

**RANKING METOD INTEGRACJI OBRAZÓW TELEDETEKCYJNYCH
O RÓŻNEJ ROZDZIELCZOŚCI – OCENA FORMALNA
SCALENIA DANYCH LANDSAT TM I IRS-PAN*. ****

**RANK OF FUSION METHODS OF REMOTELY SENSED IMAGES
OF VARIOUS RESOLUTION – FORMAL ASSESSMENT
OF MERGING LANDSAT TM AND IRS-PAN DATA**

Tomasz Pirowski

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Akademia Górniczo-Hutnicza

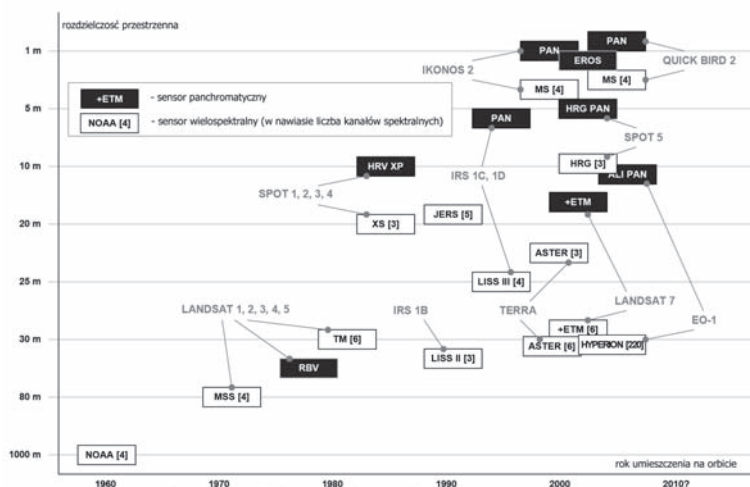
SŁOWA KLUCZOWE: integracja danych teledetekcyjnych, parametry statystyczne, wzmocnienie przestrzenne, zniekształcenie spektralne, LANDSAT, IRS

STRESZCZENIE: W publikacji przedstawiono wyniki badań związanych z integracją danych spektralnych o niższej rozdzielczości przestrzennej (Landsat) z obrazami panchromatycznymi o wyższej rozdzielczości przestrzennej (IRS). Obszarem testowym był prostokąt 20x10 km obejmujący aglomerację krakowską. W ramach badań przetestowano 30 podejść (rozumianych jako metody i ich warianty) integrujących optyczne dane satelitarne, m.in. rozwiązania wykorzystujące substytucje kanałów (SK), operacje algebraiczne (IM), w tym ilorazowe (NVSR, WMK), oparte o właściwości teksturalne obrazów (PRAD, PRICE), tablicę kolorów (LUT), transformacje liniowe (IHS, PCA, RVS), filtracje (HPF), lokalne operacje na obrazach (LMM, LMVM, LCM), analizy obrazów w różnych rozdzielczościach (PL, DWT) i kombinacje powyższych rozwiązań (IHS-HPF, IHS-LMVM, PCA-PRAD). Oceniono uzyskane syntetyczne obrazy pod kątem ich formalnej jakości w dwóch aspektach: stopnia czytelności oraz stopnia zniekształcenia tematycznego i na tej podstawie podano rankingi 30 testowanych podejść w obu powyższych aspektach. Wskazano, na drodze analizy tzw. „diagramu wyników”, metody o najlepszej relacji wzmocnienia przestrzennego do zniekształcenia spektralnego scalonych obrazów, w przekroju poszczególnych kompozycji barwnych, jakie poddano testom (KB123, 134, 174, 571, 354, 457) oraz dla średniej uzyskanej z sześciu syntetycznych kanałów spektralnych.

1. IDEA INTEGRACJI DANYCH OBRAZOWYCH

Metody teledetekcyjne charakteryzuje wielostopniowy model pozyskiwania danych (Mularz, Pirowski, 2007) jak rejestracja z wielu platform i różnych pułapów (ang. *multiplatform*, *multilevel*), rejestracja wielospektralna (*multispectral*), możliwość wykorzystania wielu różnych urządzeń obrazujących (*multisensor*), rejestracja obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej (*multiresolution*), możliwość przeprowadzenia wielorozdzielczej segmentacji zarejestrowanego obrazu (*multiresolution segmentation*), rejestracja obrazów wieloczasowych (*multitemporal*). Aktualne staje się pytanie, w jaki sposób komplementarnie wykorzystać wzrastającą liczbę dostępnych danych satelitarnych? Jak zintegrować i uzupełnić wzajemne dane, aby zwiększyć ilość informacji znajdujących się na obrazie i/lub je uwiarygodnić?

