

**RANKING METOD INTEGRACJI OBRAZÓW TELEDETEKCYJNYCH
O RÓŻNEJ ROZDZIELCZOŚCI – OCENA WALORÓW
FOTOINTERPRETACYJNYCH SCALENIA DANYCH LANDSAT TM I IRS-PAN¹**

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

Tomasz Pirowski

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska AGH

SŁOWA KLUCZOWE: integracja danych teledetekcyjnych, interpretacja wizualna, 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 20×10 km obejmujący aglomerację krakowską.

W ramach badań przetestowano 30 podejść (rozumianych jako metody i ich warianty lub kombinacje kilku metod na raz) integrujących optyczne dane satelitarne, m.in. rozwiązania wykorzystujące zastąpienie kanałów (ZK), 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 jakości wizualnej. Dla zobiektywizowania oceny zaproponowano analizę cząstkowych walorów fotointerpretacyjnych, jak stopień uczytelnienia przestrzennego (widoczność konturów obiektów) oraz zniekształcenie spektralne (zmiana barw całej sceny i/lub wybranych obiektów o szczególnej charakterystyce spektralnej). Te dwa czynniki, rozbite dodatkowo na kilka szczegółowych podczynników, stanowiły podstawę do pogrupowania wszystkich 30 testowanych metod na dziewięć grup, o określonych cechach fotointerpretacyjnych. W ramach dokonanego podziału wskazano na cztery grupy jako przydatne, w tym jedną wiodącą, o najlepszych walorach fotointerpretacyjnych. Testy przeprowadzono na 6-ciu kompozycjach barwnych.

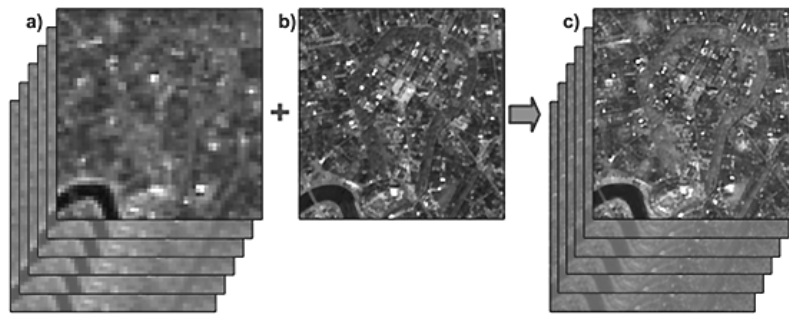
W grupie o najlepszych parametrach najczęściej występowały metody HPF, IHS-HPF, PL, LCM. Szczególną uwagę poświęcono rozwiązaniom, które uzyskały niskie noty w tak zaproponowanej metodyce rankingowej, ale które charakteryzowały się specyficznymi walorami wizualnymi (m.in. metoda LUT), lub dużymi zniekształceniami spektralnymi nie przeszkadzającymi w fotointerpretacji (np. IHS).

1. WSTĘP

Metody teledetekcyjne charakteryzuje wielostopniowy model pozyskiwania danych (Mularz *et al.*, 2007) jak rejestracja z wielu platform i różnych pułapów (ang. muliplatform,

¹ Praca zrealizowana w ramach badań statutowych AGH 11.11.150.949

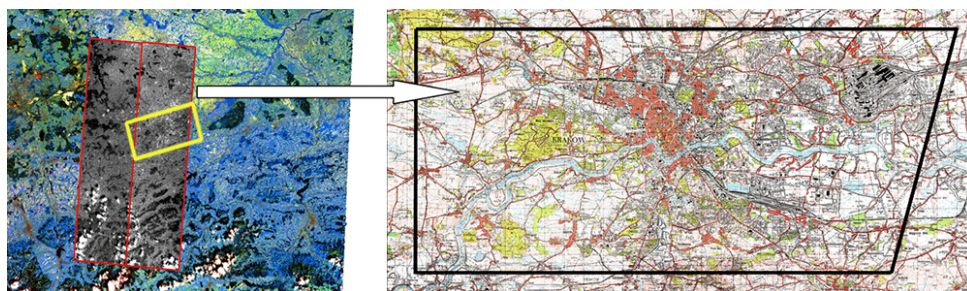
multilevel), możliwość wykorzystania wielu różnych urządzeń obrazujących (multisensor), rejestracja obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej (multiresolution). Jedną z metod ich komplementarnego wykorzystania jest integracja (fuzja, scalenie, łączenie) – na tzw. „poziomie piksela” (Pohl *et al.*, 1998), gdzie obrazy pochodzące z różnych sensorów, charakteryzujące się różną rozdzielczością przestrzenną i spektralną, są łączone w nowe, syntetyczne obrazy (Rys. 1). Różne algorytmy podawane przez wielu autorów pojawiły się już w latach 70-tych XX w. i są wciąż rozwijane i testowane. Potrzeba rozwoju metod fuzji obrazów wynika z faktu, że obrazy wielospektralne charakteryzują się niższą rozdzielczością przestrzenną, niż obrazy panchromatyczne. I chociaż stale notuje się wzrost bezwzględnych rozdzielczości przestrzennych danych, to wciąż utrzymuje się proporcja rozdzielczości obu rodzajów zobrażeń w granicach od około 2:1 do 5:1 na korzyść obrazów panchromatycznych, w ramach jednej platformy satelitarnej (dla przykładu: SPOT 2:1; LANDSAT 2:1; IKONOS 4:1, QUICKBIRD: 4:1, IRS 5:1).



