



Opracowanie symulatora echosondy wielowiązkowej

WOJCIECH MALEIKA, MICHAŁ PAŁCZYŃSKI

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Informatyki,
71-200 Szczecin, ul. Żołnierska 49
wmaleika@wi.ps.pl, mpalczynski@wi.ps.pl

Streszczenie. W artykule uzasadniono potrzebę stworzenia programowego symulatora echosondy wielowiązkowej oraz symulowania wirtualnych sondaży morskich. Przedstawiono opracowany algorytm działania symulatora oraz wirtualnych pomiarów uwzględniających parametry ruchu jednostki oraz przetwornika. Zaproponowana metoda może być wartościowym narzędziem badawczym w obszarze metod tworzenia DTM oraz w optymalizacji rzeczywistych prac hydrograficznych.

Słowa kluczowe: numeryczny model terenu (DTM), echosonda wielowiązkowa, metoda śledzenia promieni

1. Wstęp

Jednym z najważniejszych, a zarazem najtrudniejszych zadań, jakie są podejmowane w złożonym procesie konstruowania systemów informacji przestrzennej, jest tworzenie cyfrowego modelu terenu (DTM). Jest on podstawową warstwą informacyjną wykorzystywaną przez systemy opisujące zjawiska w sposób wartościowy i stanowi dla nich podstawę organizacji przestrzennej. Współcześni użytkownicy DTM stawiają duże wymagania, kładąc nacisk zarówno na jakość danych (dokładność, wiarygodność, aktualność), dynamikę ich przetwarzania i wizualizacji, jak i na możliwości analiz w czasie rzeczywistym.

Współczesne systemy pomiarowe, dzięki urządzeniom umożliwiającym rejestrację wyników obserwacji w sposób ciągły i całkowicie automatyczny (za pomocą np. sondy wielowiązkowej), pozwalają na uzyskanie w stosunkowo krótkim czasie ogromnej ilości informacji o ukształtowaniu powierzchni dna morskiego [1, 2]. Systemy pomiarowe dokonują rejestracji położenia i głębokości (współrzędne

przestrzenne) wielu milionów punktów w czasie jednej sesji pomiarowej. Opracowanie takiej ilości danych, które dodatkowo charakteryzują się najczęściej nieregularnym rozmieszczeniem przestrzennym, wymaga zastosowania specjalnie opracowanych metod i odpowiednio dobranych algorytmów przetwarzania. DTM jest zazwyczaj tworzony w oparciu o strukturę GRID (regularna siatka kwadratów). Istnieje wiele metod wyznaczania GRID na podstawie danych pomiarowych (np. kriging, minimalnej odległości, najbliższego sąsiada, naturalnego sąsiada, zmodyfikowana metoda Sheparda, funkcje radialne, metody oparte na sztucznej inteligencji [3, 4]). Dobór metody interpolacji w przypadku nierównomiernie rozmieszczonych danych pomiarowych powinien być podyktowany kilkoma cechami charakteryzującymi ten zbiór danych: stopniem homogeniczności rozprzestrzenienia danych, liczbą punktów na jednostkę powierzchni, wariancją populacji (stopniem zmienności danych) oraz typem powierzchni, którą odzwierciedlają dane [5].

Ze względu na odmienny sposób reprezentacji danych pomiarowych i danych opisujących DTM przy braku opisu powierzchni mierzonej, trudnym zadaniem staje się szacowanie wpływu przyjętych parametrów interpolacji (w fazie tworzenia siatki DTM), jak i sposobu przeprowadzenia prac hydrograficznych, na dokładność tworzonych modeli. Można postawić pytanie: jaki wpływ na końcową dokładność modelu dna morskiego ma prędkość jednostki, szerokość wiązki echosondy, stopień nachodzenia sąsiednich profili, rozkład profili (wzdłużny, na krzyż), częstotliwość pomiarów, liczba wiązek pomiarowych, przyjęta metoda interpolacji czy parametry interpolacji.