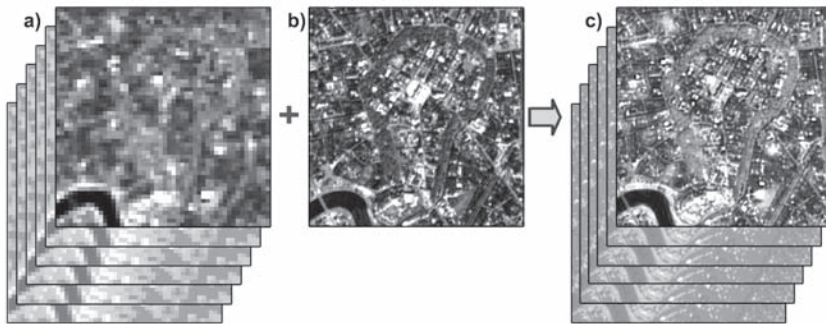
W publikacji uwagę poświęcono aspektowi rozdzielczości przestrzennej. Pozyskiwanie satelitarnych danych wiąże się bowiem z ograniczeniami w terenowej rozdzielczości przestrzennej obrazów rejestrowanych w trybie wielospektralnym. Fakt ten wynika z natury zdalnej rejestracji odbitego promieniowania – rejestrowanie sygnału w wąskich pasmach promieniowania jest możliwe do osiągnięcia tylko kosztem rezygnacji z wysokich rozdzielczości. I odwrotnie - dzięki poszerzeniu zakresu długości fal rejestrowanego promieniowania elektromagnetycznego (tryb panchromatyczny) możliwe staje się zawężenie wymiaru terenowego chwilowego pola widzenia (IFOV) przy zachowaniu wymaganego minimalnego stosunku sygnału do szumu (Mróz, 2001). Chociaż rozwiązania technologiczne prowadzą do uzyskiwania wymaganych poziomów luminacji przy coraz mniejszych wartościach IFOV, to proporcja obu rodzajów zobrazowań utrzymuje się w granicach od około 2:1 do 5:1 na korzyść obrazów panchromatycznych (Rys. 1).



Rys. 1. Tendencje rozwoju teledetekcji satelitarnej – wybrane sensory optyczne (za Mularz, Pirowski, 2007).

Praktycznym aspektem z tym związanym jest dostępność na rynku zobrazowań z platform satelitarnych zdolnych do rejestracji obu rodzajów danych: wielospektralnych o niższej oraz panchromatycznych o wyższej rozdzielczości. Dotyczy to zarówno danych archiwalnych z satelitów starszej generacji (np. systemy SPOT i LANDSAT z lat 80.), jak i obecnych (np. SPOT 5, IRS, FORMOSAT 2, ALOS, LANDSAT 7) w tym satelitów nowej generacji rejestrujących w bardzo wysokich rozdzielczościach (IKONOS, QUICK-BIRD, planowane PLEIADES).

Możliwe, a wręcz celowe, staje się ich komplementarne wykorzystanie, szczególnie na terenach wyjątkowo trudnych dla badań teledetekcyjnych, jakimi są obszary zurbanizowane. Cechuje je występowanie relatywnie małych obiektów o diametralnie odmiennych cechach spektralnych. Jednoczesne wykorzystanie obrazów pochodzących z różnych urządzeń obrazujących (sensorów) umożliwia odnoszenie korzyści z komplementarnego charakteru zarejestrowanej informacji, m. in. poprzez wykorzystanie technik integracji obrazów (Rys. 2) na poziomie piksela (ang. *merging*, *image data fusion*, *pan sharpening*). Przegląd wielu technik integracji przedstawiają m.in. Pohl, *et al.*, (1998); Pirowski (2005), Mróz, Szumiło (2005). Brakuje jednak w literaturze ich kompleksowego rankingu.



Rys. 2. Wzmocnienie przestrzenne (c) uzyskane w wyniku integracji obrazu wielospektralnego (a) i obrazu panchromatycznego o wyższej rozdzielczości przestrzennej (b).

2. DANE OBRAZOWE I OBSZAR TESTOWY

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki kompleksowych badań nad integracją obrazów wielospektralnych satelity LANDSAT TM (30 m) z obrazem panchromatycznym IRS (5.8 m). Dane zostały zarejestrowane w maju 2001 roku, w odstępnie 21 dni. Pole testowe obejmowało aglomerację krakowską (Rys. 3). Prostokątny kształt (o wymiarach 20 km x 10 km) przyjęto dla wygody przetwarzania danych obrazowych w systemach GIS. Z uwagi na krawędź sceny IRS-PAN do obliczeń parametrów statystycznych wykorzystano obszar wewnątrz zaznaczonego trapezu (Rys. 3).



Rys. 3. Zasięg pola testowego na tle mapy topograficznej Krakowa.

3. TESTOWANE FORMUŁY INTEGRACJI

W ramach badań przetestowano większość opracowanych do tej pory rozwiązań integrujących optyczne dane satelitarne, a w wielu przypadkach je zmodyfikowano, sparametryzowano lub testowano wariantowo. Z uwagi na ograniczenia objętości tekstu publikacji zostały one jedynie zasygnalizowane i pogrupowane wg ogólnych zasad działania, z odwołaniami literaturowymi kierującymi do ich szczegółowych opisów. W nawiasach podano akronimy zastosowane w tekście i na rysunkach. Ze względu na bardzo dużą ilość przetestowanych wariantów w rankingach znalazły się tylko wybrane rozwiązania.

Najprostsza (i historycznie pierwszą) metodą integracji poddaną testom była metoda „substytucji kanałów” (SK) (Cochrane, Lasselin, 1992). Polega ona na podmianie – na etapie tworzenia kompozycji barwnych - jednego z kanałów spektralnych obrazem panchromatycznym. Metoda nie pozwala więc na inne wykorzystanie, niż interpretacja wizualna.

Pierwszą dużą testowaną grupę technik integracji danych prowadzącą do uzyskania syntetycznych obrazów stanowiły metody arytmetyczne. Wykorzystuje się w nich podstawowe operacje algebraiczne dodawania, mnożenia, dzielenia lub odejmowania wartości jasności pikseli na łączonych zobrazowaniach. Tego typu fuzją są formuły matematyczne podane przez Cliché'a *et al.*, (1985) nazywane „modulacją intensywności” (IM1, IM2, IM3) oparte o iloczyn jasności obrazów, z wariantami wprowadzającymi do równań pierwiastkowanie i wagowanie. Formuły wykorzystujące dzielenie międzykanałowe, dały początek grupie metod scalania danych zwanych SRC - *Spectral Relative Contribution* (Wiemker *et al.*, 1998). Do metod tego typu należy zaliczyć metody P+XS, Brovey'a, *Color Normalised* (Hallada, Cox, 1983), SVR (Munehica *et al.*, 1993), (wszystkie cztery odrzucone po wstępnych testach) oraz metody ujęte w rankingu, dające lepsze rezultaty wizualne i formalne jak NSVR (Zhang, 1999), WMK (Wiemker *et al.*, 1998).

