

MAKA Marcin¹

REKURENCYJNY ALGORYTM DYSKRETYZACJI MAPY ELEKTRONICZNEJ Z WYKORZYSTANIEM METODY DRZEWA ĆWIARTEK

W artykule analizowano problem konwersji elektronicznej mapy nawigacyjnej w standardzie S-57 do postaci umożliwiającej wprowadzenie oraz szybką analizę i wykorzystanie informacji zawartych na mapie w nawigacyjnym systemie wspomaganie decyzji. Do rozwiązania problemu zaproponowano rekurencyjny algorytm dyskretyzujący wykorzystujący drzewa ćwiartek. Przedstawiono jego właściwości oraz wymagania. Zaprezentowano metodykę postępowania w procesie dyskretyzacji obszaru. W oparciu o opracowany algorytm przeprowadzono eksperyment, przedstawiono wyniki.

THE RECURRENT ALGORITHM FOR ELECTRONIC CHART DISCRETIZATION USING THE QUADTREE METHOD

This article analyzes the problem of converting an S-57 standard electronic chart to the form enabling the insertion and quick analysis and use of information contained on the chart of a navigational decision support system. The problem is tackled by the application of a recurrent discretizing algorithm making use of quad trees. The properties and requirements of the algorithm are discussed along with the methodology adopted in the process of area discretization. The results of an experiment based on the developed algorithm are presented.

1. WSTĘP

Jednym z podstawowych zadań w nawigacji jest bezpieczne przeprowadzenie statku z danego punktu do punktu docelowego. Rozwiązanie tego zagadnienia wymaga uwzględnienia m.in. ruchu innych obiektów na akwenu (przepisy MPDM), ograniczeń samego akwenu (ukształtowanie łądów, dopuszczalna głębokość, inne przeszkody) czy dynamiki statku własnego.

Szacuje się, że do około 80% kolizji w ruchu morskim dochodzi z winy człowieka [2]. Coraz większa liczba urządzeń wspomagających pracę nawigatora powoduje przeciążenie informacją, a tym samym utrudnia podjęcie właściwych decyzji, które wpływają na bezpieczeństwo statku. W związku z powyższym prowadzi się badania nad systemami wspomaganie decyzji.

¹ Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny, Instytut Technologii Morskich; Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin; tel. +48 91 48-09-427; m.maka@am.szczecin.pl,

Dla prawidłowego działania tego typu systemów niezbędne jest dostarczenie im szczegółowych informacji zawierających dane dotyczące analizowanego akwenu (głębokości, obszary zabronione, lądy, wraki itp.) oraz innych statków (obiektów ruchomych).

Do zobrazowania sytuacji nawigacyjnej i informacji ją opisujących stosowane są elektroniczne mapy nawigacyjne (ENC), które stanowią element systemów obrazowania elektronicznych map i informacji nawigacyjnych ECDIS (*Electronic Chart Display and Information System*). Jednakże format danych zawartych na mapie elektronicznej nie jest odpowiedni dla systemu wspomaganie decyzji. Niezbędne jest zatem przekształcenie elektronicznej mapy nawigacyjnej do postaci umożliwiającej wprowadzenie oraz szybką analizę i wykorzystanie informacji zawartych na mapie. Zaproponowano rekurencyjny algorytm dyskretyzujący, wykorzystujący metodę drzewa ćwiartek, umożliwiający analizę i przekształcenie elektronicznej mapy nawigacyjnej w standardzie S-57 do postaci umożliwiającej wprowadzenie oraz wykorzystanie informacji na niej zawartych, w systemie wspomaganie decyzji nawigacyjnych.