2. Idea wirtualnego sondażu morskiego

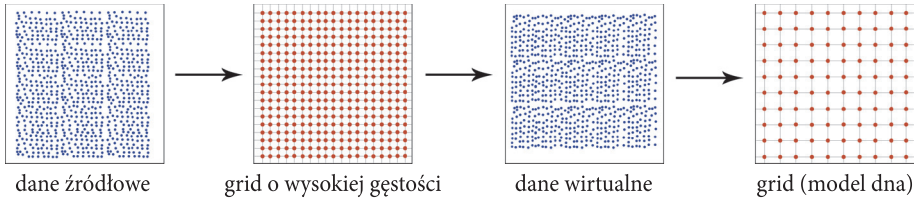
Opisana w artykule idea „wirtualnego sondażu morskiego” jest propozycją rozwiązania opisanych trudności przy badaniu i weryfikacji metod tworzenia DTM. Zaprezentowana metoda opiera się na odpowiednim przygotowaniu danych testowych bazujących na rzeczywistych danych pomiarowych. Proces ten można podzielić na dwa podstawowe etapy (rys. 1):

- utworzenie na podstawie danych rzeczywistych powierzchni testowej w postaci siatki GRID o wysokiej rozdzielczości,
- symulacja sondażu morskiego — wirtualna jednostka wyposażona w sondę wielowiązkową wykonująca sondaż na obszarze stworzonej powierzchni testowej.

Proponowane rozwiązanie posiada następujące cechy:

- otrzymane w wyniku wirtualnego sondażu punkty pomiarowe mają tożsamą postać z danymi rzeczywistymi: nierównomierne rozłożenie punktów, opis w dziedzinie liczb rzeczywistych,
- prostota weryfikacji otrzymanych w dalszych badaniach modeli DTM: porównanie otrzymanej struktury GRID z testową siatką GRID,

- elastyczność regulacji parametrów wirtualnego sondażu: prędkość jednostki, parametry pracy echosondy, dobór profili sondażowych.



Rys. 1. Przetwarzanie danych w wirtualnym sondażu

3. Opis metody

Prezentowana metoda wirtualnego sondażu oparta jest na podejściu znanym jako metoda śledzenia promieni (ang. *ray tracing*) [6, 7]. Polega ona na założeniu, że wąska wiązka akustyczna może być reprezentowana przez linię, zwaną *promieniem*, której przebieg odpowiada trajektorii propagacji fali. Umożliwia to symulację rozchodzenia się fali zarówno w aspekcie przestrzennym jak i czasowym, za pomocą stosunkowo prostych modeli matematycznych. Podejście to stosowane było z powodzeniem do syntezy symulowanych obrazów sonarowych [8, 9, 10]. Szeroka wiązka akustyczna sonaru była w tych zastosowaniach dzielona na wąskie podprzestrzenie i modelowana za pomocą pęku licznych promieni. Zastosowanie metody śledzenia promieni wydaje się tym bardziej odpowiednie do symulacji pracy zarówno echosondy pionowej, jak i wielowiązkowej, ponieważ stosowane w nich wiązki akustyczne są bardzo wąskie, co umożliwia przyporządkowanie każdej z nich pojedynczego promienia. Idea wirtualnego sondażu wymaga od symulatora echosondy wygenerowania zbioru punktów odpowiadających punktom trafienia impulsów akustycznych w obiekty podwodne, przy czym z punktu widzenia tego zastosowania nie ma potrzeby określania natężenia echa ani czasu powrotu wiązki.

Przestrzeń wirtualnego sondażu umieszczona jest w kartezjańskim układzie współrzędnych, gdzie współrzędne X i Y odpowiadają współrzędnym w układzie UTM, natomiast współrzędna Z oznacza głębokość, przy czym oś Z skierowana jest ku górze. Wymaga to zmiany znaku współrzędnej z wygenerowanych punktów, ponieważ rzeczywiste echosondy generują głębokości w postaci liczb dodatnich.

