

Integracja obrazów satelitarnych o różnej rozdzielczości*

Różnorodność obrazów satelitarnych dotyczących jednego obszaru pozwala na ich komplementarne wykorzystanie. Jedną z metod jest łączenie różnych zestawów danych i analiza informacji zawarta w syntetycznym produkcie. Warunkiem zastosowania takiego podejścia jest dysponowanie wielospektralnymi danymi obrazowymi oraz wysokorozdzielczym obrazem panchromatycznym o zbliżonym terminie rejestracji. W wyniku uzyskuje się nowy zestaw danych multispektralnych o podwyższonej - w stosunku do danych wejściowych - rozdzielczości przestrzennej. Kluczowym elementem wpływającym na jakość uzyskiwanych wyników 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 ich oryginalnej informacji spektralnej. Referat przedstawia wyniki kompleksowych badań prowadzonych na obrazach LANDSAT (30m) i IRS-PAN (5.8m).

Data fusion of multiresolution satellite images

Fusion of satellite data is one of the methods allowing complex usage of the variety of satellite images acquired for a given area. Multispectral images together with high resolution panchromatic image of similar acquisition term provide the basis for this kind of usage. As result we can obtain a new multispectral images with higher spatial resolution. To choose the appropriate fusion algorithm is the key element. It should solve the main merging problem, which is the unneeded interference of the panchromatic spectral features in the original infra-red spectral information. The paper presents the chosen topics from complex research on LANDSAT (30m) and IRS-PAN (5,8m) images..

1. Pojęcie integracji

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 (synergiczny wzrost, tzw. „1+1>2”). Można to określić jako integrację i uzupełnienie się wzajemne danych prowadzące do zwiększenia informacji znajdujących się na obrazie i/lub ich uwiarygodnienie. Łączenie informacji obrazowej należy rozpatrywać w wielu aspektach. Dlatego dla wyboru optymalnej technologii, prowadzącej do maksymalnego zwiększenia wzrostu informacji, należy odpowiedzieć na kilka pytań (Pohl i Genderen, 1998):

- jaki jest cel stawiany przez użytkownika, do czego mają być wykorzystane obrazy?
- jakie typy danych lub ich kombinacja będą optymalne dla rozwiązania określonego zagadnienia?
- jaki jest najlepszy poziom połączenia informacji z posiadanych danych?
- jaki jest niezbędny zakres wstępnego przetworzenia danych?

Najważniejsza jest odpowiedź na pierwsze ze stawianych pytań. Determinuje ona bowiem wybór danych dla rozwiązania zagadnienia, a te – w powiązaniu z określonym kryterium oceny końcowego produktu – wpływają na wybór poziomu łączenia danych. Pohl i Genderen (1998) definiują trzy poziomy łączenia danych obrazowych: poziom decyzyjny (*decision-based fusion*),

* Wybrane aspekty pracy realizowanej w ramach projektu KBN nr 9 T12E 036 19: Ocena przydatności metod integracji zobrazowań teledetekcyjnych pozyskiwanych różnymi sensorami dla potrzeb automatycznej detekcji elementów struktury aglomeracji miejsko-przemysłowych.

poziom oparty na ekstrakcji obiektów (*feature-based fusion*) oraz poziom oparty na pikselu (*pixel-based fusion*).

Fuzja na poziomie decyzyjnym lub fotointerpretacyjnym reprezentuje przypadek, gdy obrazy wejściowe są przetwarzane i analizowane oddzielnie dla ekstrakcji informacji. Wzajemne uzupełnianie informacji o obiekcie/terenie następuje na etapie porównywania i weryfikacji wyników uzyskanych z poszczególnych zestawów danych. W ten sposób mogą być np. przeprowadzane z większą precyzją i wiarygodnością procedury interpretacji i klasyfikacji obrazów. Łączenie informacji następuje więc za pomocą reguł decyzyjnych.

