

**MAPOWANIE TONALNE OBRAZÓW O PODWYŻSZONEJ
ROZDZIELCZOŚCI RADIOMETRYCZNEJ Z WYKORZYSTANIEM
TRANSFORMACJI FALKOWEJ***

**TONAL MAPPING OF IMAGES WITH INCREASED RADIOMETRIC
RESOLUTION USING WAVELET TRANSFORM**

Krystian Pyka

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Akademia Górniczo-Hutnicza

SŁOWA KLUCZOWE: mapowanie tonalne, rozdzielczość radiometryczna, transformacja falkowa

STRESZCZENIE: Stosowanie cyfrowych kamer fotogrametrycznych o podwyższonej rozdzielczości radiometrycznej powoduje konieczność redukcji zakresu tonalnego do wielkości stosowanej w grafice komputerowej. Zabieg ten jest szczególnym przypadkiem mapowania tonalnego jakie ma miejsce przy wizualizacji obrazów cyfrowych na ekranach monitorów komputerowych. W mapowaniu najczęściej wykorzystuje się funkcję gamma, która transformuje liniową skalę jasności obrazu na logarytmiczną, co generuje obraz lepiej rozpoznawalny przez człowieka. W pracy przedstawiono koncepcję wykorzystania transformacji falkowej do mapowania tonalnego. Proponowana metoda ma charakter etapowy. Wpierw ustala się arbitralnie kilka funkcji transformujących o postaci logarytmicznej i wykładniczej. Następnie dokonuje się mapowania z zastosowaniem poszczególnych funkcji. W kolejnym etapie obraz źródłowy i wszystkie obrazy zmapowane są poddawane transformacji falkowej. Porównanie komponentów falkowych pomiędzy obrazem pierwotnym a obrazami wynikowymi odzwierciedla spadek kontrastu lokalnego jaki następuje wskutek mapowania. Finalna funkcja mapująca jest złożona z segmentów funkcji inicjalnych wybranych tak, aby zminimalizować spadek kontrastu. Koncepcja została poddana weryfikacji praktycznej, w której wykorzystano zdjęcie lotnicze wykonane fotogrametryczną kamerą cyfrową DMC. W stosunku do mapowania funkcją gamma uzyskano obraz zawierający znacznie więcej szczegółów w cieniach i światłach. Dowodzi to słuszności założenia, że komponenty transformacji falkowej są nośnikami kontrastów lokalnych obrazu.

1. WPROWADZENIE

Fotografowanie na materiałach srebrowych zostało praktycznie zastąpione przez technikę cyfrową. Nowa technika nie wyeliminowała trudności jakie napotykamy fotografując sceny o dużej różnicy luminancji. Odwzorowanie szczegółów w cieniach i światłach jest w dalszym ciągu problemem, który zwłaszcza w przypadku scen krajobrazowych należy zaliczyć do kluczowych z punktu widzenia jakości radiometrycznej. Problem ten dotyczy w pełni zdjęć lotniczych, dlatego w fotogrametrii stosowane są kamery cyfrowe o podwyższonej rozdzielczości radiometrycznej (większej niż 8 bitów na piksel dla pojedynczego kanału spektralnego). Kamery te rejestrują szerszy zakres luminancji aniżeli kamery analogowe. Nie eliminuje to jednak w pełni kłopotów z odwzorowaniem szczegółów w cieniach i światłach gdyż dla potrzeb opracowania zdjęć redukuje się rozdzielczość radiometryczną do standardowej.

W pracy przedstawiono możliwość zastosowania transformacji falkowej obrazu dla potrzeb minimalizacji strat jakości jakie następują podczas redukcji rozdzielczości radiometrycznej.

2. ZAKRES TONALNY A ROZDZIELCZOŚĆ RADIOMETRYCZNA

Przez zakres tonalny sceny rozumie się stosunek luminancji miejsca najjaśniejszego do luminancji miejsca najciemniejszego (scena to fragment rzeczywistości zapisany w kadrze zdjęcia). Stosunek luminancji miejsc oświetlonych bezpośrednio przez Słońce do luminancji miejsc zacienionych może wynosić nawet 100 000:1. Aby zmieścić taką rozpiętość luminancji w zapisie cyfrowym trzeba zarezerwować więcej niż 16 bitów na piksel ($2^{16}=65536$, $2^{17}=131072$) i należy pamiętać, że dotyczy to jednego kanału spektralnego. Tymczasem kamery cyfrowe rejestrują obraz w rozdzielczości 11 lub co najwyżej 12 bitowej. Oczywiście rezerwacja większej liczby bitów jest możliwa, gdyż jest to zabieg czysto techniczny, ale ma on sens tylko wtedy, gdy detektory są odpowiednio czułe i precyzyjne, że uzasadniona jest kwantyzacja mierzonej energii na odpowiednio dużej liczbie poziomów.

