

**ZASTOSOWANIE TRANSFORMACJI FALKOWEJ DO DETEKCJI I USUWANIA
SZUMÓW Z DANYCH RASTROWYCH**

**APPLICATIONS OF WAVELET TRANSFORM IN NOISE DETECTION
AND REMOVAL FROM RASTER DATA**

Krystian Pyka

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: transformacja falkowa, jakość radiometryczna, detekcja szumów

STRESZCZENIE: W pracy zaproponowano zastosowanie transformacji falkowej do wykrywania szumów zawartych w danych rastrowych a następnie do usuwania szumów losowych. Omówiono syntetycznie problem szumów występujących w obrazach cyfrowych oraz stosowane metody ich usuwania. Przedstawiono najważniejsze cechy transformacji falkowej. Jako materiał badawczy wykorzystano fragmenty zdjęć lotniczych i wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Analizowano także dane pseudo-rastrowe, jakimi są wysokościowe modele terenu o strukturze regularnej siatki.

Badania potwierdziły możliwość formułowania wskaźników zawartości szumów, opartych na analizie kształtu rozkładów współczynników detali falkowych. Stwierdzono, że badanie kształtu histogramów komponentów falkowych może być zastosowane do porównywania zmian radiometrycznych następujących podczas przetwarzania obrazów. W pracy przedstawiono koncepcję wykorzystania falek do redukcji zawartości szumów losowych. Na podstawie pierwszych eksperymentów badawczych sformułowano problemy cząstkowe, których rozwiązanie powinno zagwarantować wysoką skuteczność metody redukcji szumów w dziedzinie transformaty falkowej.

1. WPROWADZENIE

Termin rastrowy model danych przestrzennych ma kilka konotacji semantycznych. Najczęściej jest kojarzony z cyfrowym obrazem fotograficznym reprezentowanym przez tablicę pikseli. Należy zauważyć, że obrazy teledetekcyjne można interpretować zarówno jako jeden z modeli rzeczywistości geograficznej jak i jako rastrowy model danych. Analogiczną do obrazów cyfrowych strukturę mają mapy powstałe w wyniku klasyfikacji tematycznej w systemach GIS – komórki mapy są odpowiednikami pikseli obrazu. W wielu zagadnieniach, przykładowo przy budowie i analizie NMT, przedmiotem przetwarzania są regularnie rozłożone dane punktowe, które nazywa się pseudo-rastrową postacią danych. W dalszej części artykułu jako dane rastrowe będą rozumiane zarówno obrazy cyfrowe jak i NMT o postaci GRID.

Dane rastrowe są wykorzystywane w wielu dziedzinach badawczych, dzięki czemu powstał ogromny dorobek metodyczny w zakresie przetwarzania „rastrów”. Immanentną cechą obrazów cyfrowych jest zawarty w nich szum losowy. Problem szumów dotyczy

także innych danych rastrowych aczkolwiek może być inaczej definiowany. W przypadku NMT czynnikiem utrudniającym uzyskanie współkształtnych warstw, zwłaszcza w małych skalach, jest zbyt duża „chropowatość” danych, co można uznać za rodzaj szumu informacyjnego.

Do detekcji i usuwania szumów obrazowych najczęściej wykorzystuje się częstotliwościową reprezentację obrazów. Przekształcanie danych z dziedziny przestrzennej do dziedziny częstotliwości do niedawna wykonywano głównie przy pomocy transformacji Fouriera (Oppenheim, 1982. Od kilku lat wykorzystuje się także transformację falkową, która również prowadzi do reprezentacji częstotliwościowej, ale dodatkowo posiada możliwość lokalizacji miejsca występowania określonych częstotliwości.

W pracy przedstawiono przykłady detekcji szumów zawartych w danych rastrowych z wykorzystaniem transformacji falkowej. Zaproponowano metodę redukcji szumów na drodze przekształcania komponentów falkowych.