2. WŁAŚCIWOŚCI I WYMAGANIA

Podstawowe wymagania dotyczące działania algorytmu wynikają bezpośrednio z zadań realizowanych przez nawigacyjny system wspomaganie decyzji oraz funkcji, jakie spełnia w nim mapa elektroniczna. Do zadań systemu zalicza się m.in. [4, 5]:

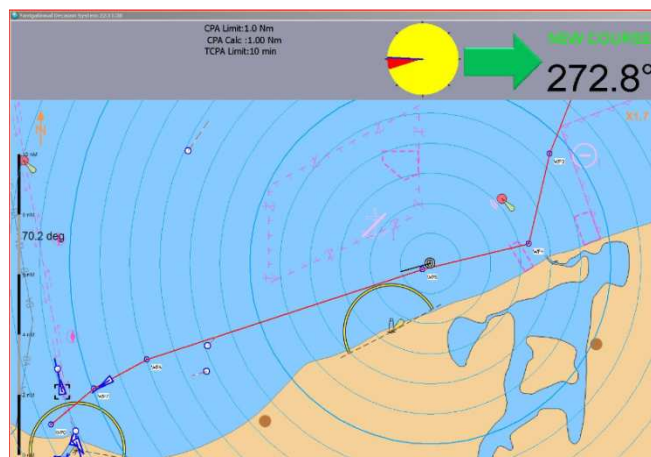
- pozyskiwanie i integrację danych nawigacyjnych z urządzeń oraz systemów nawigacyjnych dostępnych na statku,
- zobrazowanie sytuacji nawigacyjnej,
- określenie (wyznaczenie) aktualnego poziomu bezpieczeństwa nawigacyjnego,
- identyfikację oraz sygnalizowanie sytuacji niebezpiecznych,
- automatyczne wyznaczanie manewru (optymalnego) i trajektorii ruchu w sytuacjach kolizyjnych,
- czytelne dla nawigatora zobrazowanie manewru.

Mapa nawigacyjna służy (rys. 1):

- do zobrazowania konfiguracji akwenu oraz sytuacji nawigacyjnej użytkownikowi,
- jako źródło danych dotyczących akwenu dla systemu wspomaganie decyzji.

Wymagania stawiane przez działające w ramach systemu moduły: analizy i oceny sytuacji nawigacyjnej, wypracowania manewru, predykcji i inne [3] ogólnie definiują niezbędne właściwości algorytmu dyskretyzującego:

1. Algorytm powinien analizować sytuację i realizować procesy obliczeniowe w czasie rzeczywistym. Niezbędne jest zatem zastosowanie takiej metody, która zapewni realizację procesu dyskretyzacji mapy w odpowiednio krótkim czasie.
2. Konfiguracja siatki musi zapewnić takie odwzorowanie struktury mapy i obiektów znajdujących się na niej, aby dane były przedstawione z odpowiednio wysoką dokładnością.
3. Konfiguracja siatki (wielkość elementów i rozmieszczenie węzłów) musi być tak dobrana, aby zapewniała wystarczającą ilość danych do przeprowadzenia dokładnych obliczeń i analizy sytuacji nawigacyjnej.
4. Konfiguracja siatki musi zapewniać możliwość przeprowadzenia odpowiednio dokładnych obliczeń i zrealizowania manewrów statku własnego.



Rys. 1. Mapa nawigacyjna w systemie wspomaganie decyzji

W typowych przypadkach nie istnieje potrzeba uwzględniania w szczegółowych obliczeniach elementów siatki znajdujących się na lądzie, czyli elementy siatki znajdujące się w całości na takim obszarze mogą być oznaczane jako zabronione i eliminowane z dalszej analizy co pozwoli na skrócenie czasu obliczeń. Analogicznie, jako obszary zabronione mogą być traktowane: obszary wyłączone z żeglugi, rejony o zbyt małej głębokości, płytko leżące wraki itp.