Kolejną analizowaną grupą rozwiązań stanowiły metody (oraz ich modyfikacje) oparte o właściwości teksturalne obrazów o wyższej rozdzielczości przestrzennej. Metody te, zwane w literaturze „modulacjami wysokich częstotliwości” (*High-Frequency Modulation* – HFM) są rozwiązaniami, których produktami są obrazy o wysokiej dokładności radiometrycznej, zgodnej z oryginalnymi kanałami spektralnymi (Filiberti *et al.*, 1994). Metody polegające na różnorodnych wariantach degradacji pikseli obrazu panchromatycznego i porównaniu go z obrazem oryginalnym podali Pradines (1986) i Price (1987). Pradines wykorzystuje degradację do tzw. „superpiksela” odpowiadającego wielkością pikselowi obrazu spektralnego (PRAD). Pirowski (2005) wprowadził modyfikacje polegające na filtracji dolnoprzepustowej w różnych oknach, z których w rankingu uwzględniono – z testowanych pięciu okien filtracji – trzy wybrane warianty: 5x5, 7x7, 17x17 (PRAD05, PRAD07, PRAD17). Z kolei Price (1987), przed etapem degradacji do „superpiksela” proponuje modyfikacje radiometryczne obrazu panchromatycznego na drodze przekształcenia liniowego (PRICE) lub analizy tablicy kolorów (LUT). Obie metody uwzględniono w rankingu.

Kolejną grupę testowanych metod stanowią podejścia zakładające odseparowanie informacji przestrzennej od tematycznej, jej wymianę i powtórne połączenie informacji przestrzennej (polepszonej) z informacją spektralną. Wyodrębnienie informacji następuje poprzez liniową transformację obrazów spektralnych, której parametry i sposoby wyznaczania są różne dla każdej z technik. Metody wchodzące w skład tej grupy to wg Shettigara (1992) metoda IHS (wykorzystująca transformację do przestrzeni barw *Intensity, Hue, Saturation*), PCA (wykorzystująca transformację składowych głównych) i RVS (*Regression Variable Substitution* - podstawą do wyznaczenia współczynników transformacji jest regresja wielokrotna wykonywana pomiędzy obrazem panchromatycznym a zestawem danych spektralnych).

Metoda HPF (*High-Pass Filter*) polega na zastosowaniu filtracji górnoprzepustowej na obrazie o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej (Showengerdt, 1980; Chavez, 1986). Głównym parametrem wpływającym na jakość integracji jest wielkość okna filtrowania. Testowano warianty w oknach filtracji od 3x3 do 31x31. W rankingu znalazły się trzy najlepsze warianty, o oknach filtracji 5x5, 7x7 i 9x9 (HPF05, HPF07, HPF09).

Integracja przy pomocy analizy obrazów w różnych rozdzielczościach (*MRA – MultiResolution Analysis*) to technika oparta o narzędzie matematyczne oryginalnie opracowane do przetwarzania sygnałów. Narzędzia MRA generują sekwencje obrazów o różnej rozdzielczości – tzw. piramidy obrazów, w których każdy obraz jest otrzymywany przez filtrację dolnoprzepustową i „subsampling” jego poprzednika. Dwie testowane metody z tej grupy to metoda „Piramidy Laplace’a” (PL) (Aiazzi, *et al.*, 1999) oraz metoda falkowa DWT oparta o propozycję ARSIS (Ranchin, Wald, 2000).

Kolejną grupę metod uwzględnionych w badaniach stanowią rozwiązania, w których poszukiwane są relacje lokalne pomiędzy obrazami spektralnymi o niższej rozdzielczości a obrazem panchromatycznym. Przekształcenie prowadzące do uzyskania obrazu syntetycznego bazuje na filtrach adaptacyjnych AIM – *Adaptive Intensity Matching filters*. W oparciu o tą technikę propozycje podał m.in. Béthune *et al.* (1998), proponując metody doboru lokalnej średniej jasności obrazu (LMM – *Local Mean Matching*) i doboru lokalnej średniej i wariancji obrazu (LMVM – *Local Mean Variance Matching*). Obie techniki

były testowane wielowariantowo, w oknach 3x3, 5x5, 7x7, 9x9, 11x11, 15x15, 21x21, 31x31, 41x41, 51x51, 61x61, 121x121, 361x361, w tym z uwzględnieniem wariantu uproszczonego, opartego o obraz ekwiwalentny (wykorzystanie tzw. przestrzeni INR - *Intensity-Normalised Ratio*). W rankingu znalazły się rozwiązania wyselekcjonowane z wszystkich testowanych (liczba za akronimem oznacza wielkość okna analiz lokalnych): LMM21, LMM-INR05, LMM-INR11. Rozwiązanie, również oparte o lokalne relacje między obrazami, podał Hill *et al.* (1999) w metodzie LCM (*Local Correlation Modelling*). W metodzie zakłada się, że podobieństwo umiejscowienia krawędzi powinno manifestować się lokalną korelacją pomiędzy kanałami, o ile okno analiz okaże się wystarczająco małe. Taka lokalna zależność powinna występować nawet wtedy, kiedy nie zachodzi globalna korelacja między zestawami danych. Testowano występowanie zależności w oknach 3x3, 5x5, 7x7, 11x11, 15x15, 21x21, 31x31, 41x41, 51x51, 61x61. W rankingu znalazło się rozwiązanie o oknie 61x61 (LCM61).

