

**PORÓWNANIE JAKOŚCI RADIOMETRYCZNEJ ZDJĘĆ LOTNICZYCH
WYKONANYCH KAMERĄ ANALOGOWĄ I CYFROWĄ**

**COMPARISON OF RADIOMETRIC QUALITY OF IMAGES TAKEN WITH
ANALOGUE AND DIGITAL CAMERAS**

Krystian Pyka

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, AGH

SŁOWA KLUCZOWE: szum, falki, dekompozycja obrazu, jakość radiometryczna, wariancja

STRESZCZENIE: Dla potrzeb badań zebrano materiał składający się z par zdjęć zarejestrowanych kamerą analogową (LMK1000) i cyfrową (DMC). Było to zdjęcia wyselekcjonowane z wykonanych uprzednio prac fotolotniczych, przy czym materiał dobierano tak, aby w miarę możliwości porównywać zdjęcia wykonane w podobnym okresie wegetacyjnym i posiadające zbliżoną rozdzielczość geometryczną. Na zdjęciach wybierano fragmenty o jednolitym użytkowaniu terenu, np. budynki, parkingi, pola, lasy. W ten sposób zgromadzono materiał badawczy liczący 25 par obrazów o rozmiarach 1024 x 1024 pikseli. Jako metodę badań jakości radiometrycznej obrazów wybrano analizę ich transformat falkowych. Na podstawie analizy równania zachowania wariancji względnej stwierdzono następujące prawidłowości: (1) w obrazach z kamery cyfrowej względna wariancja detali sukcesywnie rośnie wraz ze wzrostem poziomu dekompozycji, (2) w obrazach z kamery analogowej względna wariancja maleje pomiędzy 1. i 2. poziomem rozdzielczości a potem powoli rośnie lub jest stabilna. Sukcesywny wzrost wariancji detali, obserwowany dla obrazów z kamery cyfrowej, świadczy o bardzo niskim poziomie szumów przypadkowych. Z kolei niestabilne zmiany wariancji dla obrazów z kamery analogowej dowodzą wysokiej zawartości szumów.

1. WPROWADZENIE

Od kilku lat kamery cyfrowe sukcesywnie zastępują kamery analogowe, stosowane dotąd w fotogrametrii lotniczej. Oczywiście zaletą kamer cyfrowych jest wyeliminowanie z procesu technologicznego etapu skanowania zdjęć. Producenci kamer cyfrowych zapewniają, że - w stosunku do skanowanych materiałów analogowych - obrazy cyfrowe rejestrowane bezpośrednio posiadają znacznie lepszą jakość radiometryczną.

Jakość radiometryczna obrazu to pojęcie, które nie zostało do tej pory jednoznacznie zdefiniowane. Jeśli za podstawowe zadanie teledetekcji uznamy rekonstrukcję promieniowania elektromagnetycznego pochodzącego od rejestrowanych obiektów, wówczas miarą jakości radiometrycznej jest stosunek luminancji energetycznej obiektów do natężenia napromienienia, jakie mierzy detektor. W metodach ilościowych dąży się do znalezienia funkcji wiążącej te energie. W metodach jakościowych nie jest istotna bezwzględna wartość mierzonego promieniowania a zachowanie wzajemnych relacji jasności pomiędzy detalami obiektów, odwzorowanych w obrazie. Przy fotogrametrycznym pomiarze szczegółów

terenowych, zarówno manualnym jak i automatycznym, interpretacja detali ma charakter jakościowy – umiemy je wskazać lub wykryć bo posiadają autonomiczne cechy widoczne dzięki różnicom jasności w stosunku do otoczenia.

