

STANISŁAW MULARZ^{*}, TOMASZ PIROWSKI^{**}

ASPEKTY METODYCZNE INTEGRACJI DANYCH TELEDETEKCYJNYCH W OPARCIU O METODĘ IHS I JEJ MODYFIKACJE

Słowa kluczowe: obrazy satelitarne, wzmacnianie przestrzenne, integracja danych teledetekcyjnych, metody IHS, Landsat ETM+, IRS 1C

STRESZCZENIE. Efektywne monitorowanie aglomeracji miejsko-przemysłowych wymaga posiadania informacji obrazowej o dużym stopniu szczegółowości. Jest to warunek niezbędny do zarejestrowania obiektów o relatywnie niewielkich rozmiarach oraz do odwzorowania cech strukturalno-teksturalnych charakterystycznych dla różnorodnych elementów środowiska miejskiego. Postulat taki realizują wysokorozdzielcze obrazy satelitarne, jednak pozyskanie danych jest drogie, a rejestracja spektralna ograniczona do czterech kanałów (IKONOS, QuickBird) lub tylko i wyłącznie do kanału panchromatycznego (EROS, IRS 1C/D), co ogranicza interpretację i klasyfikację pozyskanych informacji, w tym szczególnie utrudnia detekcję i waloryzację stref zieleni miejskiej. Z kolei relatywnie tani, wielospektralny system Landsat TM charakteryzuje się zbyt niską rozdzielczością przestrzenną dla tego typu badań.

W artykule została zaprezentowana idea scalania satelitarnych obrazów Landsat TM (30m) z obrazem panchromatycznym IRS 1C (5.8m). Prawidłowo przeprowadzona integracja tego typu danych prowadzi do uzyskania materiałów teledetekcyjnych o bogatej informacji przestrzennej i spektralnej. W badaniach jako wyjściową metodę integracji przyjęto standard IHS. Z analiz wcześniej prowadzonych przez autorów na obszarze KWB Bełchatów wynika, że metoda ta charakteryzuje się wysokimi walorami interpretacyjnymi, pomimo wprowadzania na obrazy syntetyczne wysokich zniekształceń. Badania prowadzone przez autorów zmierzają do ograniczenia tej wady poprzez zaproponowanie modyfikacji standardu. Uzyskane wyniki zostały porównane do standardowej metody IHS oraz innych klasycznych metod integracji jak PCA, HPF, CN. Dla oceny zawartości i rozkładu informacji, a także stopnia zniekształcenia spektralnego scalonych obrazów zastosowano metody statystyczne oraz interpretacji wizualnej.

METHODICAL ASPCTS OF REMOTE SENSING DATA NTEGRATION BASED ON IHS METHOD AND ITS MODIFICATIONS

Keywords: satellite image, image enhancement, image merging, IHS methods, Landsat ETM+, IRS 1C

^{*} dr hab. inż., prof. AGH, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

^{**} dr inż., Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

ABSTRACT. Effective monitoring of urban and industrial agglomerations requires possessing image information of a great degree of accuracy. It is a necessary condition to capture the objects of relatively small size and reproduce structural and textural features characteristic for different elements of urban environment. Such a requirement is fulfilled by high-resolution satellite images, however receiving data is expensive and spectral registration limited to four channels (IKONOS, QuickBird) or only and exclusively to panchromatic channel (EROS, IRS 1C/D), which limits the interpretation and classification of information and makes particularly difficult sensing and valuation of urban green areas. On the other hand, a relatively cheap, multi-spectral system of Landsat TM is characterized by too low spatial resolution for this type of studies.

The article presents the idea of integrating satellite images Landsat ETM+(30m) with panchromatic image IRS 1C (5.8m). Properly done integration of this sort of data leads into getting remote sensing materials of rich spatial and spectral information. In the studies – as a initial method of integration IHS standard was accepted. From the analyses earlier carried out by the authors in the area of KWB Belchatów it can be stated that this method has great interpretation values, despite introducing high deformations into synthetic images. The studies carried out by authors go towards the limitation of this disadvantage by proposing the modifications of the standard. The obtained results were compared to standard IHS method and other classical methods of integration such as PCA, HPF, CN. To assess the content and the distribution of information and the degree of spectral deformation of combined pictures, statistic methods and visual interpretation were applied.

1. Wstęp

Stale wzrastająca liczba dostępnych na rynku danych satelitarnych otwiera nowe możliwości wykorzystania tak szerokiego spektrum informacji do monitoringu powierzchni Ziemi. Dostępne obrazy pozwalają uzyskać informację o różnej czasowej, spektralnej, przestrzennej czy radiometrycznej dokładności. Tak duża różnorodność obrazów satelitarnych dotyczących jednego obiektu bądź obszaru daje możliwość komplementarnego wykorzystania danych w taki sposób, by otrzymać więcej informacji, niż może być pozyskane z każdego obrazu osobno. Jest to szczególnie przypadki sytuacji, gdy połączenie różnego rodzaju danych prowadzi do uzyskania synergicznego wzrostu informacji. Dla danych obrazowych można to sprecyzować jako integrację i uzupełnienie się wzajemne danych prowadzące do zwiększenia informacji znajdujących się na obrazie i/lub ich uwiarygodnienie. Dla zrealizowania takiego zamierzenia zostało opracowanych szereg zaawansowanych technik analitycznych i cyfrowych.

Szczególnym przypadkiem łączenia danych jest fuzja na poziomie piksela, co oznacza łączenie na niskim poziomie przetwarzania – w odniesieniu do zmierzonych parametrów fizycznych. Obrazy wejściowe poddawane są wstępnemu przetwarzaniu. Produktem jest syntetyczny obraz, na którym jest prowadzona dalsza analiza informacji. Najczęstsze wykorzystanie łączenia na tym poziomie to np. wyostrenie obrazu dla celów interpretacyjnych, wzmocnienie cech nierozróżnialnych w pojedynczych zestawach danych, uzupełnienie zestawu danych celem polepszenia klasyfikacji (Pohl *et al.* 1998). Tego typu podejście stosuje się dysponując obrazem panchromatycznym o wysokiej rozdzielczości przestrzennej i kanałami spektralnymi o relatywnie niskiej rozdzielczości przestrzennej. Najczęstsze zastosowania to: produkcja wielkoskalowych map satelitarnych, analiza małych obiektów lub terenów charakteryzujących się dużą częstotliwością (zmiennością) informacji przestrzennej. Warunkiem skutecznego zastosowania takiego podejścia jest dysponowanie sy-

multanicznymi (lub ewentualnie o zbliżonych terminach rejestracji) danymi. W wyniku uzyskuje się nowy zestaw danych multispektralnych o podwyższonej – w stosunku do danych wejściowych - rozdzielczości przestrzennej, nie większej jednak od rozdzielczości użytego obrazu panchromatycznego.

