

METODY I PODEJŚCIA STOSOWANE W INTEGRUJĄCYM PRZETWARZANIU OBRAZÓW TELEDETEKCYJNYCH POZYSKANYCH ZA POMOCĄ RÓŻNYCH SENSORÓW

Marek Mróz, Małgorzata Szumiło

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest przedstawieniu koncepcji, metod i narzędzi stosowanych w integrującym przetwarzaniu danych teledetekcyjnych pozyskanych za pomocą różnych sensorów, określanych w terminologii anglojęzycznej jako „*data fusion*”. Stanowi element dyskusji nt. podejść stosowanych w integracji danych wielosensorowych o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej oraz konieczności zdefiniowania formalnych ram oceny jakości wytwarzanych „obrazów syntetycznych”. Niniejszy artykuł jest ogólnym i nie wyczerpującym przeglądem metod i technik łącznego przetwarzania danych. Zostaną tu również przedstawione koncepcje i główne pola wykorzystywania technik „fuzji” danych z odniesieniem do różnych pakietów oprogramowania, w których te techniki można odnaleźć. Nie jest to w żadnej mierze waloryzacja pakietów, wręcz przeciwnie, autorzy starają się uwolnić od patrzenia na problem przez pryzmat funkcjonalności jakiegokolwiek z oprogramowań dostępnych na rynku.

Słowa kluczowe: łączenie wielosensorowych danych teledetekcyjnych

WPROWADZENIE.

Teledetekcyjne systemy satelitarne dostarczają nam ogromnej ilości obrazów powierzchni Ziemi. Systemy te różnią się wieloma parametrami, a obrazy przez nie rejestrowane mają różną rozdzielczość przestrzenną (geometryczną), spektralną i czasową. W celu pełnego wykorzystania informacji zawartych na pozyskanych obrazach opracowuje się wiele technik łączenia danych obrazowych, nazywanych czasami technikami „integracji”, „scalenia”, „zespolenia” czy też „fuzji”. Krótkie, ale precyzyjne nazwanie tych operacji nastrocza pewnych trudności, gdyż zadomowione w publikacjach wyrażenie angielskie „*data fusion*” nie znajduje równie uniwersalnego i lapidarnego, a zarazem oczywistego intuicyjnego odpowiednika terminologicznego w języku polskim.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Marek Mróz, Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. Prawocheńskiego 15, 10-720 Olsztyn, e-mail: marek.mroz@uwm.edu.pl

„Łączenie” obrazów ma na celu nie tylko zwiększenie możliwości fotointerpretacyjnych, ale również poprawienie wyników klasyfikacji automatycznych, zgodnie z zasadą: „więcej informacji otrzymujemy patrząc na obiekt zainteresowania z kilku punktów widzenia” [Pohl and Van Gerderen 1998].

Znając odpowiedź na najważniejsze pytanie: „do jakich celów potrzebujemy danych?”, aktualizacji map, detekcji zmian, monitoringu zjawisk przyrodniczych, itp., możemy rozpocząć proces ich odpowiedniego doboru i przetwarzania. Wybór zależy od charakterystyki systemu teledetekcyjnego: wysokości orbity, geometrii obrazu, rozdzielczości czasowej, zakresów spektralnych, w jakich pozyskuje obrazy itd. Oczywiście cel opracowania określa dodatkowo sezon i warunki meteorologiczne, w jakich powinna odbyć się rejestracja danych. Po ich zgromadzeniu wyłania się problem wyboru metod łączenia informacji pochodzących z obrazów o różnych rozdzielczościach geometrycznych, czasami nawet z różnych dat i sensorów.

Procesy „*data fusion*” nie tylko wymagają od nas doboru odpowiedniej techniki, lecz dodatkowo „rozumienia” danych wejściowych (*input data*), szczególnie kiedy łączymy całkowicie odmienne od siebie zbiory danych, np. dane optyczne VIR i mikrofalowe SAR, dla których otrzymane obrazy mogą nie odpowiadać wprost „widomym” atrybutom obiektów [Pohl 1996, Polidori i Mangolini 1996].