2. SZUMY LOSOWE I METODY ICH REDUKCJI

Szumem jest każde losowe lub deterministyczne zakłócenie hipotetycznego sygnału, który powstałby w warunkach idealnych (Morain, 2004). W przypadku obrazów cyfrowych mamy na myśli zakłócenie luminancji promieniowania wysyłanego (odbijanego) przez obiekty ułożone w kadrze obrazu. Jeśli pominiemy problem teledetekcyjnych wskaźników ilościowych, takich jak albedo czy temperatura radiacyjna, to wówczas nie interesuje nas bezwzględna wartość luminancji energetycznej, lecz wzajemne relacje sygnału, które kształtują wewnętrzną jakość radiometryczną (Pyka, 2005).

Szumy powstają na różnych etapach akwizycji obrazu: w czasie formowania obrazu, podczas próbkowania, kodowania, kompresji, transmisji obrazu oraz w trakcie jego przetwarzania. Szumy obrazowe mogą mieć charakter deterministyczny lub przypadkowy. Artykuł koncentruje się na szumach losowych, aczkolwiek nie w każdym przypadku możliwa jest precyzyjna separacja tych dwóch rodzajów szumów.

W obrazach analogowych źródłem szumów losowych jest ziarnistość emulsji fotograficznej. W obrazach cyfrowych szumy są spowodowane m.in. niestabilnością detektorów z których zbudowane są matryce obrazowe, zakłóceniami powstającymi w trakcie przesyłania sygnałów, ich kodowania oraz przetwarzania.

Szumy losowe, ze względu na swój nieprzewidywalny charakter, nie mogą być w pełni usunięte z obrazu, można tylko złagodzić skutki ich występowania. Najpopularniejszą metodą usuwania szumów jest dolnoprzepustowa filtracja kontekstowa. Filtry dolnoprzepustowe obniżają poziom szumów, ale jednocześnie rozmywają krawędzie występujące w obrazie. Kompromisem jest zastosowanie filtrów adaptacyjnych, które w pierwszej fazie wykrywają krawędzie a potem chronią je przed destrukcyjnym działaniem uśrednienia prowadzonego dla pikseli leżących poza krawędziami (Tadeusiewicz, 1998). Rozwiązanie to nie sprawdza się w miejscach zbiegu słabego kontrastu z szumami.

Innym podejściem do redukcji szumów jest transformacja obrazu do dziedziny częstotliwości, określenie wartości progowej dla szumu i usunięcie niepożądanych współczynników transformaty. Najczęściej wykorzystywana jest transformacja Fouriera, jednak praktyczna stosowalność tej metody ogranicza się do przypadku dużego stosunku

sygnału do szumu (Oppenheim, 1982). Ostatnio w miejsce transformacji Fouriera stosuje się transformację falkową. Rozwiązanie falkowe, w porównaniu z fourierowskim, wnosi nową jakość w postaci możliwości lokalizacji opisu częstotliwościowego sygnału względem miejsca, czyli wskazania częstotliwości występujących w określonym miejscu obrazu (Mallat 1998; Białasiewicz 2000; Pyka 2005a).