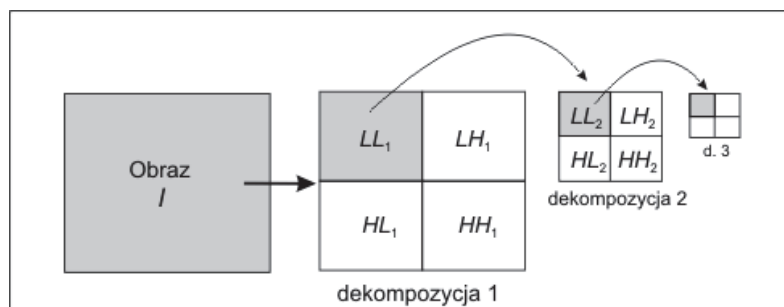
Dla potrzeb fotogrametrycznych wystarczy operować pojęciem wewnętrznej jakości radiometrycznej obrazu, zdefiniowanym następująco: jest to właściwość obrazu polegająca na szczegółowości odwzorowania lokalnych zmian napromienienia rejestrowanego przez system obrazowania przy jednoczesnym zachowaniu continuum jasności obrazu, adekwatnym dla odwzorowanej sceny (Pyka, 2005).

Lista elementów kształtujących wewnętrzną jakość radiometryczną obejmuje co najmniej: kontrast lokalny obrazu, rozpiętość tonalną, szum przypadkowy i rozdzielczość radiometryczną (Pyka, 2005). W pracy skupiono się na jedynie na analizowaniu zawartości szumów losowych w obrazach cyfrowych uzyskanych w sposób pośredni (fotografowanie na materiale srebrnym i skanowanie) i bezpośredni (kamera cyfrowa).

Praca stanowi kontynuację badań nad przydatnością dekompozycji falkowej obrazu do formułowania wskaźników wewnętrznej jakości radiometrycznej. W stosunku do poprzednich publikacji poświęconych tej tematyce (Pyka, 2005), (Pyka, 2007), niniejsza praca koncentruje się na wykorzystaniu równania zachowania wariancji falkowej do porównawczej analizy zawartości szumów losowych. Artykuł rozszerza badania przedstawione w (Pyka, 2008) o analizy komponentów R,G,B.

2. HIPOTEZA BADAWCZA

Na wstępie zostanie przypomniana idea falkowej dekompozycji obrazu. Matematyczne podstawy transformacji falkowej obrazu podał Mallat (1998). Polega ona na częstotliwościowo-przestrzennej dekompozycji obrazu na cztery składowe, z których pierwsza jest nazywana składową zgrubną (LL), a pozostałe to tzw. detale: pionowy (LH), poziomy (HL) i diagonalny (HH). Wykorzystanie falkowej reprezentacji obrazu do oceny jakości radiometrycznej obrazu po raz pierwszy zaproponował Simonceli (1996, 1999), który zauważył, że rozkład współczynników falkowych komponentów detalicznych wykazuje ostre maksimum w zerze i dobrą symetrię, natomiast spłaszczenie histogramu jest skorelowane z obecnością szumów w obrazie.



Rys. 1. Klasyczny schemat dekompozycji falkowej obrazu

Pyka (2005) potwierdził hipotezę Simoncellego i zaproponował, aby jako parametr opisujący kształt histogramów komponentów detalicznych stosować kurtozę (iloraz

momentu czwartego rzędu przez kwadrat wariancji). Propozycja została przetestowana poprzez badania licznych obrazów lotniczych i satelitarnych (Pyka 2005). Zauważono przy tym, że do analizy szumu obrazowego powinny być wybierane tylko takie fragmenty obrazu, w których nie występują obszary o naturalnej strukturze drobnoziarnistej. Konieczność pomijania miejsc drobnoziarnistych jest niewątpliwie wadą zaproponowanej metody detekcji szumów losowych. Jak wykazano w kolejnych badaniach (Pyka, 2008), lepszą metodą jest analiza równania zachowania wariancji względnej, prowadzona dla kilku poziomów dekompozycji. O niskim poziomie szumów świadczy stabilny wzrost wariancji detali jaki ma miejsce ze wzrostem poziomu dekompozycji. Wzrost ten nie jest zakłócony w przypadku drobnoziarnistej struktury obrazu (Pyka, 2008).

