

ZASTOSOWANIE DYSKRETNEJ TRANSFORMACJI FALKOWEJ DO FILTRACJI DANYCH LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO

APPLICATION OF DISCRETE WAVELET TRANSFORM TO FILTERING AIRBORNE LASER SCANNING DATA

Andrzej Borkowski, Krzysztof Sośnica

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

SŁOWA KLUCZOWE: dyskretna transformacja falkowa, lotniczy skaningu laserowy, filtracja, ScaLARS

STRESZCZENIE: Lotniczy skaningu laserowy stanowi efektywne narzędzie do pozyskiwania informacji zarówno o fizycznej powierzchni ziemi, jak i elementach pokrycia terenu. Kluczowe zagadnienie w przetwarzaniu danych pochodzących ze skaningu laserowego stanowi filtracja, rozumiana jako eliminacja wszystkich punktów, nie należących do określonej powierzchni. Ze względu na duże zbiory danych skaningu laserowego poszukuje się szybkich algorytmów obliczeniowych, posiadających możliwości analizy danych w bardzo krótkim czasie. W artykule podjęto próbę opracowania uniwersalnej metody szybkiej filtracji danych lotniczego skaningu laserowego, opartej na analizie falkowej. W tym celu opracowano algorytm dwuetapowej filtracji, realizujący proces eliminacji punktów w dziedzinie częstotliwości. Filtrację oparto na założeniu, że wysokie częstotliwości sygnału, utożsamianego z profilami terenowymi, korespondują z obiektami na powierzchni terenu. Niskie częstotliwości odpowiadają natomiast za ogólny przebieg powierzchni gruntu. W pierwszym etapie filtracji opartej na filtrze dolnoprzepustowym dyskretny transformacji falkowej, przeprowadzana jest identyfikacja wszystkich punktów znacznie odstających od powierzchni aproksymacji. Następuje redukcja wysokości punktów oraz budowa kolejnej powierzchni aproksymacji, nie zaburzonej wpływem obiektów terenowych. Aproksymacja terenu przybliży przebieg powierzchni gruntu, dzięki czemu algorytm działa zarówno w terenie płaskim, pochyłym, jak i pagórkowatym. Testy numeryczne opracowanego algorytmu zostały przeprowadzone na danych rzeczywistych. Wyniki filtracji danych na obiektach testowych są satysfakcjonujące. Skuteczność algorytmu oceniono na 95%, przy możliwości filtracji 1 miliona punktów w czasie 3.4 sekundy na komputerze przeciętnej klasy.

1. WPROWADZENIE

Na przestrzeni ostatnich lat znaczenie lotniczego skaningu laserowego jako techniki pozyskiwania informacji o fizycznej powierzchni ziemi, znacząco wzrosło. Efektem

pomiaru skaningu laserowego jest zbiór punktów o wyznaczonych współrzędnych przestrzennych w jednolitym układzie globalnym (XYZ, BLH).

Istnieje wiele obszarów zastosowań danych pozyskanych tą techniką, z czego do najbardziej powszechnych należy zaliczyć budowę Numerycznego Modelu Terenu oraz tworzenie produktów pochodnych. W takich opracowaniach można wyróżnić obliczanie objętości mas ziemnych, wyznaczanie położenia linii zalewowych, inwentaryzację sieci elektroenergetycznych, a także tworzenie profili terenowych. Ze względu na szybkość pozyskiwania danych oraz ogrom zbiorów pomiarowych w lotniczym skaningu laserowym, ciężar uzyskania efektu końcowego został przeniesiony na opracowania kameralne chmury zarejestrowanych punktów.

Kluczowe zagadnienie w przetwarzaniu danych pochodzących ze skaningu laserowego stanowi filtracja, rozumiana jako eliminacja wszystkich punktów, nie należących do określonej powierzchni. W ostatnich latach zostało opracowanych wiele algorytmów filtracji, które ze względu na wielkości zbioru danych do przetworzenia działają stosunkowo wolno. Ograniczenie to posiadają głównie metody polegające na filtracji danych w dziedzinie oryginału, tzn. współrzędnych, zarówno danych bezpośrednich jak i przetworzonych. Dobry przegląd rozwiązań algorytmicznych w tym zakresie znaleźć można w wielu pracach: (Borkowski, 2004; Sithole, Vosselman, 2004; Borkowski, Józków, 2006).