Fuzja na poziomie obiektów wymaga wydzielenia obiektów na różnych zestawach danych np. w procesie segmentacji. Obiekty odpowiadające sobie charakterystyką są ekstrahowane z wejściowych obrazów. Definiować mogą je takie cechy jak kształt czy otoczenie. Przykładem takiego obiektu jest np. jednostka fotomorficzna. Podobne obiekty, pochodzące z różnych źródeł, są wzajemnie do siebie przypisywane a potem łączone np. przy pomocy podejść statystycznych lub sieci neuronowych.

Fuzja na poziomie piksela 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 i Genderen, 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 ilością (zmiennością) informacji przestrzennej. Warunkiem skutecznego zastosowania takiego podejścia jest dysponowanie symultanicznymi danymi. W wyniku uzyskuje się nowy zestaw danych multispektralnych o podwyższonej – w stosunku do danych wejściowych - rozdzielczości przestrzennej. 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. Podawane są różne propozycje realizacji postulatu zachowania informacji spektralnej, jednak żadna z nich nie okazała się wystarczająco uniwersalna lub zdecydowanie lepsza od pozostałych. Brakuje w literaturze kompleksowych ocen/testów porównujących wyniki uzyskiwane poszczególnymi metodami integracji w kontekście różnych celów. Obecnie na miano standardu zasługuje metoda wykorzystująca transformację IHS, 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 niniejszym artykule przedstawiono istotne elementy procesu fuzji danych obrazowych na poziomie piksela. Opisano rozwiązywanie problemów pojawiających się na różnych etapach integracji oraz metody obiektywnej oceny jakości uzyskiwanych danych po scaleniu. Poszczególne zagadnienia wyjaśniono na przykładzie danych Landsat ETM+ (30m) i IRS-PAN (5,8m) stosując trzy popularne metody scalania: IHS, HPF oraz transformację Brovey'a. Komentarze wyników ograniczono do KB 123 i 234. Przyjęty sposób postępowania zilustrowano schematem blokowym.

2. Wybrane metody integracji

Metoda oparta o transformację Intensity-Hue-Saturation (IHS)

Procedura IHS (*Intensity-Hue-Saturation*) była wykorzystywana do scalania różnych danych: obrazów Landsat MSS z danymi RBV, danych SPOT (*Carper i in., 1990; Bretschneider i Kao, 2000*), danych Landsat TM i SPOT PAN (*Welch i in., 1987*), danych MOMS-2P z satelity Priroda (*Hill i in., 1999*), danych IRS 1C (*Lewiński, 2001*), Landsat 7 ETM+ (*Mróz, 2002*) czy wielospektralnych obrazów Landsat TM ze zdjęciami lotniczymi (*Mularz i in., 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 rozdzielanie 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. 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 i in., 1991*). Metoda posiada ograniczenie dotyczące możliwości jednokrotnego użycia do integracji tylko trzech kanałów spektralnych.

Metoda oparta o transformację Brovey'a (BR)

Przykładem rozwiązania wykorzystującego stosunek jasności odpowiadających sobie pikseli z różnych obrazów jest transformacja Brovey'a (*Hallada i Cox, 1983; ERDAS, 1999*). Każdy z trzech kanałów spektralnych dzieli się przez sumę trypletu kanałów (normalizacja kanałów multispektralnych wchodzące w skład KB) a rezultat mnoży się przez dowolne inne dane obrazowe zawierające informację przestrzenną. Pomimo generowanych dużych zniekształceń spektralnych metoda ta jest często używana dla różnych zastosowań o charakterze fotointerpretacyjnym, np. detekcji zmian

na terenach miejskich (*Vaughan i in., 1999; Ranchin i Wald, 2000*), monitoringu kopalni odkrywkowej (*Mularz i in., 2000a, 2000b*). Występuje często w zestawieniach porównawczych różnych metod integracji (*Ranchin i Wald 2000; Hill i in. 1999*). Jako jedna z trzech metod integracji została zaimplementowana w systemie ERDAS (*ERDAS, 1999*). Rozwinięciem transformacji Brovey'a są m.in. metody Color Normalised (*Hallada, Cox, 1983*) oraz Wiemkera i in. (*1998*). Zbliżone podejścia stosuje się w metodzie Synthetic Variable Ratio (*Munehica, 1993*) oraz New Synthetic Variable Ratio (*Zhang, 1999*), której modyfikację zaimplementowano w pakiecie PCI Geomatica 9.0 do automatycznego scalania wysokorozdzielczych danych satelitarnych.

