Jolanta MAZUREK, Leszek SMOLAREK
Akademia Morska, Gdynia

ALGORYTM STRAŻAKA A OGRANICZANIE SKUTKÓW ROZLEWÓW OLEJOWYCH

Słowa kluczowe

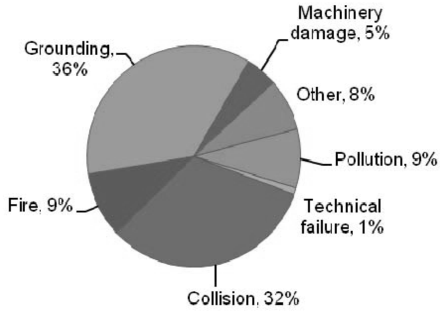
Algorytm strażaka, mieszany proces empiryczny, zagrożenie ekologiczne.

Streszczenie

W artykule zdefiniowano i opisano model stochastyczny pozwalający na ocenę skuteczności ograniczania rozlewu olejowego. Model ten wykorzystuje „algorytm strażaka" na kracie do wyznaczenia przestrzeni stanów procesu. Może być on wykorzystany do opracowania strategii wykorzystania posiadanych środków w aspekcie czasu potrzebnego na przeprowadzenie akcji.

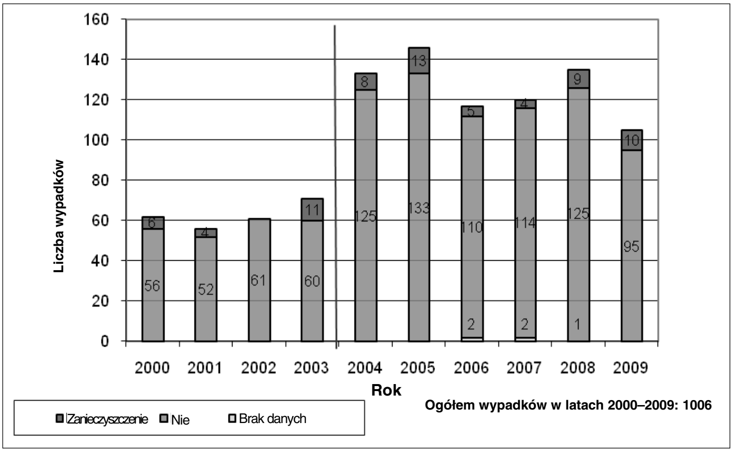
Wprowadzenie

W ostatnich latach da się zauważyć na Bałtyku istotny wzrost transportu paliw w ogólnym zestawieniu ładunków. W 2000 r. przewieziono 80 mln ton ropy, a do roku 2015 liczba ta ma wzrosnąć do ok. 150 mln ton. Ponad 9% wypadków statków powoduje zanieczyszczenie środowiska (rys. 1). Każdego dnia na Morzu Bałtyckim znajduje się ok. 200 dużych tankowców, a około połowa z nich to jednostki o pojedynczym poszyciu kadłuba. Według statystyk Helcom aż 75% kolizji z ich udziałem kończy się rozlewem ropy, co stwarza poważne zagrożenie ekologiczne dla Bałtyku.



Rys. 1. Procentowy udział wypadków związanych z zanieczyszczeniami w liczbie zgłoszonych wypadków statków na Bałtyku w 2009, [7]

Zachowanie właściwego poziomu bezpieczeństwa i ochrony na morzach wymaga ścisłego monitorowania wszystkich ruchów statków na wodach europejskich poprzez zintegrowane systemy informacyjne [6]. Dostarczanie spójnych informacji na temat ruchów statków, transportowanych przez nie ładunków pozwoli na skuteczne przeciwdziałanie skutkom wypadków i aktów terrorystycznych, rys. 2.

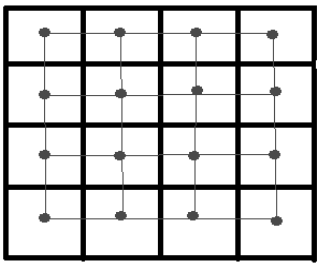


Rys. 2. Poważne wypadki związane z zanieczyszczeniami na Bałtyku w latach 2000–2009, [7]

Skutki finansowe i środowiskowe dużych wycieków ze zbiornikowców można istotnie ograniczyć usuwając wycieki olejowe z morza zanim dotrą do brzegów [1, 2]. Istnieją cztery metody likwidacji rozlewów olejowych takie, jak zatapianie, spalanie na powierzchni wody, dyspergowanie oraz zbieranie. Ostatnia metoda jest najczęściej stosowana i wymaga w pierwszej fazie ograniczenia wielkości rozlewu. Celem jest przeciwdziałanie nadmiernemu rozpływaniu się oleju po powierzchni wody przy równoczesnym pogrubieniu jego warstwy. Zadanie to realizuje się przy pomocy zapór przeciwolejowych.