Ograniczenia związane ze złożonością obliczeniową algorytmów filtracji w dziedzinie oryginału można obejść realizując filtrację w dziedzinie częstotliwości. Do metod realizujących filtrację w dziedzinie częstotliwości można zaliczyć algorytmy oparte na transformacji Fouriera oraz transformacji falkowej. Na szczególną uwagę zasługują m.in.:

- metody oparte na szybkiej transformacji Fouriera (*FFT*) oraz filtrach dolnoprzepustowych o skończonej odpowiedzi impulsowej (*FIR*) (Marmol, 2002),
- metody ekstrakcji określonych elementów terenowych z wykorzystaniem długości terenowej falki transformacyjnej i klasyfikacji nadzorowanej (Thuj, Tokunaga, 2002),
- metody eliminacji wielkoobszarowych zróżnicowań terenu oparte na filtrze górnoprzepustowym dyskretnej transformacji falkowej (Bartels, Wei, 2006),
- metody ekstynkcji detali na określonym poziomie dekompozycji falkowej (Borkowski, Józków, 2006).

Biorąc pod uwagę wszystkie wymagania stawiane metodom filtracji danych, a w szczególności szybkość działania algorytmu, minimalizację błędów oraz uniwersalność względem pokrycia terenu, został opracowany nowy algorytm filtracji danych lotniczego skaningu laserowego oparty na dyskretnej transformacji falkowej. Metoda pozwala na szybkie i skuteczne oddzielenie punktów reprezentujących fizyczną powierzchnię ziemi od punktów zarejestrowanych jako elementy pokrycia (drzewa, budynki, budowle), pozostawiając jednocześnie istotne elementy struktur terenowych, takie jak: wały rzeczne, doły, wzniesienia i skarpy. Ze względu na dostosowanie do globalnego przebiegu terenu, metodę można stosować zarówno w terenie płaskim, jak i w terenie pagórkowatym. W przeciwieństwie do większości algorytmów pracujących w dziedzinie współrzędnych, zaproponowana metoda bazuje na danych oryginalnych, wzdłuż śladu lasera

w falkowej dziedzinie częstotliwości. Filtracja posiada więc charakter jednowymiarowy, bez konieczności przeliczania współrzędnych do siatki regularnej. Proponowana metoda dobrze uwzględnia specyfikę (w zakresie rejestracji danych) skanera ScaLARS, którego ślad terenowy wiązki ma kształt przesuwej się elipsy, a po rozwinięciu układu się wzduż profilu terenowego (Borkowski *et al.*, 2006).

2. TRANSFORMACJA FALKOWA

Falki w ogólności są zbiorem matematycznych funkcji zbioru liczb rzeczywistych, które wyprowadzane są z tzw. funkcji macierzystej za pomocą przesunięcia i skalowania. Istnieje zbiór różnych falek, które w zależności od stopnia skomplikowania oraz czasowej skuteczności obliczeniowej można dobrać do określonego zastosowania. Do funkcji wykorzystywanych w dyskretnej transformacji falkowej należy zaliczyć przede wszystkim falki z grupy daubechies (*db*), coiflets (*coif*), symlets (*sym*), biortogonalne (*bior*) oraz najstarszą falkę – Haara (*haar*) (Białasiewicz, 2000).

Istnieją trzy zasadnicze zalety stosowania transformaty falkowej względem transformaty Fourierowskiej.

Po pierwsze: ograniczony nośnik danej falki umożliwia wychwycenie zjawiska (części sygnału) o charakterze lokalnym. W transformacie Fouriera poprzez ciągłość i niezmiennosc funkcji sinus bądź cosinus w całej dziedzinie, niewielkie zmiany częstotliwości wytwarzają zmiany wartości w całej dziedzinie czasu. W transformacie falkowej, dzięki dobrej lokalizacji w czasie, każde zjawisko odnosi się do ograniczonej długością nośnika części sygnału.