3.1. Dane wejściowe

Prezentowana metoda wirtualnego sondażu wymaga zdefiniowania następujących danych wejściowych:

1. DTM w postaci siatki GRID o wysokiej rozdzielczości. Boki siatki rozmieszczone są zawsze równoległe do osi X i Y , N_x i N_y — liczba węzłów siatki rozmieszczonych

- wzdłuż obu osi, $x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$ — współrzędne wierzchołków siatki, Z_{ij} ($i = 1 \dots N_x, j = 1 \dots N_y$) — głębokość w danym węźle.
2. Trasa jednostki dana jest w postaci ciągu $N_{position}$ pozycji wyrażonych jako współrzędne w układzie UTM. Dla każdej pozycji należy określić również kurs. $P_{ship} = (x_{ship}, y_{ship})$ — położenie jednostki dla danej pozycji, $R_{ship} = [kx_{ship}, ky_{ship}]$ — kurs jednostki dla danej pozycji, przy czym $|R_{ship}| = 1$. W przypadku sztucznego generowania trasy należy uwzględnić prędkość jednostki oraz parametr T przetwornika w celu wyznaczenia odpowiednich odległości pomiędzy kolejnymi pozycjami.
 3. Parametry przetwornika echosondy wielowiązkowej: N_{beam} — liczba wiązek, $\Delta\alpha$ — kąt rozwarcia utworzony przez wiązki skrajne, T [s] — czas między emisją kolejnych impulsów akustycznych, $R_0 = (x_0, y_0, z_0)$ — położenie echosondy względem pozycji określonej dla jednostki. W prezentowanej metodzie założono, że wszystkie wiązki mają jednakową szerokość, wszystkie generują impuls w tym samym czasie oraz że żadna z nich nie wpływa na pracę pozostałych.

Proponowana rozdzielczość generowanej na wstępie siatki GRID wynosi $0,1 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$. Typowe parametry echosondy wielowiązkowej na przykładzie sondy SIMRAD EM 3000 to: 128 wiązek, kąt rozwarcia 90° , a czas pomiędzy impulsami wynosi $0,07 \text{ s}$ [11].

3.2. Algorytm wirtualnego sondażu echosondą wielowiązkową

Wirtualny sondaż wymaga śledzenia propagacji zbioru wiązek akustycznych echosondy dla każdej z kolejnych $N_{position}$ pozycji jednostki. Celem śledzenia danej wiązki jest obliczenie współrzędnych punktu jej trafienia w dno. Ostatecznym rezultatem działania metody jest znalezienie zbioru wszystkich punktów, w których poszczególne wiązki trafiają w dno dla kolejnych pozycji jednostki na trasie wirtualnego sondażu. Schemat algorytmu przedstawiono na rysunku 5.

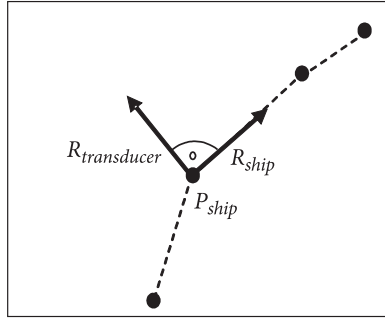
Wiązki echosondy wielowiązkowej emitowane są z przetworników ułożonych w tak niewielkich odległościach od siebie, że można ich położenia traktować jako jeden punkt w przestrzeni. Jego położenie dla danej pozycji jednostki można obliczyć następująco:

$$P_{transducer} = \begin{bmatrix} x_{transducer} \\ y_{transducer} \\ z_{transducer} \end{bmatrix} = P_{ship} + R_0 = \begin{bmatrix} x_{ship} + x_0 \\ y_{ship} + y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Osie wszystkich przetworników echosondy wielowiązkowej leżą w płaszczyźnie prostopadłej do kursu. W prezentowanej metodzie zakłada się, że kąty między nimi są równe, a oś wiązki środkowej skierowana jest pionowo w dół. Pozostałe wiązki

rozłożone są symetrycznie po obu stronach jednostki, a liczba wiązek N_{beam} oraz kąt $\Delta\alpha$ wyznaczany przez osie skrajnych wiązek są parametrami technicznymi echosondy. Ponieważ płaszczyzna, w której umieszczone są przetworniki, jest prostopadła do kursu, oblicza się wektor leżący w płaszczyźnie poziomej, skierowany prostopadłe do lewej burty (rys. 2):

$$R_{transducer} = \begin{bmatrix} kx_{transducer} \\ ky_{transducer} \\ kz_{transducer} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -ky_{ship} \\ kx_{ship} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$