Detektory kamer cyfrowych mają swój zakres tonalny, który jest równy ilorazowi maksymalnej i minimalnej luminancji rejestrowanej przez sensor. Dla bardzo czułych detektorów waha się w granicach od 5 000:1 do 10 000:1, jest to zawsze wielkość mniejsza od zakresu tonalnego sceny. W charakterystyce technicznej detektorów operuje się pojęciem zakresu dynamicznego oznaczanego akronimem DR (ang. *Dynamic Range*), wyrażanym jako logarytm dziesiętny zakresu tonalnego T:

$$(1) \quad DR = \log T$$

Producenci kamer rzadko ujawniają rzeczywistą wartość DR natomiast częściej podają wartość rozdzielczości radiometrycznej. Pomiędzy rozdzielczością radiometryczną

wyrażoną jako #bit (liczba bitów przeznaczonych do zapisu luminacji piksela) a DR zachodzi związek:

$$2^{\text{bit}} \geq 10^{\text{DR}} \quad (2)$$

Rozdzielczość radiometryczna wyznacza zawsze nieco większy zakres liczbowy aniżeli wynosi rzeczywisty zakres dynamiczny kamery. Nie należy tego traktować tylko jako zabieg marketingowy, gdyż taka zależność ma uzasadnienie praktyczne. Przykładowo, jeśli DR sensora wynosi 3 ($T=1000$) to do kodowania należy wybrać 10 bitów, gdyż daje to najbliższy (przy systemie dwójkowym zapisu liczb) przedział gwarantujący zmieszczenie takiej liczby poziomów luminacji ($2^{10}=1024$). Nie należy zatem utożsamiać rozdzielczości radiometrycznej z rzeczywistym zakresem tonalnym zdjęcia. Są to wielkości bliskie, powiązane, ale nigdy w obrazie nie uzyskujemy rozpiętości tonalnej tak dużej, jak wynikałoby to z podanej przez producenta sensora rozdzielczości radiometrycznej.

Skutecznym sposobem odwzorowania na zdjęciu fotograficznym szerokiego zakresu tonalnego sceny jest technika HDR (ang. *High Dynamic Range*). Polega na wielokrotnej rejestracji sceny, każdorazowo przy innej ekspozycji (zmiana przysłony obiektywu) i zmontowaniu poszczególnych ujęć w jedno zdjęcie o szerokiej rozpiętości tonalnej. Technika ta nie może zostać zastosowana przy fotografowaniu dynamicznym, jakie zachodzi w fotogrametrii lotniczej.

Kolejnym elementem w ograniczającym możliwość obserwacji dowolnie szerokiego zakresu tonalnego są monitory komputerowe wyświetlające obrazy cyfrowe. Zakres tonalny bardzo dobrych monitorów zbliża się do wielkości 1 000:1, ale w powszechnym użytkowaniu są monitory o gorszych parametrach. Do możliwości monitorów dostosowany jest standard *de facto* zapisu obrazu cyfrowego z rozdzielczością radiometryczną 8 bitów (na kanał). Daje to rozpiętość tonalną w jednym kanale spektralnym zaledwie 256:1.

Zastosowanie kamer o zwiększonej rozdzielczości radiometrycznej nie zmienia faktu, że ortofotomapa, obecnie produkt fotogrametryczny, jest (i długo jeszcze będzie) udostępniana końcowemu użytkownikowi w rozdzielczości 8 bitowej (3x8 bitów dla obrazów barwnych).

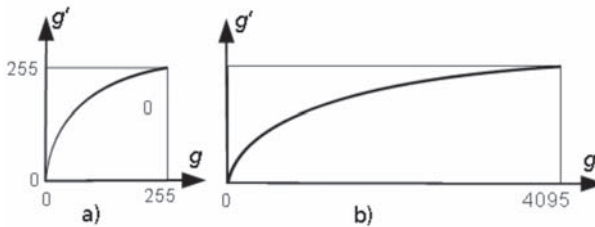
3. MAPOWANIE TONALNE

Przez mapowanie tonalne rozumie się odwzorowanie jasności² pikseli zapisanych w pliku obrazowym g na wartości które są przesyłane do urządzenia wyświetlającego obraz g' :

$$g' = fg \quad (3)$$

² Jasność piksela jest wielkością niemianowaną, odzwierciedla napromienienie jakie pada na detektor, które z kolei jest złożoną funkcją luminancji obiektu (detalu).