2. Opis modelowanego systemu

W momencie rozpoczęcia akcji plama ma losową wielkość. Obszar (akwen) pokryty jest prostokątną siatką, tzn. dzielimy go na regularne przylegające do siebie prostokąty (czarne), rysunek 3. Prostokąty mające wspólne boki nazywamy sąsiednimi. Kształt prostokąta (proporcje między bokami) zależy od lokalnych (przestrzennie i czasowo) warunków rozprzestrzeniania się i rozlewu (np. prąd morski, falowanie) zaś jego wielkość od rodzaju substancji oleistych, wielkości wycieku i warunków hydrometeorologicznych (temperatura, falowanie,..). Rozlew rozprzestrzenia się równomiernie (w czasie i przestrzeni) na wszystkie sąsiadujące prostokąty z wyjątkiem przypadku, gdy w sąsiadującym prostokącie znajduje się jedna z przeszkód blokujących jego rozwój takich jak linia brzegowa, zapora pneumatyczna itp. Każdy prostokąt zastępujemy węzłem siatki zaś sąsiadujące prostokąty połączone są krawędziami. Krawędzie obrazują sąsiedztwo prostokątów w aspekcie przemieszczania się rozlewu na sąsiednie obszary (czerwone), rys. 3.



Rys. 3. Krata dwuwymiarowa stosowana w algorytmie strażaka

Strażakiem w modelu nazywamy zaporę pneumatyczną zapobiegającą rozprzestrzenianiu się rozlewu. Umieszczenie zapory w prostokącie jest równoważne umieszczeniu „strażaka" w odpowiadającym mu węźle siatki. Akcja prowadzona jest zgodnie z algorytmem strażaka. Celem modelowania jest określenie optymalnego sposobu rozmieszczania zapór (strażaków) ze względu na ograniczenie rozlewu. Jako stan systemu przyjmujemy zbiór węzłów siatki zajętych przez rozlew (pożar). Zbiór stanów systemu M można uporządkować monotonicznie ze względu na liczbę elementów poszczególnych stanów, tzn. moc podzbioru węzłów siatki. W zbiorze stanów można wprowadzić monotoniczne uporządkowanie poprzez relację postaci – stan A poprzedza stan B, jeśli liczba elementów stanu A jest nie większa od liczby elementów stanu B. Relacja ta pozwala ustawić zbiór stanów M w porządku niemalejącym od najlepszego A_0 do najgorszego stanu A_{max}.

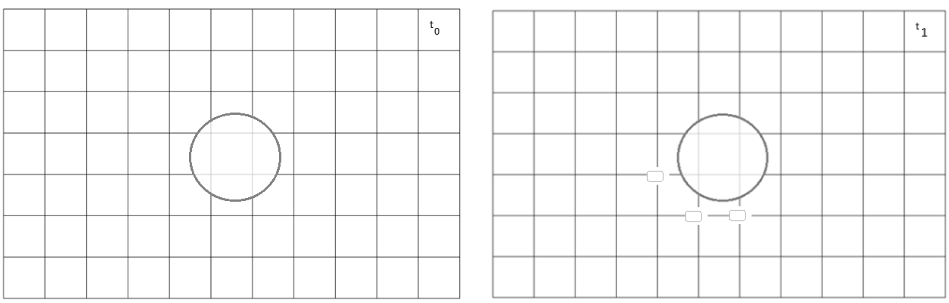
2.1. Algorytm strażaka

Algorytm strażaka został przedstawiony w 1995 roku przez Berta Hartnella w postaci zbioru reguł. Reguły te w przypadku rozlewu olejowego dają nam krokowy algorytm postaci:

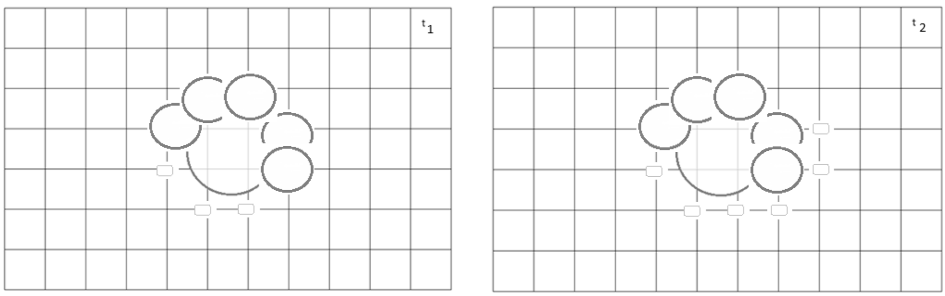
- w chwili początkowej t_0 w zadanym spójnym podzbiorze B węzłów siatki występuje rozlew olejowy, rys. 4;
- w każdej kolejnej jednostce czasu na pustych węzłach, czyli tych, na które nie rozprzestrzenił się olej umieszczona zostaje zapora oraz rozlew rozprzestrzenia się na wszystkie węzły przyległe do węzłów w zbiorze B (otrzymujemy nowy większy zbiór B), rys. 4, 5;
- stan każdego węzła jest niezmienny, węzeł zajęty przez zaporę, do końca jest nieprzenikalną barierą dla rozlewu; podobnie dzieje się z węzłem zajętym przez olej, nie można na nich postawić zapory, rys. 4, 5;
- obrona i rozlew wykonują swoje ruchy naprzemiennie, para ruchów (rozlew, obrona) tworzy cykl;
- cykle są powtarzane dopóki rozlew może się rozprzestrzeniać po siatce.

Przykład 1

Przyjmijmy, że w chwili t_0 rozlew obejmuje n wierzchołków



Rys. 4. Przykład algorytmu dla trzech strażaków, cykl 1 – n = 4, rozmieszczamy trzy zapory t_1



Rys. 5. Przykład algorytmu dla trzech strażaków, cykl 2 – rozlew się poszerza t_1, rozmieszczamy następne trzy zapory t_2

2.2. Trzech strażaków kontra d-pożar – algorytm, strategia

Strategia algorytmu strażaka pozwala w skończonej liczbie kroków (cykli) okrążyć rozprzestrzeniający się rozlew oleju umieszczając zapory pneumatyczne (strażaków). Zakładamy, że w każdym cyklu możemy umieścić zapory na trzech pustych wierzchołkach. Podjęte działania podzielimy na cztery etapy. Na kolejnych etapach będziemy prowadzić działania na kolejnych ćwiartkach siatki, przyjmując środek siatki (węzeł o współrzędnych (0,0)) w taki sposób, by każdy węzeł zajęty przez olej znajdował się w odległości nie większej niż d od środka. Działania rozpoczniemy w trzeciej ćwiartce i będziemy je kierować zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara, kończąc okrążanie rozlewu (pożaru) w czwartej ćwiartce. Dodatkowo działania dzielimy na atak oraz obronę. Obrona polega na umieszczaniu w nieparzystych jednostkach czasu jednej zapory w czwartej ćwiartce (w czasie $t = 2k + 1,\ k \in N$ umieszczamy strażaka na pozycji $(k, -d - k - 1)$). Wystarcza to, by rozlew nigdy nie okrążył zapory. Cała reszta sił skierowana jest na atak. Zatem w każdym nieparzystym kroku czasu w ataku umieszczamy dwóch strażaków, zaś w parzystym – trzech. Dzieje się to w następujący sposób [5]:

Etap I

W czasie $t = 1$ pierwszego strażaka umieszczamy w natarciu na pozycji $(-1, -d)$. Podczas rozmieszczania kolejnych strażaków w natarciu będziemy się kierować następującą zasadą. Jeśli jeden z atakujących strażaków znajduje się na pozycji (x_i, y_i), to kolejnego umieszczamy na pozycji (x_{i+1}, y_{i+1}) w następujący sposób: $x_{i+1} = x_i - 1,\ |y_{i+1} - y_i| \le 1.$

Etap pierwszy kończy się w momencie gdy strażak zostanie umieszczony w natarciu na pozycji $(-C_1, 0)$ dla pewnego $C_1 \ge 0$. Może zaistnieć sytuacja, że strażak umieszczony na końcowej pozycji nie jest ostatnim strażakiem dla danej jednostki czasu, tzn. że w tej jednostce czasu należy umieścić jeszcze jednego strażaka. W takiej sytuacji strażaka umieszczamy na pozycji $(-C_1+1, 1)$ i ten strażak jest ostatnim strażakiem etapu pierwszego.