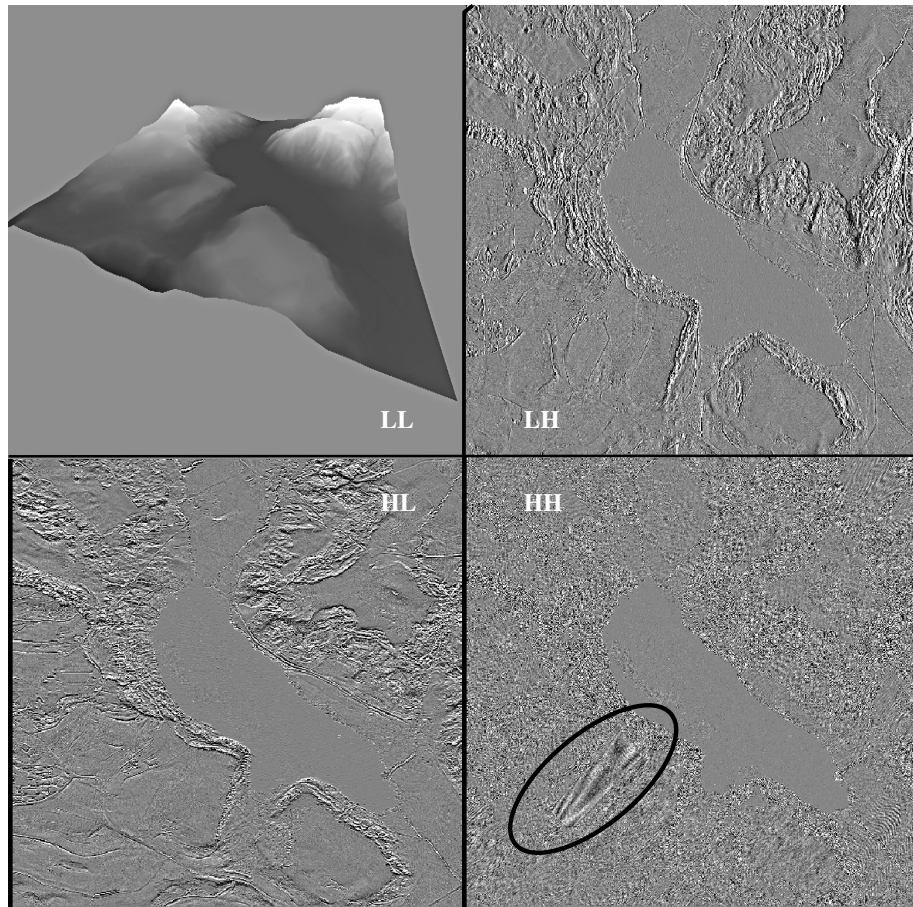
3. DETEKcja SZUMÓw LOSOWYCH NA PODSTAWIE ANALIZY WSPÓŁCZYNNIKÓw FALKOWYCH

W rozwinięciu falkowym obrazu (Mallat 1989) występują cztery komponenty: tzw. zgrubny (LL) i trzy detaliczne, określane odpowiednio jako detal pionowy (LH), poziomy (HL) i przekątny (HH) – są one pokazane na rysunku 1. Charakterystyczną cechą transformacji falkowej jest możliwość jej kontynuowania w stosunku do wybranych komponentów, najczęściej rozwija się głębiej komponent zgrubny.

Wizualna ocena komponentów falkowych pozwala niejednokrotnie wykrywać artefakty, niewidoczne przy obserwacji obrazu w klasycznej postaci. Destrukcyjne efekty kompresji stratnej algorytmem JPEG są łatwiej zauważalne w detalu przekątnym (HH) niż przy obserwacji obrazu w klasycznej postaci (Pyka 2005a). Na rysunku 1 pokazano dekompozycję falkową NMT GIRD. Nawet wnikliwa i wykonywana w różnych powiększeniach obserwacja obrazu przedstawiającego wysokości w skali szarości nie wykazała obecności artefaktów, natomiast są one widoczne w detalu przekątnym. Warto zwrócić uwagę, że wizualizacja regularnego NMT w postaci obrazu achromatycznego napotyka na barierę wyświetlania tylko 256 jasności, tymczasem NMT może zawierać (i z reguły zawiera) wartości z szerszego przedziału. W przypadku takich danych jak regularny NMT, obserwacja komponentów falkowych jest szczególnie przydatna, gdyż pozwala na „głębsze” rozpoznanie treści.

Falkowa reprezentacja obrazu może być wykorzystana do oceny zawartości szumu losowego. Po raz pierwszy zaproponował to Simoncelli (1996, 1999), który zauważył, że rozkład współczynników komponentów detalicznych wykazuje ostre maksimum w zerze i dobrą symetrię, natomiast spłaszczenie histogramu jest skorelowane z obecnością szumów w obrazie.