Metoda z wykorzystaniem filtracji górnoprzepustowej (HPF)

Metoda HPF (*High-Pass Filter*) polega na zastosowaniu filtracji górnoprzepustowej na obrazie o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej. Tego typu operacje stosowano np. dla integracji danych satelitarnych ze zdjęciami lotniczymi (*Mularz i in., 2000a, 2000b*) oraz dla integracji obrazów TM z obrazem SPOT PAN (*Chavez i in., 1991*). W metodzie HPF zakłada się, że filtracja górnoprzepustowa usuwa większość informacji spektralnej z obrazu PAN. W rezultacie pozostają wysokoczęstotliwościowe informacje, 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 użytego do jego wygenerowania. Obraz po filtracji jest następnie dodawany – piksel po pikselu – do poszczególnych obrazów spektralnych. W wyniku otrzymuje się zestaw wielospektralny o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej. W przeciwieństwie do dwóch poprzednich metod nie występuje tu ograniczenie, co do ilości użytych do scalania kanałów spektralnych.

Metoda HPF posiada wiele parametrów umożliwiających modyfikowanie jej działania. Pozwala to na optymalizację działania procedury w zależności od charakteru posiadanych danych i celu integracji obrazów. Głównym parametrem wpływającym na jakość integracji jest wielkość okna filtrowania (tu wybrano wariant 9x9). Zastosowanie zbyt małego okna filtracji powoduje jedynie wydobycie 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. Proces ten powinien być w razie potrzeby przeprowadzany dopiero na skalonych obrazach, ponieważ wtedy zostaną wzmocnione również krawędzie obecne tylko na obrazach spektralnych.

2. Etapy integracji danych teledetekcyjnych

Integracja danych teledetekcyjnych jest często traktowana jako samoistna, zaawansowana procedura przetwarzania obrazowego w celu wzmocnienia wartości informacyjnej obrazu, obok filtracji splotu, wyostrzającej czy adaptacyjnych filtrów (*ERDAS, 1998*). Przy takim założeniu scalenie danych można przeprowadzić w szybki i prosty sposób, o ile tylko posiada się skalibrowane dane multisensoryczne. Wyniki otrzymuje się bez znużającego procesu wstępnego przygotowywania danych,

a krytyczna ocena scalonych obrazów jest z reguły ograniczona do akceptacji wizualnej. Ułatwia takie podejście wzrastająca ilość automatycznych i półautomatycznych modułów fuzji danych implementowanych w oprogramowaniach teledetekcyjnych i pakietach GIS.

Jednakże dla osiągnięcia maksymalnych możliwych korzyści wymagane jest wieloetapowe i kompleksowe podejście, w którym samo scalenie danych obrazowych wybraną metodą jest tylko jednym z ogniw ciągu przeprowadzanych czynności. W skład procesu wchodzi następujące elementy:

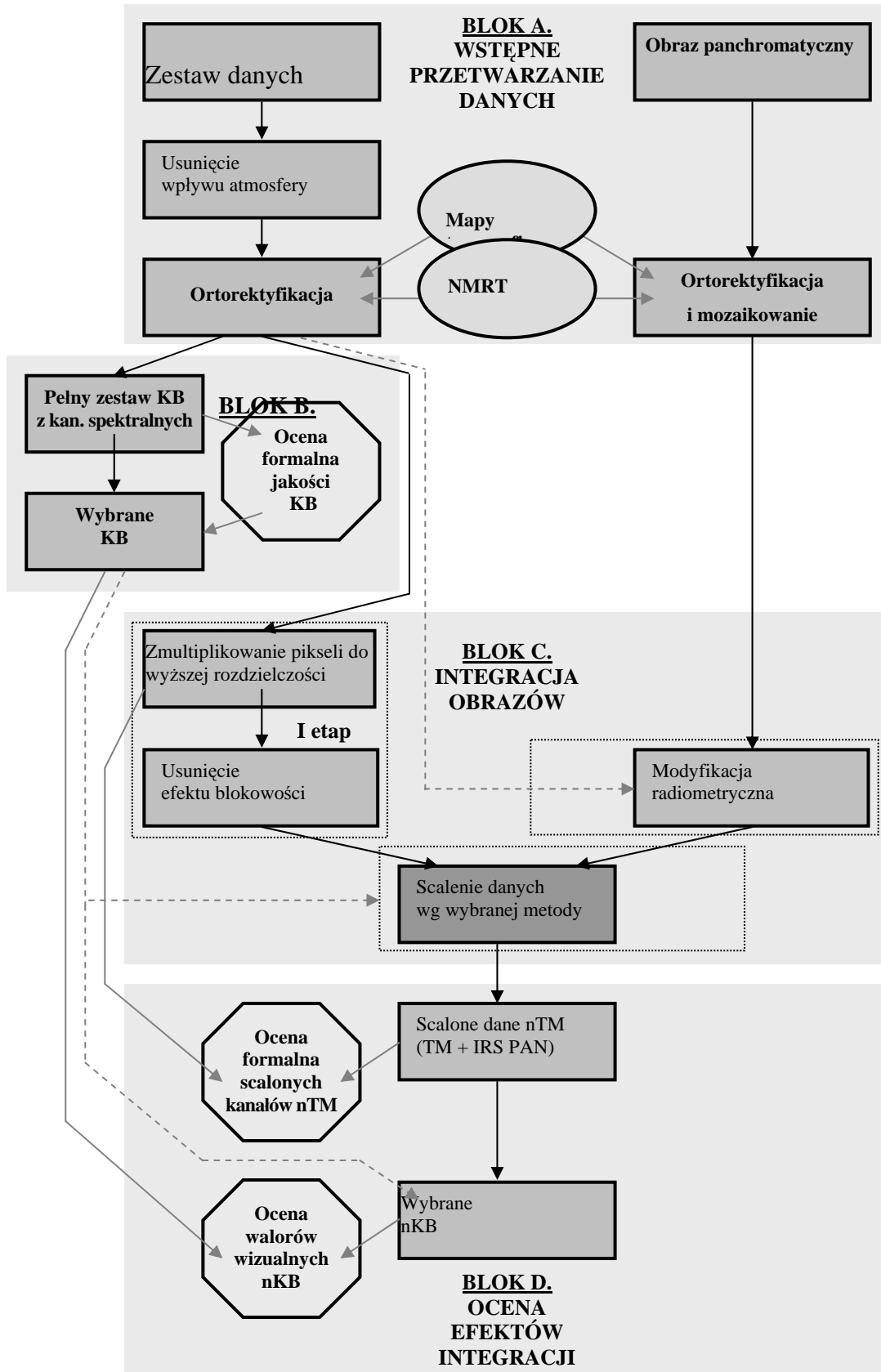
- Wstępne przetwarzanie danych polegające na sprowadzeniu danych do wspólnej skali poprzez względną korekcję obrazów względem jednego z nich, przyjętego za punkt odniesienia. Etapami korekcji są: eliminacja różnic kalibracji lub charakterystyk sensorów, usunięcie wad radiometrycznych i geometrycznych obrazów takich jak prążkowanie, wpływ atmosfery, wpływu morfologii (topografii) terenu. Skorygowane obrazy są ortorektyfikowane lub wpasowywane w siebie.
- Integracja obrazów składająca się z uzgodnienia finalnej rozdzielczości syntetycznych produktów, usuwania blokowości na obrazach spektralnych, modyfikacji radiometrycznej obrazu panchromatycznego (opcjonalnie, o ile nie zostało to wykonane przy wstępnym przetwarzaniu danych) oraz przeprowadzenia wybranej procedury scalania;
- Ocena przydatności otrzymanych syntetycznych produktów (nowych kanałów spektralnych i KB) w kontekście celu do jakiego zostaną wykorzystane dane.

