Modelowanie sygnału full-waveform w lotniczym skanowaniu laserowym

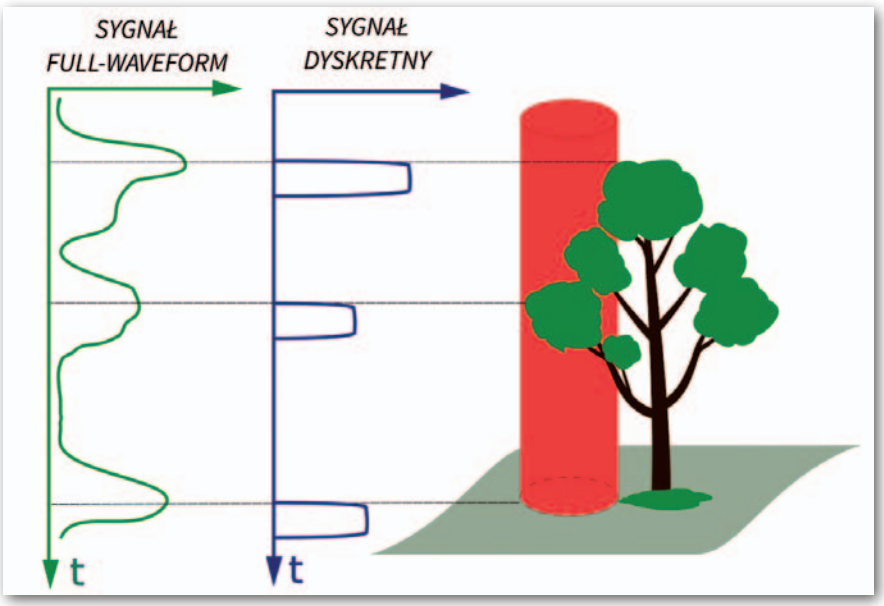
Rozkład fali na czynniki pierwsze

Współczesne skanery laserowe rejestrują próbki odbitego echa w zakresie pełnego przebiegu fali. Realizowana na etapie *post-processingu* identyfikacja ech reprezentujących poszczególne punkty chmury jest szczególnie ważna dla obiektów o złożonej strukturze przestrzennej.

Agata Walicka,
Andrzej Borkowski

Dane pozyskane za pomocą dynamicznie rozwijającej się technologii skanowania laserowego są coraz powszechniej wykorzystywane zarówno przez firmy komercyjne, jak i instytucje publiczne (np. jednostki samorządu terytorialnego, Lasy Państwowe) oraz naukowe. Zakres zastosowań skanowania laserowego jest bardzo szeroki i cały czas pojawiają się ich nowe obszary. Dane pozyskane w tej technologii mogą posłużyć m.in. do tworzenia modeli 3D miast, monitorowania i zarządzania lasami, rolnictwa precyzyjnego, nawigacji we wnętrzach budynków czy monitorowania linii energetycznych. Do ich akwizycji, oprócz jednostek naziemnych, powszechnie wykorzystuje się samoloty, łodzie, a od kilku lat nawet drony.

Typowym produktem skanowania jest chmura punktów reprezentująca odbicia impulsu laserowego od napotkanych obiektów. Poszczególne odbicia ekstrahowane są bezpośrednio przez urządzenie skanujące z wykorzystaniem najprostszych algorytmów, co może prowadzić do pominięcia niektórych odbić. Mimo to dla większości zastosowań dokładność i kompletność otrzymanej w ten sposób chmury punktów jest wystarczająca. Jednak w niektórych przypadkach kluczowym aspektem jest uzyskanie informacji o każdym napotkanym przez impuls obiekcie. Stosuje się wówczas technikę



Rys. 1. Różnica pomiędzy sygnałem full-waveform *a sygnałem dyskretnym (poszczególne echa)*