Mapowanie tonalne stosuje się praktycznie zawsze, często bez wiedzy osoby obserwującej obraz na ekranie monitora. Większość dobrych programów graficznych przy wyświetlaniu obrazów wielotonalnych automatycznie stosuje korekcję gamma (Rys. 1). Jest to przykład mapowania aplikowanego w celu zmiany liniowej skali jasności na logarytmiczną, zgodną z percepcją obrazu przez człowieka (Wyszecki, Stiles, 2000). Innym przykładem mapowania jest tzw. rozciągnięcie kontrastu obrazów 8 bitowych. Występuje wtedy gdy rzeczywisty zakres jasności obrazu jest wąski i rozszerzamy go na pełny 0-255, aby ułatwić człowiekowi rozróżnienie półtonów. Oba te przypadki będą w dalszej części pracy nazywane mapowaniem klasycznym.



Rys. 1. Przykłady mapowania: a) klasyczna korekcja gamma, b) redukcja zakresu tonalnego.

Szczególnym przypadkiem mapowania jest sytuacja, kiedy obraz g ma większy zakres jasności niż obraz użytkowy 8/24 bitowy, czyli kiedy dziedzina funkcji (1) jest dłuższa niż przeciwdziedzina. Taka sytuacja następuje gdy do rejestracji stosujemy obrazy o podwyższonej rozdzielczości radiometrycznej a eksploatujemy je w standardowej rozdzielczości. Zwróćmy uwagę na fakt, że w tym przypadku od mapowania oczekuje się, że zminimalizuje (nieuniknione) straty spowodowane zmniejszeniem zakresu jasności jednocześnie uwzględnieniem właściwości systemu wzrokowego człowieka (na podobieństwo korekcji gamma).

Konsekwencją uwzględnienia specyficznych właściwości postrzegania jasności przez człowieka jest ogólny trend funkcji mapującej zgodny z funkcją logarytmiczną. Taki przebieg krzywej (Rys. 1) powoduje rozciągnięcie „cieni” (niskie jasności) i przytłumienie „światła” (najwyższe jasności). Jednakże na ten ogólny trend można nałożyć lokalne zmiany krzywizny, które będą decydowały o sile rozciągnięcia i tłumienia w tych niewrażliwych fragmentach obrazu.

4. PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI FALKOWEJ TRANSFORMACJI OBRAZÓW

Transformacja falkowa obrazów jest częstotliwościowo-przestrzenną reprezentacją obrazu, wykazującą pewne podobieństwa do transformacji Fouriera a różniącą się od niej powiązaniem częstotliwości z miejscem jej występowania. Praktyczna realizacja trans-

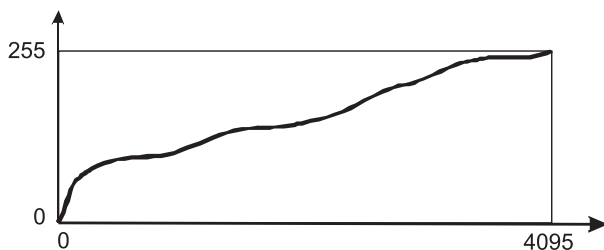
formacji dla obrazów jako sygnałów dwuwymiarowych polega na dekompozycji obrazu na cztery komponenty, z których jeden (tzw. zgrubny) reprezentuje tło obrazu a pozostałe trzy (tzw. detaliczne) przedstawiają krawędzie – odpowiednio pionowe, poziome i diagonalne (Mallat, 1998). Żadnego z tych komponentów nie można rozpatrywać z osobna, gdyż są one wzajemnie powiązane. Przykładowo w komponencie reprezentującym detale pionowe nie są zawarte wszystkie krawędzie pionowe, gdyż część z nich w dalszym ciągu (pomimo dekompozycji) znajduje się w komponencie zgrubnym. Charakterystyczną cechą transformacji falkowej jest możliwość jej kontynuowania w stosunku do wybranych komponentów, najczęściej rozwija się głębiej komponent zgrubny.

Komponenty detaliczne są zbudowane ze współczynników falkowych, które są tym większe im większy jest kontrast w danym miejscu obrazu (Pyka, 2005). Dlatego istnieje możliwość interpretacji tych komponentów jako wskaźników kontrastu lokalnego. Rozbicie kontrastu na trzy składowe daje możliwość wskazania tych miejsc obrazu, które są najmniej wyraziste z punktu widzenia kontrastu kierunkowego (rzut wektora kontrastu lokalnego w kierunku pionowym, poziomym i diagonalnym). Właściwość ta została wykorzystana w zaproponowanej w pracy koncepcji wykorzystania transformacji falkowej do mapowania tonalnego.