Hipoteza Simoncelliego, wysnuta na podstawie analizy komponentów falkowych typowych, widokowych zdjęć naziemnych, została potwierdzona także dla zdjęć lotniczych i satelitarnych. W pracy (Pyka, 2005a) analizowano zdjęcia lotnicze różnych terenów, wykonane w różnych skalach oraz wysokorozdzielcze obrazy satelitarne. Zaproponowano, aby jako parametr opisujący kształt histogramów stosować kurtozę, która jest ilorazem momentu czwartego rzędu przez kwadrat wariancji. Przyjęte zostały trzy modelowe przypadki rozkładu współczynników falkowych: rozkład normalny dla którego kurtoza wynosi 3, rozkład Laplace’a bardziej wzniesiony od normalnego, o kurtozie równej 6 oraz zmodyfikowany (symetryczny) rozkładu gamma, jeszcze bardziej wzniesiony, o kurtozie równej 12.



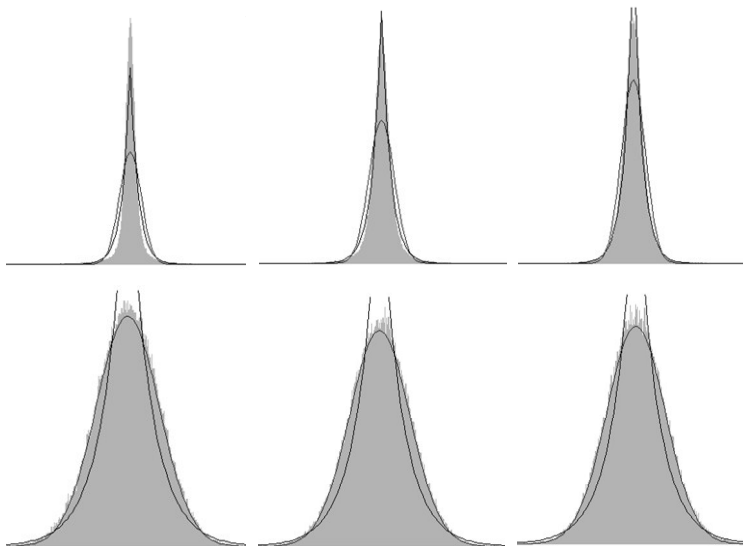
Rys. 1. Falkowa dekompozycja NMT (komponent LL pokazano w rzucie perspektywicznym, na komponencie HH wskazano miejsce wystąpienia artefaktów)

W pracy (Pyka, 2005a) potwierdzono silną korelację pomiędzy udziałem szumów losowych w obrazie a kształtem rozkładu współczynników detalicznych rozwinięcia falkowego. Zauważono, że korelacja rozkładu z szumami może być zaburzona w tych fragmentach obrazu, gdzie występuje naturalna struktura drobnoziarnista. Dlatego do analizy należy wybierać fragmenty obrazu, w których naturalna struktura jest gładka, plamista lub w ostateczności gruboziarnista. Jednocześnie stwierdzono (Pyka, 2005a), że ocena kształtu rozkładu współczynników powinna być przeprowadzona dla wszystkich trzech komponentów detalicznych, ale wystarczy ograniczyć badania do dekompozycji falkowej na jednym poziomie rozdzielczości. Dalsza dekompozycja komponentu zgrubnego (LL), nie wnosi już informacji o szumach, gdyż każdy kolejny komponent

zgrubny jest efektem wygładzenia poprzedniego, co zmniejsza zawartość szumów. Na rysunku Rys. 2 zestawiono histogramy komponentów detalicznych obrazu z dużą i małą zawartością szumów. Na tle histogramów zilustrowano krzywe rozkładu normalnego i rozkładu Laplace'a.

Modelowanie kształtu histogramów komponentów falkowych może być zastosowane do porównywania zmian radiometrycznych następujących podczas przetwarzania obrazów. Analizując histogram współczynników falkowych obrazu źródłowego i poddanego przetwarzaniu, można ocenić stopień wygładzenia obrazu. Jeśli celem przetwarzania była redukcja szumów, wówczas histogram powinien być bardziej wzniesiony od histogramu obrazu źródłowego. Jeśli przetwarzanie ma charakter geometryczny (np. ortorektyfikacja), wówczas silna zmiana kształtów histogramów detali jest sygnałem o nadmiernych zmianach radiometrycznych, spowodowanych np. niewłaściwym wyborem funkcji interpolującej jasności tworzonego obrazu (Pyka, 2005a).