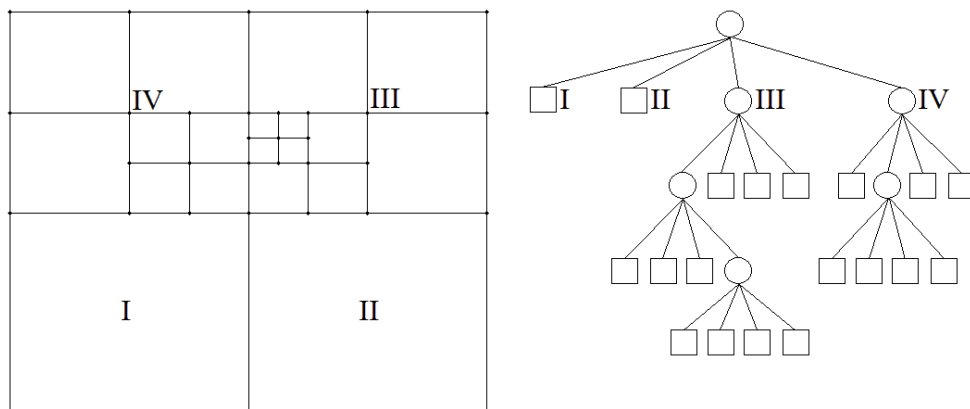
Niezbędne jest także zachowanie standardowych wymagań dotyczących siatek takich, jak: prawidłowe ukształtowanie elementów czy też wzajemne ich dopasowanie względem siebie.

Proponowany w dalszej części artykułu algorytm pokrywa dyskretyzowany obszar siatką nieregularną z elementami w kształcie czworokąta foremnego. Każda z gałęzi drzewa ćwiartek reprezentującego siatkę ma określoną, minimalną głębokość. Pozwala to uzyskać wymaganą rozdzielczość siatki. Algorytm zawiera także procedurę zapewniającą uzyskanie zrównoważonego drzewa ćwiartek (tj. takiego, w którym rozmiary dwóch sąsiadujących kwadratów różnią się co najwyżej o współczynnik 2, dowolne dwa liście drzewa, których kwadraty są sąsiadami mogą się różnić głębokością o jeden).

3. DRZEWO ĆWIARTEK

Drzewo ćwiartek jest ukorzenionym drzewem, w którym każdy wewnętrzny węzeł ma czworo potomków. Każdy węzeł w drzewie reprezentuje jeden prostokąt (kwadrat). Jeżeli dany węzeł drzewa w ma n potomków, to odpowiadające im prostokąty (kwadraty) stanowią cztery ćwiartki elementu reprezentowanego przez węzeł drzewa w [1].

Potomkom każdego z węzłów drzewa nadawane są etykiety: I, II, III, IV według kolejności przedstawionej na rysunku 2. Symbole okręgów i kwadratów w grafie oznaczają odpowiednio: węzły wewnętrzne reprezentujące takie elementy siatki, które ulegają dalszemu podziałowi oraz liście czyli węzły drzewa, który nie posiada potomków, reprezentujące elementy siatki nie ulegające dalszemu podziałowi.



Rys. 2. Podział obszaru i odpowiadające mu drzewo ćwiartek

W analizowanym przypadku drzewo ćwiartek wykorzystywane będzie do przekształcenia elektronicznej mapy nawigacyjnej w standardzie S-57, stanowiącej zbiór wektorów definiujących obszary na płaszczyźnie, do postaci odpowiedniej dla nawigacyjnego systemu wspomagania decyzji. Podział będzie kontynuowany dopóki nie zostanie osiągnięta maksymalna, dozwolona liczba punktów w elemencie lub minimalny dozwolony rozmiar pojedynczego elementu. Dla zbioru punktów mapy P znajdujących się wewnątrz jednego elementu siatki k :

$$k := [x_{k1}, x_{k2}] \times [y_{k1}, y_{k2}] \quad (1)$$

Jeżeli $\text{card}(P) \leq P_{\max} \wedge x_{k2} - x_{k1} \leq k_{\min}$, gdzie P_{\max} - maksymalna liczba punktów mapy znajdujących się wewnątrz jednego elementu siatki, k_{\min} - minimalny dozwolony rozmiar oczka siatki, to podział elementu nie będzie kontynuowany.