Jedną z fundamentalnych cech dekompozycji falkowej jest zachowanie energii obrazu (Mallat, 1998), z czego wynika także stałość wariancji obrazu, co można zapisać następująco (Pyka, 2005), (Pyka, 2008):

$$V(I) = V(LL_R) + \sum_1^R [V(LH_r) + V(HL_r) + V(HH_r)] \quad (1)$$

gdzie: $V(I)$ – wariancja obrazu I ,
 R – poziom dekompozycji (na rysunku 1 R wynosi 3),
 $V(LL_R)$ – wariancja komponentu zgrubnego LL dla dekompozycji R
 (ostatniej z rozważanych),
 $V(LH_r)$, $V(HL_r)$, $V(HH_r)$ - wariancje detali LH , HL , HH dla kolejnych
 dekompozycji od 1 do R .

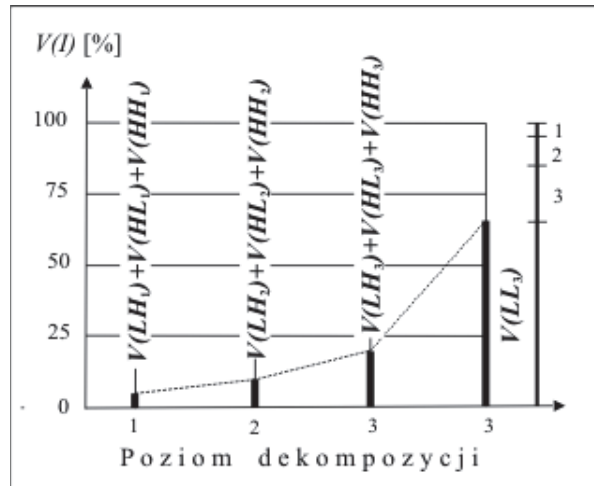
Po dokonaniu normalizacji równania (1), polegającej na podzieleniu obu stron przez $V(I)$, uzyskujemy następującą postać:

$$1 = \frac{V(LL_R)}{V(I)} + \frac{1}{V(I)} \sum_{r=1}^R [V(LH_r) + V(HL_r) + V(HH_r)] \quad (2)$$

Z równania (2) wynika, że podczas dekompozycji falkowej suma wariancji komponentów, normalizowanych wariancją obrazu, jest zawsze równa 1. Zasada ta zachodzi niezależnie od tego, na ilu poziomach dekomponujemy obraz.

Analiza równania (2) pozwala prześledzić, jak zmieniają się wariancje względne na kolejnych poziomach rozdzielczości. Zauważmy, że kolejne komponenty falkowe LL_r , LH_r , HL_r , HH_r cechuje dwukrotne (liniowo) zmniejszenie rozmiaru w stosunku do poprzedniej dekompozycji. Zwróćmy także uwagę, że schemat dekompozycji przedstawiony na rysunku 1 (teoretycznie istnieje wiele innych), zakłada sukcesywne rozkładanie komponentu zgrubnego. Kolejne komponenty zgrubne LL_1 , LL_2 , itd., są wygładzane, co wynika z faktu, że w odniesieniu do tych komponentów transformacja falkowa jest filtracją dolnoprzepustową (dla komponentów detalicznych zachodzi filtracja górnoprzepustowa). Podczas każdego wygładzania komponentu zgrubnego zanikają miejsca o słabych kontrastach a pozostają tylko te, w których kontrast jest wysoki. Silne kontrasty ulegają sukcesywnej progresji, gdyż równocześnie z filtracją zachodzi wspomniana diadyczna redukcja rozmiarów obrazu. Innymi słowy, kolejne komponenty zgrubne przenoszą mocne kontrasty a wygaszają słabe. W konsekwencji

wariancje względne detali powinny stopniowo rosnąć i taka sytuacja jest oczekiwana podczas analizy równania (2) na kolejnych poziomach rozdzielczości.