Rys. 1. Wzmocnienie przestrzenne (c) uzyskane w wyniku integracji obrazu wielospektralnego (a) i obrazu panchromatycznego o wyższej rozdzielczości przestrzennej (b)

Artykuł jest kontynuacją prac przedstawionych w ubiegłym roku w ramach V Sympozjum Geoinformacji pt. „Ranking metod integracji obrazów teledetekcyjnych o różnej rozdzielczości – ocena formalna scalenia danych Landsat TM i IRS-PAN” (Pirowski, 2009). W niniejszej publikacji nacisk położono na ocenę walorów fotointerpretacyjnych, związaną ze wzrostem czytelności obrazów wielospektralnych, oraz konsekwencje ich zniekształcenia spektralnego, jakie występują po fuzji z obrazem panchromatycznym o wyższej rozdzielczości przestrzennej.

Przedstawiono wyniki kompleksowych badań nad integracją obrazów wielospektralnych satelity LANDSAT (30 m) z obrazem panchromatycznym IRS (5,8 m). Dane zostały zarejestrowane w maju 2001 roku, w odstępnie 21 dni. Pole testowe o wymiarach 10 km × 20 km obejmowało aglomerację krakowską (Rys. 2).



Rys. 2. Zakres sceny Landsat TM, IRS-PAN oraz obszar pola testowego.

Testy przeprowadzono na 6-ciu kompozycjach barwnych (KB123, KB134, KB174, KB571, KB354, KB457), z dostępnych 20-stu dla systemu Landsat. Przyjęto dwa kryteria selekcji: pojemności informacyjnej trypletów kanałów (najlepszy wynik uzyskały KB174 i KB 354) oraz ich różnorodności (aby wśród testowanych kompozycji znalazły się złożone z różnej liczby kanałów widzialnych, podczerwieni bliskiej i średniej). Ograniczona w ten sposób liczba kompozycji zredukowała wielokrotnie czasochłonność przetwarzania i tak ogromnego zbioru danych obrazowych. „Pojemność informacyjną” kombinacji trzech kanałów obliczono korzystając z czterech wskaźników. Opierają się one na ocenie wzajemnych relacji międzykanałowych tak, aby określić stopień redundancji danych:

- OIF – *Optimum Index Factor* (Chavez *et al.*, 1982) – wyraża normalizację sumy odchyłeń standardowych i współczynników korelacji trzech dowolnych kanałów spektralnych tworzących daną kompozycję barwną,
- DET – *Determinant Analysis Method* (Sheffield, 1985) – wyznacznik macierzy wariancji-kowariancji trypletu kanałów spektralnych,
- INDEX CRIPPEN – wyznacznik macierzy korelacji trypletu kanałów spektralnych (Crippen, 1987),
- MOIK – suma modułów korelacji trypletu kanałów spektralnych (Moik, 1980).

2. TESTOWANE FORMUŁY INTEGRACJI

W ramach badań przetestowano identyczny zestaw danych, jak wcześniej przeprowadzono dla oceny formalnej (Pirowski, 2009), tj. większość opracowanych do tej pory rozwiązań integrujących optyczne dane satelitarne oraz ich warianty (w nawiasach kwadratowych podano akronimy zastosowane w tekście i na rysunkach). Analizowano m.in. rozwiązania:

- zastąpienia kanałów [ZK] (Cochrane, Lasselin, 1991),
- wykorzystujące operacje algebraiczne – mnożenie międzykanałowe [IM1, IM2, IM3] (Cliché'a *et al.*, 1985),
- wykorzystujące operacje algebraiczne – dzielenie międzykanałowe [CN] (Hallada, Cox, 1983), [SVR] (Munehica *et al.*, 1993), [WMK] (Wiemker *et al.*, 1998), [NVSr] (Zhang, 1999),
- oparte o właściwości teksturalne obrazów o wyższej rozdzielczości przestrzennej [PRAD, PRAD05, PRAD07, PRAD17] (Pradines, 1986), [PRICE] (Price, 1987),
- oparte o analizę tablicy kolorów [LUT] (Price, 1987),

- wykorzystujące transformacje liniowe [IHS, PCA, RVS] (Shettigara, 1992),
- filtrujące obrazy w wyższej rozdzielczości (HPF5, HPF7, HPF9) w różnych oknach obliczeń (Showengerdt, 1980; Chavez, 1986),
- lokalne operacje na obrazach, w różnych oknach obliczeń [LMM21, LMM–INR05, LMM–INR11] (Béthune *et al.*, 1998), [LCM61] (Hill *et al.*, 1999),
- analizy obrazów w różnych rozdzielczościach [DWT] (Ranchin, Wald, 2000) , [PL] (Aiazzi, 1999),
- kombinacje powyższych rozwiązań (np. IHS–HPF, IHS–LMVM, PCA–PRAD) (Mróz, 2001; Mularz, Pirowski 2006).