Pakiety oprogramowania komercyjnego proponują liczne metody łączenia danych, ale w konkretnym przypadku, dla nie-specjalistów, ich wybór nie jest wcale oczywisty. Sprzedawcy obrazów satelitarnych również proponują produkty „połączone” (np. tzw. pan-sharpened). Firmy oferujące usługi o charakterze wartości dodanej generują własne produkty połączone na podstawie satelitarnych danych źródłowych. Wszystkie one mogą się wahać w wyborze jednej z dostępnych metod łączenia danych i często stosują metody, które nie są odpowiednie dla ich klientów. Klienci mają ten sam problem – nie mają łatwego środka pozwalającego na poprawny wybór między oferowanymi produktami lub zastosowanymi metodami [Thomas i Wald 2005].

W tym kontekście dyskusja o metodach łączenia danych wielosensorowych musi rozciągać się również na obszar określenia jakiegoś wspólnego (ujednoliczonego) protokołu oceny skutków tworzenia obrazów syntetycznych („*fused products*”). Na wstępie tych rozważań proponuje się [Thomas i Wald 2005] objęcie takim protokołem dwóch kardynalnych zasad:

- produkty wynikowe muszą być „bliskie rzeczywistości”,
- syntetyczne produkty wynikowe powinny być mocno spójne z danymi oryginalnymi, a więc zadośćuczynienie wymaganiu, aby pierwotne właściwości radiometryczne ulegały minimalnemu zniekształceniu poprzez „uszlachetniające” działania podwyższania rozdzielczości przestrzennej obrazów.

CELE ŁĄCZENIA DANYCH

Data Fusion jest zbiorem metod i podejść do łączenia wieloźródłowych obrazów teledetekcyjnych używających zaawansowanych technik ich przetwarzania. Ma na celu integrację odmiennych, acz często uzupełniających się danych, by „wzmocnić” zawarte w obrazach informacje. Studiując literaturę przedmiotu można stwierdzić, że procedury łączenia danych stosuje się do:

1. Podwyższania rozdzielczości przestrzennej satelitarnych obrazów wielospektralnych przy wykorzystaniu obrazów panchromatycznych i zdjęć lotniczych ułatwiającego proces fotointerpretacji. Określona rozdzielczość geometryczna obrazów wielospektralnych wynika z fizycznych podstaw obrazowania. Projektowanie nowych systemów teledetekcyjnych opiera się na zrównoważeniu dwóch parametrów: rozdzielczości spektralnej (jak wąskie będą kanały rejestracji?) z wymiarem terenowym chwilowego pola widzenia sensora (IFOV) reprezentowanym na obrazie cyfrowym przez piksel tak, aby zapewnić wymagany poziom luminacji rejestrowanej przez sensor przy ustalonym stosunku sygnału do szumu (SNR – *signal-to-noise ratio*). Współczesne systemy satelitarne, takie jak SPOT, LANDSAT, IKONOS czy QuickBird, mają możliwość jednoczesnej rejestracji obrazów wielospektralnych i panchromatycznych.
2. Ułatwienia przeprowadzania korekcji geometrycznych poprzez łatwiejszy i bardziej precyzyjny wybór fotopunktów i punktów kontrolnych.
3. Wzmocnienia rozróżnialności obiektów w stosunku do pojedynczego obrazu, co ułatwia pracę na obrazie barwnym lub mapie satelitarnej.
4. Rozszerzenia zbiorów danych o nowe wymiary przestrzeni spektralnej w celu poprawienia wyników klasyfikacji. Dokładność klasyfikacji może być zwiększona, kiedy w jej procesie wykorzystujemy dane wieloźródłowe.
5. Detekcji i monitorowania zmian używając danych wieloczasowych.
6. Zastępowania (uzupełniania) brakujących informacji, np. zachmurzonych części obrazu, danymi z innego obrazu.

DEFINICJA „*DATA FUSION*”

Pojęcie „*data fusion*” jest łatwe do zrozumienia, jakkolwiek jego ścisła definicja różni się w rozumieniu wielu naukowców. W literaturze przedmiotu spotkać można kilka odmiennych definicji, np.:

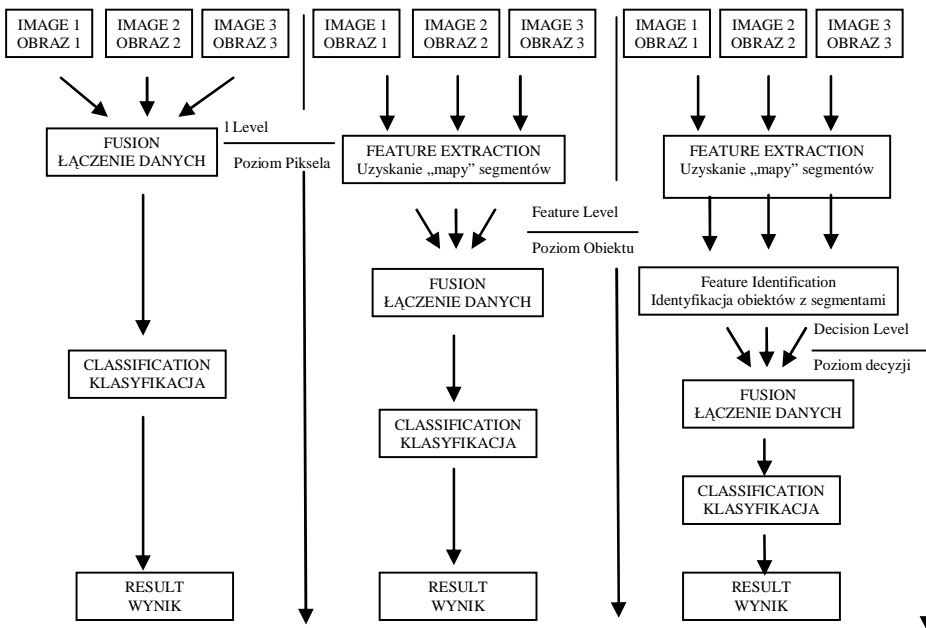
- „metody integrującego przetwarzania danych i informacji pozyskanych z różnych źródeł” [Hall 1992],
- „łączenie obrazów to kombinacja dwu lub kilku obrazów w celu uzyskania jednego o lepszej jakości przy użyciu określonych algorytmów” [Van Genderen and Pohl 1994].

Widać, że definicje te skupiają się bądź to na metodologii przetworzeń, bądź na poprawieniu jakości obrazów, co oczywiście jest pojęciem względnym. W roku 1998 członkowie specjalnej grupy roboczej złożonej z naukowców należących do Europejskiego Stowarzyszenia Laboratoriów Teledetekcyjnych (EARSeL) zaproponowali nową definicję. *Data Fusion* jest zdefiniowane jako formalne ramy, w których sposoby i narzędzia są tak wyrażone (dobre), by dane pochodzące z różnych źródeł mogły stworzyć pewien „*allians*” w celu uzyskania informacji o lepszej jakości, przy czym pojęcie „lepsza jakość” jest ściśle zależne od zastosowania (*Data fusion is defined as a formal framework in which means and tools are expressed for the alliance of data originating from different sources. It aim at obtaining information of great quality; the exact definition of “great quality will depend upon the application*) [Wald 1998]. Terminologia anglojęzyczna używa na określenie tego typu przetworzeń oprócz „*data fusion*” również: „*image fusion, image enhancement, image sharpening, image integration*”.

Procesy łączenia i integrowania danych można przeprowadzić na trzech różnych poziomach przetwarzania:

- piksela (nawet subpikselowym) – *pixel level*,
- obiektu – *feature level*,
- klasyfikacji (decyzji) – *decision level*.

Łączenie danych na najniższym poziomie, czyli analizie piksel po pikselu danych wejściowych (*input data*) odnosi się do łączenia zmierzonych wartości wielkości fizycznych (luminancji, rozpraszania, itp.) zarejestrowanych na poszczególnych obrazach. Keys [1990] oraz Franklin, Blodget [1993] określili to jako obliczenie nowych wartości pikseli opierając się na znanych relacjach pomiędzy danymi wejściowymi. Poddawane opracowaniu zobrazowania zazwyczaj różnią się rozdzielczością spektralną i przestrzenną oraz czasem rejestracji. Przed zastosowaniem jakiegokolwiek algorytmu łączenia danych należy obrazy z reguły odpowiednio dane przygotować, między innymi przeprowadzić korekcję geometryczną i radiometryczną (zestandardyzować). Szczególnie istotną rolę odgrywa korekcja geometryczna obrazów, a zwłaszcza dobór odpowiedniego stopnia wielomianu i metody „*resamplingu*”. Wynikłe podczas niej błędy mogą powodować zniekształcenie krawędzi obiektów, co przyczynia się do błędnej fotointerpretacji i pogorszenia wyników klasyfikacji.