Rys. 2. Oczekiwany przebieg równania zachowania wariacji podczas dekompozycji falkowej

Powstaje pytanie czy opisana powyżej prawidłowość będzie zachowana dla obrazu obciążonego szumem losowym. W takim przypadku szumy powinny zawyżać wariację na pierwszym poziomie rozdzielczości, co spowoduje, że będzie ona większa niż na następnym poziomie. Po kolejnej filtracji dolnoprzepustowej sytuacja powinna wrócić do oczekiwanej i wariacja powinna rosnąć. W przypadku bardzo silnego szumu zachowanie tendencji wzrostu wariacji może być kontynuowane dla większej liczby poziomów dekompozycji. Hipoteza ta była przedmiotem przeprowadzonych badań porównawczych, w których spodziewano się, że pomiędzy obrazami z kamery analogowej (poddanymi skanowaniu) i obrazami z kamery cyfrowej wystąpi istotna różnica w zawartości szumu losowego.

Transformację falkową cechuje tzw. jednorodność. Objawia się ona w tym, że transformatę falkową obrazu stanowiącego funkcję liniową innego obrazu (wyjściowego) można uzyskać wykonując to samo przekształcenie liniowe na komponentach falkowych obrazu wyjściowego. Zasada ta może być wykorzystana przykładowo do generowania transformaty obrazu luminancji na podstawie transformat falkowych komponentów R,G,B (bez konieczności uprzedniego utworzenia obrazu luminancji). Praktyczne sprawdzenie tej zasady było dodatkowym elementem badań opisanych w dalszej części.

3. MATERIAŁ I NARZĘDZIA BADAWCZE

Jako materiał badawczy wykorzystano zbiór obrazów tego samego terenu wykonanych kamerą LMK 1000 (Zeiss Jena) i DMC (Z/I Imaging), dostępny w archiwum firmy MGGP AERO. Zdjęcia z LMK były wykonane na filmie AGFA Aviphot Color X100 a do skanowania użyto DELTA SCAN (piksel 12 μm i 14 μm). Wybrano obrazy o zbliżonych rozmiarach piksela terenowego (ang. GSD) i wykonane w podobnym okresie wegetacyjnym (niestety w różnych latach).

Dla każdej pary zdjęć (LMK i DMC) zostały wybrane odpowiadające sobie fragmenty tak, aby zawierały tę samą treść. W miarę możliwości wybierano fragmenty o jednolitym użytkowaniu terenu, np. budynki, parkingi, pola, lasy. Dzięki temu obserwowano, jaki wpływ na transformację falkową ma rodzaj użytkowania terenu. W sumie do badań wybrano 25 fragmentów ze zdjęć w skali średniej (GSD 12-14 cm) i 9 ze zdjęć w skali małej (GSD 36-46 cm).

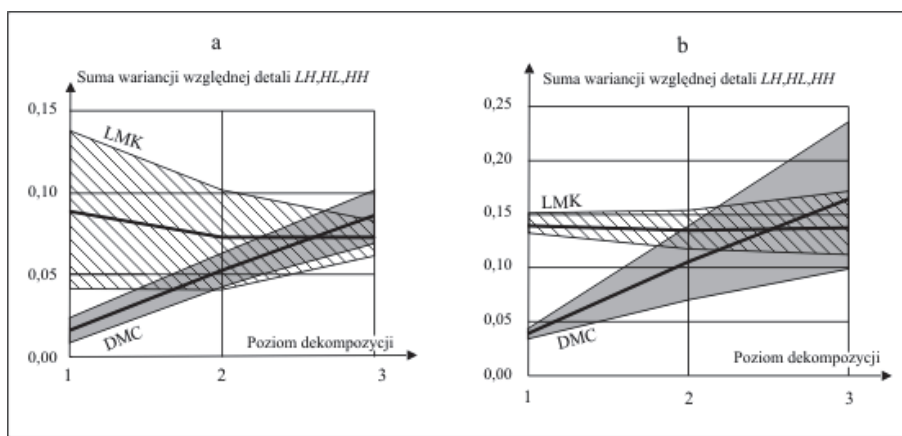
W transformacji falkowej zastosowano algorytm macierzowy z filtrami Coiflet-a 3. rzędu (Mallat, 1998). Dekompozycję realizowano przy pomocy procedur napisanych w środowisku R. Wybierane fragmenty miały wielkość 1024 x 1024 pikseli. Dodatkowo stosowano maskowanie kadrów w poszczególnych parach obrazów tak, aby zawierały one tę samą treść. Było to konieczne ze względu na różne rozmiary GSD obrazów z LMK i DMC.