Po drugie: możliwość doboru różnorodnych funkcji falkowych, w szczególności niegładkich, poszerza obszar zastosowań o analizę sygnałów nieciągłych, takich jak przykładowo zawiera ciąg danych z kampanii lotniczego skaningu laserowego. Nieciągłości i przeskok funkcji mogą być lokalnie wykryte i właściwie przetworzone w dziedzinie częstotliwości.

Po trzecie: duże zbiory danych mogą być bardzo szybko przetworzone przez dyskretną transformatę falkową. Podczas gdy szybka transformata Fouriera (*FFT*) charakteryzuje się liczbą koniecznych obliczeń rzędu $O(n \log_2(n))$, to szybka transformata falkowa (*FWT*) przy spełnieniu warunku diadyczności wymaga operacji $O(n)$.

2.1. Dyskretna transformacja falkowa

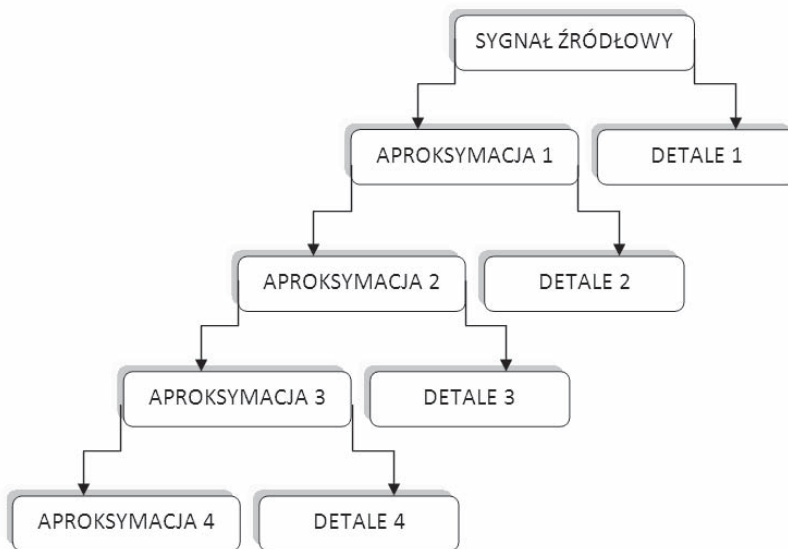
Dyskretna transformata falkowa (DWT) pozwala przedstawić sygnał $f(t) \in L^2$ w postaci liniowej kombinacji współczynników $a_{j_0}(k)$, $d_j(k)$. Rozwinięcia w szereg funkcji $f(t)$ dokonuje się w oparciu o dwie spokrewnione ze sobą funkcje bazowe – tzw. kwadratowe filtry lustrzane: funkcję falkową $\Psi(t)$ oraz funkcję skalującą $\phi(t)$ (Białasiewicz, 2000):

$$f(t) = \sum_k a_{j_0}(k) \phi_{j_0,k}(t) + \sum_k \sum_{j=j_0}^{\infty} d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (1)$$

Współczynniki $d_{j,k}$ zawierają informację o wysokich częstotliwościach oraz tworzą zbiór detali. Natomiast współczynniki a_k zawierają informację dolnoprzepustową wraz ze składową stałą, czyli stanowią aproksymację sygnału. Dekompozycja wykorzystuje własność, że dla ustalonej skali j składowa detali reprezentuje rzut ortogonalny funkcji f na podprzestrzeń $W_j \subset L^2(\mathbf{R})$ (Vidaković, Müller, 2005). Wówczas zachodzi związek:

$$(2) \quad V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1}$$

Gdzie V_{j+1} jest ortogonalnym dopełnieniem W_{j+1} w przestrzeni V_j . Schemat dekompozycji sygnału przedstawiono na rys. 1.