3. CEL I METODYKA BADAŃ

Celem badań była próba usystematyzowania metod integracji wg kryteriów przydatności fotointerpretacyjnej. Ranking walorów wizualnych przeprowadzono w oparciu o technikę punktacji kompozycji barwnych. Zbliżone podejście tego typu zastosowali m.in. Mularz (2001) oraz Pellemans *et al.* (1993). W tym przypadku każda kompozycja poddawana była zabiegowi liniowego wzmocnienia kontrastu z jednocentowym nasyceniem, a następnie wizualnie oceniana przez jednego operatora. Z uwagi na dużą liczbę analizowanych danych zrezygnowano z próby uszeregowania metod i kompozycji barwnych do postaci pojedynczego, syntetycznego rankingu. Zastąpiono to pogrupowaniem metod wg pewnych charakterystycznych cech wizualnych. Tego typu podejście umożliwia sformułowanie wniosków dotyczących skuteczności stosowania poszczególnych metod scalania dla określonych celów.

Dla realizacji powyższych zamierzeń zdecydowano się na odrębną ocenę walorów wizualnych związanych z informacją tematyczną oraz odrębną związaną ze stopniem uczytelnienia obrazów. W obu przypadkach dokonano dalszych podziałów i punktowano poszczególne elementy/cechy obrazów według ustalonych kryteriów (Tab. 1. – walory tematyczne, Tab. 2. – wzmocnienie przestrzenne). Rozbicie oceny na kilka części składowych umożliwiło szeregowanie metod według różnych aspektów oraz dokonywanie stopniowej syntezy wyników, aż do próby całościowej waloryzacji. Takie podejście zapewniło też możliwie wysoką obiektywność ocen (Pirowski, 2006), szczególnie trudną do zrealizowania przy jednoosobowej ocenie tak szerokiego zestawu materiałów.

Przy waloryzacji KB w aspekcie charakterystyki spektralnej sceny (dwie składowe – S1 i S2) kierowano się zasadą wierności spektralnej w stosunku do oryginału. Podstawą oceny był test porównawczy wzmocnionej przestrzennie KB z obrazem referencyjnym – KB opartą na danych oryginalnych, sprzed integracji. Przy analizie wzrostu czytelności degradowano kompozycje barwne do postaci obrazów panchromatycznych, poprzez uśrednienie odpowiedzi spektralnej kanałów wchodzących w skład kompozycji, aby wykluczyć wpływ walorów barwnych na ocenę. Analiza była prowadzona w dużej skali dla każdej z trzech składowych oceny – P1, P2, P3.

Tab. 1. Kryteria oceny wizualnej – zachowanie informacji spektralnej (za Pirowski, 2006)

S1	Ogólna charakterystyka spektralna sceny (ocena prowadzona w małej skali): ocena głównych kategorii pokrycia terenu i dużych obszarów	Punkty
1	zachowana informacja spektralna, jasność sceny i kontrast zbliżone do oryginału	5
2	niewielkie zmiany spektralne lub niewielka zmiana jasności sceny lub degradacja barw	4
3	zniekształcenie spektralne lub zmiana jasności sceny lub duża degradacja barw lub równoczesne wystąpienie niekorzystnych efektów wymienionych w pkt. 2.	3
4	duże zniekształcenie spektralne lub równoczesne wystąpienie niekorzystnych efektów wymienionych w pkt. 3.	2
5	drastyczne zniekształcenie spektralne lub równoczesne wystąpienie niekorzystnych efektów wymienionych w pkt. 4.	1
S2	Szczegółowa charakterystyka spektralna (ocena prowadzona w dużej skali): ocena zachowywania informacji spektralnej na szczegółach i małych obiektach	
6	zachowywana informacja spektralna w kontekście otoczenia	4
7	niewielkie zmiany spektralne nie prowadzące do utraty rozróżnialności obiektu od otoczenia, degradacja na małych obiektach informacji spektralnej	3
8	zniekształcenie spektralne małych obiektów prowadzące do obniżenia walorów obrazu, artefakty (pojawianie się fałszywych obiektów barwnych), obwódki wokół obiektów lub duża degradacja informacji spektralnej na małych obiektach	2
9	usuwanie informacji spektralnej z małych obiektów prowadzące nawet do usunięcia obiektów ze sceny, pojawianie się dużej ilości artefaktów	1

Tab. 2. Kryteria oceny wizualnej – wzrost czytelności (za Pirowski, 2006)

P1	Charakterystyka wzmocnienia przestrzennego sceny	Punkty
1	bardzo wysokie uczytelnienie	5
2	wysokie uczytelnienie	4
3	przeciętne uczytelnienie	3
4	niskie uczytelnienie	2
5	brak uczytelnienia lub bardzo niskie	1
P2	Obszar o wysokim kontraście – podkreślanie konturów elementów	
6	wysokie uszczegółowienie	2
7	przeciętne uszczegółowienie	1
8	brak uszczegółowienia	0
P3	Obszar o niskim kontraście – obecność szumów	
9	brak lub niewielka, nie utrudniająca interpretacji	2
10	widoczna, w niewielkim stopniu wpływająca na interpretację	1
11	duża, utrudniająca interpretację	0

Dokonano syntetycznego podziału metod według ich walorów interpretacyjnych. W tym celu zgeneralizowano oceny do dwóch głównych: punktacji zachowania walorów tematycznych WT (wzór 1) oraz punktacji walorów przestrzennych WP (wzór 2).

$$WT = S1 + S2 \quad (1)$$

$$WP = P1 + P2/2 + P3/2 \quad (2)$$

Na bazie obu punktacji zaproponowano macierzowe pogrupowanie przydatności metod. W ten sposób zostało wyodrębnionych 9. grup, z których cztery wskazano jako przydatne do wizualnej interpretacji (tab. 3).