Na obecnym etapie badań nie można jeszcze wykorzystać wyników modelowania rozkładu komponentów falkowych jako bezwzględnej miary zawartości szumów losowych. Aby określić takie miary należało by przeprowadzić szereg eksperymentów badawczych, w którym badane byłyby obrazy w różnych skalach (o różnym pikselu), przedstawiające reprezentatywnie różne sposoby użytkowania i pokrycia terenu, zarejestrowane w różnych porach roku.

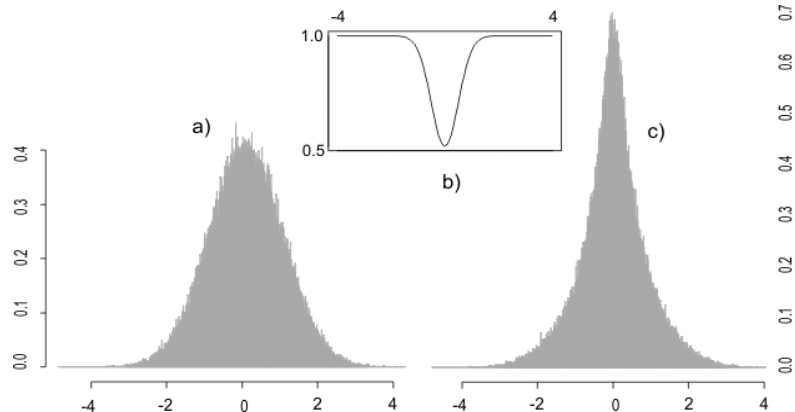


Rys. 2. Porównanie histogramów rozkładu współczynników falkowych komponentów detalicznych (LH,HL,HH) uzyskanych dla obrazów o małej (góra) i dużej (dół) zawartości szumów

4. REDUKCJA SZUMÓW NA DRODZE PRZEKSZTAŁCANIA KOMPONENTÓW FALKOWYCH

Jak poprzednio wykazano, im jest mniej wzniesiony rozkład współczynników detali falkowych, tym jest większe prawdopodobieństwo, że obraz przenosi szumy losowe. Zatem pojawia się pomysł, aby dokonać takiego przekształcenia współczynników detali, które zmniejszy małe współczynniki a większe pozostawi niezmienione. Takie działanie zmieni rozkład współczynników wprowadzając większe wzniesienie (większa kurtoza). Zabieg taki pokazany jest na rysunku Rys. 3, z lewej strony przedstawiono histogram określony na podstawie współczynników wybranego komponentu detalicznego, w środku jest funkcja przekształcająca, z prawej wynik przekształcenia. Do przekształcenia wykorzystano funkcję, która powstała na drodze zwierciadlanego odbicia i translacji funkcji rozkładu normalnego. Ma ona pożądaną właściwość: zmniejsza małe współczynniki a zachowuje duże.

Jedną z cech transformacji falkowej jest jednorodność. Wynika z niej, że jeśli komponenty falkowe poddamy przekształceniu liniowemu, to po rekonstrukcji otrzymamy obraz, którego jasności są związane z jasnościami obrazu źródłowego tą samą funkcją liniową. A co się stanie, gdy poszczególne komponenty falkowe zostaną przekształcone inną funkcją liniową lub funkcjami nieliniowymi? Naruszona zostanie relacja pomiędzy odpowiadającymi sobie współczynnikami poszczególnych detali. Wiadomo, że wprowadzi to zaburzenia w postaci sztucznych efektów (artefakty), ale powstaje pytanie, czy będą one istotne.