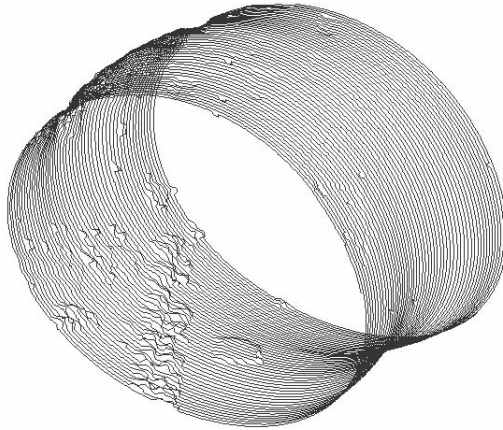
Rys. 1. Dekompozycja falkowa według schematu Mallata (Białasiewicz, 2000).

Pełna informacja o sygnale oryginalnym jest zachowana w zbiorze złożonym ze wszystkich detali jego rozwinięcia i aproksymacji najniższego poziomu rozdzielczości.

3. ALGORYTM FILTRACJI

Proces filtracji realizowany jest w następujących krokach programowych:

- 1) **Dekompozycja falkowa I:** n – krotna transformacja falkowa na ciągu wysokości zarejestrowanych punktów wzdłuż śladu terenowego wiązki lasera (Rys. 2), który po rozwinięciu stanowi profil terenowy;



Rys. 2. Terenowy ślad wiązki skanera laserowego ScaLARS 2.

- 2) **Eliminacja progowa twarda I:** (ang. *hard threshold*) dla wszystkich detali na maksymalnym poziomie (detale o większej częstotliwości niż częstotliwość danej falki są usuwane);
- 3) **Synteza sygnału:** powrót do dziedziny wyjściowej (dziedziny czasu);
- 4) **Nalóżenie maski na dane odstające:** dla danych odstających powyżej σ_1 od powierzchni aproksymacji nakładana jest maska:

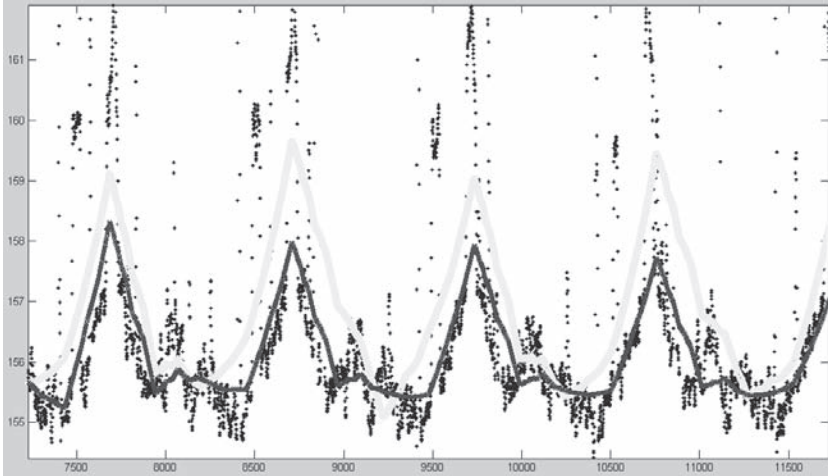
$$k_i = \begin{cases} 1 & \text{dla } (h_i - h_{ali}) > \sigma_1 \\ 0 & \text{dla } (h_i - h_{ali}) \leq \sigma_1 \end{cases} \quad (3)$$