Kluczowym elementem wpływającym na jakość uzyskiwanych nowych danych multispektralnych jest wybór odpowiedniego algorytmu łączenia obrazów. Musi on rozwiązywać główny problem integracji danych, jakim jest wprowadzanie informacji panchromatycznej (z zakresu widzialnego) do kanałów podczerwonych, co powoduje zakłócenie – w większym bądź mniejszym stopniu - oryginalnej informacji spektralnej. Od lat 80-tych podawane są różne propozycje realizacji postulatu zachowania informacji spektralnej, jednak żadna z nich nie okazała się wystarczająco uniwersalna lub zdecydowanie lepsza od pozostałych. Obecnie na miano standardu zasługuje metoda wykorzystująca transformację IHS (*Intensity Hue Saturation*), która zdobyła sobie popularność ze względu na swoją prostotę, dostępność procedur transformacyjnych w większości pakietów GIS i w programach graficznych oraz uzyskiwane relatywnie dobre wyniki pod względem walorów interpretacyjnych. Nie należy jednak utożsamiać popularności tej metody z jej uniwersalnością.

W literaturze spotyka się różnorodne propozycje podziału metod integracji danych. Najczęściej stosowanym podejściem jest klasyfikacja metod wg technik łączenia obrazów. Szerokie i usystematyzowane podejście tego typu stosują Pohl *et al.* (1998) wydzielając dwie podstawowe grupy metod:

- oparte na transformacji barw;
- statystyczno-numeryczne.

Do pierwszej autorzy zaliczają operacje oparte o kompozycje barwne RGB oraz bardziej zaawansowane przekształcenia wykorzystujące transformacje do modeli kolorów IHS i HSV (Welch *et al.* 1987; Carper *et al.* 1990). W tej grupie wiodącą metodą jest IHS. W drugiej grupie wydziela się techniki oparte na działaniach arytmetycznych (Cliché *et al.* 1985; Pradines 1986; Price 1987; Pellemans *et al.* 1993; Munechika *et al.* 1993; Wiemker *et al.* 1998), rozwinięte na bazie statystyki kanałów np. składowych głównych, regresji (Chavez *et al.* 1991; Shettigara 1992) oraz metody filtracyjne (Chavez 1986), w tym wykorzystujące operacje na piramidach obrazów (Wald *et al.* 1995).

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki uzyskane standardową metodą IHS (główny przedstawiciel metod opartych na transformacji barw), a następnie skonfrontowano je z wynikami wybranych metod należących do drugiej grupy. Następnie, z uwagi na dużą popularność metody IHS oraz jej wysokie walory wizualne, podjęto próby zmodyfikowania formuły celem poprawy wyników formalnych. Przetestowano trzy różne podejścia łącząc metodę IHS z obrazem panchromatycznym przez jego analizę teksturalną, filtrację górnoprzepustową oraz lokalne zmiany wariancji i jasności.

2. Charakterystyka danych i pole testowe.

Bazą dla prowadzonych w niniejszej pracy badań były obrazowe dane satelitarne pochodzące z dwóch sensorów: LANDSAT 7 ETM+ oraz IRS 1C PAN. Dane te zostały zortorektyfikowane programem PCI OrthoEngine przy użyciu Numerycznego Modelu Rzeźby Terenu o rozdzielczości 30 metrów.

LANDSAT 7 jest amerykańskim satelitą umieszczonym na orbicie w kwietniu 1999 roku. Obrazy rejestrowane są przez skaner optyczno mechaniczny ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Skaner pozyskuje dane z 8. bitową rozdzielczością radiometryczną w 8. zakresach spektralnych. W badaniach wykorzystano scenę zarejestrowaną w dniu 7 maja 2000 r o godzinie 9²⁵ czasu lokalnego. Do przetwarzania użyto fragment obejmujący obszar testów złożony z zestawu kanałów spektralnych TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 i TM7.

IRS-1C (*Indian Remote Sensing*) jest indyjskim satelitą umieszczonym na orbicie w roku 1995 wyposażonym m.in. w skaner panchromatyczny PAN oraz skaner multispektralny LISS-III. Obrazy panchromatyczne posiadają rozdzielczość 5,8m x 5,8m i są rejestrowane z 6. bitową rozdzielczością radiometryczną, w zakresie spektralnym 0,50-0,75 μm . System zawiera skaner elektrooptyczny z trzema linijkami detektorów. Każda z nich rejestruje odrębny pas o szerokości 23km o niewielkim wzajemnym pokryciu poprzecznym. Wykorzystano w badaniach fragmenty dwóch pasów obrazowania: środkowy i prawy wykonane w dniu 28 maja 2000 r o godzinie 9⁵³ czasu lokalnego.

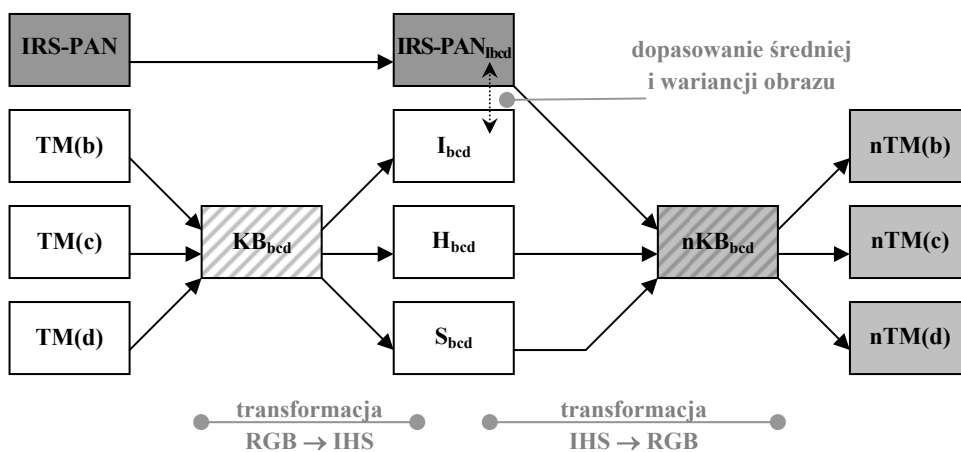
Na obszar testowy wybrano aglomerację krakowską. Prostokątny kształt (o wymiarach 20km x 10km) przyjęto dla wygody przetwarzania danych obrazowych w systemach GIS. Wskazany obszar był wystarczająco obszerny dla reprezentowania przeciętnych elementów i struktur występujących w środowisku miejsko-przemysłowym dla średnich szerokości geograficznych. Stosunkowo duża strefa buforowa wokół miasta zapewniła analizę wyników nie tylko dla ścisłego centrum aglomeracji (zwarta zabudowa, przemysł, zieleń miejska) ale i dla obszarów mieszanych, np. stref podmiejskich wraz z charakterystyczną infrastrukturą związaną funkcjonalnie z miastem (sieć komunikacyjna, lotnisko, strefy rekreacyjne, zabudowa willowa, rolnictwo i ogrodnictwo).