Etap II

Etap drugi jest kontynuacją etapu pierwszego. Bazowym strażakiem, od którego rozpoczniemy, jest ostatni strażak etapu pierwszego. Jeżeli jeden z atakujących strażaków znajduje się na pozycji (x_i, y_i), to kolejnego umieszczamy na pozycji (x_{i+1}, y_{i+1}) w następujący sposób: $y_{i+1} = y_i + 1,\ |x_{i+1} - x_i| \le 1.$

Etap drugi kończy się, gdy umieścimy strażaka na pozycji $(0, C_2)$ dla pewnego $C_2 \ge 0$ lub jeśli strażak ten nie jest ostatnim strażakiem w rozważanej jednostce czasu, to ostatniego strażaka umieszczamy na pozycji $(1, C_2 - 1)$, co kończy etap drugi.

Etap III

Etap trzeci wykonujemy analogicznie do poprzednich etapów korzystając z warunku: $x_{i+1} = x_i + 1,\ |y_{i+1} - y_i| \le 1.$

Etap trzeci kończy się, gdy na pozycji (C_3, 0) dla pewnego $C_3 \geq 0$ umieścimy ostatniego lub przedostatniego strażaka w danej jednostce czasu. W drugim przypadku ostatniego strażaka umieszczamy na pozycji ($C_3 - 1, -1$).

Etap IV

Etap czwarty jest kontynuacją etapu trzeciego. Znajdujemy się w czwartej ćwiartce zatem jeżeli jeden z atakujących strażaków jest na pozycji (x_i, y_i) to kolejnego umieszczamy na pozycji (x_{i+1}, y_{i+1}) w następujący sposób:

$$y_{i+1} = y_i - 1, |x_{i+1} - x_i| \leq 1.$$

Etap czwarty kończy się gdy atakujący strażak zostanie umieszczony obok strażaka z obrony, co prowadzi do ostatecznego okrążenia pożaru.

Rozmieszczenie na etapie I

W czasie $t = 2k + 1$, $k \in N$ umieszczamy strażaka w obronie na pozycji (k, $-d - k - 1$) oraz dwóch strażaków w ataku na pozycjach ($-5k - 1$, $-d + 3k$), ($-5k - 2$, $-d + 3k + 1$). W czasie $t = 2k$, $k \in N \setminus \{0\}$ umieszczamy trzech strażaków na linii ataku na pozycjach ($-5k + 2$, $-d + 3k - 2$), ($-5k + 1$, $-d + 3k - 1$), ($-5k$, $-d + 3k$). Rozważmy kolejne przypadki w czasie $t = d - m$.

Dla $d = 3m + 1$, $m \in N$ w czasie $t = d - m = 3m + 1 - m = 2m + 1$ (nieparzysta jednostka czasu) umieszczamy dwóch strażaków na linii ataku na pozycjach ($-5m - 1$, $-3m - 1 + 3m$), ($-5m - 2$, $-3m - 1 + 3m + 1$), czyli ($-5m - 1$, -1), ($-5m - 2$, 0), co kończy etap I.

Dla $d = 3m + 2$, $m \in N$ w czasie $t = d - m = 3m + 2 - m = 2m + 2 = 2(m + 1)$ (parzysta jednostka czasu) umieszczamy trzech strażaków na linii ataku na pozycjach ($-5(m + 1) + 2$, $-3m - 2 + 3(m + 1) - 2$), ($-5(m + 1) + 1$, $-3m - 2 + 3(m + 1) - 1$), ($-5(m + 1)$, $-3m - 2 + 3(m + 1)$), czyli ($-5m - 3$, -1), ($-5m - 4$, 0), ($-5m - 5$, 1). Drugi strażak znajduje się na pozycji ($-5m - 4$, 0) zatem ostatniego strażaka w tej jednostce czasu umieścimy na pozycji ($-C_1+1$, 1) = ($-5m -4+1$, 1) =($-5m - 3$, 1).

Dla $d = 3m$, $m \in N \setminus \{0\}$ w czasie $t = d - m = 3m - m = 2m$ (parzysta jednostka czasu) umieszczamy trzech strażaków na linii ataku na pozycjach ($-5m + 2$, $-3m + 3m - 2$), ($-5m + 1$, $-3m + 3m - 1$), ($-5m$, $-3m + 3m$), czyli ($-5m + 2$, -2), ($-5m + 1$, -1), ($-5m$, 0), co kończy etap I.

Algorytm rozmieszczenia przedstawiony na etapie pierwszym prowadzi do okrążenia rozlewu w czwartej ćwiartce. Łatwo zauważyć, iż analogiczne przeprowadzenie algorytmu w kolejnych ćwiartkach prowadzi do połączenia natarcia z linią obrony, która powstaje w czwartej ćwiartce, co ostatecznie prowadzi do zakończenia działań.