Rys. 3. Przekształcenie współczynników detalu falkowego:
 a) histogram detalu oryginalnego; b) funkcja przekształcenia;
 c) histogram wynikowy

Przedstawiony powyżej pomysł stanowi pewną analogię do idei kompresji stratnej. Każda kompresja stratna narusza równowagę współczynników transformaty (kosinusowej, falkowej), gdyż redukuje liczbę współczynników niezerowych (istotnych dla przeniesienia treści). Im większy stopień kompresji, tym większe prawdopodobieństwo pojawienia się artefaktów w odtwarzanym obrazie. Natomiast rozsądny stopień kompresji daje pożądany efekt w postaci mniejszej objętości plików obrazowych przy mało zauważalnych przez człowieka efektach ubocznych. Przypomnijmy, że przy opracowaniu algorytmu kompresji JPEG korzystano z wyników wizualnych obserwacji obrazów, prowadzonych przez reprezentatywną grupę ludzi. Wykorzystano fizjologiczne właściwości ludzkiego systemu obserwacyjnego, polegające na ograniczonej czułości oka na duże częstotliwości obrazowe (Pyka, 2005b). Innymi słowy, człowiek nie zauważa bardzo delikatnych zniekształceń wprowadzonych przez kompresję, lub widzi je dopiero w pewnych okolicznościach.

Warto podkreślić na czym polega różnica pomiędzy strategią kompresji stratnej a proponowaną koncepcją zmiany kształtu rozkładu współczynników falkowych. Kompresja stratna zeruje małe współczynniki detali falkowych. Natomiast rozważana koncepcja zakłada przekształcenie zmieniające wartości współczynników, ale w sposób ciągły. Powinno to przeciwdziałać generowaniu artefaktów, pod warunkiem wszakże, że nie zostanie nadmiernie zachwiana relacja współczynników komponentów detalicznych w stosunku do komponentu zgrubnego. W przypadku nieznacznej ingerencji w komponenty detaliczne (zmiany dotyczą praktycznie tylko małych współczynników) efekt jest pozytywny: zmniejsza się udział szumów przypadkowych, nie są widoczne artefakty (nie zamieszczono rysunków, gdyż redukcja szumów jest dostrzegalna tylko na monitorze). Wraz ze stopniem ingerencji w detale zwiększa się prawdopodobieństwo występowania artefaktów, co potwierdziły przeprowadzone eksperymenty. Do rozwiązania pozostają następujące problemy;

- wskazanie kresu górnego zbioru wartości współczynników falkowych, czyli takiej wartości współczynnika (innego dla każdego detalu), która powinna kończyć zabieg zmniejszania wartości,
- dobór rodzaju funkcji korygującej detale, obok funkcji zastosowanej eksperymentalnie (rys. 3) należy rozważyć inne, np. przekształcona funkcja arcus tangens,
- opracowanie metody wyznaczającej optymalne współczynniki wybranej funkcji korygującej detale,
- rozszerzenie zakresu przekształcenia o następny poziom rozdzielczości (dekompozycja komponentu zgrubnego na cztery komponenty falkowe i przekształcanie tak uzyskanych detali).

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania udowodniły przydatność falkowej detekcji szumów do analizy porównawczej obrazów tej samej sceny, wykonanych w tych samych warunkach. W praktyce taka sytuacja występuje rzadko, ale można porównywać zawartość szumów pomiędzy obrazem a jego radiometrycznym lub geometrycznym przetworzeniem (przy zmianie geometrii następuje zawsze interpolacja jasności). Takie narzędzie analityczne pozwala kontrolować stopień wygładzenia obrazów, do dyspozycji jest bowiem ilościowy, względny wskaźnik poziomu szumów.

Na obecnym etapie badań nie można jeszcze zaproponować analizy rozkładu współczynników falkowych jako obiektywnej, ilościowej miary poziomu szumów obrazowych. Jednakże doświadczenia z przeprowadzonych eksperymentów są na tyle obiecujące, że badania warto kontynuować na polu testowym, które byłoby zarejestrowane w różnych skalach, w różnych porach roku, z wykorzystaniem kamery cyfrowej i analogowej.