Jeżeli $\text{card}(P) > P_{\max} \wedge x_{k2} - x_{k1} > k_{\min}$ następuje podział elementu siatki k na cztery kwadraty: $k_I, k_{II}, k_{III}, k_{IV}$ o współrzędnych wierzchołków:

$$\begin{aligned} k_I &: (x_{k1}, y_{k1}), (x_{sr}, y_{k1}), (x_{sr}, y_{sr}), (x_{k1}, y_{sr}) \\ k_{II} &: (x_{sr}, y_{k1}), (x_{k2}, y_{k1}), (x_{k2}, y_{sr}), (x_{sr}, y_{sr}) \\ k_{III} &: (x_{sr}, y_{sr}), (x_{k2}, y_{sr}), (x_{k2}, y_{k2}), (x_{sr}, y_{k2}) \\ k_{IV} &: (x_{k1}, y_{sr}), (x_{sr}, y_{sr}), (x_{sr}, y_{k2}), (x_{k1}, y_{k2}) \end{aligned} \quad (2)$$

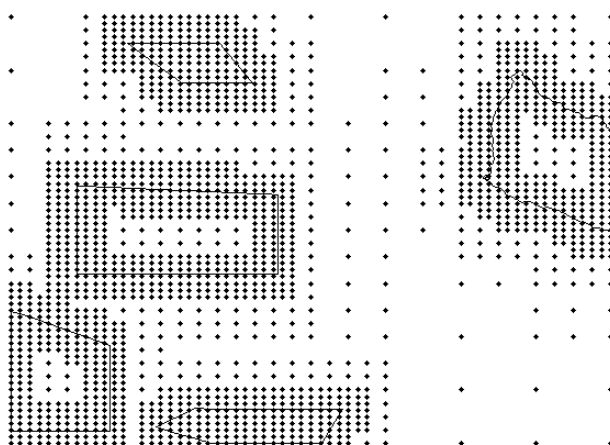
gdzie: x_{sr}, y_{sr} – współrzędne środka elementu k .

4. ALGORYTM

Nawigacyjny System Wspomagania Decyzji analizuje zarówno obiekty nieruchome, których pozycja na mapie nawigacyjnej jest niezmienna w czasie, jak i obiekty, których pozycja zmienia się w czasie. Analizowanie w czasie rzeczywistym wszystkich obiektów ruchomych i nieruchomych oraz generacja siatki dla całego potrzebnego (rozpatrywanego) obszaru mapy wymaga bardzo dużej mocy obliczeniowej oraz niepotrzebnie wydłuża czas obliczeń. Zaproponowany algorytm generacji siatki pozwala na znaczne skrócenie czasu potrzebnego na analizę i dyskretyzację obszaru.

Kryteriami, według których dobierana jest gęstość siatki na danym obszarze są (rys. 3):

1. ograniczenia wynikające z ogólnych założeń dotyczących minimalnego i maksymalnego rozmiaru pojedynczego elementu siatki,
2. odległość od obiektów nieruchomych oraz obszarów zabronionych,
3. ilość punktów wyznaczających kontur obiektu na mapie, znajdujących się w jednym oczku sieci,
4. aktualne położenie obiektów ruchomych.