Tab. 3. Zestawienie wybranych charakterystyk dla KB na podstawie oceny wizualnej (za Pirowski, 2006)

		WT – Walory tematyczne, punktacja wg (1)	
		9	7-8
WP Walory przestrzenne	6-7	GRUPA „A” * KB o wysokim uszczegółowieniu lub średnim (w tym na obszarach jasnych) przy braku szumów; * brak zniekształcenia spektralnego zarówno dla całej sceny jak i dla małych obiektów	GRUPA „B” * KB o wysokim uszczegółowieniu lub średnim (w tym na obszarach jasnych) przy braku szumów; * niewielkie lub średnie zniekształcenie lub degradacja informacji spektralnej na całej scenie lub na małych obiektach
	punktacja wg (2) 4,5-5,5	GRUPA „C” * KB o średnim uszczegółowieniu z możliwością wystąpienia szumów oraz braku informacji na obszarach jasnych; * brak zniekształcenia spektralnego zarówno dla całej sceny jak i dla małych obiektów	GRUPA „D” * KB o średnim uszczegółowieniu z możliwością wystąpienia szumów oraz braku informacji na obszarach jasnych; * niewielkie lub średnie zniekształcenie lub degradacja informacji spektralnej na całej scenie lub na małych obiektach

Przydatność obrazów z grupy „A” do wizualnej interpretacji jest najwyższa z wszystkich testowanych. Uzyskiwane uczytelnienie obrazów jest wysokie a informacja spektralna wizualnie nie odbiega od wzorca sprzed fuzji. Materiały mogą być wykorzystane zarówno do małoskalowych, jak i wielkoskalowych opracowań. Dla analizowanego obszaru uzyskano bardzo dobre wzmocnienie podmiejskiej sieci komunikacyjnej i elementów związanych z infrastrukturą miejsko-przemysłową miasta. Poprzez zwiększenie liczby szczegółów uzyskano wzmocnienie cech teksturalnych wybranych obszarów i dużych obiektów. Dzięki temu stało się możliwe wydzielenie funkcjonalnych stref miasta np. ścisłego centrum ze zwartą zabudową kamienic, osiedli mieszkaniowych, stref willowych, wielkopowierzchniowych obiektów handlowych, obszarów przemysłowych, parków miejskich i ogródków działkowych. Poprawiono geometrię mniejszych obiektów, co uczytelniło m.in. sieć miejskich ulic, ciągi komunikacyjne, małe enklawy zieleni miejskiej, sieć rzeczna z położonymi wzdłuż terenami zielonymi. Wysoka wierność informacji tematycznej wyeliminowała możliwość popełnienia błędu w interpretacji. Jest to szczególnie istotne dla analiz związanych z roślinnością śródmiejską. Na materiałach z grupy „A” możliwa jest nie tylko detekcja małych stref zieleni ale również odczytanie ich funkcji (np. rozróżnienie parków, ogródków działkowych, cmentarzy, zieleni nieurządzonej, nieużytków, skwerów, zadrzewień itd.). Zachowane są też wiernie walory związane z wodami powierzchniowymi.

Obrazy należące do grupy „B” charakteryzują się uczytelnieniem identycznym jak notowane dla grupy „A”, natomiast posiadają zdegradowaną informację tematyczną (spadek nasycenia barw) lub niewielkie jej zniekształcenie. W skład grupy „C” wchodzi obraz o niskich błędach spektralnych, natomiast podkreślenie konturów i wzbogacenie w szcze-

góry jest niższe niż widoczne na obrazach z grup „A” i „B”. Mogą stanowić alternatywę dla metod z grupy „A” w przypadkach analiz w mniejszej skali, gdzie różnice we wzmacnieniu zacierają się. Podobna sytuacja występuje dla obrazów grupy „D”, z tym, że dochodzą tu zastrzeżenia dotyczące wad metod grupy „B”.

4. PORÓWNANIE PRODUKTÓW SCALANIA LANDSAT TM + IRS PAN

Analizę przeprowadzono odrębnie dla każdej z testowanych KB (tabele 4–9). Dla końcowego, syntetycznego zestawienia, uśredniono wyniki WT i WP z 6. testowanych KB i przedstawiono je w tab. 10.

Tab. 4. Zestawienie metod wg przydatności dla celów interpretacji wizualnej KB 123

KB 123		WT – Walory tematyczne, punktacja wg (1)		
	Pkt.	9	7–8	1–6
Walory przestrzenne, punktacja wg (2)	6–7	HPF09, IHS–HPF09, PCA–HPF09, LCM61	NSVR, PRAD17, DWT, PL, LMM21	PCA
	4,5–5,5	PRICE, LUT, HPF07, IHS–PRAD, PRAD07, PCA–PRAD, PRAD,	HPF05, IHS–LMVM41, PCA–LMVM41, LMM–INR11	ZK, IM1, IM2, WMK, IHS
	1–4		PRAD05, LMM–INR05	IM3, RVS

Tab. 5. Zestawienie metod wg przydatności dla celów interpretacji wizualnej KB 134