Obok detekcji szumów poszukiwano odpowiedzi na pytanie czy możliwe jest zastosowanie transformacji falkowej do redukcji poziomu szumów losowych. Zaproponowano przekształcenie w dziedzinie transformaty falkowej, polegające na zmniejszaniu małych współczynników detali z zachowaniem dużych. Przeprowadzone eksperymenty przekonują, że takie przekształcenie prowadzi do redukcji szumów, ale aby było to rozwiązanie wyraźnie lepsze od dotychczas stosowanych, konieczne jest rozwiązanie kilku zdefiniowanych w pracy problemów cząstkowych.

Pole zastosowań transformacji falkowej rozszerzono o dane pseudo-rastrowe, jakimi są wysokościowe modele terenu o strukturze regularnej siatki. Z punktu widzenia takich zadań jak generowanie warstw oraz wypełnianie baz wielorozdzielczych, zbyt szczegółowy opis morfologii terenu można interpretować jako szum informacyjny. Falki mogą być wykorzystane zarówno do kontroli efektów interpolacji danych NMT do postaci regularnej siatki jak i do monitorowania procesu wygładzania modeli regularnych.

6. LITERATURA

- Białasiewicz J.T., 2000: Falki i aproksymacje. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.
- Mallat S., 1998: A Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press, ISBN 0-12-466605-1.
- Morain S.A., Zanon V.M., 2004.: Joint ISPRS/CEOS-WGCV Task Force on Radiometric and Geometric Calibration. ISPRS Istanbul 2004, com. I, p.354-360
- Oppenheim A.V. (red.) 1982: Sygnały cyfrowe. Przetwarzanie I zastosowania. Wydawnictwa naukowo-techniczne, Warszawa.
- Pyka K., 2005a. Falkowe wskaźniki mian radiometrycznych zachodzących w procesie opracowania ortofotomapy. UWND AGH Kraków, 2005, s. 1-95.
- Pyka K., 2005b: Uwarunkowania fizjologiczne i techniczne wpływające na percepcję obrazu obserwowanego na ekranie monitora. Roczniki Geomatyki, t. 3, z. 1, str. 131-137
- Simoncelli E.P., Adelson E.H. 1996: Noise removal via Bayesian Wavelet Coring. Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing, vol. I, pp. 379-382. Lausanne, Switzerland. 16-19 September 1996. IEEE Signal Processing Society, 1996.
- Simoncelli E.P. 1999: Modeling the Joint Statistic of Images in Wavelet Domain. Proc. SPIE 44th Annual Meeting, vol. 3813 Denver, Colorado. July 1999
- Tadeusiewicz R., Korohoda P. 1997: Komputerowa analiza obrazów. Wydawnictwo Fundacji Postępu Komunikacji, Kraków 1997.

Praca została wykonana w ramach badań własnych AGH 10.10.150.900

**APPLICATIONS OF WAVELET TRANSFORM IN NOISE DETECTION
AND REMOVAL FROM RASTER DATA**

KEY WORDS: wavelets transform, radiometric quality, noise detection

SUMMARY: In the present paper, the use of wavelet transformation for determining noise type and reduction of random noise from raster data, is proposed. Noise in the digital images and applied methods for noise removal is described synthetically. The most important features of wavelet transformation are presented. The fragments of aerial photographs and high-resolution satellite images were used as a research material. Besides the images, the pseudo-raster data, such as the area digital terrain models (DTM) with the regular grid structure, were analysed.

The research confirmed the possibility to define the noise content indicators based on the analysis of wavelet detail coefficients distribution shape. It was found that the study of histogram shape of the wavelet components can be employed for the comparison of the radiometric changes occurring during radiometric and geometric processing of the images. In the paper, the concept of using wavelets for the reduction of the random noise content is presented. On the grounds of the experiments in preliminary research, the partial problems were formulated. Finding the solution to them should guarantee the efficiency of noise reduction method in the wavelet transformation field.

Dr hab. inż. Krystian Pyka
krisfoto@agh.edu.pl