Rys. 3. Rozmieszczenie węzłów siatki dla analizowanego obszaru

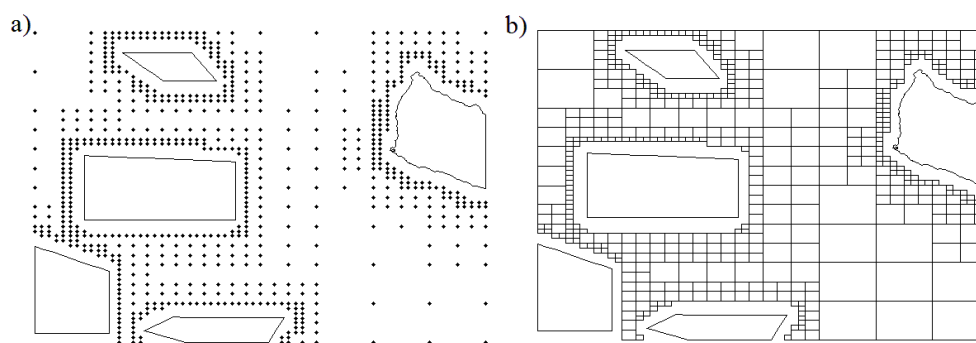
Każdy utworzony element siatki analizowany jest pod kątem położenia w stosunku do obszarów zabronionych (ładów, rejonów o zbyt małej głębokości itp.) – elementy znajdujące się w całości w tych obszarach są oznaczane jako zabronione i eliminowane z dalszej analizy (rys 4). Elementy zawierające punkty i krawędzie obiektów znajdujących się na mapie podlegają dalszemu podziałowi do momentu, w którym: nie będą zawierały punktów i krawędzi lub obejmować będą ich maksymalną dozwoloną liczbę, albo osiągną zdefiniowany, minimalny rozmiar oczka sieci.

W algorytmie określono także minimalną odległość od obszaru zabronionego w jakiej może przebiegać planowana trasa obiektu. Elementy siatki, które znajdują się w zbyt małej odległości od tych obszarów są także oznaczane jako zabronione i eliminowane z dalszych obliczeń

Rezultatem działania algorytmu są dwie zmienne macierzowe: pierwsza o wymiarach $2 \times m$ zawierająca współrzędne kolejnych węzłów, druga o wymiarach $4 \times n$ zawierająca numery węzłów stanowiących narożniki kolejnych elementów siatki, gdzie m - liczba węzłów, n - liczba elementów.

Otrzymana siatka odwzorowująca strukturę mapy elektronicznej będzie następnie lokalnie modyfikowana w zależności od położenia obiektów ruchomych. Uzyskane ostatecznie zbiory węzłów i elementów stanowią bazę dla procesów analizy sytuacji nawigacyjnej oraz optymalizacji drogi w nawigacyjnym systemie wspomagania decyzji.

Wszystkie obiekty (łądy) znajdujące się na zaprezentowanym, teoretycznym obszarze składają się łącznie z 625 linii. Całkowita liczba węzłów siatki wynosi 1855. Po eliminacji węzłów i elementów siatki znajdujących się w obszarach zabronionych otrzymano: 483 elementy siatki oraz 714 węzłów.



Rys. 4. Dyskretyzacja analizowanego obszaru, wyeliminowane elementy znajdujące się w rejonach zabronionych: a) rozmieszczenie węzłów, b) siatka

5. REALIZACJA PRAKTYCZNA

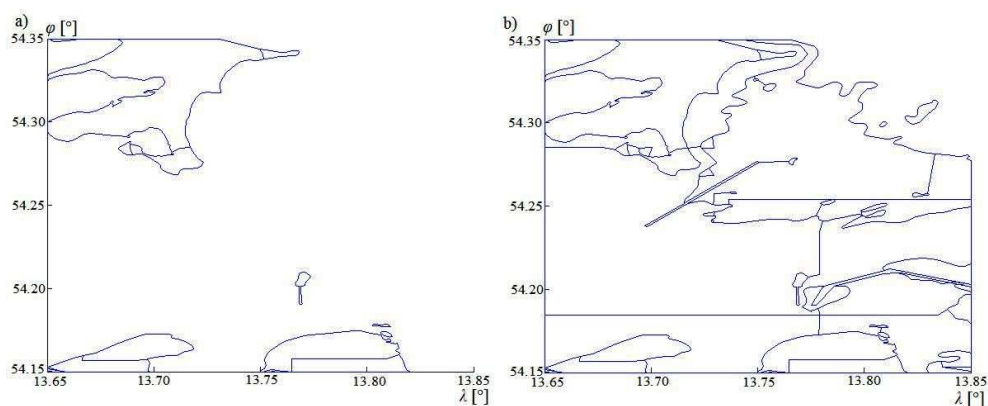
Za pomocą opisanego wyżej algorytmu przeprowadzono konwersję fragmentu mapy elektronicznej południowo – zachodniego Bałtyku, w pobliżu wyspy Rugia. Transformacji poddano prostokątny obszar znajdujący się pomiędzy: $54^{\circ}9'N$ \square $54^{\circ}21'N$ oraz $13^{\circ}39'E$ \square $13^{\circ}51'E$ ($54,15^{\circ}N - 54,35^{\circ}N$ oraz $13,65^{\circ}E - 13,85^{\circ}E$) (rys. 5). Proces dyskretyzacji przeprowadzono w dwóch wariantach, uwzględniając:

1. wyłącznie łądy (obszary zdefiniowane jako zabronione) (rys. 6a);
2. łądy oraz izobaty (rys. 6b).

W pierwszym przypadku analizowany obszar składał się łącznie z 12 obiektów zawierających razem 474 linie, w drugim przypadku zawierał 42 obiekty składające się łącznie z 1963 linii.



Rys. 5. Obszar poddawany dyskretyzacji



Rys. 6. Obszar poddawany dyskretyzacji: a) model zawierający wyłącznie lądy, b) model rozszerzony o izobaty

W obu analizowanych przypadkach przyjęto takie same założenia dotyczące rozmiaru elementów siatki, minimalnej, dopuszczalnej odległości od obszarów zabronionych itd.:

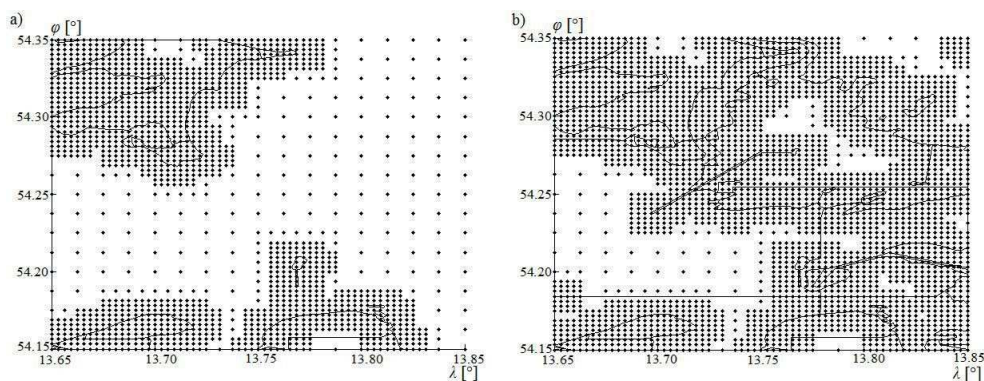
1. współrzędne granic obszaru: $\lambda_{min} = 13,65^\circ$, $\lambda_{max} = 13,85^\circ$, $\varphi_{min} = 54,15^\circ$, $\varphi_{max} = 54,35^\circ$;
2. maksymalna rozdzielczość siatki $d_{smax} = 0,0166^\circ$;
3. minimalna rozdzielczość siatki $d_{smin} = 0,00208^\circ$;
4. minimalna odległość od obszaru zabronionego $l_{smin} = 0,25$ Mm;
5. dozwolone trzy przedziały, w jakich mieści się rozdzielczość siatki, w zależności od odległości l od obiektów na mapie oraz obszarów zabronionych:
 - a) $d_s \in \langle 0,0166^\circ, 0,01^\circ \rangle$ dla $l \geq 2$ Mm;
 - b) $d_s \in \langle 0,01^\circ, 0,006^\circ \rangle$ dla $2 \text{ Mm} > l \geq 0,5$ Mm;
 - c) $d_s \in \langle 0,006^\circ, 0,00208^\circ \rangle$ dla $l < 0,5$ Mm;

W rezultacie kolejnych podziałów dyskretyzowanego obszaru otrzymano, w kolejnych przedziałach następujące rozdzielczości elementów:

1. $d_{s1} = 0,0125^\circ$;
2. $d_{s2} = 0,00625^\circ$;
3. $d_{s3} = 0,003125^\circ$.