Rys. 1. Schematy poziomów łączenia danych

Fig. 1. Flow chart of image fusion levels

Łączenie danych na wyższym poziomie (*feature level*) wymaga wyodrębnienia na obrazach pewnych obiektów przestrzennych, skupisk pikseli reprezentujących elementy świata rzeczywistego, przy użyciu procedur segmentacji. Nie łączymy tu ze sobą obrazów, by uzyskać jeden o „lepszej jakości”, lecz informację zawartą w każdym z nich w celu określenia jednolitych regionów pod względem rozmiaru, kształtu, sąsiedztwa itp. (tzw. segmentów). Na podstawie tak uzyskanej „mapy” segmentów identyfikowane są poszczególne obiekty i poddawane dalszej ocenie (klasyfikacji) według metod statystycznych bądź innych reguł decyzyjnych.

Decision level reprezentuje metody przetwarzania danych, w których każdy obraz ze zbioru podstawowego jest przetwarzany indywidualnie. Dopiero uzyskane z nich informacje są ze sobą „wiązane”, stosując różne reguły decyzyjne (*decision rules*). W procesie łącznego przetwarzania danych często wykorzystujemy nie tylko obrazy satelitarne, ale również inne materiały pomocnicze, tj. mapy topograficzne, dane z pomiarów bezpośrednich, informacje z baz danych itp. Jak łatwo zauważyć, te dodatkowe informacje możemy dodać do wejściowego zbioru obrazów jedynie na dwóch wyższych poziomach, tj. *feature level* i *decision level*.

TECHNIKI ŁĄCZENIA OBRAZÓW (*IMAGE FUSION*)

W rozdziale tym zostaną przybliżone techniki „łączenia obrazów”. Omawianie metod integracji danych na poziomie *feature* i *decision* uważane jest przez autorów za wchodzenie już w bardzo szeroką tematykę klasyfikacji obrazów i nie będą one przedstawione w niniejszym opracowaniu. Poszukiwania metod i algorytmów „*data fusion*” rozpoczęto od badania literatury przedmiotu, a następnie poszukiwano ich aplikacji w dostępnych na rynku pakietach oprogramowania „teledetekcyjnego”. W opracowaniach można odnaleźć kilkanaście różnych realizacji metod łączenia danych obrazowych. Niekiedy te same lub bardzo podobne algorytmy funkcjonują pod różnymi nazwami.

Generalnie można wyróżnić trzy grupy metod:

- rzutowanie oryginalnych wartości pikseli na zmienione osie przestrzeni spektralnej,
- wagowanie wartości pikseli z różnych kanałów spektralnych,
- transformacje falkowe, fourierowskie i oparte na koncepcji ARSIS [Wald i in. 1999]

Do pierwszej grupy można zaliczyć transformacje metodą głównych składowych (PCA Principal Component Analysis), CCA – Canonical Components Analysis, MNF – Minimum Noise Fraction, ortogonalizację Gramma- Schmidt’a, transformacje przestrzeni barw – najczęściej RGB-IHS.

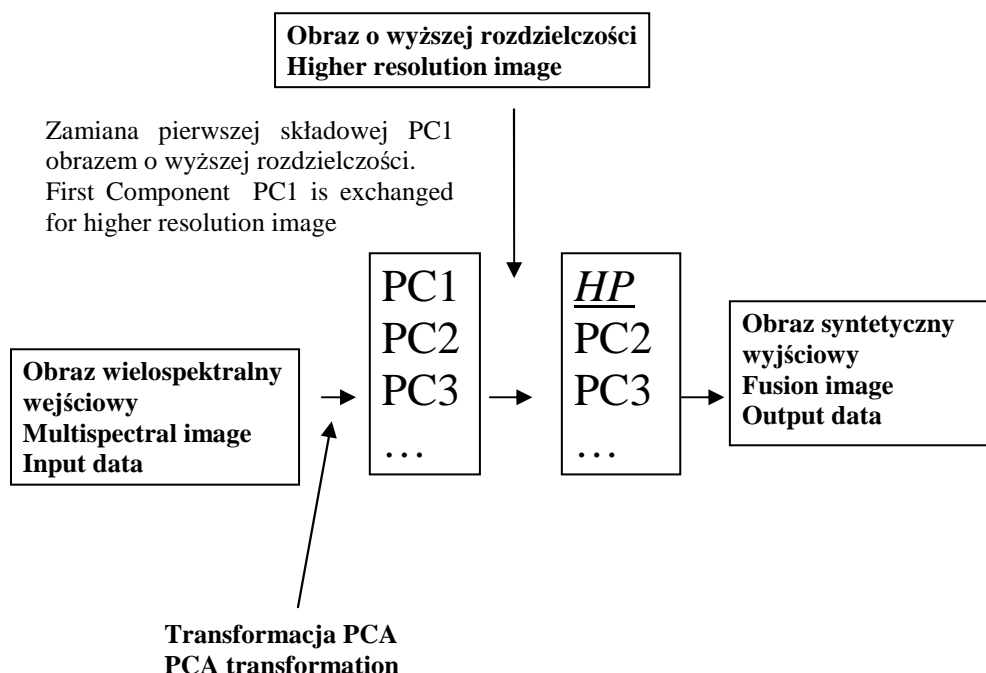
Druga grupa to przekształcenia algebraiczne wartości pikseli obrazów wielospektralnych. Zaliczyć można do niej wszystkie metody wykorzystujące sumo-mnożenia i wagowanie kanałów, w tym zaimplementowaną w ERDAS-ie i często przywoływaną w literaturze metodę „*multiplicative*” czy też „*additive*”. Metodę Brovey’a oraz *CN Spectral Sharpening*.