3. Metody bazowe

3.1. Metoda IHS

Metoda oparta o transformację IHS (*Intensity-Hue-Saturation*) była wykorzystywana do scalania różnych danych: obrazów Landsat MSS z danymi RBV, danych SPOT (Carper *et al.* 1990; Bretschneider *et al.* 2000), danych Landsat TM i SPOT PAN (Welch *et al.* 1987), danych MOMS-2P z satelity Priroda (Hill *et al.* 1999), danych IRS 1C (Lewiński 2001), Landsat 7 ETM+ (Mróz 2001) czy wielospektralnych obrazów Landsat TM ze zdjęciami lotniczymi (Mularz *et al.* 2000a, 2000b). W metodzie IHS trzy wybrane niskorozdzielcze kanały spektralne transformuje się z modelu barw RGB do modelu barw IHS. W ten sposób

uzyskuje się rozdzielenie informacji przestrzennej w postaci obrazu I (*Intensity* - jasności) od informacji spektralnej w postaci obrazów H (*Hue* - barwa) i S (*Saturation* - nasycenie). W drugim kroku za składową I podstawia się obraz PAN o wyższej rozdzielczości, po czym następuje transformacja powrotna do modelu barw RGB (rys. 1). W wyniku tego procesu informacja przestrzenna jest wprowadzana na poszczególne kanały spektralne. Dla uniknięcia dużych zniekształceń kolorystycznych stosuje się modyfikację obrazu panchromatycznego w taki sposób, aby jego parametry statystyczne (średnia wartość i wariancja) były zbliżone do składowej I po wykonanej transformacji danych spektralnych. Wysoka korelacja i uzyskiwane podobieństwo to podstawowe wytłumaczenie zastąpienia składowej jasności rozciągniętym obrazem o wyższej rozdzielczości przestrzennej – wtedy I można potraktować jako ekwiwalent informacji przestrzennej zawartej w zobrazowaniach wielospektralnych (Chavez *et al.* 1991). Metoda posiada ograniczenie dotyczące możliwości jednokrotnego użycia do integracji tylko trzech kanałów spektralnych.

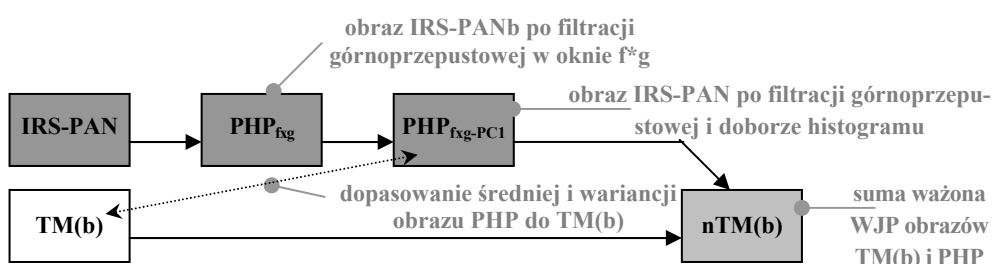


Rys. 1. Integracja danych metodą IHS

3.2. Metoda HPF

Metoda HPF (*High-Pass Filter*) polega na zastosowaniu filtracji górnoprzepustowej na obrazie o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej (Showengerdt 1980). Tego typu operacje stosowano dla integracji danych satelitarnych ze zdjęciami lotniczymi (Chavez 1986; Mularz *et al.* 2000a, 2000b) oraz dla integracji zobrazowań TM z obrazem SPOT PAN (Chavez *et al.* 1991). W metodzie HPF zakłada się, że filtracja górnoprzepustowa usuwa większość informacji spektralnej ze zobrazowania panchromatycznego pozostawiając głównie informacje wysokoczęstotliwościowe, które głównie odnoszą się do informacji przestrzennej. Powstały obraz ma średnią zbliżoną do zera, a zakres wartości i ich wariancja zależą od wielkości ruchomego okna (wraz ze wzrostem okna filtrowania wzrastają ww. wielkości). Obraz po filtracji górnoprzepustowej może być znormalizowany poprzez dobór histogramu. Następnie jest dodawany – piksel po pikselu – do poszczególnych kanałów spektralnych (rys. 2). W wyniku otrzymuje się zestaw obrazów wielospektralnych o pod-

wyższej rozdzielczości przestrzennej. Głównym parametrem wpływającym na jakość integracji jest wielkość okna filtrowania. Zastosowanie zbyt małego okna filtracji powoduje jedynie wydobywanie informacji teksturalnej znajdującej się wewnątrz piksela o niższej rozdzielczości przestrzennej, ale jest niewystarczające dla scalenia danych. Z kolei użycie zbyt dużego okna powoduje – obok dobrych możliwości integracji danych – niepotrzebne na tym etapie wzmocnienie krawędzi. W odniesieniu do prezentowanych w niniejszym artykule badań rozmiar ruchomego okna wynosił (9x9).