Rys. 2. Wyznaczanie wektora $R_{transducer}$

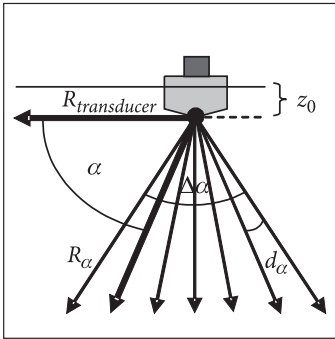
Wektor kierunkowy R_α osi każdej z N_{beam} wiązek (z wyjątkiem środkowej wiązki pionowej) oblicza się zgodnie z formułą:

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} kx_\alpha \\ ky_\alpha \\ kz_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kx_{transducer} \cdot \cos(\alpha) \\ ky_{transducer} \cdot \cos(\alpha) \\ -\tan(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \end{bmatrix}, \quad \text{dla } \alpha \neq \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

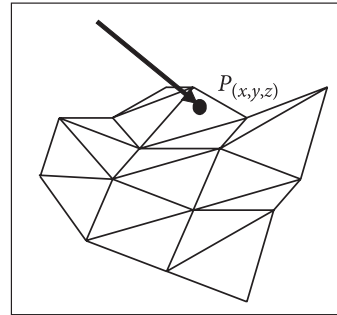
$$R_\alpha = \begin{bmatrix} kx_\alpha \\ ky_\alpha \\ kz_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad \text{dla } \alpha = \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \alpha_0 + i \cdot d\alpha, \\ i = 0 \dots (N_{beam} - 1), \quad i \neq \frac{N_{beam} - 1}{2}, \\ \alpha_0 = \frac{\pi - \Delta\alpha}{2}, \\ d\alpha = \frac{\Delta\alpha}{N_{beam} - 1}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Każdej z wiązek należy przyporządkować promień reprezentujący trajektorię propagacji fali. W prezentowanej metodzie zakłada się, że ośrodek jest jednorodny, a więc trajektoria propagacji fali akustycznej jest prostoliniowa. Założenie to jest bliskie rzeczywistości dla wód płytkich. Promień przyjmuje zatem kształt półprostej o początku w punkcie położenia przetwornika $P_{transducer}$ oraz kierunku zgodnym z osią wiązki R_α (rys. 3).



Rys. 3. Wyznaczanie kierunku promienia



Rys. 4. Punkt przecięcia promienia z siatką GRID

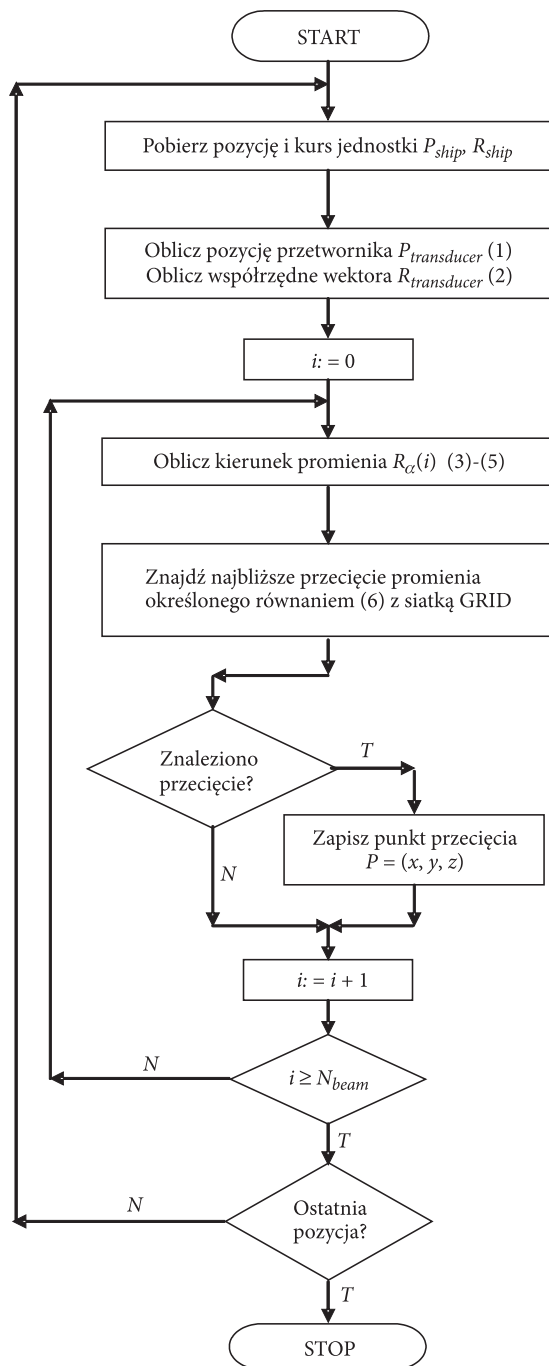
Równanie parametryczne promienia:

$$P_\alpha = P_{transducer} + t \cdot R_\alpha, \quad t > 0. \quad (6)$$

Śledzenie promienia polega na poszukiwaniu jego przecięcia z obiektami tworzącymi dno. W przypadku znalezienia przecięć należy wybrać najbliższe z nich. Współrzędne tego punktu stanowią wynik działania algorytmu dla danej pozycji oraz wiązki.

Powierzchnia dna dana poprzez siatkę GRID składa się z oczek, wyznaczanych przez 4 wierzchołki, które zwykle nie są współpłaszczyznowe. W celu uzyskania elementarnych powierzchni w postaci płaskich wielokątów, każde oczko siatki GRID jest dzielone na dwa trójkąty (rys. 4). Test na przecięcie promienia z trójkątem i obliczenie współrzędnych punktu trafienia odbywa się metodą znaną z dziedziny syntezy obrazów. Polega ona na wyznaczeniu punktu przecięcia promienia z płaszczyzną zdefiniowaną jednoznacznie przez wierzchołki trójkąta, a następnie na sprawdzeniu, czy rzut punktu przecięcia na płaszczyznę OXY znajduje się wewnątrz rzutu trójkąta [12, 13].

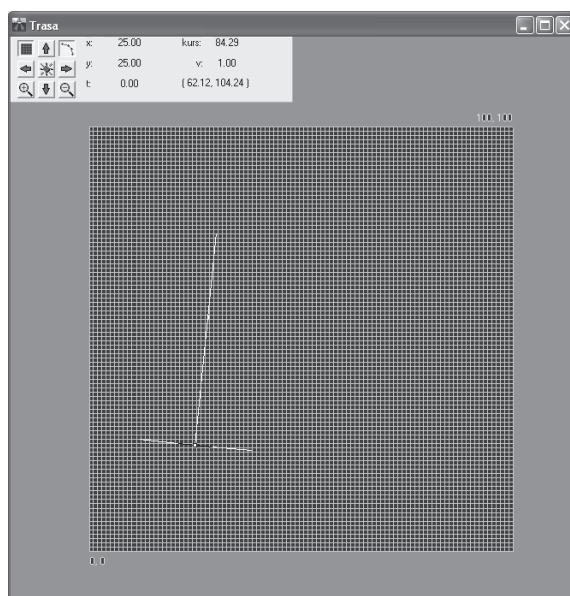
W ogólnym przypadku algorytm śledzenia promieni nakazuje dla każdego promienia sprawdzenie przecięć ze wszystkimi obiektami modelu dna [12]. Ze względu na specyfikę siatki GRID oraz regularność zbioru badanych promieni można jednak znacznie zredukować liczbę testowanych na przecięcie oczek siatki, co umożliwia poprawę wydajności metody [14].