W przypadku obrazów barwnych, jakimi dysponowano, dekomponować można albo poszczególne kanały R,G,B albo można ograniczyć się do wypadkowego obrazu luminancji. Wyniki badań wykonanych na obrazach luminancji opisano w (Pyka, 2008). W kolejnych, opisywanych w niniejszej pracy badaniach, zdecydowano skonfrontować analizy prowadzone tylko dla obrazu luminancji z analizami dla poszczególnych kanałów składowych. Spowodowało to zwielokrotnienie materiału badawczego, ale w zamian uzyskano możliwość wnioskowania o jakości składowych oraz zgromadzono materiał badawczy do praktycznego potwierdzenia jednorodności transformacji falkowej (opisanej w rozdziale 2).

4. WYNIKI BADAŃ

Najbardziej przejrzystą formą zestawienia wyników jest graficzne przedstawienie równania zachowania wariancji dla 3. badanych poziomów dekompozycji, gdyż szybko można stwierdzić, czy zachodzi podobieństwo do sytuacji oczekiwanej, pokazanej na rysunku 2. Duża ilość badanych obrazów nie pozwala na pokazanie wszystkich wykresów osobno. Jednakże okazało się, że bardzo łatwo można je podzielić na dwie grupy – jedną zgodną z zasadą systematycznego wzrostu wariancji a drugą z odstępstwem od tej zasady, zawsze wypadającym pomiędzy pierwszym a drugim poziomem rozdzielczości a czasami kontynuowanym dalej tj. do ostatniego z analizowanych poziomów. W pierwszej grupie mieściły się wszystkie obrazy z kamery DMC a w drugiej - z kamery LMK. Należy podkreślić, że ta prawidłowość nie napotkała na żadne odstępstwo, co w obliczu różnych skal badanych obrazów oraz fragmentów obrazujących różne krajobrazy jest mocnym potwierdzeniem innej reakcji zdjęć LMK i DMC na dekompozycję falkową.

Na rysunku 3 przedstawiono syntetyczne wyniki dla wszystkich badanych obrazów (dotyczy wypadkowych obrazów luminancji) z podziałem na zdjęcia w średniej i małej skali (odpowiednio część a i b rysunku 3). W obrazach z kamery cyfrowej względna wariancja detali rośnie wraz ze wzrostem poziomu dekompozycji – pokazuje to szara strefa na rysunku 3a i 3b, wewnątrz której mieściły się wyniki dla wszystkich przebadanych fragmentów zdjęć. Natomiast w przypadku obrazów z kamery analogowej względna wariancja maleje pomiędzy 1. i 2. poziomem rozdzielczości a potem albo powoli rośnie albo maleje do 3. poziomu (taka sytuacja wystąpiła głównie dla zdjęć małoskalowych, dla terenów zielonych). Pokazuje to strefa pokryta szrafurą na rysunkach 3a i 3b, wewnątrz której mieściły się wyniki dla wszystkich przebadanych fragmentów zdjęć.