Rys. 2. Integracja danych metodą HPF

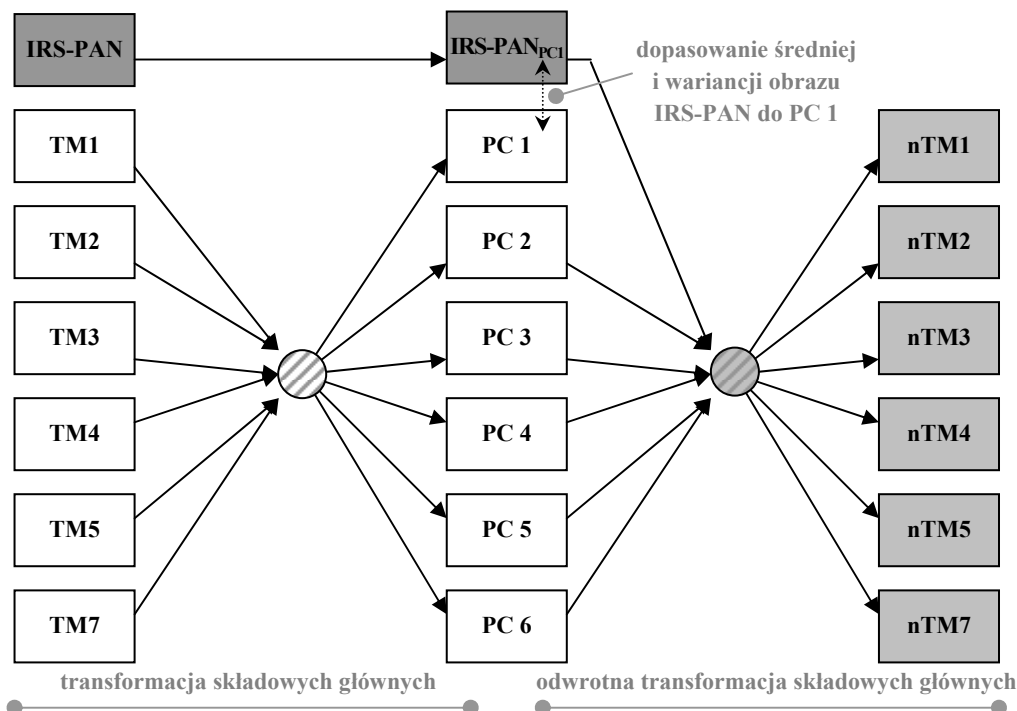
3.3. Metoda PCA

Jest to metoda oparta o analizę składowych głównych (Shettigara 1992). PCA jest procedurą zbliżoną ideowo do metody IHS. Podobnie jak w procedurze IHS jest wykorzystywana transformacja z oryginalnej przestrzeni kanałów do nowej przestrzeni – tym razem głównych składowych. Następnie dokonuje się podmiany kanałów niosących informację przestrzenną i przeprowadza się transformację odwrotną (rys. 3). Procedura PCA pozwala wykorzystać równocześnie nie tylko trzy (jak miało to miejsce w metodzie IHS), ale większą liczbę kanałów spektralnych. Daje to możliwość wpływu na wyniki procedury PCA poprzez wybór ilości kanałów spektralnych równocześnie biorących udział w procesie integracji. Analogicznie jak w metodzie IHS, histogram obrazu panchromatycznego jest dostosowywany do ekwiwalentu informacji przestrzennej wyekstrahowanej z kanałów spektralnych a następnie podmieniany. W metodzie PCA przyjmuje się, że jest to pierwsza składowa główna procesu transformacji (PC1). Po transformacji odwrotnej informacja przestrzenna lokuje się z różnym natężeniem we wszystkich kanałach spektralnych, które brały udział w transformacji. Poprzez zastąpienie pierwszej głównej składowej, która zawiera maksymalną wariancję w zestawie danych o niskiej rozdzielczości, maksymalizuje się efekt wyższej rozdzielczości w kanałach po transformacji odwrotnej (Shettigara 1992).

3.4. Metoda Wiemkera (WMK)

Podejścia, wykorzystujące dzielenie międzykanałowe, dały początek grupie metod scalania danych zwanych SRC - *Spectral Relative Contribution* (Wiemker *et al.* 1998). Cechą wspólną tych rozwiązań jest to, że oryginalna odpowiedź spektralna w danym kanale – wartość atrybutu piksela - jest mnożona przez pewien współczynnik – wagę. Ta wartość

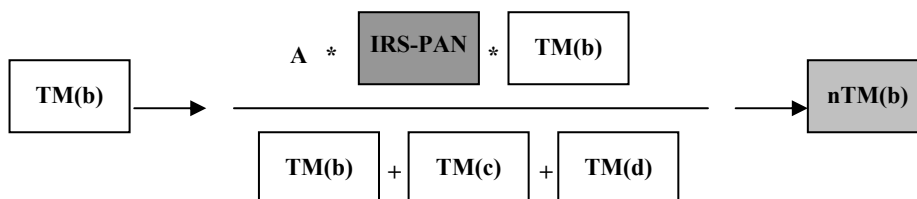
reprezentuje wkład informacji spektralnej z kanału tematycznego do kanału panchromatycznego. Jest ona równa stosunkowi kanału panchromatycznego i kombinacji kanałów spektralnych, które pokrywa swoim zakresem spektralnym kanał panchromatyczny.



Rys. 3. Integracja danych metodą PCA

Jedną z pierwszych propozycji tego typu była metoda P+XS stosowana dla kanałów widzialnych SPOT (zielonego i niebieskiego), opracowana przez CNES (*Centre National d'Etude Spatiale*). Rozszerzeniem metody ilorazowej na więcej niż dwa kanały spektralne jest transformacja Brovey'a (Hallada *et al.* 1983). Normalizuje ona trzy kanały multispektralne wchodzące w skład kompozycji barwnej w celu zachowania integralności radiometrycznej. Rezultat mnoży się przez dowolne inne dane zawierające informację przestrzenną. Przebieg procedury dla pojedynczego kanału ilustruje rys. 4, przy parametrze $A=1$. Pomimo generowanych dużych zniekształceń spektralnych metoda ta jest często używana dla różnych zastosowań o charakterze fotointerpretacyjnym, np. detekcji zmian na terenach miejskich (Ranchin *et al.* 2000) czy monitoringu kopalni odkrywkowej (Mularz *et al.* 2000a, 2000b). Rozwinięciem transformacji Brovey'a jest metoda *Color Normalised - CN* (Hallada *et al.* 1983). Rozwiązanie to testują m. in. Rigol *et al.* (1998), Bretschneider *et al.* (2000) oraz Vrabel (1996). W metodzie CN przemnożenie jasności obrazu po fuzji przez wartość „3” ($A=3$ na rys. 4) zwiększa jasność sceny obniżoną wskutek dzielenia międzykanałowego. Nie wystarcza to jednak do zachowania średniej wartości odpowiedzi spektralnej dla nowego generowanego obrazu. Wiemker *et al.* (1998) proponują zatem obliczyć średnią

odpowieź spektralną na obrazie oryginalnym i po wstępnej integracji z obrazem panchromatycznym, a następnie parametr ten wykorzystać do ostatecznego obliczenia średniej jasności syntetycznego obrazu. Współczynnikiem odpowiedzialnym za odpowiednie zachowanie średniej jasności sceny jest „A”. W rezultacie nowy obraz zachowuje średnią jasność jak obraz sprzed fuzji, co nie było osiągnięte wcześniej podczas transformacji Brovey’ a i tylko częściowo przy trzykrotnym zwiększaniu jasności sceny w metodzie CN.



Rys. 4. Integracja danych metodami: transformacji Brovey’ a ($A=1$), CN ($A=3$), Wiemkera (A obliczane każdorazowo dla konkretnego kanału)

4. Propozycje modyfikacji metody IHS.

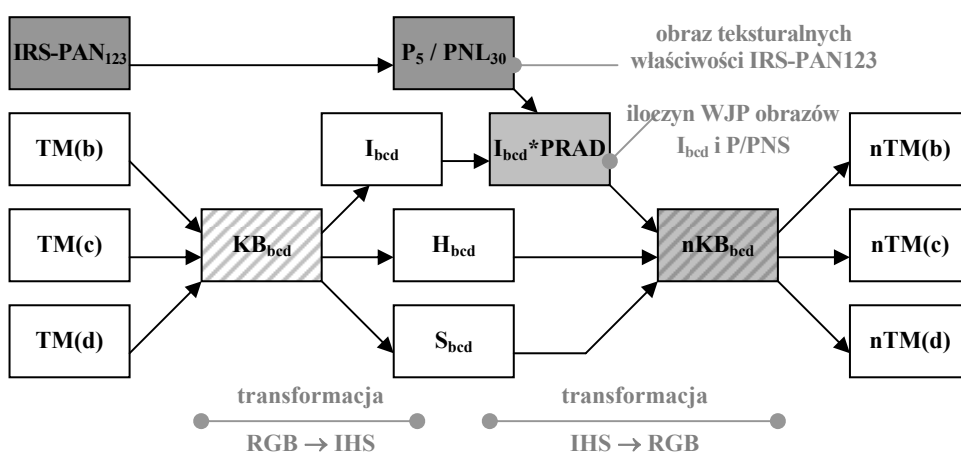
Głównym zarzutem stawianym koncepcji scalania danych obrazowych procedurą IHS jest duża niestabilność składowej I_{bcd} w zależności od użytych wejściowych kanałów spektralnych (znacząco zmienia się jej korelacja z obrazem panchromatycznym). Zmiana zawartości informacji w składowej jasności szczególnie nasila się przy wzrastającej ilości kanałów spoza zakresu widzialnego. Z reguły spada wtedy podobieństwo obrazu I_{bcd} do obrazu panchromatycznego i wątpliwy staje się do utrzymania postulat, że tą składową można potraktować jako ekwiwalent informacji przestrzennej zawartej w zobrazowaniach wielospektralnych (do składowej I_{bcd} jest wprowadzana nie tylko informacja przestrzenna, ale również część informacji spektralnej). W konsekwencji podmiany obrazu PAN za obraz I_{bcd} część informacji spektralnej jest bezpowrotnie tracona. Wprowadzana na jej miejsce informacja przestrzenna obrazu panchromatycznego jest po retransformacji nadmiernie eksponowana, co szczególnie niekorzystnie uwidacznia się w kanałach spoza zakresu widzialnego (następuje znaczące zniekształcenie barw).