KB 134		WT – Walory tematyczne, punktacja wg (1)		
	Pkt.	9	7–8	1–6
Walory przestrzenne, punktacja wg (2)	6–7	HPF09, PL, IHS–HPF09, LCM61	WMK, NSVR, DWT PRAD17, LMM21	
	4,5–5,5	PRAD, PRAD07, HPF07, IHS–PRAD	IM3, LMM–INR11	IM1, IM2, IHS, RVS
	1–4	HPF05, PCA–HPF09, PRICE, LMM–INR05	PRAD05, LUT, PCA	ZK, IHS–LMVM41, PCA–LMVM41

Tab. 6. Zestawienie metod wg przydatności dla celów interpretacji wizualnej KB 174

KB 174		WT – Walory tematyczne, punktacja wg (1)		
	Pkt.	9	7–8	1–6
Walory przestrzenne, punktacja wg (2)	6–7	HPF09, PL, IHS–HPF09, LCM61	DWT, PCA–HPF09	WMK, NSVR, PRAD17, LMM21
	4,5–5,5	PRAD, PRAD07, PRICE, HPF05, HPF07, PCA–PRAD	LMM–INR11	IM1, IM2, IHS, PCA
	1–4	IHS–PRAD	IM3, PRAD05, LUT, LMM–INR05	

Tab. 7. Zestawienie metod wg przydatności dla celów interpretacji wizualnej KB 571

KB 571	Pkt.	WT – Walory tematyczne, punktacja wg (1)		
		9	7-8	1-6
Walory przestrzenne, punktacja wg (2)	6-7	HPF09, IHS-HPF09, LCM61	DWT, PCA-HPF09	PRAD17, PCA, LMM21
	4,5-5,5	PRAD, PRAD07, PL PRICE, HPF05, HPF07	NSVR, LMM-INR11, PCA-PRAD	IM2, WMK, IHS
	1-4	IHS-PRAD	IM3, PRAD05, LUT, LMM-INR05	ZK, IM1, IHS-LMVM41, PCA-LMVM41, RVS,

Tab. 8. Zestawienie metod wg przydatności dla celów interpretacji wizualnej KB 354

KB 354	Pkt.	WT – Walory tematyczne, punktacja wg (1)		
		9	7-8	1-6
Walory przestrzenne, punktacja wg (2)	6-7	HPF09, PL	DWT	PRAD17, LMM21
	4,5-5,5	PRAD07, HPF07, IHS-PRAD, IHS-HPF09, LCM61	NSVR, HPF05, LMM-INR11	IM2, WMK, IHS
	1-4	PRAD, PRICE, PCA-PRAD, PCA-HPF09	IM3, PRAD05, PCA-LMVM41, RVS, LMM-INR05	ZK, IM1, LUT, IHS-LMVM41, PCA

Tab. 9. Zestawienie metod wg przydatności dla celów interpretacji wizualnej KB 457

KB 457	Pkt.	WT – Walory tematyczne, punktacja wg (1)		
		9	7-8	1-6
Walory przestrzenne, punktacja wg (2)	6-7	HPF09, IHS-HPF09	DWT	WMK, PRAD17, IHS, LMM21
	4,5-5,5	HPF07, PL, PCA-HPF09, LCM61, LMM-INR11	NSVR	PCA
	1-4	IM3, PRAD, PRAD07, PRICE, HPF05, IHS-PRAD, PCA-PRAD, RVS	PRAD05, PCA-LMVM41, LMM-INR05	ZK, IM1, IM2, LUT, IHS-LMVM41

Tab. 10. Zestawienie metod wg przydatności dla celów interpretacji wizualnej. Uśrednione wyniki z sześciu testowanych KB

KB 123, 134, 174, 571, 354, 457	Pkt.	WT – Walory tematyczne, punktacja wg (1), uśredniona		
		<8,5-9,0>	<6,5-8,5>	<1,0-6,5>
Walory przestrzenne, punktacja wg (2), uśredniona	<5,75-7>	HPF09, PL, IHS-HPF09, LCM61	DWT	WMK, PRAD17, LMM21
	<4,25-5,75>	PRAD, PRAD07, HPF05, IHS-PRAD, HPF07, PCA-HPF09	NSVR, LMM-INR11	IM1, IM2, IHS, PCA
	<1-4,25>	PRAD05, PRICE, PCA-PRAD	IM3, PCA-LMVM41, LUT, LMM-INR11	ZK, IHS-LMVM41, RVS

