMENT OF DIFFERENT IMAGE FUSION METHODS ON EXAMPLE WORLDVIEW-2 IMAGES

KEY WORDS: WorldView-2, image fusion, spectral quality, spatial quality

Summary

This paper presents the results of complex evaluation of the quality of image fusion algorithms, which are implemented in different software. All analysis were made for WorldView-2 satellite image. It is the only a very high resolution satellite system, which acquires image in 8 spectral bands. These spectral bands give the larger possibility of applying application than is inthe case of image with 4-bands data, such as the assessment of carbon stocks in forests and inland water investigation. However, the results of quantitative analyzes depend on the applied image fusion algorithm, it is important to assess the quality of the resultsed obtained using different algorithms implemented in various commercial software packages (ERDAS Imagine, PCI Geomatica, ENVI). Evaluation of quality of the image fusion results has been made in terms of spectral and spatial quality. To determine the spectral and spatial quality of the processed images, used in such the correlation coefficient, RMSE, quality index Q, new quality index nQ%, ERGAS, Deviation Index (DI) and Deviation Per Pixel (DPP) were used. The best results, both in terms of the spectral and spatial quality, were given by give three methods: Zhang algorithm (PCI Geomatica), Gram-Schmidt transformation (ENVI) and Ehlers algorithm (ERDAS Imagine).

Dane autora:

Dr hab. inż. Katarzyna Osińska-Skotak
e-mail: kos@gik.pwedu.pl
telefon: 22 234 73 58
fax: 22 234 53 89