Do grupy trzeciej: zastosowanie filtracji górnoprzepustowych, transformacji furierowskich oraz falkowych, a także złożonych metod opartych na koncepcji ARSIS wypracowanej przez francuską *Ecole de Mines* [Wald i in. 1999].

Wiele z wymienionych powyżej metod pozwala na operowanie znaczną liczbą kanałów wejściowych, podczas gdy inne pozwalają wykorzystać jedynie ściśle określony liczbowo zbiór danych, np. 3 kanały. Użytkownik może sam określić zbiór wejściowy posługując się własnym doświadczeniem i posiadaną wiedzą lub posłużyć się narzędziami proponowanymi przez twórców oprogramowania (określania wariancji, korelacji czy stopnia kompresji danych).

PCA I INNE METODY TRANSFORMACJI UKŁADU WSPÓLRZĘDNYCH SPEKTRALNYCH

Transformacja PCA jest znana i wielokrotnie opisana w literaturze [Pohl 1999 i in.]. Z wielospektralnego obrazu wyodrębnia najistotniejsze elementy, dokonując analizy macierzy kowariancji budowanej na podstawie wartości pikseli z wszystkich kanałów zobrazowania. Jest w zasadzie metodą redukcji wymiaru przestrzeni spektralnej. W zastosowaniu do łączenia danych o różnej rozdzielczości umożliwia podstawienie za pierwszy komponent obrazu o wyższej rozdzielczości przestrzennej.



Rys. 2. Schemat łączenia obrazów o różnej rozdzielczości oparty o metodę PCA
Fig. 2. Procedure of fusing multiresolution images using PCA method

Jakość procedury łączenia danych przy użyciu metody PCA może zależeć od samych danych, tj. ich wariancji. Stąd niekiedy ważne jest zdecydowanie, czy źródłem wartości liczbowych będzie macierz kowariancyjna (niestandardyzowana wersja metody, przy wyborze tej opcji kanały o większej wariancji mają przypisywane wyższe wagi), czy też macierz korelacyjna (standardyzowana – najczęściej stosowana do łączenia danych wieloczasowych, wszystkie kanały mają równe wagi w procedurze obliczeniowej). Modyfikacjami klasycznej metody głównych składowych jest kaskadowa procedura transformacji PCA określana w literaturze jako Minimum Noise Factor (lub Fraction) oraz CCA (Canonical Components Analysis). CCA transformuje obrazy do nowego ortogonalnego układu opierając się na macierzy kowariancyjnej, ale obliczonej na podstawie wskazanych pól „treningowych”. Operuje na wybranych fragmentach obrazu. Technika ta jest najbardziej użyteczna, gdy transformacja PCA, operująca wartościami globalnymi nie daje odpowiedniej separatywności klas.

Transformacja *Intensity-Hue-Saturation (RBG-IHS)* to szeroko stosowana technika integracji obrazów. W metodzie transformacji barw z systemu RBG do IHS stosuje się podstawienie kanału wysokorozdzielczego w miejsce składowej natężenia barwy (*Intensity*) przy transformacji powrotnej IHS-RBG. Zakłada się, że składowa ta reprezentuje zróżnicowanie wypadkowej (sumarycznej) jasności spektralnej obrazowanej sceny i jest wysoko skorelowana z poziomem luminacji w kanale o wyższej rozdzielczości (z reguły panchromatycznym).