5. DYSKUSJA WYNIKÓW

Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- w analizie wizualnej potwierdza się większa trudność łączenia obrazu PAN z kanałami podczerwonymi (szczególnie TM4) niż z widzialnymi. Manifestuje się to spadkiem liczby akceptowalnych wizualnie KB wraz ze wzrostem liczby kanałów podczerwonych wchodzących w ich skład. Wyniki o walorach grup „A”, „B”, „C” lub „D” uzyskało dla KB 123, 134, 174, 571, 354, 457 odpowiednio: 20, 15, 13, 14, 11 i 9 metod;
- notuje się zdecydowanie większą obecność rozwiązań o wysokich walorach tematycznych przy różnym stopniu ich wzmocnienia przestrzennego (grupy „A” i „C”) niż sytuację odwrotną, tj. dużego wzmocnienia przestrzennego przy akceptowalnym zniekształceniu spektralnym (grupy „A” i „B”). Oznacza to, że jeśli następuje już zniekształcenie tematyczne spowodowane dużym wzmocnieniem, to najczęściej prowadzi ono do takiej postaci obrazu, że przestaje on być przydatny (nie mieści się nawet w grupach „B” lub „D”). Sytuacja taka występuje np. dla metod IHS, WMK, NSVR i PCA. Są to metody o dużym wzmocnieniu a równocześnie często w bardzo dużym stopniu zniekształcające wejściową informację tematyczną. Dyskusja nad ich przydatnością została zamieszczona w tabeli 11;
- grupę najlepszych metod tworzą: HPF09, PL, IHS–HPF09 oraz LCM61. Metoda HPF09 w każdej KB posiada najwyższe walory użytkowe. Autorska propozycja IHS–HPF09 (Mularz, Pirowski, 2006) tylko dla jednego przypadku (KB354) nie posiada najwyższych walorów użytkowych, metoda LCM61 – w dwóch (KB 354 i KB457) a PL – w trzech (KB 123, KB 571, KB 457). Spośród najlepszej czwórki metoda HPF09 reprezentuje rozwiązanie o największym wzmocnieniu spektralnym przy czym ubocznym efektem dużego udziału informacji z obrazu PAN są szumy na obrazie. Metodą o najniższych szumach jest LCM61, a następnie PL i IHS–HPF09. W przypadku sceny zawierającej duże obszary o wysokim kontraście najlepsze wyniki uzyskuje się stosując metody HPF09 i IHS–HPF09, a następnie LCM61;
- metoda PRAD, metody sparametryzowane o średnich oknach obliczeń (HPF07, PRAD07, LMM–INR11) notują średnie oceny czytelności. W przypadku metod o małych oknach obliczeń oraz metody PRICE ocena ta jest niska i z reguły wskazuje na nieprzydatność rozwiązania do interpretacji wizualnej pomimo braku zniekształceń spektralnych;
- metody IM, ZK i RVS są nieprzydatne zarówno ze względu na cechy spektralne, jak i przestrzenne. Podobnie zachowują się metody PCA–LMVM41 i IHS–LMVM41, z wyjątkiem KB123. Metody PRAD17 i LMM21 oceniane są jako nieprzydatne z uwagi na specyficzną cechę zupełnego usuwania bardzo małych obiektów o odmiennej od otoczenia informacji spektralnej;
- metoda LUT, ze względu na swoją specyfikę jest trudna do jednoznacznej oceny (stosując skale ocen WT i WP uzyskuje b. niskie wyniki). Została ona odrębnie omówiona w tabeli 11;

- stwierdzono, że opracowane przez autora rozwiązania hybrydowe dla metod PCA i IHS wyraźnie zwiększają walory interpretacyjne obrazów (zwłaszcza IHS–HPF09);
- jak już wyżej zauważono, odrębnego omówienia wymagają metody IHS, NSVR, WMK i PCA (Tab. 11), zniekształcające początkową informację tematyczną (sygnalizują to zarówno analizy formalne, jak i ocena wizualna) a posiadające przy tym wysokie walory interpretacyjne (duże wzmocnienie w szczegółach, ostre podkreślenie krawędzi a przy tym spójna integracja informacji przestrzennej i spektralnej pozbawiona występującego często dla innych metod „krawędziowania” obiektów). Również odejścia od klasycznej oceny wymaga metoda LUT, gdyż posiada ona specyficzne, niepowtarzalne walory interpretacyjne;
- charakterystyka przedstawiona w tabeli 11. potwierdza wysoką przydatność dla celów interpretacyjnych metody NSVR w każdej kombinacji testowanych trypletów kanałów (metoda WMK – zbliżona wizualnie do NSVR – generuje gorsze tonalnie obrazy KB). Dla metody IHS równie wysokie oceny uzyskały KB 123, 174, 354 457. Obie metody cechuje uczytelnienie obrazu w sposób nie wprowadzający niespójności pomiędzy informacją barwną a konturami, nie jest widoczne przerysowanie krawędzi lub dominacja informacji przestrzennej nad tematyczną a poziom szumów jest relatywnie niski. Tego typu wadami są obciążone w różnym stopniu metody wykorzystujące formuły HPF, LMM/LMVM i HFM. Jeśli głównym celem integracji danych jest osiągnięcie „atrakcyjnej” wizualnie mapy satelitarnej, metody NSVR i IHS stanowią alternatywę nawet dla metod sklasyfikowanych jako najlepsze w analizie wizualnej (HPF9, IHS–HPF09, LCM61, PL). Warunkiem wykorzystania walorów metod NSVR i IHS dla bardziej zaawansowanych zastosowań (np. do jakościowej analizy obrazu) jest posiadanie przez użytkownika doświadczenia pozwalającego uniknąć błędów w interpretacji związanych z przekłamaniami tonalnym i kolorystycznym obrazów;
- przydatność metody PCA występuje w sytuacji, gdy potrzebne jest zarówno wybiórcze uczytelnienie antropogenicznych elementów obrazu (np. sieci komunikacyjnej dla lepszego kontekstu topograficznego), jak i zachowanie informacji tematycznej na strefach obrazu zdominowanych przez roślinność (odbywa się to kosztem braku ich uczytelnienia);
- metoda LUT stanowi interesujący materiał pomocniczy dla wizualnej interpretacji zwartych obszarów zurbanizowanych z niewielką domieszką zieleni miejskiej. W takim konglomeracie danych pozwala przeprowadzić detekcję sieci dróg i zarysów głównych budynków, dostarcza też w niektórych przypadkach informacji o teksturze stref pokrytych roślinnością. Wyniki otrzymane tą metodą nie sprawdzają się do detekcji arterii komunikacyjnych poza strefą zabudowy lub wzbogacenia w szczegóły dużych obszarów zielonych.