Rysunek 1. przedstawia przyjęty schemat postępowania dla integracji danych spektralnych Landsat TM i IRS-PAN. Widoczne modyfikacje są wypracowane dzięki przeprowadzonym testom:

Korekcja prążkowania

Usuwanie prążkowania (*destriping*) okazało się zbędne na danych TM z powodu wysokiej jakości skanowania sensora ETM. Dane IRS-PAN charakteryzowały się wysokim poziomem szumów, co przy ich niskiej rozdzielczości radiometrycznej (6 bitów) wyraźnie obniżało ich jakość. W tym przypadku korekcja prążkowania była pożądanym zabiegiem. Testowano dwa podejścia korekcji obrazu: prostego splotu wzdłuż linii oraz filtrację dolnoprzepustową. Pierwsze podejście nie dało poprawy radiometrycznej obrazu. Z drugiego zrezygnowano, gdyż w dużym stopniu redukowało informacje przestrzenne na obrazie. Zaobserwowane prążkowanie na danych IRS-PAN w przypadku metod integracji BR i HPF spowodowało wyraźne obniżenie jakości produktu końcowego. Zbędne szumy szczególnie są widoczne (a nawet wzmacniane) na obszarach niskim kontraście.

Zaleca się, aby przed procesem scalania danych w stopniu maksymalnie możliwym usunąć prążkowanie z obrazu panchromatycznego. W przypadku danych spektralnych wada ta odgrywa mniejszą rolę, gdyż dane podlegają procesowi multiplikacji pikseli i usuwaniu efektu blokowości, co redukuje szumy w sposób zbliżony do filtracji dolnoprzepustowej.



RYS 1. Proces integracji danych LANDSAT TM i IRS-PAN.

Korekcja wpływu atmosfery.

Notowany wpływ wykonania korekcji jest różny dla poszczególnych metod integracji: znaczący dla metody BR, nieistotny dla HPF. Moment jej przeprowadzenia nie jest obojętny. Próba usuwania wpływu atmosfery na danych już scalonych nie przynosi pożądanych rezultatów. Korekcja atmosfery powinna nastąpić na etapie wstępnego przetwarzania danych, przed przeprowadzeniem dalszych procedur scalania. Dobre rezultaty otrzymano stosując metodę regresji podaną przez Mather'a (1999).

Korekcja wpływu morfologii (topografii) terenu.

Teren badań charakteryzował się niewielkim urozmaiceniem rzeźby, co przy rejestracji danych w zbliżonych warunkach oświetleniowych spowodowało, że zniekształcenia związane z morfologią były podobne na obu zestawach danych i na tyle niewielkie, że nie wpłynęły na końcowy produkt. Usuwanie wpływu morfologii terenu nabiera dużego znaczenia w przypadku danych rejestrowanych w złych lub różnych warunkach oświetleniowych. Scalenie tego typu danych z pominięciem korekcji może spowodować błędne wyniki w interpretacji wizualnej i/lub klasyfikacji. Stopień zniekształcenia zależy od wyboru metody scalania. W testach scalania wykonanych na tego typu niekorzystnych danych najbardziej „odporna” na błędy okazała się metoda HPF.

Selekcja kompozycji barwnych.

Wyodrębniono oddzielny etap integracji, którego zadaniem było ograniczenie pełnego zestawu kompozycji barwnych otrzymywanych ze zbioru kanałów spektralnych (TM1-TM7) do najbardziej przydatnych. Przyjęto trzy kryteria selekcji: pojemności informacyjnej trypletów kanałów, różnorodności zestawu wskazanych KB oraz walorów fotointerpretacyjnych. Dzięki takiemu podejściu ograniczono testy z trzydziestu możliwych KB do sześciu: 123, 134, 174, 571, 354, 457.

Usuwanie efektu blokowości.