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (1a)$$

$$H = \arctan\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad (1b) \quad S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (1c)$$

wzór na transformację odwrotną:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Metoda ta jest szeroko stosowana, umożliwia jednak operowanie wyłącznie na trzech kanałach wejściowych, stąd często występuje razem w zestawieniu z innymi technikami, np. MNF.

Przekształcenia algebraiczne należą do grupy operacji przekształcających źródłowe, pierwotne wartości pikseli w nowe wartości, będące ich wagowanym sumo-mnożeniem. Operacje takie pozwalają na wygenerowanie wartości pikseli jako pochodnych luminacji w różnych kanałach spektralnych. Wzory nr 3 i 4 są przykładem przekształcenia

wykorzystanego przez Yesou'a i in. [1993] do łączenia obrazów Landsat TM ze SPOT Panchro.

$$DN_f = A(w_1 * DN_a + w_2 * DN_b) + B \quad (3)$$

$$DN_f = A * DN_a * DN_b + B \quad (4)$$

gdzie:

DN_f – wartość piksela na obrazie wynikowym

DN_a, DN_b – pierwotna wartość piksela (*input data*)

w_1, w_2 – wagi przypisane obrazom wejściowym

A, B – współczynniki przekształcenia liniowego

Przykładem szczególnym wzoru nr 4 (gdy $A=B=1$) jest procedura obliczeniowa zawarta np. w pakiecie Erdas Imagine pod nazwą **Multiplicative**. Do „rodziny” tych przetworzeń należy również **transformacja Brovey'a**. [Erdas 1999, ENVI 2004, ...] Jedno z podejść „wyostrania obrazu” (*image sharpening*) oparte na założeniu, że zakres spektralny obrazu o wyższej rozdzielczości, np. panchromatycznego, jest taki sam jak suma tych, w których zostały zarejestrowane obrazy o niższej rozdzielczości geometrycznej, np. wielospektralne. Przekształcenie opisane jest wzorem:

$$F_k = \frac{M_k * H}{\sum_{k=1}^n M_k},$$

gdzie:

F_k – wynik działania – obraz wielospektralny o podwyższonej rozdzielczości,

M_k – kanał „i” obrazu wielospektralnego,

H – obraz panchromatyczny.

W dobie pojawienia się systemów hiperspektralnych zostały stworzone modyfikacje transformacji Brovey'a, pozwalające na łączenie informacji pochodzących z obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej w sposób „bezstratny”, tj. przy zachowaniu charakterystyk spektralnych „odwzorowanych” w zestawie wąskich kanałów spektralnych, ale z dokładnością lokalizacji obiektów w skali i stopniu szczegółowości kanału wysokorozdzielczego (szerokopasmowego). W Research Systems np. zaproponowano algorytm integrującego przetwarzania obrazów hiperspektralnych z wielospektralnymi (o wyższej rozdzielczości) o nazwie *CN Spectral Sharpening (Color Normalized Spectral Sharpening)*, znany również jako *Energy Subdivision Transform*. Wąskie kanały spektralne są grupowane w tzw. „segmenty” danych tak, aby w danej grupie znalazły się obrazy należące do szerszego spektralnie, ale wysokorozdzielczego kanału, który będzie kanałem wyostrającym, obejmującym swoim zasięgiem cały segment hiperspektralny. Właściwe „wyostranie” dokonuje się przez wymnożenie kanałów o różnej rozdzielczości w ramach „segmentów” z odpowiednią normalizacją.

Założeniem w metodach *Frequency Domain Fusion* jest przeniesienie wysokiej częstotliwości przestrzennej (*high frequency*) zawartej w obrazach o wysokiej rozdzielczości geometrycznej do obrazów o niższej rozdzielczości. Odbywa się to najczęściej w

ten sposób, że obrazy wysokorozdzielcze poddawane są filtracji górno- i dolnoprzepustowej. Tak utworzone komponenty obrazu są łączone z obrazami o niższej rozdzielczości. Przykładami takich metod są:

- *High frequency modulation (HFM)*

$$F_k = M_k * H / LPH$$

- *High frequency addition (HFA)*

$$F_k = M_k + (H - LPH),$$

gdzie:

F_k – wynik działania – obraz o podwyższonej rozdzielczości,

M_k – obraz wielospektralny,

H – obraz panchromatyczny

LPH – wynik filtracji obrazu o panchromatycznego filtrem dolnoprzepustowym

Transformacja falkowa (Wavelet Transform) i analizy „różno-rozdzielcze” są matematycznym narzędziem w dziedzinie przetwarzania sygnału, który znalazł swoje zastosowanie w łączeniu danych teledetekcyjnych. Technika dekompozycji falkowej pozwala na podział obrazu na zbiór pod-obrazów o różnej rozdzielczości zgodnie ze współczynnikami falkowymi (*wavelet coefficients*), które odgrywają istotną rolę w wyznaczaniu charakterystycznych struktur dla danej skali obrazu. Współczynniki te dla każdego poziomu rozdzielczości zawierają przestrzenne różnice pomiędzy dwoma następnymi poziomami. Realizacja dyskretna transformacji falkowej może być wykonana poprzez różne algorytmy, jednakże nie wszystkie z nich są odpowiednie do rozwiązania danego problemu, gdyż każdy prowadzi do specyficznej, niepowtarzalnej (*unique*) dekompozycji sygnału. Można przykładowo wymienić trzy realizacje transformacji falkowych: *Pyramidal Laplacian*, *Pyramidal in Fourier Space*, *Haar Wavelet Transform*.

Z transformacji falkowych wywodzi się koncepcja integracji danych o różnej rozdzielczości ARSIS (*Amelioration de la Resolution Spatiale par Injection des Structures*) opracowana przez zespół Ecole de Mines de Paris. Koncepcja ARSIS jest oparta na założeniu, że informacje, których brakuje na obrazach wielospektralnych o niższej rozdzielczości, są związane z wysokimi częstotliwościami przestrzennymi, zarówno tego zbioru obrazów, jak też obrazu(ó)w wysokorozdzielczego(ych). Oba zbiory obrazów, zarówno te o niższej rozdzielczości, które będą „wyostrzane”, jak też te o wyższej rozdzielczości geometrycznej, (wyostrzające) rozkłada się na dwa komponenty: niskich i wysokich częstotliwości przestrzennych, i w jednym z kilku możliwych algorytmów dokonuje się tworzenia nowych, syntetycznych obrazów wynikowych, zachowujących pierwotne cechy spektralne, ale obdarzonych zwiększoną rozdzielczością geometryczną. W literaturze [Thaomas 2005] wskazano, że w ramach koncepcji ARSIS możliwych jest kilka schematów postępowania. Dogłębne studiowanie tych metod łączenia danych wymaga poświęcenia im oddzielnej publikacji.

KRYTERIA OCENY JAKOŚCI ŁĄCZENIA DANYCH OBRAZOWYCH

Proponowane w literaturze [Pohl 1998, Thomas 2005] oraz w komercyjnym oprogramowaniu metody łączenia danych teledetekcyjnych (obrazowych) siłą rzeczy podlegają ocenie i porównywaniu. Szczególnie wtedy, gdy jak już wspomniano, oferuje się użytkownikom końcowym tzw. produkty „uszlachetnione”. Pojawia się więc potrzeba zdefiniowania jakiegoś obiektywnego protokołu oceny tych produktów. Trudność oceny jakości algorytmu łączenia (fuzji) obrazów *a priori* wynika z faktu, że efekty łączenia zależne są od dwu parametrów:

- typu krajobrazu (rodzaje obrazowanych obiektów),
- rozdzielczości przestrzennej obrazów [Thomas i Wald 2005];

czyli, jak się w sposób naturalny kojarzy, od relacji między rozdzielczością geometryczną systemów obrazujących a wielkością komponentów obrazowanej sceny; *de facto* – tekstury. Być może lepiej jest „ustawić się na końcu ścieżki” oceniając *a posteriori* jakość produktu połączonych, uniezależniając się od oceny poszczególnych algorytmów „fuzji”. Ocena jakości wymaga jednak elementu odniesienia – obrazu referencyjnego. Niekiedy takim obrazem jest obraz wysokorozdzielczy o degradowanej rozdzielczości o czynnik np. „2” symulujący obrazy pseudorzeczywiste. W większości przypadków takiego obrazu referencyjnego nie ma i musi on być skonstruowany. Niekiedy jako obraz referencyjny stosuje się paradoksalnie obraz niskorozdzielczy przepróbkowany wprost do rozdzielczości obrazu wysokorozdzielczego. Jest to podejście ze wszech miar odradzane.