Tab. 11. Ocena walorów interpretacyjnych metod IHS, WMK, NSVR, PCA i LUT

Metoda	KB	Walory interpret.	Charakterystyka
IHS	ogólnie	zmiennie, w zależności od KB	Duże zmiany w kolorystyce scen, w zależności od KB efekt ten w różny sposób wpływa na walory interpretacyjne, bardzo wysoka spójność informacji tematycznej z przestrzenną, uczytelnienie wysokie lub średnie.
	123	wysokie	Jasność sceny dużo wyższa od oryginału (tonacja jasnozielona) ułatwiająca interpretację obrazu, usunięcie zróżnicowania tematycznego dla powierzchni wód otwartych.
	134	średnie/niskie	Niekorzystna kolorystyka sceny w dużym stopniu ograniczająca interpretację, duża zmiana barwy wód otwartych i stref zurbanizowanych.
	174	wys./średn.	Obniżenie jasności sceny, zmiana kolorystyki szczególnie widoczna na terenach zurbanizowanych i na powierzchni wód otwartych.
	571	średnie	Mała czytelność szczegółów spowodowana przez niski kontrast, diametralna zmiana kolorystyki i liczne artefakty na wodach otwartych.
	354	wysokie	Obniżenie jasności sceny, duża zmiana kolorystyki wód otwartych.
	457	wysokie	Niewielkie obniżenie jasności sceny, lepsza separacja barwna i zróżnicowanie w obrębie stref roślinnych.
WMK	ogólnie	zmiennie, w zależności od KB	Duże obniżenie jasności sceny (szczególnie dla stref pokrytych roślinnością) połączone z niewielką degradacją lub zmianą kolorystyki, w małym stopniu utrudniająca interpretację. Pojedyncze obiekty zmieniają charakterystykę spektralną, co wpływa na lokalną utratę czytelności, bardzo wysoka spójność informacji tematycznej z przestrzenną, uczytelnienie wysokie.
	123	wysokie	Usunięcie zróżnicowania tematycznego dla wód otwartych.
	174	średnie	Zmiana kolorystyki sceny szczególnie widoczna na terenach zurbanizowanych i na powierzchni wód otwartych.
	571	średnie	Diametralna zmiana kolorystyki oraz artefakty na wodach otwartych.
	354	średnie	Duże obniżenie jasności sceny, zmiana kolorystyki wód otwartych.
	457	wys./średn.	Duże obniżenie jasności sceny.
NSVR	ogólnie	wysokie	Niewielkie lub średnie obniżenie jasności sceny, szczególnie dla stref roślinnych, połączone z niewielką degradacją kolorystyki, w niewielkim stopniu utrudniająca interpretację. Wybrane obiekty zmieniają charakterystykę spektralną co wpływa na lokalną utratę czytelności, bardzo wysoka spójność informacji tematycznej z przestrzenną, uszczegółowienie wysokie.
PCA	ogólnie	zmiennie, w zależności od KB	Różnokierunkowe, niewielkie zmiany tonalne KB, obniżenie czytelności szczegółów w strefach roślinnych dla KB z kanałem TM4, drastyczne zmiany kolorów na niewielkich, specyficznych obiektach. Wysoka spójność informacji tematycznej z przestrzenną, uczytelnienie wysokie lub średnie, w niektórych KB zróżnicowane w zależności od rodzaju pokrycia terenu.
	134	średnie	Duży spadek uczytelnienia na obszarach o pokryciu roślinnym.
	354	średnie/niskie	Spadek uczytelnienia na obszarach o pokryciu roślinnym, drobne jasne obiekty niespójnie zintegrowane z obrazem spektralnym.
	457	wys./średn.	Spadek uczytelnienia na obszarach o pokryciu roślinnym.
LUT	ogólnie	zmiennie, w zależności od KB	Metoda generująca na KB szczególnie plastyczne podkreślenie konturów elementów, niejako „trzeci wymiar” obiektów poprzez wytwarzaną sugestię cienia, efekt ten jest najkorzystniej eksponowany dla KB 457 i 354, w mniejszym stopniu dla KB 571 i 174, a w bardzo niskim dla KB 134 i 123. Efekt ten podkreśla np. rozkład sieci ulicznej (w pewnych strefach obrazu lepiej niż najwyżej ocenione rozwiązania z grupy „A”) oraz ukazuje teksturę stref roślinnych. Działanie takie nie we wszystkich partiach obrazu przynosi korzystny efekt. Np. spadek czy wręcz brak czytelności (szumy, niespójne obiekty, artefakty) pojawia się na wielkoobszarowych strefach roślinnych. Spadek specyficznych walorów następuje również przy analizie obrazu w dużym powiększeniu.