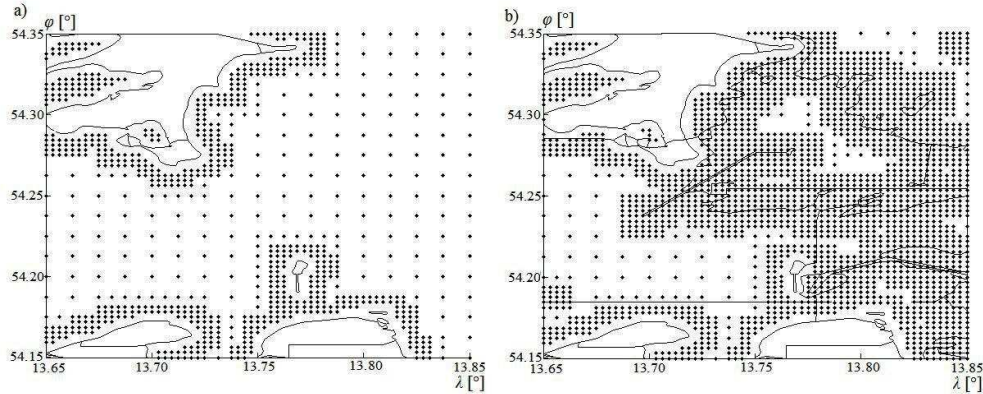
W zaprezentowanych przykładach ograniczono minimalną rozdzielczość siatki w celu zachowania czytelności rysunków. W rzeczywistości przybiera ona wartości rzędu $0,0005^\circ - 0,001^\circ$.

W przypadku, gdy uwzględniano wyłącznie obszary zaprezentowane na rysunku 6a (łądy), po przetworzeniu analizowanego fragmentu mapy otrzymano siatkę składającą się z 1594 elementów i zawierającą 1762 węzły (rys. 7a). Po wyeliminowaniu elementów oraz węzłów znajdujących się w obszarach zabronionych otrzymano: 810 elementów siatki oraz 1048 węzłów (rys. 8a, 9a). W przypadku, gdy dyskretyzowany obszar zawierał także izobaty (rys. 6b), przed procesem eliminacji siatki z rejonów zabronionych wartości te wynosiły odpowiednio: 3031 elementów oraz 3275 węzłów (rys. 7b). Po eliminacji otrzymano: 2247 elementów siatki oraz 2559 węzłów (rys. 8b, 9b).

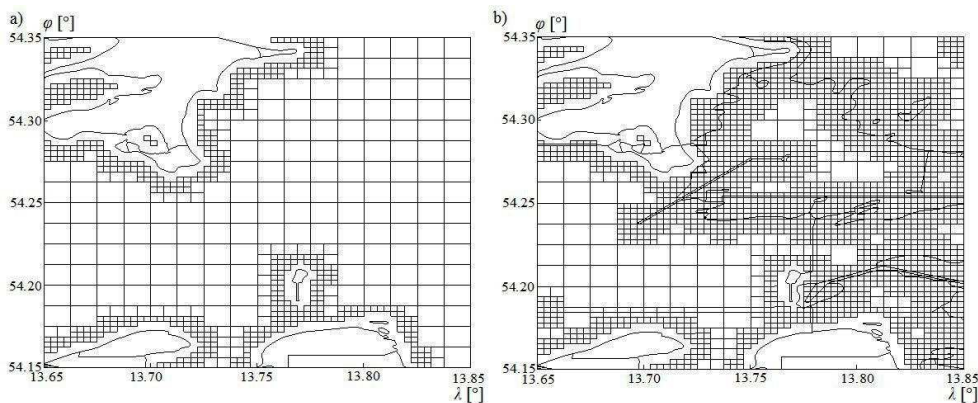


Rys. 7. Dyskretyzacja obszaru, węzły siatki: a) model zawierający wyłącznie obszar łądy, b) model rozszerzony o izobaty