W celu zapobieżenia tego typu niekorzystnym tendencjom stosuje się różnego typu zabiegi ochrony informacji z zakresu podczerwonego. Jednym z nich jest podmiana składowej I mieszaną informacją pochodzących z kanału panchromatycznego i jednego z kanałów podczerwonych. Opracowana przez Carper’ a *et al.* (1990) metoda WTA – *WeighTed Average* jest połączeniem metody IHS z wzorami arytmetycznymi podanymi przez Cliché *et al.* (1985). Autorzy sugerują dla kompozycji barwnej KB 234 podmianę obrazu I_{bcd} poprzez sumę ważoną: złożoną z oryginalnego kanału podczerwonego (75%) i panchromatycznego (25%). Z kolei Mróz (2001) proponuje tylko wzmocnienie informacji przestrzennej w obrazie I_{bcd} , a nie podmianę kanałów. Swoją metodę określa jako „wykorzystującą teksturalne właściwości kanału panchromatycznego”. Jest to połączenie metody IHS z rozwiązaniem HFM (*High-Frequency Modulation*) opisanym przez Pradines (1986). Tego typu modyfi-

kację IHS stosują Zhijun *et al.* (1999). Inne podejście, noszące nazwę IHS-SC, polega na zastosowaniu sferycznej (a nie cylindrycznej) transformacji IHS (Pellemans *et al.* 1993; Rigol *et al.* 1998). Proponuje się również wykonywanie rozciągnięcia liniowego histogramu na obrazach oryginalnych przed procesem fuzji albo na obrazach H i S lub H, S i I (Lewiński 2001).

4.1. Metoda IHS-PRAD

Przy pierwszej modyfikacji (tzw. IHS-PRAD) zrezygnowano z podmiany składowej I_{bcd} . Zamiast tego dokonano jej modyfikacji opierając się o cechy teksturalne obrazu IRS-PAN (rys. 5).



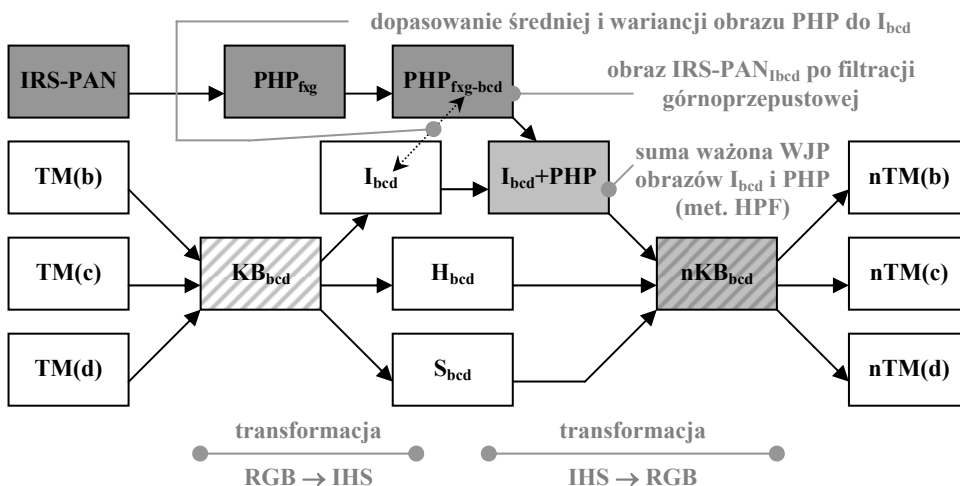
Rys. 5. Integracja danych metodą IHS-PRAD.

W tym celu wykorzystano sposób postępowania zaproponowany przez Pradines (1986). Zakłada on, iż niedobór informacji przestrzennej w odwzorowaniu multispektralnym może być zrekomensowany poprzez zdegradowanie obrazu panchromatycznego w tzw. „superpiksele” a następnie - porównanie obydwu obrazów. Tzw. „superpiksel” jest geometrycznie zlokalizowany identycznie jak piksel spektralny, jest równy mu powierzchniowo, a jego wartość jasności jest wartością uśrednioną z wartości pikseli oryginalnego obrazu panchromatycznego. Porównanie obrazów oryginalnego i zdegradowanego następuje poprzez obliczenie stosunku jasności pikseli. Niniejsze testy wykazały, że lepsze wyniki uzyskuje się degradując obraz panchromatyczny poprzez filtrację dolnoprzepustową. Po zmodyfikowaniu I_{bcd} do postaci $nI_{bcd}PRAD$ następowała transformacja odwrotna z przestrzeni barw IHS do RGB. Podobną ideę zastosował Mróz (2001) integrując dane panchromatyczne i spektralne satelity Landsat ETM+.

4.2. Metoda IHS-HPF

Drugie podejście oparto o modyfikację obrazu I_{bcd} przy pomocy metody HPF (rys. 6.). Do obrazu jasności I dodawana była informacja przestrzenna, którą pozyskano z obrazu pan-

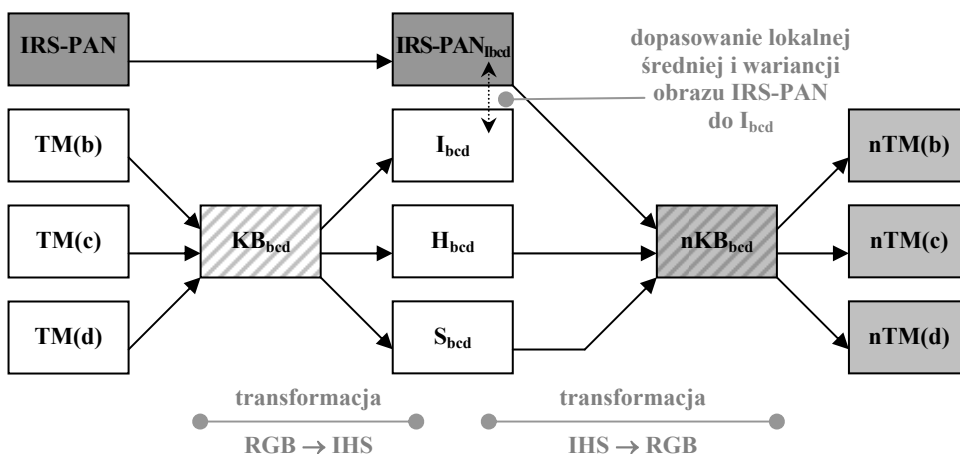
chromatycznego w procesie filtracji górnoprzepustowej w oknach (9x9), (7x7), (5x5). Po tym etapie następowala transformacja odwrotna do przestrzeni RGB.