5. KONCEPCJA MAPOWANIA Z WYKORZYSTANIEM FALEK I REALIZACJA TESTOWA

Rozważane zadanie, polegające na rzutowaniu szerokiego zakresu tonalnego na standardowy, ma w ogólności nieskończenie wiele rozwiązań. Wybór określonej funkcji mapującej musi wynikać ze sformułowania warunków definiujących funkcję celu. Pewne przesłanki do zdefiniowania funkcji przejścia daje histogram jasności obrazu. Wzorując się na programach graficznych służących do klasycznego mapowania, można stosować manualne modelowanie krzywej przejścia, z równoczesną wizualną kontrolą efektów zmiany lokalnej krzywizny krzywej (przykład pokazuje Rys. 2). Jest to działanie obarczone dużą dozą subiektywizmu a ponadto operator często dochodzi do sprzecznych wyników w zależności od tego, które miejsce obrazu wybierze do obserwacji kontrolnej.

W zadaniu tym pomocne byłoby obiektywne wskazanie miejsc o słabych kontrastach. Można do tego celu wykorzystać komponenty detaliczne, które są zbiorem kontra-

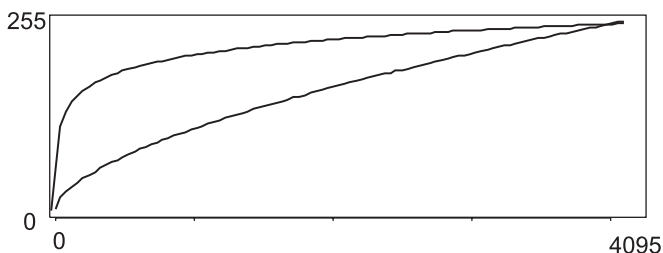


Rys. 2. Funkcja mapująca uzyskana na drodze manualnej.

stów lokalnych. Dodatkowo mając do dyspozycji komponent zgrubny można lokalizować słabe kontrasty w strefie cieni, półtonów i światła. W ten sposób powstaje zbiór miejsc „wrażliwych” z punktu widzenia rozważanego mapowania. W tych miejscach krzywa mapująca powinna mieć jak największe nachylenie. Z drugiej strony ze względu na zachowanie kontinuum jasności krzywa powinna być monotoniczna. Są to warunki częściowo sprzeczne i ograniczają przestrzeń, w której musi znaleźć się krzywa mapowania.

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania zaproponowano następujące postępowanie:

- wybór kilku funkcji globalnych do przejścia z zakresu 0-4095 na zakres 0-255, tak aby tworzyły ciąg funkcji o innych krzywiznach w cieniach i światłach (funkcje logarytmiczne i wykładnicze o różnych wykładnikach i współczynnikach skalowych),
- wykonanie transformacji falkowej dla obrazu źródłowego i wszystkich obrazów przeskalowanych do zakresu 0-255,
- porównanie komponentów detalicznych pomiędzy kolejnymi obrazami przeskalowanymi a komponentami obrazu o pełnym zakresie tonalnym,
- podział zakresu 0-4095 na podzakresy i przypisanie każdemu tego przekształcenia globalnego dla którego spadek kontrastu był najmniejszy,
- złożenie funkcji wynikowej z fragmentów funkcji globalnych uznanych za najkorzystniejsze w poszczególnych podzakresach.



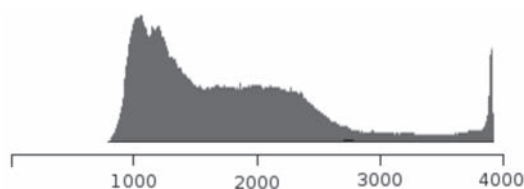
Rys. 3. Przykład globalnych funkcji mapujących.

Przedstawiona ścieżka postępowania została zrealizowana dla fragmentu zdjęcia lotniczego wykonanego kamerą cyfrową DMC z pikselem terenowym 10 cm. Jako inicjalne funkcje globalne wybrano 5 funkcji: logarytm dziesiętny i 4 funkcje wykładnicze. Dwie z nich pokazano na rysunku 3. Zakres 0-4095 podzielono na 10 równych przedziałów, którym przyporządkowano tą z 5. funkcji globalnych, dla której uzyskano najmniejszy spadek kontrastu.