Ostatnią grupę testowanych metod stanowią wybrane kombinacje zaprezentowanych wyżej formuł. W metodach wykorzystujących transformacje liniowe, zamiast zastąpienia obrazem PAN składowej I (metoda IHS) lub pierwszej głównej składowej (metoda PCA), następuje wzmocnienie tych obrazów na drodze analiz teksturalnych (IHS-PRAD, PCA-PRAD), filtracji górnoprzepustowej (IHS-HPF, PCA-HPF – wykorzystane okno filtracji: 9x9) lub lokalnych operacji na obrazach (IHS-LMVM, PCA-LMVM – wykorzystane okno analiz: 41x41). Takie rozwiązania stosowali Mularz, Pirowski (2006), Mróz (2001).

4. CEL I METODYKA BADAŃ

Celem badań była próba usystematyzowania metod integracji wg kryteriów formalnych (statystycznych). 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 (2006) ma następującą formułę:

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

gdzie:

RMS (b) – średni błąd kwadratowy jasności pikseli kanału (b) po fuzji w stosunku do odpowiadających im jasności pikseli oryginalnych;

MS_{sr} (b) – średnia wartość jasności pikseli na kanale spektralnym (b);

k – ilość kanałów.

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.

Dla pomiaru wzmocnienia przestrzennego wykorzystano korelację pomiędzy obrazami poddawanymi 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 scalonym obrazie spektralnym w stosunku do znajdujących się w kanale PAN. Zgodnie z propozycją Pirowskiego (2006) wykorzystano parametr syntetyczny $AIL_{\%}$ oparty o średnią arytmetyczną z trzech takich współczynników z każdego kanału wchodzącego w skład trypletu.

5. WYBÓR KOMPOZYCJI BARWNYCH

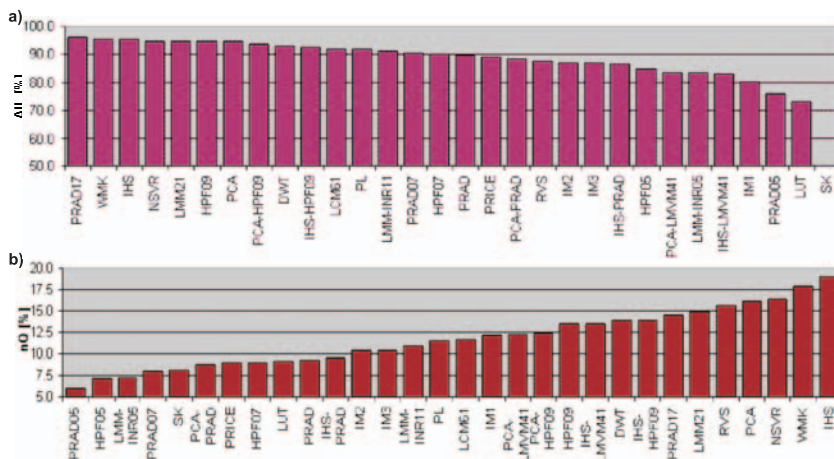
Badania przeprowadzono dla pełnego zestawu kanałów oraz dla sześciu wybranych trypletów kanałów, tj. kompozycji barwnych: KB123, KB134, KB174, KB571, KB354, KB457. Wybór kompozycji podyktowany był ich różnorodnością oraz pojemnością informacyjną wyznaczoną za pomocą dwóch parametrów: OIF (Chavez *et al.*, 1982) i MOIK (Moik, 1980). Wskaźnik OIF - *Optimum Index Factor* wyraża normalizację sumy odchyłeń standardowych i współczynników korelacji trzech dowolnych kanałów spektralnych tworzących daną kompozycję barwną. Wskaźnik MOIK (pochodzący od nazwiska autora propozycji), jest sumą modułów korelacji trypletu kanałów spektralnych (mianownikiem wskaźnika OIF). Dla OIF wysokie wartości oznaczają, że z formalnego punktu widzenia zestaw trzech kanałów zawiera dużą objętość i różnorodność informacji. Natomiast niskie wartości wskazują na podobieństwo i powielanie informacji zawartych w kanałach. W przypadku wskaźnika MOIK zasada jest odwrotna.

Na podstawie ww. parametrów za najlepszą kompozycję uznano KB174. Dla kompozycji KB134 zanotowano najwyższe wskaźniki spośród wszystkich kombinacji kanałów widzialnych i bliskiej podczerwieni (TM4). Podobną analizę przeprowadzono dla kombinacji dwóch dowolnych kanałów podczerwonych (TM4, TM5, TM7) i jednego kanału widzialnego (wybrano KB354) oraz dwóch kanałów z zakresu średniej podczerwieni (TM5, TM7) i jednego kanału widzialnego (wybrano KB571). Zestaw testowanych kompozycji uzupełniono o dwie charakterystyczne: złożoną tylko z kanałów widzialnych (KB123) oraz złożoną tylko z kanałów podczerwonych (KB457).

6. PORÓWNANIE PRODUKTÓW SCALANIA - ANALIZA STATYSTYCZNA

Dla każdego zestawu scalonych danych (trójek kanałów w danej kompozycji barwnej lub średniej dla sześciu kanałów) obliczono syntetyczne parametry wzmocnienia przestrzennego oraz zniekształcenia spektralnego. Na tej podstawie uszeregowano

metody dla każdej z kompozycji oraz dla średniej dla całego zestawu kanałów. Poniżej zilustrowano wynik uzyskany dla KB123: ranking wg ucztyelnienia (Rys. 4a) i wg zniekształcenia spektralnego (Rys. 4b).