Czas potrzebny do realizacji całego algorytmu przetwarzania mapy elektronicznej, łącznie z procesami identyfikacji obszarów zabronionych oraz eliminacji znajdujących się w nich elementów siatki wynosił około 2-3 sekund w przypadku rozpatrywania wyłącznie obszarów łądy oraz 5 – 6 sekund w przypadku modelu zawierającego izobaty.



Rys. 8. Dyskretyzacja obszaru – węzły. Wyeliminowane węzły znajdujące się na obszarach zabronionych: a) model zawierający wyłącznie obszar lądu, b) model rozszerzony o izobaty



Rys. 9. Dyskretyzacja obszaru – siatka. Wyeliminowane elementy znajdujące się na obszarach zabronionych: a) model zawierający wyłącznie obszar lądu, b) model rozszerzony o izobaty

6. WNIOSKI

Otrzymane wyniki badań potwierdzają skuteczność przedstawionego w artykule algorytmu. Zastosowanie zaproponowanej metody umożliwia realizację procesu dyskretyzacji mapy elektronicznej dla potrzeb nawigacyjnego systemu wspomaganie decyzji.

Proponowana metodyka postępowania posiada kilka ograniczeń. Ze względu na specyficzne reguły podziału elementu siatki - wyłącznie na cztery równe części - jest ona mało elastyczna i może stwarzać problemy podczas dyskretyzacji skomplikowanych obszarów. Ponadto w przypadku wykorzystywania w procesie optymalizacji drogi statku metod o charakterze probabilistycznym, zbyt duża liczba węzłów oraz elementów siatki

może skutkować przekroczeniem zakładanego, maksymalnego czasu realizacji algorytmu optymalizacyjnego.

Przedstawione w niniejszym artykule analizy stanowią bazę do dalszych badań mających na celu m.in.: wprowadzenie dodatkowych kryteriów mających na celu zmniejszenie liczby węzłów, skrócenie czasu działania algorytmu, usprawnienia procedur wykrywania obszarów zabronionych, a także dobór optymalnej liczby przedziałów rozdzielczości siatki oraz rozmiaru elementów w poszczególnych przedziałach. Ponadto stanowią one punkt wyjścia do badań nad innymi metodami konwersji mapy elektronicznej dla potrzeb nawigacyjnego systemu wspomagania decyzji.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] de Berg M., van Kreveld M., Overmars M., Schwarzkopf O.: *Geometria obliczeniowa – algorytmy i zastosowania*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2007.
- [2] Li L.-N., Yang S.-H., Cao B.-G., Li Z.-F.: *A summary of studies on the automation of ship collision avoidance intelligence*, Journal of Jimei University, China, Vol. 11, No. 2, pp. 188-192, 2006.
- [3] Pietrzykowski Z., Borkowski P., Chomski J., Magaj J., Mąka M., Wołęjsza P., Uriasz J., Szewczuk P., Kazimierski W.: *Nawigacyjny system wspomagania decyzji na statku morskim*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej, Szczecin 2011, (monografia w druku).
- [4] Pietrzykowski Z., Chomski J., Magaj J., Bąk A., Uriasz J.: *Aims and tasks of the navigational support system on a sea going vessel*, Advanced in Transport Systems Telematics 2, pp. 251-259, Katowice, Publisher Faculty of Transport, Silesian University 2007.
- [5] Pietrzykowski Z., Mąka M., Magaj J., Wołęjsza P., Uriasz J.: *Prezentacja informacji w nawigacyjnym systemie wspomagania decyzji na statku morskim*, TST 2009.