Rys. 5. Algorytm wirtualnego sondażu

5. Weryfikacja rozkładu punktów sondażowych

Opisany powyżej algorytm został zaimplementowany w języku C++ w środowisku MS Windows. Model DTM oraz trasa wczytywane są z plików tekstowych, przy czym format modelu dna odpowiada formatowi Surfer ASCII. Parametry przetwornika zadawane są za pośrednictwem graficznego sprzęgu użytkownika. Jedno z okien programu zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6. Widok okna trasy w opracowanym symulatorze

Pierwsze badania mające na celu weryfikację opracowanej metody wykonano według następującego schematu:

- Na podstawie rzeczywistych danych testowych (121 tys. punktów XYZ) utworzono strukturę GRID o rozdzielczości $0,1 \times 0,1$ m, rozmiar utworzonego modelu: $70,6 \times 25,8$ m (706×258 punktów).
- Na podstawie analizy danych testowych wyznaczono trzy profile sondażowe (trajektorie ruchu jednostki).
- Parametry echosondy: szerokość wiązki — 90 stopni, 100 wiązek, częstość sondowania — 15 Hz, przyjęto prędkość ruchu jednostki 5 węzłów.
- Z wykorzystaniem opracowanego oprogramowania wykonano wirtualny sondaż, w wyniku którego otrzymano zbiór symulowanych punktów sondażowych XYZ.

Pierwszym i podstawowym zadaniem przy weryfikacji danych otrzymanych z symulowanego sondażu jest porównanie rozkładu lokalizacji przestrzennej

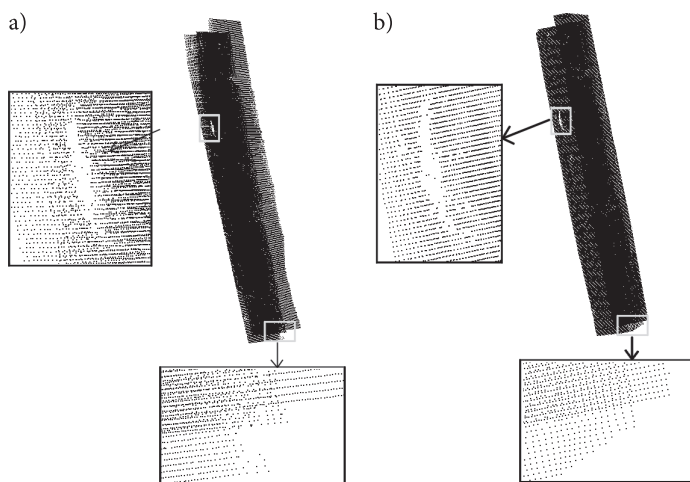
punktów pomiarowych otrzymanych w wyniku sondażu rzeczywistego i symulowanego.

W tabeli 1 pokazano wybrane charakterystyki źródłowych i wirtualnych danych zgromadzonych w plikach XYZ.

TABELA 1
Porównanie rzeczywistego i symulowanego zbioru punktów sondażowych

Właściwość	Dane rzeczywiste	Dane symulowane
Całkowita liczba punktów	121 864	119100
Liczba punktów w wiązce	100	100
Średnia szerokość wiązki [m]	9,40	9,90
Średnia odległość między punktami w środku wiązki [m]	0,051	0,059
Średnia odległość między punktami na zewnątrz wiązki [m]	0,23	0,24
Średnia odległość pomiędzy kolejnymi liniami wiązek [m]	0,18	0,17

Na rysunku 7 zaprezentowano rozkład przestrzenny punktów XYZ źródłowych i symulowanych.



Rys. 7. Porównanie rozkładu rzeczywistych (a) i symulowanych (b) punktów sondażowych

6. Podsumowanie

Zaprezentowana w pracy metoda wirtualnego sondażu może stanowić wartościowe narzędzie wspomagające badania w dziedzinie metod tworzenia DTM oraz metod prowadzenia prac sondażowych. Jej zastosowanie umożliwia:

- badanie dokładności różnych metod interpolacji (tworzenia siatek GRID) z zastosowaniem rzeczywistych danych sondażowych,
- badanie wpływu parametrów prac sondażowych, takich jak gęstość profili, prędkość jednostki, trajektoria ruchu jednostki itp. na dokładność modelu dna,
- badanie wpływu parametrów echosondy na dokładność modelu dna,
- porównanie dokładności modeli dna zbudowanych w oparciu o sondaże z użyciem echosondy jedno i wielowiązkowej.

W toku dalszych prac nad metodą wirtualnego sondażu można uwzględnić niejednorodność ośrodka w postaci profilu prędkości dźwięku w zależności od głębokości, co spowoduje konieczność śledzenia nieliniowej trajektorii propagacji fali, zakłócenia, takie jak przechyły jednostki badawczej, błędy pozycji i kursu oraz niepewność pomiarową echosondy.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.07.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2010 r.