Rys. 6. Integracja danych metodą IHS-HPF.

4.3. Metoda IHS-LMVM

Trzecia modyfikacja metody IHS (tzw. IHS-LMVM) polegała na zmianie sposobu dopasowania średniej i wariancji obrazu IRS-PAN, który zastępuje składową I_{bcd} (rys. 7.). W tym przypadku obraz IRS-PAN jest przekształcany radiometrycznie lokalnie, a nie globalnie, tj. na każdym obszarze obrazu skala i kierunek przekształcenie jasności pikseli mogą być różne.



Rys. 7. Integracja danych metodą IHS-LMVM.

Dla realizacji tego zadania wykorzystano zasady podane przez Béthune *et al.* (1998). W niniejszej publikacji przedstawiono efekt wykorzystania algorytmu LMVM (*Local Mean Variance Matching*). Polega on na modyfikowaniu obrazu panchromatycznego w taki sposób, że przekształcony obraz charakteryzuje się lokalną zgodnością średniej jasności i wariancji w stosunku do wzorca w każdym miejscu obrazu. Obszar tej lokalnej zgodności parametrów statystycznych obu obrazów definiuje wielkość okna obliczeń. Przekształcenie prowadzące do uzyskania takiego zmodyfikowanego radiometrycznie obrazu bazuje technicznie na filtrach adaptacyjnych AIM – Adaptive Intensity Matching filters. W oparciu o tą technikę propozycje podali m.in. Béthune *et al.* (1998) oraz Hill *et al.* (1999). W testowanym przypadku wzorcem jest obraz I_{bcd} a obrazem modyfikowanym – IRS-PAN. Testowano okna obliczeń (3x3), (5x5), (7x7), (9x9), (11x11), (15x15), (21x21), (31x31), (41x41), (51x51), (61x61), (121x121).

5. Analizy i porównanie.

5.1. Ocena statystyczna

Do analizy statystycznej wykorzystano parametry syntetycznie opisujące stopień zniekształcenia spektralnego oraz stopień wzrostu uczytelnienia obrazów. Parametr $nQ_{\%}$ zaproponowany przez Walda (2000) i uproszczony w badaniach prowadzonych dla jednego zestawu danych przez Pirowskiego (2004) ma następującą formułę:

$$nQ_{\%} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{b=1}^k RMS(b)^2}{MS_{sr}(b)^2}} \quad (1)$$

Jest to względna wartość średniego błędu kwadratowego poziomu jasności wszystkich pikseli z dowolnej ilości kanałów spektralnych po scaleniu w stosunku do kanałów oryginalnych. Wartość jest wyrażana w procentach, gdyż odnosi się do średniej jasności sceny.

Dla pomiaru wzmocnienia przestrzennego wykorzystano korelację pomiędzy obrazami poddanymi filtracji górnoprzepustowej w oknie (3x3) (Zhou *et al.* 1998). W ten sposób parami badano zgodność krawędzi obrazów po integracji z obrazem panchromatycznym. Dla lepszej interpretacji jego wartości zastosowano wartości R^2 (współczynnika determinacji korelacji) i wyrażano je w [%]. Wtedy wartość parametru można interpretować jako stopień obecności krawędzi na skalonym obrazie spektralnym w stosunku do znajdujących się w kanale PAN. Zgodnie z propozycją Pirowskiego (2004, 2006) wykorzystano parametr syntetyczny AIL_% oparty o średnią arytmetyczną z trzech takich współczynników z każdego kanału wchodzącego w skład trypletu.

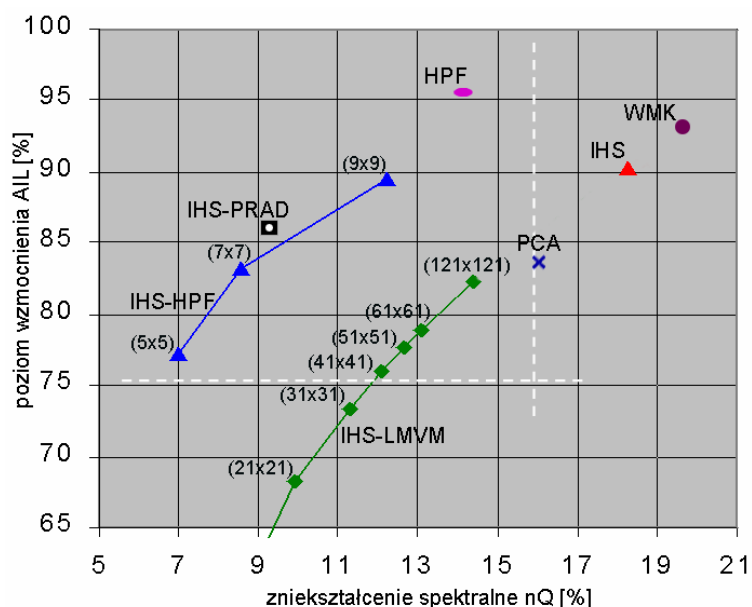
W tabeli 1 zestawiono wyniki uzyskane dla kompozycji barwnych: 123, 134, 354, 457 dla wybranych metod.

Tabela 1

Zniekształcenie spektralne oraz wzmocnienie przestrzenne notowane dla kompozycji barwnych po integracji z obrazem panchromatycznym

Kompozycja / Metoda	KB 123		KB 134		KB 354		KB 457	
	nQ%	AIL%	nQ%	AIL%	nQ%	AIL%	nQ%	AIL%
HPF (9x9)	13,44	94,63	14,14	95,43	13,97	96,49	14,90	96,47
PCA	16,16	94,54	14,57	77,56	13,93	78,87	15,95	78,95
WMK	17,85	95,49	18,02	92,50	20,30	93,75	22,23	94,24
IHS	18,96	95,49	16,02	85,03	17,32	90,05	20,24	91,58
IHS-PRAD	9,46	86,72	9,15	84,63	8,82	86,19	9,14	85,41
IHS-HPF (9x9)	13,93	92,47	10,51	85,43	11,00	89,61	12,34	90,96
IHS-LMVM (41x41)	13,56	83,24	10,44	69,87	10,84	74,59	12,47	75,60