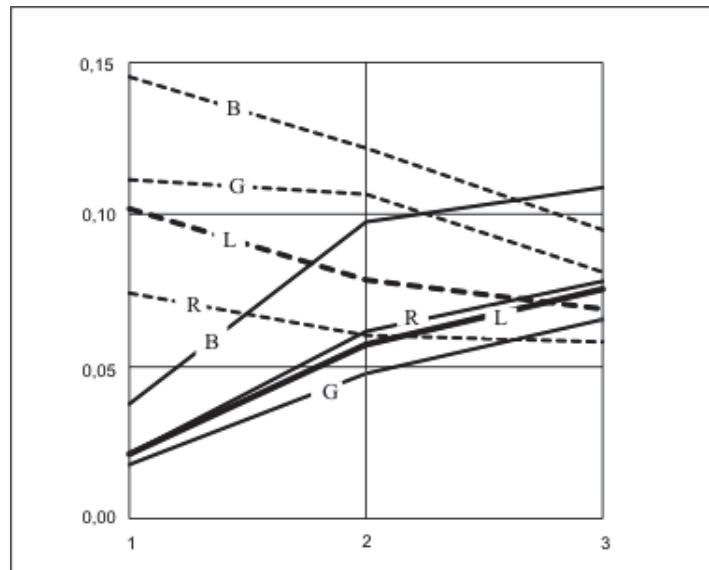


Rys.3. Syntetyczne wyniki analizy równania zachowania wariancji względnej dla obrazów w średniej (a) i małej skali (b)

Aby lepiej zaznaczyć zmiany wariancji dla kolejnych poziomów dekompozycji, na rysunkach 3a i 3b pokazano wytłuszczoną linią łamaną średnią tendencję zmian. Z teoretycznego punktu widzenia poprawniejszy jest rysunek 2, gdzie pokazano wartości wariancji względnej, mające charakter dyskretny a nie ciągły. Ponadto rysunki 3a i 3b nie zawierają (dla większej przejrzystości) wariancji komponentu zgrubnego, która wraz z wariancjami detali tworzy analizowane równanie (2).

Analogiczne do wyżej opisanych badania przeprowadzono dla składowych R,G,B wszystkich badanych obrazów. I w tym przypadku rezultaty poddają się łatwemu podziałowi na dwie grupy, odpowiadające kamerom LMK i DMC. Przebieg krzywych obrazujących równanie wariancji względnej składowych R,G,B jest zgodny z uzyskanym dla wypadkowych obrazów luminancji i potwierdza właściwość jednorodności transformacji falkowej. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki dla jednego z badanych obrazów, które można uznać za reprezentatywne dla całej badanej populacji obrazów

w aspekcie wzajemnej relacji wariancji komponentów R,G,B (wybrany obraz LMK należy do podzbioru tych obrazów, dla których tendencja spadku wariancji utrzymuje się aż do 3. poziomu dekompozycji).



Rys. 4. Ilustracja równania zachowania wariancji względnej dla wybranej pary obrazów LMK (linie przerywane) i DMC (linie ciągłe); R,G,B – składowe, L - obraz luminancji

5. PODSUMOWANIE

Praca nie wyczerpuje problemu jakości radiometrycznej zdjęć lotniczych. Porównano zdjęcia wykonane kamerą LMK ze zdjęciami wykonanymi kamerą cyfrową DMC tylko w aspekcie zawartości szumów losowych. Pominięto inne elementy kształtujące jakość radiometryczną.

Analiza przebiegu równania wariancji względnej podczas dekompozycji falkowej okazała się skuteczną metodą wykrywania szumów losowych. O niskim poziomie szumów świadczy stabilny wzrost wariancji detali, jaki ma miejsce ze wzrostem poziomu dekompozycji. Metoda nie wykazuje korelacji z naturalną, drobnoziarnistą strukturą, co było wadą wcześniej stosowanej przez autora metody wykrywania szumów na podstawie kształtu rozkładu falkowych komponentów detalicznych.