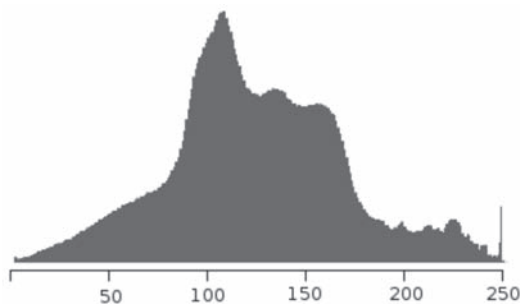
Do badania spadku kontrastu lokalnego wykorzystano różnicę transformat falkowych obrazów przeskalowanych i obrazu źródłowego. Wynik takiej operacji jest zbiorem współczynników obrazujących zmianę kontrastu lokalnego pomiędzy porównywanymi obrazami. Sumując różnice zachodzące dla jasności mieszczących się w jednym z dziesięciu przedziałów (dla wszystkich komponentów detalicznych) uzyskuje się wskaźnik zmiany kontrastu. Za kryterium wyboru najkorzystniejszej funkcji globalnej uznano najmniejszą wartość wskaźnika.

Ostatnim etapem zaproponowanego postępowania jest połączenie funkcji globalnych przypisanych do poszczególnych przedziałów w funkcję ciągłą zachowującą monotoniczność w całej dziedzinie. Zadanie to zrealizowano z pewnym przybliżeniem korygując manualnie wykresy w poszczególnych przedziałach tak, aby uzyskać gładkie połączenia segmentów. Zastosowane połączenie graficzne może być zastąpione przez aproksymację funkcji sklejaną.

W wyniku mapowania funkcją otrzymaną w opisany powyżej sposób uzyskano obraz którego histogram jest pokazany na rysunku 4b. W stosunku do histogramu obrazu źródłowego, widocznego na rysunku 4a widać zmiany kształtu. Znacznie wydłużona jest strefa cieni, wyeksponowane są także fragmenty półtonalne oraz podkreślone zmiany jasności w światłach. W efekcie obraz o zredukowanym zakresie tonalnym jest bardziej wyrazisty aniżeli każdy z obrazów zmapowanych funkcją globalną (w pracy nie zamieszczono obrazu gdyż jakość druku nie jest w stanie odzwierciedlić uzyskanego efektu).



a) histogram obrazu źródłowego



b) histogram obrazu przeskalowanego

Rys. 4. Porównanie histogramu przed (a) i po mapowania (b).

6. PODSUMOWANIE

Zastosowanie transformacji falkowej do wyboru funkcji mapującej przyniosło obiecujący rezultat. W stosunku do mapowania funkcją gamma uzyskano obraz zawierający znacznie więcej szczegółów w cieniach i światłach. Dowodzi to słuszności założenia, że falkowe komponenty detaliczne są nośnikami kontrastów lokalnych obrazu.

Przetestowane rozwiązanie wykorzystuje transformację falkową aplikowaną tylko jako pojedyncza dekompozycja. Autor jest zdania, że wykorzystanie dekompozycji wielorozdzielczej przyniesie jeszcze lepsze rezultaty a przede wszystkim pozwoli zautomatyzować proces.

7. LITERATURA

Mallat S., 1998. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press.

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

Wyszecki G., Stiles W.S., 2000. *Color Science, Concept and Methods, Quantitative Data and Formulae*. Second Edition, John Wiley and Sons ONC NY.

TONAL MAPPING OF IMAGES WITH INCREASED RADIOMETRIC RESOLUTION USING WAVELET TRANSFORM

KEY WORDS: tonal mapping, radiometric resolution, wavelet transformation

SUMMARY: The use of digital photogrammetric cameras with increased radiometric resolution requires the tonal range to be reduced to the values used in computer graphics. The procedure involves a unique operation of tonal mapping, which takes place while displaying digital images on a PC monitor. Gamma, the function most frequently used for mapping, transforms the linear scale of image brightness to a logarithmic one, generating an image which is easier to recognise by the human eye. The present paper presents a concept for the use of wavelet transform for tonal mapping. The method proposed has a number of stages. First, several transforming logarithmic and exponential functions are arbitrarily determined. Then, a mapping is performed using individual functions. In the following stage, the source and all the mapped images are subjected to wavelet transform. Comparison of the wavelet components between the primary and resultant images is represented by the decrease in local contrast resulting from mapping. The final mapping function is composed of the initial function segments, combined so as to minimise the reduction of contrast. The process was verified in practice, using an aerial photograph taken with a DMC digital photogrammetric camera. As compared to gamma-function mapping, an image containing much more detail in light and shade areas was achieved. This proves the assumption that the components of wavelet transform are the local contrast carriers of the image

dr hab. inż Krystian Pyka
krisfoto@agh.edu.pl
telefon: +48 12 6173826

* praca wykonana w ramach badań statutowych AGH 11.11.150.949/09