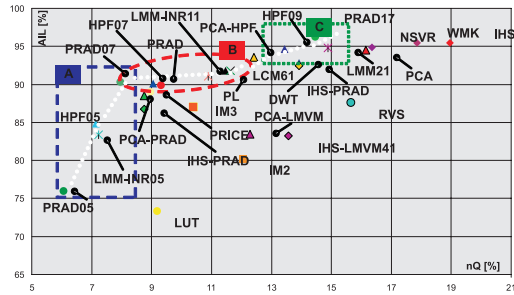
Rys. 4. Ranking metod integracji dla KB123 wg: a) wzmocnienia przestrzennego; b) zniekształcenia spektralnego.

Trudno o wybór właściwej metody, gdy niezależnie rozpatruje się oba rankingi. Spójne porównanie wzajemnych zależności skali zniekształcenia informacji spektralnej do uzyskiwanej skali wzmacniania przestrzennego jest możliwe przez zastosowanie formalno-graficznej metody „diagramu wyników” (Pirowski, 2006). Pozwala ona na wskazania optymalnych metod scalania na podstawie analizy parametrów statystycznych obrazów powstałych po scaleniu.

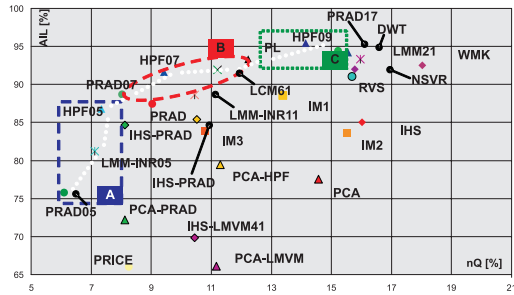
Metoda opiera się na założeniu, że najlepsze metody to takie, dzięki którym uzyskuje się syntetyczne obrazy charakteryzujące się najlepszą relacją wzmocnienia przestrzennego do zniekształcenia spektralnego. Niemożliwe jest jednak wskazanie jednego rozwiązania, a jedynie metody relatywnie najlepsze dla konkretnego poziomu wzmocnienia przestrzennego bądź zniekształcenia spektralnego, ponieważ oba wskaźniki nie są ze sobą wprost porównywalne. Wyznaczenie takiego zbioru rozwiązań ze wszystkich dostępnych możliwe jest właśnie dzięki użyciu „diagramu wyników”.

Na pojedynczym diagramie wyników umieszcza się punkty reprezentujące pary wskaźników statystycznych uzyskanych dla wybranej KB (trypletu kanałów) lub pełnego zestawu kanałów (w przypadku danych Landsat jest to 6 kanałów). Rysunki 5-10 przedstawiają układy punktów reprezentujących wyniki scalania uzyskane przy pomocy trzydziestu testowanych metod, w przekroju poszczególnych kompozycji barwnych oraz pełnego zestawu kanałów.

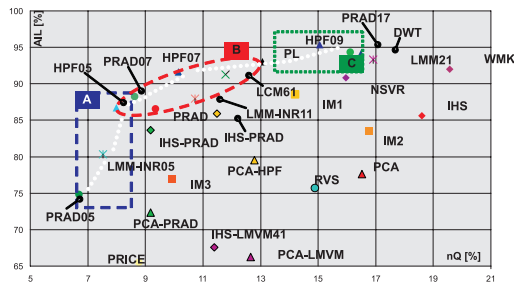
Graficzna analiza relacji wzajemnego położenia punktów pozwala na precyzyjne określenie zbioru rozwiązań o najkorzystniejszych relacjach formalnych parametrów



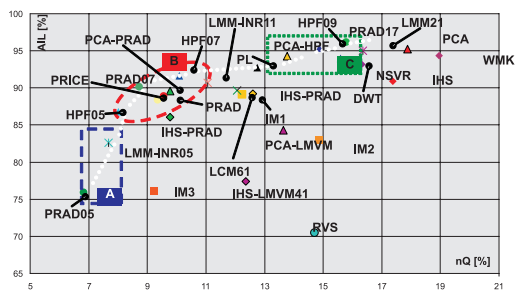
Rys. 5. Diagram wyników – wyznaczenie zbioru najlepszych metod integracji dla KB123: A – o niskim błędzie spektralnym $nQ\% < 8\%$; B – „kompromisowe” o relatywnie wysokim wzmocnieniu przestrzennym i niskim błędzie spektralnym; C – o wysokim wzmocnieniu przestrzennym $AIL\% > 92.5\%$.



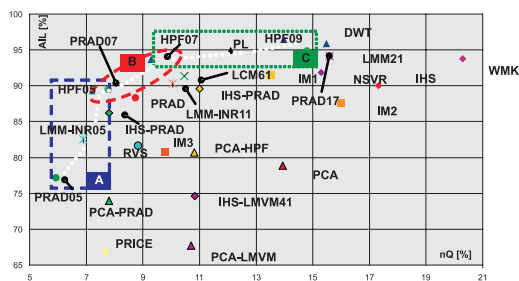
Rys. 6. Diagram wyników – wyznaczenie zbioru najlepszych metod integracji dla KB134: A – o niskim błędzie spektralnym $nQ\% < 8\%$; B – „kompromisowe” o relatywnie wysokim wzmocnieniu przestrzennym i niskim błędzie spektralnym; C – o wysokim wzmocnieniu przestrzennym $AIL\% > 92.5\%$.