Porównanie obrazów z kamery analogowej i cyfrowej potwierdziło ogromną różnicę w zawartości szumów przypadkowych na korzyść kamery cyfrowej, która zawiera ich zdecydowanie mniej. Taki wniosek był oczekiwany, gdyż bezpośrednia rejestracja cyfrowa eliminuje szereg źródeł szumów, jakie występują przy pozyskiwaniu obrazów cyfrowych na drodze skanowania zdjęć analogowych. W badaniach nie dociekano, co było przyczyną wysokiego zaszumienia zdjęć zarejestrowanych na materiale srebrnym i przekształconych do postaci cyfrowej na drodze skanowania. Na podstawie wniosków płynących z literatury wiadomo, że obok ziarnistości emulsji fotograficznej, obok uchybień w procesie wywoływania, prawdopodobnym źródłem szumów jest także skanowanie. Problem ten musiałby być rozstrzygnięty poprzez skanowanie tego samego zdjęcia na różnych skanerach. Również w stosunku do obrazów z kamery cyfrowej poczyniono pewne umowne założenia upraszczające. Jednym z nich było badanie obrazów przekształconych z 12-bitowego zapisu

oryginalnego do konwencjonalnego zapisu 8. bitowego. Ciekawa byłaby analiza szumów pomiędzy obrazami źródłowymi DMC a przetworzonymi (zastosowany algorytm falkowy umożliwia dekompozycję obrazów zapisanych na dowolnej liczbie bitów). Autor przypuszcza, że transformacja falkowa może być także zastosowana do optymalizacji mapowania tonalnego jakie zachodzi przy transformacji sygnału z szerokiego zakresu dynamicznego kamery cyfrowej do zakresu 8. bitowego. W trakcie badań zauważono stosunkowo małą rozpiętość tonalną obrazów z DMC, znacznie mniejszą niż badane obrazy pochodzące z kamery LMK. Intrygująca jest także zauważona wielomodalność histogramów obrazów DMC. Są to problemy warte podjęcia w następnych badaniach.

Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH 11.11.150.949/08

6. LITERATURA

Mallat S., 1998: *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, ISBN 0-12-466605-1.

Pyka K., 2005. Falkowe wskaźniki zmian radiometrycznych zachodzących w procesie opracowania ortofotomapy. UWND AGH Kraków, 2005.

Pyka K., 2007: Zastosowanie transformacji falkowej do detekcji i usuwania szumów z danych rastrowych i pseudo-rastrowych, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 17.

Pyka K., 2008: The Use of Wavelets for Noise Detection in the Image Taken by the Analog and Digital Photogrammetric Cameras. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII-B1.

Simoncelli E.P., Adelson E.H., 1996: Noise removal via Bayesian Wavelet Coding. *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

COMPARISON OF RADIOMETRIC QUALITY OF IMAGES TAKEN WITH ANALOGUE AND DIGITAL CAMERAS

KEY WORDS: Noise, Wavelets Transform, Decomposition, Radiometric Quality, Variance

Summary

A set of aerial images taken by two cameras, analogue (LMK 1000) and digital photogrammetric (DMC), was used to compare radiometric quality of images obtained. Pairs consisting of analogue and digital images showing corresponding fragments of identical contents were selected for comparisons. As far as possible, fragments showing homogenous land use, e.g. buildings, parking lots, fields, forests, were selected, which made it possible to observe how the land use affected the wavelet transform. A total of 25 and 9 fragments of medium- and small-scale images, respectively were subjected to comparisons. The fragments selected were 1024 * 1024 pixels in size.

The wavelet transformation was chosen as a method with which to compare radiometric image quality. Analysis of the equation for relative image variance preservation allowed to reveal the following patterns: (1) the relative variance of details in digital camera images was found to increase with the decomposition level, (2) the relative variance in analogue camera images was observed to decrease between the first and the second decomposition level.

In all the cases examined, the digital camera produced better parameters of noise evaluation. The DMC images contained several times less random noise than those taken with the analogue camera. The study confirmed that it was possible to define the noise content indicators by analysing the wavelet detail coefficients.

dr hab. Krystian Pyka
e-mail: krisfoto@agh.edu.pl
tel. 012 617 3826
fax: 012 617 3993