2.3. Mieszany proces empiryczny

Mieszanym procesem empirycznym nazywamy proces empiryczny z losowym rozmiarem próbki dany równaniem [3]:

$$N_n = \sum_{k=1}^{\gamma} \delta_{X_k} \tag{1}$$

gdzie zmienna losowa γ jest niezależna od zmiennych X_k; k = 1,2,…,m.

Miarą intensywności empirycznego procesu punktowego nazywamy miarę, która dla każdego skończonego podzbioru płaszczyzny B jest równą wartości oczekiwanej liczby punktów, które znajdą się w zbiorze B.

Ponieważ czas potrzebny na dotarcie do rejonu rozłożenia zapory jak i czas jej rozłożenia są niedeterministyczne, dlatego cykle modelowane są jako zmienne losowe [8]. Zastosowanie procesu punktowego do wyznaczania chwil zmiany stanu systemu pozwala na wykorzystanie miary intensywności empirycznego procesu punktowego do oceny skuteczności prowadzonych działań w zakresie ograniczenia rozlewu olejowego. Rozpatrujemy proces z zależnością długozasięgową LRD [4] postaci

$$\lambda(t) = X_{N_n(t)} \tag{2}$$

gdzie $\{X_k\}_{k\geq 1}$ jest ciągiem zmiennych losowych przyjmujących wartości w zbiorze M zaś $N_n(t)$ procesem zliczającym skojarzonym z punktowym procesem stacjonarnym (1). Zbiór wartości zmiennej X_k jest złożony z k elementowych podzbiorów węzłów siatki (zajętych przez rozlew). Jeżeli $k<n$ to zbiór wartości zmiennej X_n jest skorelowany ze zbiorem wartości zmiennej X_k. Zakładamy, że każda wartość zmiennej X_k generuje (w sposób niezależny od pozostałych) wartości zmiennej X_{k+1} oraz że liczba tych wartości jest zmienną losową z pewnego wspólnego rozkładu prawdopodobieństwa.

Modelowany system składa się z analizowanego akwenu i plamy rozlewu. System może znajdować się w jednym ze stanów zbioru M. Czas trwania pojedynczego cyklu jest losowy i wyznaczony przez elementy procesu punktowego.

Wnioski

Algorytm pokazuje, że da się okrążyć pożar, tzn. wykorzystując ograniczone środki opanować rozlew w skończonym czasie.

Przedstawiony model można wykorzystać do analizy różnych strategii postępowania pod kątem wyboru najlepszej ze względu na czas potrzebny do opanowania rozlewu lub też doboru strategii pozwalającej na minimalizację obszaru zajętego przez rozlew.

Bibliografia

1. Bogalecka M., Kolowrocki K.: Probabilistic Approach to Risk Analysis of Chemical Spills at Sea, International Journal of Automation and Computing 2 (2006) 117–124.

2. Fabisiak J.: Zagrożenia ekologiczne Bałtyku związane z zanieczyszczeniami chemicznymi — węglowodory, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, ROK XLIX NR 3 (174), 7–28, 2008.
3. Kosorok M.R.: Introduction to Empirical Processes and Semiparametric Inference, SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, INC, 2006.
4. Kulik R., Szekli R.: Long Range Dependence of continuous - time processes associated with stationary point processes, University of Wroclaw, Technical report 128, 2002.
5. Mazurek J.: Problem strażaka w grafach kratowych, praca magisterska, Politechnika Gdańska 2009.
6. Pietrzykowski Z.: Assessment of the navigational safety level in ship encounter situations in an open area. Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering – MTE, Szczecin 2007, 299–306.
7. Report on shipping accidents in the Baltic Sea area during 2009, http://www.helcom.fi/stc/files/shipping/shipping_accidents_2009.pdf
8. Smolarek L.: Finite Discrete Markov Model of Ship Safety, Marine Navigation and Safety of Sea Transport, Balkema Book 2009 Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 589–592.

Recenzent:
Zbigniew SMALKO

The firefighter algorithm and reduction of oil spills

Key words

Firefighter algorithm, the mixed empirical process, ecological risk.

Summary

The article defines and describes the stochastic model to measure the effectiveness of oil spill mitigation. This model uses the „firefighter's algorithm” on the grid to designate the state space of the process. It can be used to develop strategies to use available resources in terms of time needed to perform the action.