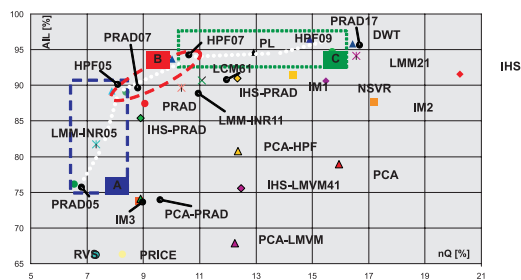
Rys. 7. Diagram wyników – wyznaczenie zbioru najlepszych metod integracji dla KB174: A – o niskim błędzie spektralnym $nQ\% < 8\%$; B – „kompromisowe” o relatywnie wysokim wzmocnieniu przestrzennym i niskim błędzie spektralnym; C – o wysokim wzmocnieniu przestrzennym $AIL\% > 92.5\%$.



Rys. 8. Diagram wyników – wyznaczenie zbioru najlepszych metod integracji dla KB571: A – o niskim błędzie spektralnym $nQ_{\%} < 8\%$; B – „kompromisowe” o relatywnie wysokim wzmocnieniu przestrzennym i niskim błędzie spektralnym; C – o wysokim wzmocnieniu przestrzennym $AIL_{\%} > 92.5\%$.



Rys. 9. Diagram wyników – wyznaczenie zbioru najlepszych metod integracji dla KB354: A – o niskim błędzie spektralnym $nQ_{\%} < 8\%$; B – „kompromisowe” o relatywnie wysokim wzmocnieniu przestrzennym i niskim błędzie spektralnym; C – o wysokim wzmocnieniu przestrzennym $AIL_{\%} > 92.5\%$.



Rys. 10. Diagram wyników – wyznaczenie zbioru najlepszych metod integracji dla KB457: A – o niskim błędzie spektralnym $nQ_{\%} < 8\%$; B – „kompromisowe” o relatywnie wysokim wzmocnieniu przestrzennym i niskim błędzie spektralnym; C – o wysokim wzmocnieniu przestrzennym $AIL_{\%} > 92.5\%$.

$nQ_{\%}$ i $AIL_{\%}$. Wyznacza go krzywa (przerwana biała linia) łącząca punkty leżące na zewnętrznej części zestawu rozwiązań: od niskiego wzmocnienia przestrzennego (strefa „A”), poprzez średnie (strefa „B”), aż do wysokiego (strefa „C”), przy możliwie niskim do osiągnięcia zniekształceniu spektralnym. Przesuwając się po wyznaczonej krzywej otrzymuje się kolejne zestawy scalonych danych o różnych charakterystykach formalnych, przy czym zasada jest, że wraz ze wzrostem ilości ładowanej informacji przestrzennej rośnie zniekształcenie spektralne syntetycznych produktów obrazowych. Cechą wspólną najkorzystniejszych rozwiązań jest to, że nie istnieją żadne inne, dla których notowano by lepszą formalną zależność skali wzmocnienia przestrzennego do zniekształcenia spektralnego. Innymi słowy: wszystkie pozostałe metody mogą zostać zastąpione przynajmniej jednym alternatywnym rozwiązaniem leżącym na wyznaczonej krzywej. Taka zamiana jednego zestawu scalonych obrazów na drugi poprawia przynajmniej jeden ze wskaźników formalnych przy niezmiennym drugim, a z reguły oba ulegają poprawie. Wtedy stosunek pomiędzy ilością informacji przestrzennej a zniekształceniem spektralnym jest lepszy niż wcześniej. Taka konstatacja dotycząca całego zbioru rozwiązań pozwala na wykluczenie części metod pod względem formalnym. Zmiana metody integracji jest najbardziej pożądana w przypadku, gdy wynik scalania reprezentowany przez punkt leży daleko od wyznaczonej krzywej (Pirowski, 2006).

W tabeli 1 zestawiono wszystkie optymalne wyniki wskazane na diagramach. Zastosowane podejście formalne zakłada, że metoda integracji jest oceniana na podstawie uzyskanych wyników, a więc przez charakterystykę obrazów po fuzji. Dlatego otrzymane rezultaty należy traktować jako próbę oceny formalnej metod. Powtarzalność miejsc występowania metod w rankingach i w strefach „A”, „B” i „C” wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań na innych zestawach danych.

Należy oczekiwać, że metody generujące syntetyczne obrazy o korzystnych relacjach wskaźników formalnych są takimi, które pozwalają uzyskać najlepszy materiał obrazowy do interpretacji wizualnej oraz dalszego przetwarzania obrazowego jak filtracje, transformacje liniowe obrazów, wagowanie międzykanałowe czy klasyfikacja danych.

Tab. 1. Zestawy najkorzystniejszych metod określone wg wskaźników formalnych.

	Strefa „A”. Zastosowania wymagające niskich błędów spektralnych $nQ_{\%}<8\%$	Strefa „B” Zastosowania wszechstronne (metody uniwersalne)	Strefa „C” Zastosowania wymagające wysokiego wzmocnienia $AIL_{\%}>92.5\%$
6 kan.	PRAD05, LMM-INR05, HPF05	PRAD07, HPF07	PL, HPF09
KB 123	PRAD05, HPF05	PRAD07, LMM-INR11, PL, LCM61	HPF09, PRAD17, PCA\HPF09
KB 134	PRAD05, HPF05	HPF05, PRAD07, HPF07, LCM61	PL, HPF09
KB 174	PRAD05, LMM-INR05	HPF05, PRAD07, HPF07	PL, HPF09
KB 571	PRAD05, LMM-INR05	HPF05, PRAD07, HPF07, PL	PCA-HPF09, HPF09, PRAD17
KB 354	PRAD05, LMM-INR05, HPF05	HPF05, PRAD07, HPF07	HPF07, PL, HPF09,
KB 457	PRAD05, LMM-INR05	HPF05, HPF07	HPF07, PL, HPF09,