6. KONKLUZJE

Przeprowadzone doświadczenia potwierdziły wnioski z ubiegłorocznych badań opartych na parametrach formalnych (Pirowski, 2009), iż możliwe jest uzyskanie szeregu przydatnych, różnorodnych produktów scalania. Niemożliwe z kolei jest wskazanie jednej, najlepszej czy uniwersalnej metody integracji.

Z punktu widzenia walorów wizualnych fuzja obrazów określonymi metodami (HPF09, PL, IHS-HPF09, LCM61) pozwala otrzymać zestawy kanałów spektralnych o dużym uczytelnieniu, zachowując przy tym dużą wierność spektralną.

Pomimo zaproponowania szczegółowej metodyki oceny walorów wizualnych nie powiodło się jej skuteczne zastosowanie dla wszystkich metod integracji. Wybrane syntetyczne obrazy charakteryzowały się bowiem wysoka przydatnością fotointerpretacyjną i/lub celowe byłoby ich zastosowanie w specyficznych okolicznościach, chociaż uzyskały one niskie noty wg parametrów WT i WP (metody IHS, NSVR, WMK i PCA, LUT). Pokazuje to szerszy problem, jakim jest prawidłowa ocena potencjału informacyjnego danych obrazowych.

Uzasadnione wydaje się prowadzenie dalszych badań w tym przedmiocie, w celu określenia zgodności otrzymanej waloryzacji wizualnej ze wskaźnikami formalnymi, a także dokonanie ocen produktów scalania dla takich zastosowań jak segmentacja i klasyfikacja danych. Istotne wydaje się określenie możliwości 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 i występować będzie rozbieżność przestrzenna w rejestracji danych panchromatycznych i multispektralnych.

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, Hyderabad.

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. 23–30.

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.

- Crippen R. E., 1989, *A simple spatial filtering routine for the cosmetic removal of scan-line noise from Landsat TM P-Tape Imagery*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, No. 3, s. 327–331.
- 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, 3-4 June.
- 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. 5.27–5.34.
- Mularz S., 2001. Teledetekcyjny monitoring środowiska kopalń odkrywkowych, w: Nowoczesne technologie w geodezji i inżynierii środowiska: konferencja naukowa z okazji jubileuszu 50-lecia Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska: Kraków 21–22 września 2001 roku, red. Zdzisław Sobczyk przy udziale Krzysztofa Grzywacza i Janusza Malickiego; Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. WGGiŚ, s. 315–331.
- 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.
- Mularz, S. Drzewiecki W., Pirowski T., 2007: *Teledetekcyjne metody rejestracji krajobrazu*, Roczniki Geomatyki, Tom V, z.8, s. 67–78.
- Munehika C. K., Warwick 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.
- Pellemans A. H. J. M., Jordans R. W. L., Allevijn R., 1993: *Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59, s.81–87.
- Pirowski T., 2006. *Integracja danych teledetekcyjnych pochodzących z różnych sensorów – propozycja kompleksowej oceny scalonych obrazów*. Geoinformatica Polonica, z. 8. Kraków, s. 78–87.
- Pirowski T., 2009: *Ranking metod integracji obrazów teledetekcyjnych o różnej rozdzielczości – ocena formalna scalenia danych Landsat TM i IRS-PAN*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 19, w druku.
- Pohl C., Genderen J. L. Van, 1998. *Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications*, Int. J. Remote Sensing, Vol. 19, s. 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, 15-17 April, 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. 1325–1334.

Sheffield C., 1985: *Selecting band combinations from multispectral data*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 51, s. 681–687.

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.

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.

RANK OF FUSION METHODS FOR REMOTELY SENSED IMAGES OF VARIOUS RESOLUTION – VISUAL ASSESSMENT OF MERGING THE LANDSAT TM AND IRS-PAN DATA

KEY WORDS: fusion of remotely-sensed images, visual interpretation, spatial enhancement, spectral distortion, LANDSAT, IRS

SUMMARY: The paper presents the results of merging lower-resolution spectral data (Landsat) with panchromatic images of higher resolution (IRS). The testing field (20 × 10km) covers the Cracow agglomeration.

Thirty methods of merging satellite data (including their variants) have been tested in the research. They are based on canal substitution, on algebraic operations (including quotient operations), textural image features, look-up table, linear transformations, filters, local image transformations and on the analyses of various-resolution images. There are also combinations of the above approaches.

Visual quality of the obtained synthetic images was assessed. The detailed analyses of different aspects of photo interpretation helped to maximise the objectiveness of the assessment. Object edges visibility and spectral distortion (colour change in a whole scene and/or in one object of specific spectral characteristic) were the analysed factors selected. They were farther divided into sub-factors and provided the basis to appoint the 30 merging methods categories. There emerged nine groups of various photo interpretation features. Four groups were described as useful, including one leading group of the most optimal photo interpretation features. Six colour composites were tested.

Some methods with best parameters were indicated (HPF, IHS–HPF, generalised Laplacian pyramide, local correlation matching). Special attention was given to the methods which came low in the rank but have specific visual features (e.g. LUT) or have high spectral distortion which does not influence photo interpretation (e.g. IHS).

dr inż. Tomasz Pirowski
e-mail: pirowski@agh.edu.pl
tel. +48 (012) 617 22 88