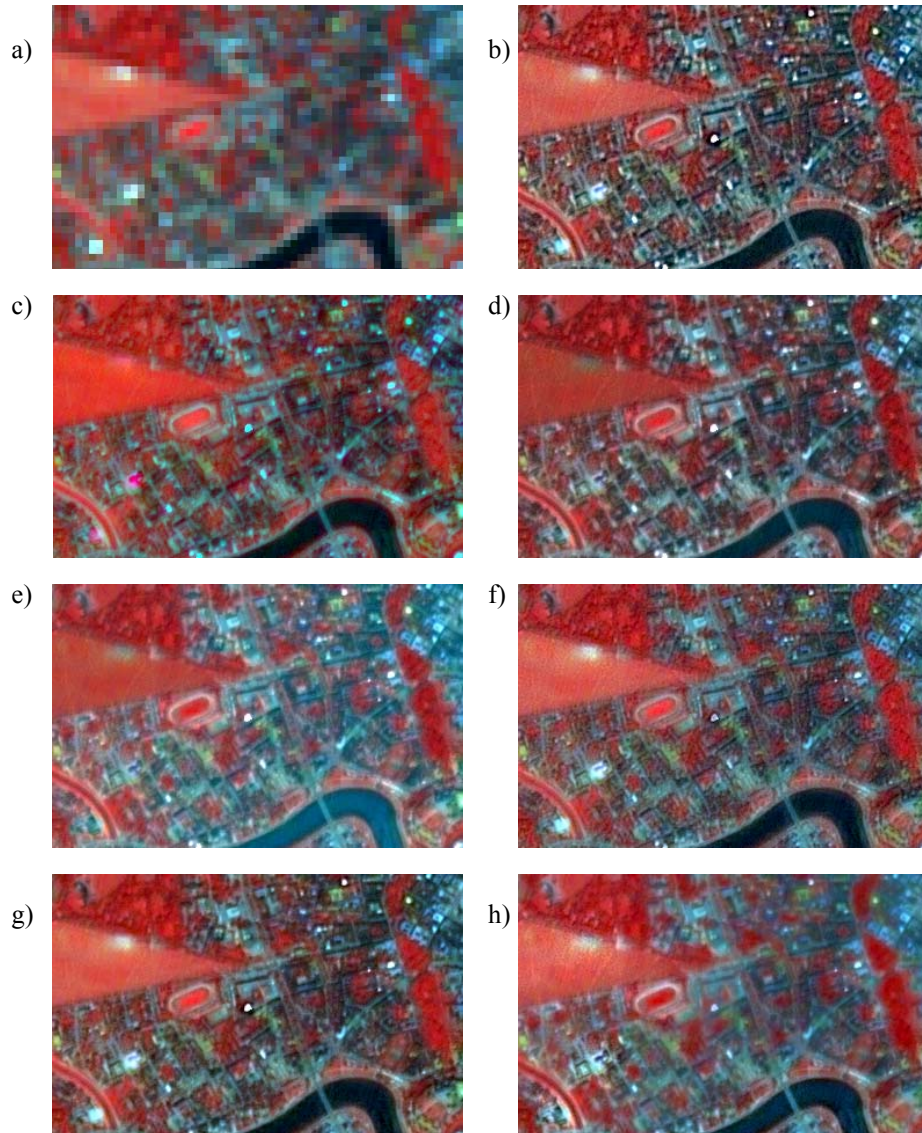
Dla zilustrowania wzajemnych relacji wzmocnienia przestrzennego do notowanego zniekształcenia spektralnego posłużono się tzw. „diagramem wyników” (rys. 8) opracowanym przez Parowskiego (2006). Ujęto w nim średnie wartości AIL i nQ notowane łącznie dla pełnego zestawu kanałów spektralnych po fuzji (nTM1, nTM2, nTM3, nTM4, nTM5, nTM7). Oprócz podejść wymienionych w tabeli 1 znalazły się tutaj warianty metod IHS-LMVM oraz IHS-HPF testowane w innych oknach obliczeniowych.



Rys. 8. Diagram wyników: Ocena formalna grupy metod IHS na tle metod HPF, PCA, WMK. Liczby oznaczają wielkość okna obliczeń. Wartości średnie dla 6. kanałów.

5.2. Ocena wizualna

Porównanie wizualne przeprowadzono na poszczególnych kompozycjach barwnych (ocena zachowania informacji spektralnej wymaga pracy na obrazach barwnych). Poniżej zilustrowano wynik osiągnięty dla KB 134 (rys. 9). Ze względów redakcyjnych zredukowano ilustracje do odcieni szarości, co pozwala czytelnikowi jedynie na ocenę stopnia uczytlenia szczegółów.



Rys. 9. Fragment obszaru testowego w KB 134: a) kanały oryginalne; b) HPF (9x9); c) PCA; d) WMK; e) IHS; f) IHS-PRAD; g) IHS HPF (9x9); h) IHS-LMVM (41x41).

6. Dyskusja wyników.

Dokonana w oparciu o wskaźniki statystyczne ($AIL_{\%}$ i $nQ_{\%}$) ocena formalna uzyskanych wyników integracji (tabela 1) wykazała, że zdecydowanie najniższy poziom wzmocnienia przestrzennego uzyskano dla metody PCA oraz IHS-LMVM (41x41). Spośród czterech analizowanych kompozycji jedynie synteza kanałów widzialnych (KB 123) charakteryzowała się wysokim wzmocnieniem przestrzennym, w odniesieniu do wszystkich testowanych formuł, przy czym wysoki poziom wzmocnienia przestrzennego porównywalny z metodami bazowymi ma modyfikacja IHS-HPF (9x9). Natomiast bardzo wysokie wzmocnienie przestrzenne – w dodatku niezależnie od zestawu kanałów tworzących daną kompozycję barwną – dały metody HPF (9x9) oraz WMK. Wyraźnie niższy poziom wzmocnienia informacja przestrzenną, ale również podobny w odniesieniu do wszystkich testowanych kompozycji daje zmodyfikowana formuła IHS-PRAD, zastosowanie której zapewnia również relatywnie małe zniekształcenie spektralne, średnio dwukrotnie niższe od bazowej procedury IHS.

Z analizy diagramu (rys. 8) wynika, iż modyfikacja IHS-HPF (9x9) może stanowić korzystną alternatywę dla stosowania klasycznej formuły IHS. Bowiem z punktu widzenia wymiernych parametrów statystycznych zapewnia ona niemal identyczny poziom wzmocnienia przestrzennego i jednocześnie blisko dwukrotną redukcję zniekształceń spektralnych. W tym kontekście na uwagę zasługuje również modyfikacja IHS-PRAD, którą charakteryzuje nieco niższe wzmocnienie informacją przestrzenną, ale w zamian uzyskujemy znaczące zredukowanie poziomu zniekształcenia spektralnego. Natomiast formuła IHS-LMVM w przedstawionych badaniach okazała się najmniej obiecującą propozycją modyfikacji procedury IHS.

Ponadto warto zauważyć, że spośród standardowych procedur najlepsze efekty integracji uzyskano dla formuły HPF, która zapewnia bezwzględnie najwyższy poziom wzmocnienia przestrzennego, a jednocześnie wprowadza mniejsze, niż pozostałe metody, zniekształcenie spektralne.