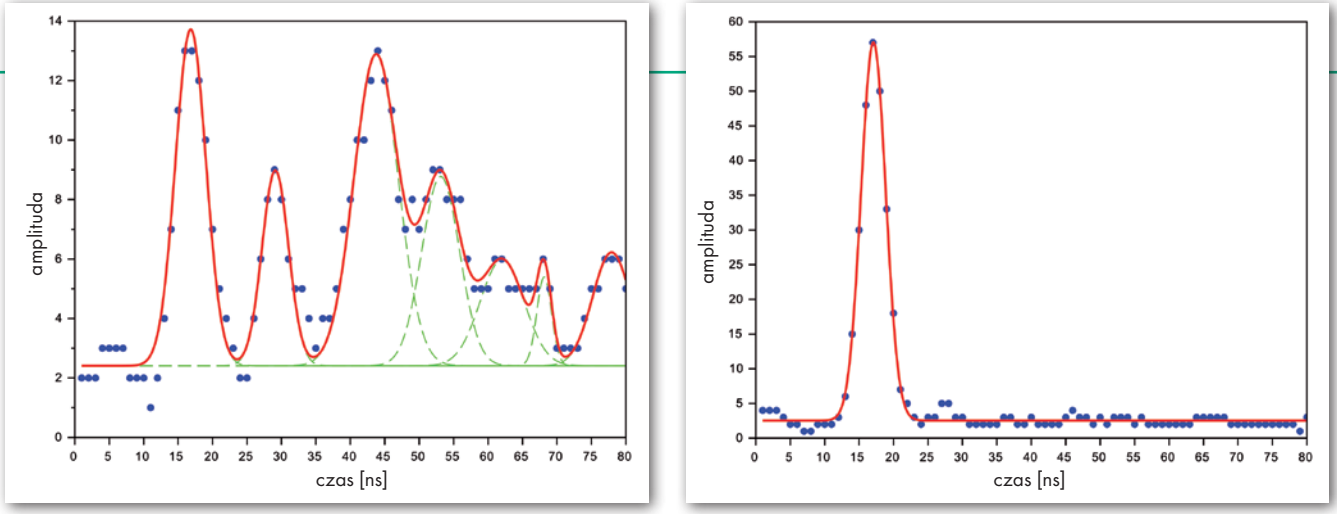
full-waveform, która umożliwia samodzielne opracowanie oraz zastosowanie algorytmów modelujących zarejestrowany sygnał i pozwalających na ekstrakcję większej liczby ech, a co za tym idzie – lepszy opis struktury przestrzennej skanowanego obiektu. Typowym obszarem zastosowań jest badanie drzewostanu.

Sposoby rejestracji

Lotnicze skanowanie jest kombinacją trzech technik służących do: wyznaczenia pozycji, orientacji i laserowego pomiaru odległości. Pomiar odległości polega na wyznaczeniu czasu, jaki zajmuje impulsowi dotarcie do celu i powrót do sensora. Dzięki znajomości prędkości rozchodzenia się fali w powietrzu można obliczyć odległość obiektu od instrumentu. W skanerach impulsowych rejestracja danych może następować na dwa sposoby (rys. 1):

- w trakcie pomiaru następuje detekcja maksymalnej wartości echa powracającego do skanera bądź pewnej wartości progowej i zapis jedynie dyskretnych wartości odpowiadających pojedynczym echom;
- rejestracja pełnej fali w sposób prawie ciągły – podczas pomiaru następuje jedynie próbkowanie fali, najczęściej w interwałach 1 ns.

Druga z wymienionych metod, stosowana powszechnie w nowszych skanerach, nazywa się metodą pełnej fali lub



Rys. 2. Dekompozycja sygnału full-waveform dla przykładowych danych z obszaru zalesionego (z lewej) oraz łąki (z prawej); zarejestrowane próbki fali – kolor niebieski, krzywe aproksymujące poszczególne komponenty – zielony, ostateczny kształt krzywej reprezentującej sygnał – czerwony

full-waveform. W metodzie tej wyodrębnienie poszczególnych ech będących odbiciem od kolejnych obiektów następuje w *postprocessingu*.