Wykonanie resamplingu (zmultiplikowania pikseli) wyciągu spektralnego o niskiej rozdzielczości do rozdzielczości równej obrazowi PAN jest niezbędnym etapem na drodze scalania danych. W kroku następnym, aby otrzymać zadawalające rezultaty wizualne, obrazy ze zmultiplikowanymi pikselami muszą mieć usunięty tzw. efekt blokowości (*blockiness*). Powstaje on z tej przyczyny, że przygotowany obraz spektralny ze sztucznie podniesioną rozdzielczością nadal posiada jednakowe wartości jasności pikseli w blokach równych oryginalnym pikselom. Na danych scalonych ten efekt widoczny jest w postaci widocznych dużych pikseli barwnych nie zintegrowanych ze szczegółami z obrazu panchromatycznego.

Proponuje się dwa rozwiązania tego problemu. Pierwsze jest realizowane na etapie resamplingu do wyższej rozdzielczości lub w procesie ortorektyfikacji. W obu przypadkach stosuje się metody interpolacji biliniowej lub bikubicznej zamiast najbliższego sąsiada. Takie podejście zastosowano m.in. w łączeniu danych SPOT oraz SPOT-PAN z Landsat TM (Welch i Ehlers, 1987;

Carper i in., 1990). Jednak w przypadku dużej krotności zwiększania rozdzielczości podejście takie jest niewystarczające. Wtedy stosuje się zabieg filtracji dolnoprzepustowej, najczęściej o oknie równym lub zbliżonym wielkością do piksela spektralnego (*Chavez i in., 1991; Grasso, 1993; Mularz i in. 2000a, 2000b*). Teoretycznie, w przypadku scalanych danych o rozdzielczości 30m (Landsat) i 5m (w procesie ortorektyfikacji przyjęto taką właśnie rozdzielczość dla danych IRS-PAN), optymalne okno filtracji wynosi 6x6. Dla wyboru okna o wielkości nieparzystej (konieczne dla symetrii obliczeń wokół pojedynczego piksela) przetestowano zestawy masek dolnoprzepustowych o wielkościach od 5x5 do 7x7. Za najkorzystniejszą drogę eliminacji efektu blokowości uznano filtrację w oknie 7x7 zakładającą „kołowy” efekt filtracji (zera w narożnikach maski).

Korekcja radiometryczna obrazu panchromatycznego.

Korekcja obrazu IRS-PAN była niezbędna z uwagi na wystąpienie bardzo dużych różnic w charakterystyce łączonych obrazów (IRS-PAN i TM), nawet dla kanałów o wspólnej czułości spektralnej. Na etapie wstępnego przetwarzania danych zrezygnowano z korekcji bezwzględnej, ponieważ otrzymywane w jej wyniku wartości luminancji utrudniały stosowanie formuł scalania. Sprowadzenie jasności pikseli IRS-PAN do wspólnej skali z danymi TM wykonano na drodze korekcji względnej. W tym celu wykorzystano procedurę doboru histogramu, czyli taką modyfikację radiometryczną obrazu, która doprowadza średnią jasność sceny i wariancji do odpowiadających charakterystyce obrazu referencyjnego. Jest to podejście często stosowane w procedurach scalania danych (*Chavez i in., 1991*). Rejestracja IRS-PAN odbywa się w zakresie spektralnym kanałów widzialnych (formalnie manifestuje się to ich wysoką wzajemną korelacją), a dokładnie TM2 i TM3. Dlatego dla wskazania obrazu referencyjnego poddano testom obraz średniej jasności z dwóch (TM2 i TM3) oraz trzech kanałów (TM1, TM2, TM3). Oba obrazy uzyskały podobne korelacje z IRS-PAN, z tym, że drugi wariant posiadał bardziej zbliżoną wariancję i to on został wybrany jako wzorzec.

4. Metody oceny wyników integracji

Ocena jakości syntetycznych obrazów spektralnych opiera się o zgodne założenie, że spektralne zniekształcenie obrazu po integracji powinno być możliwie niskie przy maksymalnym możliwym wprowadzeniu informacji przestrzennej (*Chavez i in., 1991; Munechica, 1993*). Poniżej przedstawiono dwa główne nurty określania jakości syntetycznych produktów: wizualne i formalne.