7. DYSKUSJA WYNIKÓW

Analizując rysunki 5-10 i tabelę 1 łatwo zauważyć, że pewne metody powtarzają się praktycznie w każdej testowanej KB. Najczęściej w zbiorze optymalnych rozwiązań występują metody PRAD05, LMM-INR05 (grupa metod o $nQ_{\%} < 8\%$, strefa „A”), HPF05, PRAD07, HPF07 (metody „kompromisowe”, uniwersalne, strefa „B”) oraz PL i HPF09 (grupa metod o $AIL_{\%} > 92.5\%$, strefa „C”). Rozwiązania oscylujące pomiędzy dwiema grupami lub występujące w obu naraz to HPF05 i HPF07. Sporadycznie wystąpiły metody LMM-INR11, LCM61, PRAD17 oraz PCA-HPF09. Łącznie pojawiło się (przynajmniej raz) wśród metod optymalnych tylko 11 z 30. testowanych metod. Wśród najkorzystniejszych rozwiązań nie znalazła się ani raz metoda IHS, ani jej modyfikacje. Warto jednak zauważyć, że aż sześciokrotnie wystąpiła w grupie metod uniwersalnych metoda PRAD07 będąca zaproponowaną przez autora modyfikacją PRAD.

Z kolei, na podstawie analizy rozmieszczenia metod na wykresach wyniku, że dużym zmianom w notowanych wartościach wskaźników (graficznie manifestuje się to przesunięciami na diagramach wyników) podlegają głównie metody o gorszych parametrach formalnych. To przede wszystkim te metody zmieniały znacznie miejsce w rankingach opartych o wartości $nQ_{\%}$ i $AIL_{\%}$, zestawionych w przekrojach poszczególnych kompozycji barwnych. Tego typu „efemeryczne” metody uniemożliwiały wskazanie metod najlepszych ze zbioru wszystkich testowanych podejść, bez uciekania się do analizy formalno-graficznej „diagramu wyników”.

Reasumując: spośród testowanych rozwiązań aż 19 metod może zostać skutecznie zastąpione dla dowolnej KB oraz dla całego zestawu danych przynajmniej przez jedno z 11. rozwiązań wskazanych jako najkorzystniejsze. Oznacza to, że cała dziewiętnastka metod może być - z formalnego punktu widzenia - zupełnie odrzucona jako nieprzydatna, o niskiej efektywności skalania obrazów. Wybór konkretnej alternatywy (jednej z 11. ze zbioru najkorzystniejszych) zależy przede wszystkim od oczekiwań stawianych nowym, syntetycznym obrazom.

Dla przykładu, jeżeli poszukuje się sposobów uczynienia obrazów w stopniu maksymalnie chroniącym wejściową informację tematyczną, najlepsze rezultaty uzyska się stosując rozwiązania PRAD, LMM-INR i HPF operujące na małych oknach obliczeń. Oczywiście, w takim przypadku skala wzmocnienia przestrzennego obrazów po fuzji tymi metodami będzie niewielka, ale i tak najwyższa z dostępnych rozwiązań przy wymaganym tak niskim poziomie generowanych błędów spektralnych.

Stosując analogiczne rozumowanie najkorzystniejszym wyborem dla zastosowań wymagających wyraźnego podkreślenia konturów na obrazach jest metoda HPF09, która sprawdza się w każdej konfiguracji trypletów kanałów. W zależności od KB alternatywą mogą być także takie rozwiązania jak PL, PCA-HPF09, PRAD17 i HPF07.

Trzon ostatniej grupy, o charakterze uniwersalnym, stanowi metoda PRAD07. Produkty skalania otrzymane tą drogą charakteryzują się relatywnie wysokim poziomem informacji przestrzennej przy relatywnie niskim zniekształceniu tematycznym obrazów. W zależności od KB korzystne formalnie wyniki uzyskuje się stosując podejścia HPF05, HPF07, LCM61 oraz PL.

8. KONKLUZJE

Dzięki przeprowadzonym doświadczeniom wykazano, że możliwe jest uzyskanie szeregu różnorodnych produktów scalania – i to często w obrębie jednej metody, zmieniając jej parametry. Fuzja obrazów jest więc elastyczną procedurą, dzięki której można otrzymać zarówno zestawy kanałów spektralnych o dużym uczytelnieniu jak i obrazy o dużej wierności spektralnej.

Dotychczas nie opracowano w pełni uniwersalnej metody integracji danych. Nie można bowiem otrzymać scalonych obrazów o wysokim uczytelnieniu, a przy tym pozbawionych zniekształcenia spektralnego. Badania statystyczne prowadzone w niniejszej publikacji wykazały, że te dwie cechy obrazów otrzymanych na drodze fuzji są z sobą powiązane. Od wyboru metody zależy przede wszystkim relacja tych dwóch cech i można wskazać takie rozwiązania, które mniejszym kosztem zniekształcenia informacji tematycznej dają większe uczytelnienie. Jednak to użytkownik decyduje, na jakim poziomie oczekuje wzmocnienia przestrzennego i jaki dopuszcza maksymalny błąd danych, z których korzysta. Z reguły determinuje to rodzaj prowadzonej analizy, a więc wybór metody scalania (lub wskazanie konkretnego wariantu metody), jest podporządkowany celowi badań. Odpowiednio dobierając metody integracji i ich parametry można wpływać i optymalizować syntetyczny produkt obrazowy, tak aby jego przydatność dla rozwiązania postawionego problemu była możliwie najwyższa.