Opracowanie

Wynikiem opracowania danych typu *full-waveform* mogą być, w zależności od potrzeb, współrzędne wierzchołków sygnału (maksimów lokalnych), a co za tym idzie, współrzędne obiektów, od których nastąpiło odbicie impulsu laserowego, albo współrzędne wierzchołków oraz parametry funkcji modelującej sygnał. Ze względu na dodatkową informację o własnościach fizycznych obiektu, jakie niosą ze sobą parametry funkcji modelującej, drugie podejście jest coraz częściej stosowane w praktyce.

Do modelowania sygnału wykorzystuje się nieliniowe funkcje oparte na funkcji eksponencjalnej. W tradycyjnym, a zarazem najprostszym przypadku jest to modyfikacja funkcji Gaussa, czyli funkcji reprezentującej gęstość rozkładu normalnego – jednego z najważniejszych rozkładów prawdopodobieństwa:

$$y = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-t)^2}{2\sigma^2}\right) + b,$$

gdzie: t – czas; σ – połowa szerokości echa; A – amplituda (wysokość echa), reprezentuje energię odbitego impulsu wyrażoną liczbą umowną; b – estymowany poziom szumu.

Ze względu na nieliniowy charakter funkcji oraz nieliniowe zależności pomiędzy jej parametrami dopasowanie krzywej odbywa się na ogół w sposób iteracyjny, według metody najmniejszych kwadratów i wymaga znajomości przybliżonych wartości parametrów. Aby wyznaczyć takie wartości początkowe oraz określić liczbę ech wchodzących w skład fali, niezbędne jest znalezienie wszystkich wierzchołków sygnału reprezentujących poszczególne odbicia. Powszechnie stosowane procedury wyszukiwania wierzchołków wymagają uprzedniego wygładzenia sygnału, a do poprawności dopasowania funkcji niezbędne jest określenie z dużą dokładnością wszystkich parametrów początkowych. Strategia modelowania sygnału w większości przypadków polega więc na wygładzeniu sygnału, w następnej kolejności znajdowane są lokalne maksima i wyznaczane wartości początkowe, a ostatecznie następuje dopasowanie funkcji do sygnału.

Algorytm opracowany przez autorkę w ramach pracy magisterskiej pozwala na pominięcie etapu wstępnego przetwarzania danych w celu wyznaczenia wartości początkowych parametrów, a jednocześnie poprawnie identyfikuje wszystkie zawarte w sygnale echa.

Dane

Do eksperymentów numerycznych wykorzystano trzy zestawy danych pochodzących z nalotu nad rejonem osuwiska Kłodne w województwie małopolskim. Pierwszy z nich składa się z terenów leśnych, gęsto porośniętych roślinnością wysoką. W drugim znajdują się pola uprawne i łąki, charakteryzujące się pokryciem roślinnym o niewielkiej wysokości. Trzeci fragment stanowi pokrycie mieszane, składające się z roślinności wysokiej, niskiej oraz pojedynczych zabudowań. Dane zostały pozyskane na zlecenie Państwowego Instytutu Geologicznego w 2010 roku za pomocą systemu Riegl LMS-Q680i.

W celu zamodelowania sygnału zaproponowano podejście będące modyfikacją metody polegającej na wykonaniu iteracyjnego wyszukiwania wierzchołków. Jako model matematyczny służący do aproksymacji zarejestrowanej fali wykorzystano sumę funkcji Gaussa. Algorytm działania metody przedstawia się następująco:

1. Znalezienie wartości maksymalnej sygnału.

2. Ustalenie parametrów początkowych dla krzywej – amplituda jest równa wartości znalezionego wierzchołka na osi pionowej (rys. 2), wartość t jest równa położeniu wierzchołka na osi czasu, połowę szerokości echa ustala się jako 1, wartość współczynnika b (szumu) przyjmujemy jako wartość minimalną sygnału.

3. Obliczenie wagi dla każdego punktu jako odwrotności odległości na osi poziomej od najbliższego znalezionego wierzchołka. Wagi wierzchołków przyjęto jako 10.