Metody wizualne

Opierają się na ocenie walorów fotointerpretacyjnych produktów lub półproduktów procedur scalania danych. Były pierwszymi wykorzystywanymi do oceny integracji danych (*Hallada i Cox, 1983*). KB – oparte o obrazy syntetyczne i oryginalne – są ze sobą nawzajem porównywane. Ocena walorów tematycznych (zachowania wejściowej informacji spektralnej) oraz stopnia czytelności szczegółów przebiega jednocześnie a wyniki są komentowane w sposób opisowy. Najczęściej

waloryzacja wizualna jest używana jako jeden z elementów oceny obok używanego innego aparatu pomiarowego np. graficznego i/lub formalnego (*Chavez i in., 1991; Hill i in., 1999; Rigol i Chica-Olmo, 1998; Ranchin i Wald, 2000, Vaughan i Oune, 1998*).

Pojawiają się próby sformalizowania oceny wizualnej, głównie ze względu na rosnącą ilość porównywanych ze sobą obrazów oraz dywersyfikację kryterium oceny (zachowanie oryginalnej informacji tematycznej przestaje być jedynym kryterium). Przykładem są oceny oparte o punktację kompozycji barwnych w kontekście uzyskania użyteczności dla konkretnego celu (*Mularz i in., 2000a, 2000b*). Tego typu sformalizowany sposób oceny zastosowano dla waloryzacji wyników trzech testowanych metod. Odrębnie przyznawano punkty za cechy spektralne KB (ogólna charakterystyka spektralna sceny /1-5 pkt/ oraz separacja barwna małych obiektów /1-4 pkt/), a także za wzrost czytelności KB (ogólna charakterystyka wzmocnienia przestrzennego sceny /1-5 pkt/, podkreślanie konturów elementów na obszarach o wysokim kontraście /0-2 pkt/, obecność szumów na obszarach o niskim kontraście /0-2 pkt/). Syntetyczne wyniki zamieszczono w tabeli 1.

Metody formalne

Poprzez obliczenie parametrów statystycznych otrzymuje się formalną charakterystykę informacji zawartej na obrazie. Zaproponowano szereg narzędzi oceny jakości scalanych danych pod względem walorów spektralnych i przestrzennych (*Carper i in., 1990; Chavez i in. 1991; Munechica i in., 1993; Zhou i in., 1998; Wald, 2000*). Opierają się one o analizę pojedynczych obrazów syntetycznych w relacji do oryginalnych wyciągów spektralnych i obrazu PAN. Stosuje się takie miary jak korelacje, różnice, średnie błędy kwadratowe (RMS) pomiędzy jasnością odpowiadających sobie pikseli porównywanych obrazów, wariancje obrazów czy ich średnią jasność.

Dokonywane są próby opracowania syntetycznej oceny działania metody (*Munechica i in., 1993; Ranchin i Wald, 2000b; Wald, 2000; Mularz i in., 2000a, 2000b*). Celem jest uzyskanie jednego parametru, którego działanie byłoby uniwersalne dla różnych zestawów scalanych danych (niezależne np. od ilości obrazów, rozdzielczości, kalibracji sensora) a przy tym proste do interpretacji i oceny jakości spektralnej scalonego zestawu danych. Dla oceny testowanych metod integracji zastosowano jeden z takich parametrów - $nQ_{\%}$ (*Wald, 2000*) - określający wielkość średniego relatywnego błędu spektralnego notowanego dla KB (k - ilość kanałów = 3, MS_{sr} – średnia jasność kanału spektralnego):

$$nQ_{\%} = 100 * [1/k \sum_{b=1}^k RMS(b)^2 / MS_{sr}(b)^2]^{1/2}$$

Dla pomiaru wzmocnienia przestrzennego funkcjonują parametry oparte o korelacje pomiędzy obrazami scalonymi a obrazem PAN (*Carper i in., 1990; Chavez i in., 1991*) lub pomiędzy wynikami ich przetworzeń w procesie filtracji górnoprzepustowej np. w oknie 3x3 (*Zhou i in., 1998*). Taki wskaźnik jest czuły na zgodność krawędzi (szczegółów) zawartych na obrazie PAN z zawartymi na