Uzasadnione wydaje się prowadzenie dalszych badań w tym przedmiocie, w celu określenia zgodności otrzymanych wskaźników formalnych z faktyczną przydatnością scalonych danych satelitarnych do takich zastosowań jak interpretacja wizualna, segmentacja i klasyfikacja danych. Wymaga także przeprowadzenia doświadczeń zasadność przenoszenia uzyskanych wyników na produkty łączenia innych danych satelitarnych. Odpowiedź na to pytanie jest o tyle aktualna, że pomimo wciąż zwiększających się możliwości rozdzielczych, a także spektralnych nowych sensorów, nadal występuje rozbieżność przestrzenna w rejestracji danych panchromatycznych i multispektralnych.

9. LITERATURA

Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Pippi I., 1999. Fusion of 18 m MOMS-2P and 30 m Landsat TM multispectral data by the generalized laplacian pyramid. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, s. 116-122.

Béthune S., Muller F., Donnay J. P., 1998: Fusion of multispectral and panchromatic images by local mean and variance matching filtering techniques. *Proceedings of Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, Nice, France, s. 31-37. National Remote Sensing Agency, Hyerabad, s. 31-37.

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, s. 1637-1646.

Chavez, P. S., Berlin G. L., Sowers L. B., 1982. Statistical Methods for Selecting Landsat MSS Ratios. *Applied. Photographic Engineering*, Vol. 8, No. 1, s. 22-30.

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, s. 311-316.

Cochrane R., Lasselin D., 1992. *Production over urban environment of a rectified and enhanced natural color image: a simple methodology for processing SPOT panchromatic and multispectral data on microcomputer*. Auckland town (New Zealand) MULTISCOPE software in Remote sensing and insular environments in the Pacific: integrated approaches, ORSTOM 1992, s. 425-447.

Filiberti D. P., Marsh S. E., Schowengerdt R. A., 1994. A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolutions. *Optical Engineering*, 33(8), s. 2520-2528.

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*, 9-13 May, s. 1023-1032.

Hill J., Diemer C., Stöver O., Udelhoven Th., 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, Part 7-4-3, W6, Valladolid, Spain.

Moik, J. G., 1980. *Digital Processing of Remotely Sensed Images*. Washington, D.C.NASA, Government Printing Office.

Mróz 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, s. 430-411.

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

Mularz S., Pirowski T., 2006. Aspekty metodyczne integracji danych teledetekcyjnych w oparciu o metodę IHS i jej modyfikacje. *Zeszyty naukowe AGH, „Geodezja”*, T.12, z.2, cz.1, s. 330-332.

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, No 1, s. 67-72.

Pirowski, 2005. *Ocena przydatności metod integracji zobrazowań teledetekcyjnych pozyskiwanych różnymi sensorami*. Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków. Rozprawa doktorska, nie publikowana.

Pirowski T., 2006. Integracja danych teledetekcyjnych pochodzących z różnych sensorów - propozycja kompleksowej oceny scalonych obrazów. *Geoinformatica Polonica*, z. 8. Kraków, s. 78-87.

- Pohl C., Genderen J. L. Van, 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 19, 823-854.
- 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*", Innsbruck, Austria, Vol. 660, s. 98-102.
- Price J. C., 1987. Combining panchromatic and multispectral imagery from dual resolution satellite instruments. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 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*, Vol. 66, s. 49-61.
- Schowengerdt R. A., 1980. Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency content. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 10, s. 1225-1334.
- 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, No 5, s. 561-567.
- Wald L., 2000. Quality of high resolution synthesized images: is there a simple criterion? Ranchin T., Wald L. (red.), *Proceedings of the third conference: Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images*, Sophia Antipolis, France, s. 99-103.
- Wiemker R., Prinz B., Meister G., Franck R., Spitzer H., 1998. Accuracy assessment of vegetation monitoring with high spatial resolution satellite imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, part 7, s. 285-292.
- Zhang Y., 1999. A new merging method and its spectral and spatial effects. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, No 10, s. 2003-2014.
- 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, No 4, s. 743-757.

RANK OF FUSION METHODS OF REMOTELY SENSED IMAGES OF VARIOUS RESOLUTION - FORMAL ASSESSMENT OF MERGING LANDSAT TM AND IRS-PAN DATA

Keywords: fusion of remotely-sensed images, statistical evaluation, spatial enhancement, spectral distortion, LANDSAT, IRS

SUMMARY: The paper presents results of merging lower-resolution spectral data (Landsat) with panchromatic images of higher resolution (IRS). The testing field (20x10 km) covers the Cracow agglomeration. Thirty methods of merging satellite data (including their variants) have been tested. They are based on the canal substitution, on algebraic operations (including quotient operations), textural image features, look-up table, linear transformations, filters, local image transformations and on analyses of various-resolution images. There are also combinations of the above approaches.

Two aspects of the obtained synthetic images have been formally assessed – their improvement for photo interpretation and thematic distortion. The rank of thirty merging methods has been made for both aspects. The so called ‘result diagram’ has allowed to appoint the best methods according to the assessed factors. There is a group of methods with the best relation between the spatial enhancement and the spectral distortion. There are the best methods within each tested colour composite image. There are also the best methods assessed for the average value obtained for the six synthetic spectral bands.

dr inż. Tomasz Pirowski
pirowski@agh.edu.pl
telefon: +48 12 6172288

* praca zrealizowana w ramach badań statutowych AGH 11.11.150.949

** wersja kolorowa artykułu jest dostępna na stronie <http://www.sgp.geodezja.org.pl/ptfit>