4. Estymacja parametrów modelu.

5. Obliczenie rezyduów, czyli różnic wartości pomiędzy sygnałem zarejestrowanym a zamodelowanym.

6. Wyznaczenie maksymalnej wartości wśród rezyduów.

7. Jeśli wartość amplitudy w punkcie sygnału odpowiadającym współrzędnej X znalezionego maksimum jest większa od ustalonego poziomu szumu – powrót do punktu 2. W przeciwnym razie zakończenie działania algorytmu.

W trakcie obliczeń kontrolowane jest również, czy dodanie nowego wierzchołka zmniejsza błąd wpasowania obliczony według poniższej formuły:

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{N-m} \cdot \sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

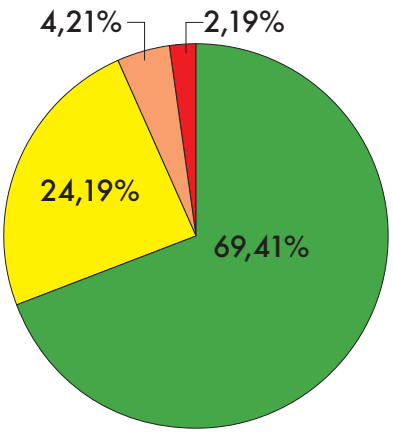
gdzie: N – liczba próbek fali (punktów), m – liczba parametrów, y – zarejestrowana wartość w punkcie, ŷ – wartość z modelu. Dzięki zastosowaniu wagowania punktów algorytm nie wymaga wygładzania sygnału ani oddzielnego szacowania parametrów początkowych. Pominięto zatem cały etap *preprocessingu*.

Eksperyment

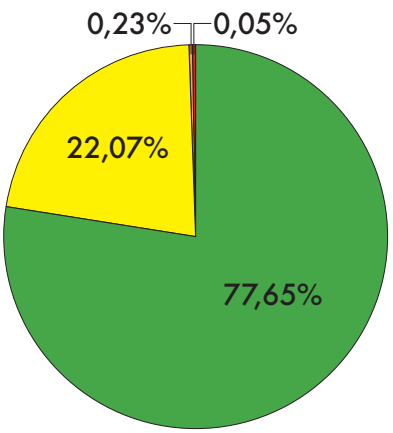
Pierwszym obszarem, dla którego przeprowadzono eksperymenty, była powierzchnia zalesiona. Jest to najtrudniejszy teren ze względu na występowanie licznych skomplikowanych sygnałów wytwarzanych przez dużą liczbę poziomów wegetacji. W sygnale znajdowało się również dużo słabych i nakładających się ech, co było dodatkowym utrudnieniem i stanowiło bardzo dobrą kontrolę po-

Struktura błędów wpasowania modelu w zarejestrowany sygnał

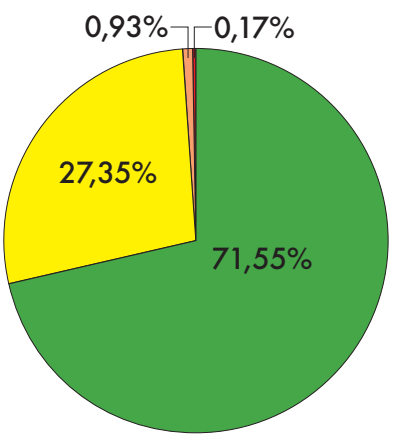
Sygnały zarejestrowane dla obszaru lasu



Sygnały zarejestrowane dla obszaru łąki



Sygnały zarejestrowane dla obszaru mieszanego pokrycia



błąd wpasowania w model

[0, 1) [1, 2)
[2, 3) >3

Błędy wpasowania modelu w zarejestrowane dane dla każdego z opracowanych obszarów

	łąka	las	mieszane pokrycie
średnia wartość błędu ε^2	0,846	1,005	0,896
mediana błędów ε^2	0,812	0,816	0,832
odchylenie standardowe błędu ε^2	0,281	0,792	0,372
razem znalezionych wierzchołków	42 057	38 132	225 824

prawności działania algorytmu. Przykład zamodelowania i dekompozycji fali, czyli podziału sygnału na poszczególne echa odpowiadające pojedynczym odbiciom, przedstawiono na rysunku 2. Jak można zauważyć, w przytoczonym przykładzie zaproponowana metoda umożliwiła prawidłową identyfikację wszystkich występujących wierzchołków oraz ich dokładną aproksymację. Większość powstającego błędu generowana była przez szum pomiarowy.