- 5) **Redukcja wysokości dla danych z maską:** dla danych, na które została nałożona maska przyjmuje się wysokość poprzedniego punktu, który spełnił warunek σ_1 , pozostałe wysokości punktów nie ulegają zmianie:

$$\bar{h}_i = h_i - k_i \cdot (h_i - \bar{h}_{i-1}) \quad (4)$$

- 6) **Dekompozycja falkowa II:** n – krotna transformacja falkowa;
- 7) **Eliminacja progowa twarda II:** dla wszystkich detali na maksymalnym poziomie;
- 8) **Synteza sygnału:** powrót do dziedziny wyjściowej – uzyskanie falkowej aproksymacji profilu terenu (Rys. 3);
- 9) **Filtracja właściwa – analiza odstępstwa każdego punktu od powierzchni aproksymacji:** wszystkie punkty, jednostronnie odstające ponad σ_2 od powierzchni aproksymacji są kwalifikowane jako punkty pokrycia terenu – o wartości indeksu 1. Pozostałe otrzymują indeks 0, co oznacza klasyfikację jako punkty terenowe:

$$(5) \quad J_i = \begin{cases} 1 & \text{dla } (h_i - h_{a2i}) > \sigma_2 \\ 0 & \text{dla } (h_i - h_{a2i}) \leq \sigma_2 \end{cases}$$



Rys. 3. Wizualizacja ciągu wysokości punktów ze skaningu laserowego wraz z aproksymacją powierzchni po 3 etapach filtracji (linia jasnoszara) oraz po 8 etapach filtracji (linia ciemnoszara) z wykorzystaniem falki *db3*.

4. WERYFIKACJA METODY

Do weryfikacji metody wykorzystano dane pochodzące z obszaru doliny rzeki Widawy, gdzie w czasie pomiarów wykorzystano prototypowy skaner ScaLARS 2, skonstruowany w Instytucie Nawigacji Uniwersytetu Technicznego w Stuttgarcie. Skanowanie wykonano dla całego ujścia rzeki Widawy, szerokość skanowania wyniosła około 2 km, przy długości pasa 20 km. W trakcie kampanii zarejestrowano 150 milionów punktów ze średnią gęstością 3 pkt/m².

4.1. Weryfikacja skuteczności algorytmu

Do oceny skuteczności filtracji prezentowaną metodą wykorzystano zbiór sześciu obszarów testowych, reprezentujących różne pokrycie terenu, który został ręcznie odfiltrowany w programie Microstation. Weryfikacja, czy dany punkt reprezentuje teren, czy obiekt terenowy, nastąpiła poprzez analizę wizualną odstępstwa wysokości danego punktu w stosunku do wysokości podłoża na podkładzie ortofotomapy.

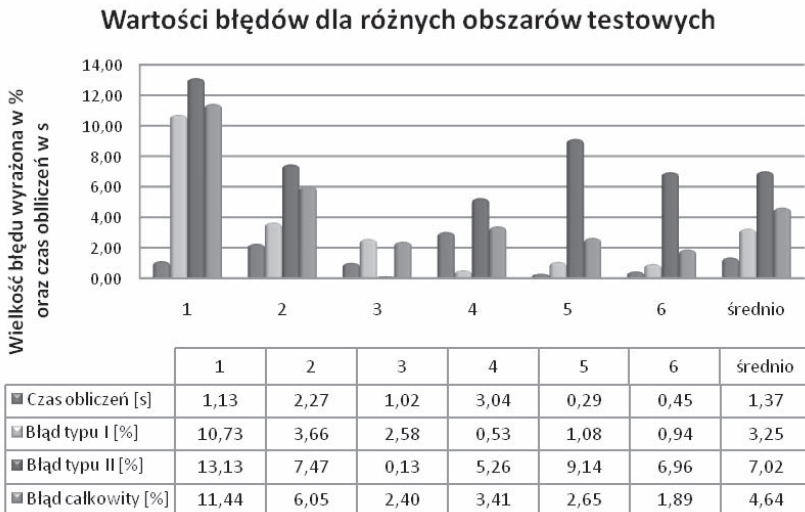
Obszar testowy nr 1 reprezentuje teren zadrzewiony z zabudowaniami. W obszarze testowym nr 2 oprócz gęstej pokrywy roślinnej, występuje rzeka. Obszar nr 3 charakteryzuje się niewielkim stopniem zadrzewienia, zawiera natomiast wał rzeczny, dół oraz rów melioracyjny. Obszar nr 4 zawiera gęstą zabudowę. Obszary 5 i 6 reprezentują teren pochyły z zadrzewieniami, polami uprawnymi i drogą asfaltową, przy czym w obszarze 6 występują ponadto zabudowania jednorodzinne, rolnicze i przemysłowe.