scalonym wyciągu spektralnym. Dla lepszej interpretacji jego wartości można stosować wartości R^2 (współczynnika determinacji korelacji) i wyrażać je w [%]. Wtedy wartość parametru można interpretować jako stopień obecności krawędzi na skalonym obrazie spektralnym w stosunku do znajdujących się w kanale PAN. W tab. 1 zaproponowano używanie dla KB wyników opartych o średnią arytmetyczną z trzech takich współczynników z każdego kanału wchodzącego w skład trypletu ($AIL_{\%}$).

5. Podsumowanie

Łatwo zauważyć, że uznana za najlepszą wizualnie metoda HPF koresponduje z wynikami formalnymi (tabela 1). Natomiast bardzo niskie oceny formalne metody BR (wysokie błędy spektralne, niskie uczytelnienie) nie znajdują potwierdzenia w jej ocenie wizualnej. Oznacza to, że sama akceptacja walorów interpretacyjnych produktu scalania nie wystarcza do dowolnego jego zastosowania. Jeśli użycie skalonych obrazów nie ogranicza się tylko do interpretacji, ale również do zastosowań wymagających niskiego zniekształcenia spektralnego, np. do dalszego przetwarzania obrazów czy klasyfikacji, konieczne jest uwzględnienie wyników formalnie charakteryzujących obraz.

TABELA 1. Zestawienie oceny jakości danych obrazowych po integracji.

Metoda integracji	KB 123						KB 234									
	Ocena wizualna			Ocena formalna			Ocena wizualna			Ocena formalna						
	Cechy spektralne (pkt.)	Miejsce metody	Uczytelnienie (pkt.)	Miejsce metody	nQ [%]	Miejsce metody	AIL [%]	Miejsce metody	Cechy spektralne (pkt.)	Miejsce metody	Uczytelnienie (pkt.)	Miejsce metody	nQ [%]	Miejsce metody	AIL [%]	Miejsce metody
IHS	6	2-3	6	2-3	190	2	95,5	1	6	3	7	2-3	160	2	85,0	2
BR	6	2-3	6	2-3	70,1	3	81,5	3	8	2	7	2-3	74,5	3	78,2	3
HPF	9	1	7	1	134	1	94,6	2	9	1	8	1	141	1	95,4	1

Literatura

- 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“ PE&RS, Vol. 56, No. 4;
- 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“ PE&RS, Vol. 57, No. 3;
- Erdas, Inc, GEOSYSTEMS Polska, 1998. „ERDAS Field Guide. Przewodnik geoinformatyczny“;
- Grasso D. N., 1993. „Applications of the HIS color transformation for 1:24,000-scale geologic mapping: a low cost SPOT alternative“ PE&RS;
- 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;
- Mather P. M., 1999. „Computer processing of remotely-sensed images“ John Wiley & Sons Ltd.;
- Mróz M., 2002. „Radiometric and textural fusion of multiresolution Landsat 7 ETM+ channels for the improvement of visual image interpretation and land cover classification“, EARSeL Symposium, Praga;
- 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” PE&RS, Vol. 59;

Pohl C., Genderen J. L. Van, 1998. „Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications” Int. J. Remote Sensing, Vol. 19;

Ranchin T., Wald L., 2000. „Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation” PE&RS, 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;

Vaughan R., O. Oune, 1998. „The fusion of TM, SPOT, IRS and KFA data for urban change detection in Tripoli”, Fusion of Earth Data, Sophia Antipolis, France;

Wald L., 2000. „Quality of high resolution synthesized images: is there a simple criterion?”, Fusion of Earth Data, Sophia Anipolis, France;

Welch R., Ehlers M., 1987. „Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data” PE&RS, 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;

Zhang Y., 1999. „A new merging method and its spectral and spatial effects”, International Journal of Remote Sensing, Vol. 20;

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;

Dane kontaktowe: Tomasz Pirowski, pirowski@agh.edu.pl, tel. (AGH). 617-39-93.