Przedstawiona powyżej formalna ocena wyników fuzji danych satelitarnych pozyskiwanych różnymi sensorami (Landsat ETM+ oraz IRS 1C/D) dobrze koresponduje z rezultatami oceny wizualnej, gdzie podstawowym kryterium oceny testowanych produktów scalania danych teledetekcyjnych były ich walory interpretacyjne. Również i w tym przypadku najlepsze odwzorowanie obszaru testowego uzyskano w oparciu o zmodyfikowaną formułę IHS-HPF (9x9), tak w sensie zgodności spektralnej z kompozycją referencyjną, generowaną z danych źródłowych (Landsat ETM+) jak i wzmocnienia informacją przestrzenną. Fakt ten ilustruje wymownie rysunek 9. W oparciu o analizę porównawczą przykładowej kompozycji (KB 134) można bez trudu stwierdzić zasadność powyższej oceny, jak również daleko idące podobieństwo wyników integracji przy użyciu formuł: IHS-HPF (9x9) oraz IHS-PRAD (rys. 9g i 9f). Warto podkreślić, że stwierdzenie to jest zbieżne z oceną statystyczną uzyskanych produktów scalenia. Ponadto, w ocenie wizualnej wynik fuzji wg procedury HPF (9x9) charakteryzuje się wysoką przydatnością interpretacyjną (rys.9b) i zasługuje również na wyróżnienie wśród testowanych procedur standardowych podobnie jak to

miało miejsce w ocenie formalnej. Dodać należy, że również w ocenie wizualnej wynik integracji wg formuły IHS-LMVM jest zdecydowanie najmniej korzystny z punktu widzenia właściwej geometryzacji przestrzeni miejskiej. Łatwo też zauważyć, że wynik integracji standardową metodą IHS odbiega w największym stopniu od wzorcowej kompozycji sprzed integracji.

7. Konkluzje.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na celowość doskonalenia metodyki integracji obrazów satelitarnych pozyskiwanych różnymi sensorami, co znalazło potwierdzenie w przedstawionych artykule propozycjach. Rezultaty badań dokumentują w sposób wymierny możliwość uzyskania znaczącej poprawy walorów interpretacyjnych produktów scalania danych satelitarnych (Landsat ETM+ oraz IRS 1C/D) poprzez wprowadzenie stosownych modyfikacji formuły IHS (*Intensity Hue Saturation*). Najbardziej obiecujące efekty uzyskano dla formuł IHS-HPF (9x9) oraz IHS-PRAD, które zapewniają znaczącą redukcję zniekształceń spektralnych z jednoczesnym zachowaniem wysokiego poziomu wzmocnienia informacją przestrzenną. Warto przy tym wskazać na daleko idącą zbieżność ocen dokonanych w oparciu o analizę formalną (parametry statystyczne) oraz wizualną (walory interpretacyjne) w odniesieniu do uzyskanych produktów scalania danych teledetekcyjnych.

Można przypuszczać, że tego rodzaju podejście otwiera pola różnorodnych aplikacji, w tym przede wszystkim w zakresie teledetekcyjnego monitoringu aglomeracji miejsko-przemysłowych.

Literatura.

- Béthune S., Muller F., Donnay J. P., 1998: *Fusion of multispectral and panchromatic images by local mean and variance matching filtering techniques*. Fusion of Earth Data, Sophia Antipolis.
- Bretschneider T., Kao O., 2000: *Image fusion in remote sensing*. Proceedings of the 1st Online Symposium of Electronic Engineers.
- Carper T. J., Lillesand T. M., Kiefer R. W., 1990: *The use of intensity-hue-saturation transformations for Merging SPOT panchromatic and multispectral image data*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 56, No. 4.
- Chavez P. S., Jr., 1986: *Digital Merging of Landsat TM and digitized NHAP data for 1:24,000-scale image mapping*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 10.
- Chavez P. S., Jr., S. C. Sides, J. A. Anderson, 1991: *Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 57, No. 3.

- Cliché G., F. Bonn, P. Teillet, 1985: *Integration of the SPOT panchromatic channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 51, No. 3.
- Hallada W. A., Cox S., 1983: *Image sharpening for mixed spatial and spectral resolution satellite systems*. Proc. Of the 17th International Symposium on Remote Sensing of Environment.
- Hill J., C. Diemer, O. Stöver, Th. Udelhoven, 1999: *A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolutions in forestry applications*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32.
- Lewiński S., 2001: *Zastosowanie transformacji RGB-HIS w przetwarzaniu zdjęć satelitarnych*. Teledetekcja Środowiska, nr. 32.
- Mról M., 2001: *Podwyższenie rozdzielczości przestrzennej obrazów wielospektralnych Landsat 7 ETM+ przy wykorzystaniu właściwych teksturalnych i radiometrycznych kanału panchromatycznego*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 11, 2001.
- Mularz S., Drzewiecki W., Pirowski T., 2000: *Merging Landsat TM images and airborne photographs for monitoring of open-cast mine area*. XIX Kongres ISPRS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam.
- Mularz S., Drzewiecki W., Pirowski T., 2000: *Thematic information content assessment of aerial and satellite data fusion*. Cadastre, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Perspectives. Proceedings of 2-nd International Conference, Lviv, National University Lvivska Polytechnica.
- Munehika C. K., Warnick J. S., Salvaggio C., Schott J. R., 1993: *Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59.
- Pellemans A. H. J. M., Jordans R. W. L., Allewijn R., 1993: *Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59.
- Pirowski T.: *Integracja obrazów satelitarnych o różnej rozdzielczości*. Katalog wystawców X międzynarodowych targów GEA - materiały szkoleniowe, Kraków 2004.
- Pirowski T.: *Integracja danych teledetekcyjnych pochodzących z różnych sensorów - propozycja kompleksowej oceny scalonych obrazów*. Geoinformatica Polonika (w druku), Kraków 2006.
- Pohl C., Genderen J. L. Van, 1998: *Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications*. Int. J. Remote Sensing, Vol. 19.
- Pradines D., 1986: *Improving SPOT images size and multispectral resolution*. Proceedings of the S.P.I.E. Earth Remote Sensing using Landsat Thematic Mapper and SPOT Systems, Vol. 660.
- Price J. C., 1987: *Combining panchromatic and multispectral imagery from dual resolution satellite instruments*. Remote Sensing of Environment, Vol. 21.

- 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.
- Rigol J. P., Chica-Olmo M., 1998: *Merging remote-sensing images for geological-environmental mapping: application to the Cabo de Gata-Níjar Natural Park, Spain*. Environmental Geology 34.
- Schowengerdt R. A., 1980: *Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency content*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 46, No. 10.
- Shettigara V. K., 1992: *A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 58.
- Vrabel J., 1996: *Multispectral imagery band sharpening study*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62.
- Wald L., 2000: *Quality of high resolution synthesized images: is there a simple criterion?*. Fusion of Earth Data, Sophia Anipolis, France.
- Wald L., Ranchin T., 1995: *Fusion of images and raster-maps of different spatial resolutions by encrustation: an improved approach*. Comput., Environ. And Urban Systems, Vol. 19.
- Welch R., Ehlers M., 1987: *Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 53.
- Wiemker R., Prinz B., Meister G., Franck R., Spitzer H., 1998: *Accuracy assessment of vegetation monitoring with high spatial resolution satellite imagery*. Contribution to the ISPRS ECO BP'98, Budapest.
- Zhijun W., Deren L., 1999: *A Image Fusion Method: Improve the Spatial Resolution While Preserve the Color*. Asian Conference on Remote Sensing, Hongkong.
- Zhou J., Civco D. L., Silander J. A., 1998: *A Wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data*. Int. J. Remote Sensing, Vol. 19.

Recenzent:
 dr hab. inż. Beata Hejmanowska