Procedura weryfikacji polegała na porównaniu wyników filtracji metodą falkową z opracowanymi danymi referencyjnymi, będącymi efektem filtracji ręcznej, i określeniu parametrów ilościowych tego porównania, opierając się na pracy (Borkowski, Józków, 2006).

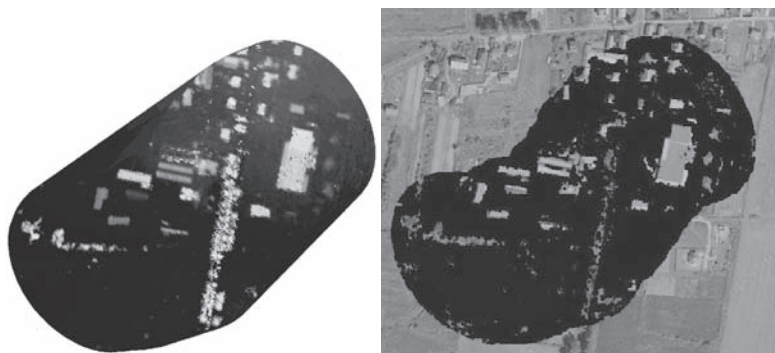
Jakość filtracji wyraża procentowy udział błędnie sklasyfikowanych przez algorytm punktów w całkowitej ilości punktów. Wówczas błędy filtracji typu pierwszego – ε_1 (punkty terenu zidentyfikowane przez algorytm jako punkty obiektów), typu drugiego – ε_2 (punkty obiektów zidentyfikowane przez algorytm jako punkty terenu) oraz całkowity – ε_c obliczane są według zależności:

$$\varepsilon_1 = \frac{f}{e+f}, \varepsilon_2 = \frac{g}{g+h}, \varepsilon_c = \frac{f+g}{e+f+g+h} \quad (6)$$

Wielkości błędów dla poszczególnych obszarów testowych przedstawiono na rysunku 4. Rysunek 5 przedstawia fragment opracowanego zbioru danych oryginalnych oraz po eliminacji punktów nie będących odbiciami od powierzchni terenu.



Rys. 4. Wielkości błędów i czas filtracji dla różnych obszarów testowych z wykorzystaniem tych samych parametrów.

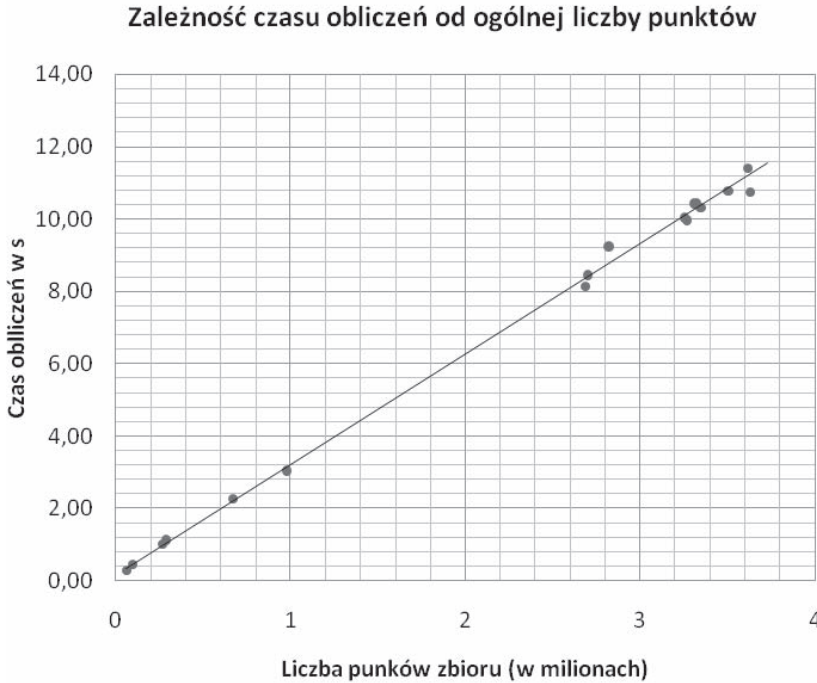


Rys. 5. Wysokości punktów zakodowane walorem oraz wynik filtracji na podkładzie ortofotomapy.