W kolejnych eksperymentach wykonano dekompozycję sygnału dla obszaru obejmującego tereny uprawowe oraz teren o mieszanym pokryciu. Większość sygnałów stanowią tutaj fale składające się z jednego komponentu (echa) (rys. 2). Również w tym przypadku możliwe było prawidłowe wykrycie wszystkich ech i ich zamodelowanie.

W celu kompleksowej analizy jakości dopasowania modelu do danych obliczono statystyki dotyczące powstającego błędu wpasowania dla każdego z opracowywanych obszarów (tab. powyżej). Największą wartość średniego błędu (obliczonego jako średnia arytmetyczna błędów występujących dla pojedynczych fal) otrzymano dla obszarów leśnych, najmniejszą dla obszaru porośniętego roślinnością niską. Jest to związane ze stopniem skomplikowania fali powracającej do odbiornika, występowaniem nakładających się krzywych i poziomem zaszumienia powstałym dla roślinności wysokiej. Na obszarach łąk większość fal stanowiły pojedyncze komponenty, również poziom szumu był znacząco niższy.

Inaczej sytuacja prezentuje się dla mediany. Wartości otrzymane dla każdego z obszarów nieznacznie się między sobą różnią. Można zatem przypuszczać, że na obszarze lasu występuje więcej obserwacji odstających – tj. takich, dla których błąd wpasowania jest znacząco większy niż dla pozostałych. Hipotezę tę potwierdza obliczona wartość odchylenia standardowego, która dla obszaru lasu jest znacząco większa niż dla pozostałych sektorów. Aby lepiej zaprezentować strukturę obliczonych błędów, zestawiono otrzymane wartości z podziałem na klasy ze względu na wartość błędów wpasowania (wykresy obok).

W przypadku każdego z analizowanych obszarów większość sygnałów aproksymowano z błędem nieprzekraczającym 1. Wartości błędów przekraczające 3 dla terenu łąki i mieszanego pokrycia występują pomijalnie rzadko. Na podstawie powyższego zestawienia można wnioskować, że wpasowanie przebiegło prawidłowo i odnaleziono wszystkie echa, również te nakładające się. Analiza przytoczonych wyników wpasowania oraz struktury powstałych błędów pozwala na stwierdzenie, że funkcja Gaussa dobrze sprawdza się przy modelowaniu terenów porośniętych zarówno roślinnością wysoką, jak i niską.

Wyniki

Efektem pomiaru skanerami typu *full-waveform* jest zbiór punktów odpowiadających poszczególnym odbiciom od różnych powierzchni. Własności fizyczne obiektów, od których nastąpiło odbicie, mają wpływ na wynikowy kształt sygnału. Modelowanie fal zarejestrowanych dla terenów zurbanizowanych nie stanowi problemu, ponieważ sygnał w większości składa się z pojedynczych ech. W terenach porośniętych gęstą, wysoką roślinnością jest to jednak znacznie bardziej skomplikowane ze względu na występowanie licznych słabych i nakładających się ech. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników można stwierdzić, że zaproponowany algorytm umożliwia poprawne wykrycie wszystkich komponentów oraz ich aproksymację przy użyciu wybranego modelu matematycznego. Dodatkowo metoda ta nie wymaga wygładzania sygnału ani ustalania parametrów początkowych.

Agata Walicka, Andrzej Borkowski
Instytut Geodezji i Geoinformatyki
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Na podstawie pracy magisterskiej pt. „Modelowanie sygnału *full-waveform* w lotniczym skaningu laserowym" napisanej przez Agatę Walicką w IGiG UP we Wrocławiu pod kierunkiem prof. Andrzeja Borkowskiego i wyróżnionej I miejscem w konkursie na najlepsze prace dyplomowe obronione na kierunku geodezja i kartografia w roku akademickim 2015/2016