Niektóre podejścia rezygnują z tworzenia obrazu referencyjnego opierając się jedynie na podobieństwie histogramów obrazów wejściowych oraz „połączonych” (i/lub innych miarach statystycznych). Wyniki wielu prac wskazują jednak na nieprzystawanie miar statystycznych produktów połączonych z miarami obrazów oryginalnych, wynikające z samego faktu zmiany rozdzielczości przestrzennej skojarzonej z jakimś typem interpolacji (*resamplingu*). Nie wydaje się więc, aby jakiś protokół oceny jakości procesu „fuzji” obrazów mógł być na tych parametrach oparty. Ciekawe podejście do skonstruowania obrazu referencyjnego proponują Thomas i Wald [Thomas i Wald 2005] poprzez wprowadzenie dodatkowej zmiany skali obrazów (piramida obrazów). Proponowany przez nich protokół obejmuje sprawdzenie spójności obrazów syntetycznych zarówno z oryginalnymi obrazami nisko- jak i wysokorozdzielczymi.

Sprawa stworzenia obiektywnych kryteriów oceny jakości łączenia danych obrazowych pozostaje otwarta i wymaga zarówno rozwijania wątku teoretycznego, jak też walidacji na podstawie wyników prac eksperymentalnych.

PODSUMOWANIE

Współczesne podejście do zagadnień fotointerpretacji wspomaganą komputerowo (CAPI) oraz klasyfikacji automatycznych, w tym zorientowanych obiektowo, wymaga położenia nacisku na dobre, poprawne przygotowanie danych wejściowych. Dzieje się to w omawianych wyżej procedurach łączenia danych obrazowych. Rozwijanie kolejnych metod integracji danych, ocena jakości metod już opracowanych i istniejących w formie pakietów oprogramowania komercyjnego, jak też pilna potrzeba opracowania obiek-

tywnego protokołu oceny jakości „produktów połączonych” wymagają zintensyfikowania prac eksperymentalnych. Dobrym pomysłem byłoby chyba stworzenie zbioru danych testowych i rozpropagowanie go w polskim środowisku teledetekcyjnym tak, aby uzyskiwane przez różne zespoły badawcze wyniki mogły być łatwo porównywalne. Coś na kształt dawnych testów OEEPE (obecnie Euro SDR). Naszym wspólnym celem powinno być takie działanie, aby polski końcowy użytkownik danych teledetekcyjnych miał możliwość wyboru określonych produktów w sposób bardziej świadomy zarówno na etapie definiowania warunków technicznych i specyfikacji zamówień, jak też przy odbiorze gotowych produktów, a nie kierował się „urokiem osobistym” dostawców czy też presją lobbystów.

PIŚMIENNICTWO

- ENVI User's Guide wydanie wrzesień 2004.
 ERDAS Field Guide, 1999 wydanie piąte.
 Idrisi Kilimanjaro Guide to GIS and Image processing, Wydanie: kwiecień 2003.
 Franklin S. E., Blodgett C.F., 1993. An Example of satellite multisensor data fusion. *Computers and Geoscience*, 19, 577-583.
 Pohl C., Genderen J.L., 1998. Multisensor image fusion In remote sensing: concepts, methods and applications, *International Journal of remote Sensing*, 1998 vol. 19 nr 5, 823-854.
 Pohl C., 1999. Tools and Methods for Fusion of Images of Different Spatial Resolution, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June 1999.
 Reyes R.A. et al., 2005. Fusion of SPOT 5 multispectral and Ikonos panchromatic images. *Proceedings of the 24th symposium of the EARSeL*. Millpress Netherlands 2005.
 Thomaas C., L. Wald., 2005. Assessment of the quality of fused products. *Proceedings of the 24th symposium of the EARSeL*. Millpress Netherlands 2005.
 Wald L. et al., 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assesing the quality of resulting images. *PE&RS* vol.63, No. 6, June 1997, pp. 691-699.
 Wald L., 1999. Definition and terms of reference in data fusion, *international Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June 1999.
 Yesou H., Besnus Y., Rolet J., 1993. Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery – a contribution to the study of geological structures. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(5) 23-26.

METHODS AND APPROACHES APPLIED TO MULTISENSORAL DATA FUSION

Abstract. The paper presents the ideas, methods and tools used in fusion of remotely sensed data acquired by different systems and sensors. It is a contribution to the discussion on methods and approaches applied to fusion of imagery data having different spectral and spatial resolution, and on the necessity of elaboration of any formal framework of

data fusion process quality assessment. This paper is general, not pretending to be an exhaustive review of methods and techniques of data fusion. The authors show certain solutions in the context of commercial software functionality but they avoid any formal evaluating of them.

Key words: remote sensing data fusion

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.10.2005