Na podstawie badań przeprowadzonych na obszarach testowych zostały zoptymalizowane wartości poszczególnych parametrów filtracji. Kluczowymi parametrami determinującymi dokładność filtracji są wartości progu I oraz II aproksymacji, które powinny zawierać się w przedziałach odpowiednio $\sigma_1 \in (0.0; 1.0)$ i $\sigma_2 \in (0.7; 1.0)$. Natomiast liczba poziomów aproksymacji falkowej optymalnie powinna wynosić od 7 do 9. Rodzaj użytej funkcji falkowej, jej rząd oraz liczba punktów w pojedynczym kroku obliczeniowym, nie wpływają na dokładność filtracji, lecz mają swoje odzwierciedlenie w szybkości działania algorytmu. Wartość progu I i II nie wpływa w żaden sposób na czas obliczeń oraz w niewielki sposób zależy od stopnia aproksymacji i rodzaju falki. Prędkość działania algorytmu diametralnie spada w przypadku użycia falek o wysokim rzędzie. Zaleca się, z tego powodu, stosowanie falek prostych, takich jak np. falki z rodziny *daubechies* niskiego rzędu. Minimalizacja liczby niezbędnych iteracji, w postaci zwiększania ilości punktów w pojedynczym kroku aproksymacji wiąże się także, w pewnych granicach, ze zwiększeniem szybkości działania algorytmu.

4.2. Weryfikacja szybkości działania algorytmu

Weryfikacja szybkości działania algorytmu została przeprowadzona na komputerze przeciętnej klasy (komputer klasy PC z procesorem Intel Pentium Dual CPU @ 2.00 GHz, wyposażony w 3 GB pamięci operacyjnej RAM, pracujący na systemie Windows XP Professional SP3). W celu sprawdzenia szybkości działania algorytmu wzięto pod uwagę 6 obszarów testowych służących do weryfikacji skuteczności algorytmu oraz dodatkowo 11 obszarów o liczebności z zakresu 2.6÷3.6 miliona punktów. Maksymalny czas obliczeń wyniósł 11.41 sekundy dla zbioru 3.6 mln, natomiast średni czas filtracji wyniósł 3.4 sekundy na milion punktów (Rys. 6).



Rys. 6. Weryfikacja szybkości działania algorytmu filtracji.

5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono algorytm szybkiej filtracji danych lotniczego skaningu laserowego oparty na filtrze dolnoprzepustowym dyskretnej transformaty falkowej. Zastosowanie w metodzie dwóch etapów aproksymacji minimalizuje zaburzenia ostatecznej powierzchni aproksymacji, która stanowi element referencyjny we właściwym procesie filtracji.

Opracowany algorytm bazuje na danych w postaci nieprzetworzonej. Metoda nadaje się do filtracji danych dla terenów płaskich, pagórkowatych oraz pochyłych, umożliwiając jednocześnie zachowanie lokalnych struktur terenowych, takich jak np. wały rzeczne.

Algorytm filtracji w dziedzinie częstotliwości zakłada, że elementy wysokoczęstotliwościowe w sygnale profilów terenowych odpowiadają za pokrycie terenu, natomiast niskie częstotliwości charakteryzują ogólny przebieg powierzchni ziemi. Dokładność algorytmu została oceniona na 95% dla wszystkich obszarów testowych oraz 97% dla danych uporządkowanych w sposób optymalny wzdłuż śladów terenowych wiązki laserowej. Większość błędów miała miejsce w filtracji punktów odbitych od ścian budynków oraz na obrzeżach zwartej pokrywy roślinnej.