LITERATURA

- [1] D. GRABIEC, *Hydrografia morska — Quo vadis? (Krótkie spojrzenie na kierunki rozwoju hydrograficznych metod i środków pomiarowych)*, http://pl.wikisource.org/wiki/Hydrografia_morska, 2008.
- [2] A. FOURGASSIE, *L'hydrographie moderne*, Cols Bleus, 6, 2000, 10-13.
- [3] A. STACZNY, M. KOZAK, *Space Modelling of the Sea Bottom Shape Using the Geostatistics Method*, Polish Journal of Environmental Studies, 14, Supplement I, 2005.
- [4] J. ŁUBCZONEK, *Hybrid Neural Model of the Sea Bottom Surface*, Artificial Intelligence and Soft Computing — ICAISC 2004, Springer, Berlin/Heidelberg, 2004.
- [5] J. C. DAVIS, *Statistics and Data Analysis in Geology*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [6] R. COATES, *Underwater Acoustic Systems*, Macmillan New Electronics, London, 1990.
- [7] P. ETTER, *Underwater Acoustic Modeling*, Elsevier Applied Science, London & New York, 1991.
- [8] J. M. BELL, L. M. LINNETT, *Simulation and Analysis of Synthetic Sidescan Sonar Images*, IEE Proceedings, Radar, Sonar and Navigation, 1997.
- [9] M. PAŁCZYŃSKI, *Metoda generowania symulowanych obrazów sonarowych dla potrzeb nawigacji porównawczej*, (Ph. D. thesis), Szczecin University of Technology, 2008.
- [10] A. STACZNY, M. PAŁCZYŃSKI, *Synthesis of Simulated Sonar Images by Means of Acoustic Rectilinear Rays*, Polish Journal of Environmental Studies, 15, 4C, 2006.
- [11] M. KONGSBERG, *High Resolution Focused Multibeam Echo Sounders*, <http://www.hydrographicsociety.nl/documents/hydrographicsociety/downloads/km%20multibeam.pdf>, 2008.
- [12] A. GLASSNER, *An Introduction to Ray-Tracing*, Academic Press, London, 1989.
- [13] J. ZABRODZKI, *Grafika komputerowa*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1994.
- [14] M. PAŁCZYŃSKI, *Adaptacja metody śledzenia promieni dla potrzeb syntezy symulowanych obrazów sonarowych*, X Sesja Naukowa Informatyki, Szczecin, 2005.

W. MALEIKA, M. PAŁCZYŃSKI

Development of a simulator of multibeam echosounder

Abstract. The paper deals with the process of building digital terrain model (DTM) of a seabed basing on multibeam echosounder data. One of the most difficult problems in this area is verification of existing interpolation methods using real data, since the exact shape of the bottom is uncertain. Authors propose introducing the simulation of the hydrographic survey over the high resolution DTM in order to obtain a set of virtual points which can be the source for creating terrain models using different interpolation methods. Such a procedure gives a powerful research tool due to the possibility of simple comparison of the resulting and source terrain models. The algorithm of virtual survey is based on the ray tracing method. Input data consist of the source DTM, description of vessel movement and the echosounder parameters. During each virtual ping, every beam is represented as a ray, which is traced according to sound wave propagation trajectory in order to find an intersection with the terrain model. The coordinates of intersection points are stored as the output of the method. Described algorithm was implemented and the first attempt of its verification is described in the paper. The basis of the research was the set of real data acquired by multibeam echosounder. The high resolution DTM was calculated, the vessel movement and echosounder parameters were obtained as well, then virtual survey was performed. The matter of the research was the spatial distribution of virtual survey points. The results show a similarity of distributions of real and simulated points, including the number of points, distances between them and a beam width. The method introduced in the paper can be powerful verification tool in the area of DTM calculation methods. It will be also useful for the research of the impact of hydrographic survey parameters on the accuracy of resulting digital terrain model.

Keywords: digital terrain model (DTM), multibeam echosounder, ray tracing