Przedstawione rezultaty są bardzo satysfakcjonujące, szczególnie, że czas przetworzenia 1 miliona punktów to około 3.4 sekundy na komputerze przeciętnej klasy, czas ten rośnie liniowo wraz ze wzrostem liczby punktów.

6. LITERATURA

Bartels M., Wei H., 2006. Towards DTM generation from LIDAR data in hilly terrain using wavelets. Whiteknights. The University of Reading. <http://www.cvg.reading.ac.uk/projects/LIDAR>.

Białasiewicz J. T., 2000. *Falki i aproksymacje*, Wydawnictwo Naukowe-Techniczne, Warszawa 2000

Borkowski A., 2004. Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten. *Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe C, Heft Nr 575.

Borkowski A., Keller W., 2006. An attempt to ALS-data filtering in wavelet domain. *8th Bilateral Geodetic Meeting Poland-Italy*. Wrocław, 22-24 June 2006.

Borkowski A., Jóźków G., 2006. Wykorzystanie wielomianowych powierzchni rucho-
mych w procesie filtracji danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego. *Archi-
wum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol.16, s. 63-73

Borkowski A., Gołuch P., Wehr A., Schiele O., Thomas M., 2006. Airborne laser scanning for the purpose of hydrodynamic modelling of Widawa river valley. *Reports on Geodesy*, No 2(77), pp. 85-94.

Marmol U., 2002. Analiza częstotliwościowa jako metoda filtrowania profili powierzchni topograficznej. *Materiały Ogólnopolskiego Symposium Naukowego: Fotogrametria i teledetekcja w społeczeństwie informacyjnym*. Białobrzegi k/Warszawy, 2002.

Sithole G., Vosselman G., 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 59, s. 85-101.

Thuy Vu T., Tokunaga M., 2002. Designing of wavelet-based processing system for air-borne laser scanner segmentation. *Space Technology Applications and Research – Asian Institute of Technology*, Commission V, WG V/6, Thailand.

Vidaković B., Müller P., 2005. Wavelets for Kids. A Tutorial Introduction. Duke University, Institute of Statistics and Decision Sciences, 2005.

Obliczenia wykonano w systemie MATLAB, licencja nr 101979, grant obliczeniowy Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowego.

APPLICATION OF DISCRETE WAVELET TRANSFORM TO FILTERING AIRBORNE LASER SCANNING DATA

KEY WORDS: discrete wavelet transform, Airborne Laser Scanning, filtration, ScaLARS

SUMMARY: Airborne Laser Scanning (ALS) provides an effective tool for gaining data about physical terrain as well as features on the earth's surface. The main problem in the process of analysing ALS data is filtration, i.e. the elimination of all recorded points which do not belong to the particular surface being considered. Because large datasets of points are being considered, appropriately fast algorithms are needed in order to process the data in a very short timespan. The objective of the research was to develop a universal method of fast filtration of the airborne laser scanning data based on wavelet analysis. The algorithm of two-steps filtration, which has been developed for this purpose, carries out the process of filtration in the domain of wavelet frequency. In this process, high frequencies of the signal, which can be thought as the terrain profiles, correspond to objects on the surface. Low frequencies are basically responsible for the surface of the ground. In the first step of the filtration process, based on a low pass filter of discrete wavelet transform, the identification of all points which lie away from the approximation surface, is made. Then a reduction in the height of the points is carried out as well as the construction of a final approximation surface, which is unbiased by the influence of artificial structures on the ground. This completes the filtration process. The algorithm works well both on a flat area as well as in hilly and mountainous terrain. The method has been tested on real data obtained by airborne laser scanning carried out in the "Widawa River Valley" campaign in 2005. The results of filtration are satisfactory. The accuracy of the algorithm was estimated at 95 %, with a capacity to filter 1 million points in 3.4 seconds.

dr hab. inż. Andrzej Borkowski, prof. ndzw.
andrzej.borkowski@up.wroc.pl
telefon: +48 71 3205609

mgr inż. Krzysztof Sośnica
krzysztof.sosnica@gmail.com

