Andrzej Szklarski
Józef Lisowski
Akademia Morska w Gdyni

PRAWDOPODOBIEŃSTWO WYKRYCIA MAŁEGO OBIEKTU PŁYWAJĄCEGO Z BIERNYM REFLEKTOREM RADAROWYM

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z prawdopodobieństwem wykrycia obiektów nawodnych, omówiono klasyczne modele fluktuacyjne oraz zaprezentowano nowy model fluktuacyjny dla małych obiektów pływających, o skutecznej powierzchni odbicia mniejszej od 10 m^2. Określono możliwości wykrycia biernych reflektorów radarowych przez radary stosowane na statkach handlowych. Praca zawiera wyniki obliczeń prawdopodobieństw wykrycia badanych biernych reflektorów radarowych dla klasycznych modeli fluktuacyjnych, które następnie porównano z wynikami obliczeń uwzględniającymi nowy model fluktuacyjny.

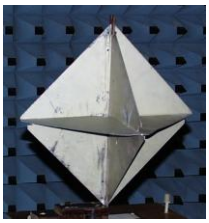
1. WPROWADZENIE

Na małych jednostkach pływających, w szczególności na jachtach, stosowane są bierne reflektory radarowe posiadające atesty towarzystw kwalifikacyjnych, tzw. reflektory konwencyjne, oraz reflektory bez atestów, czyli niekonwencyjne (rys. 1).

Mobri M2

Mobri M4

Cyclops 1



RR 101

Rys. 1. Przykłady biernych reflektorów radarowych

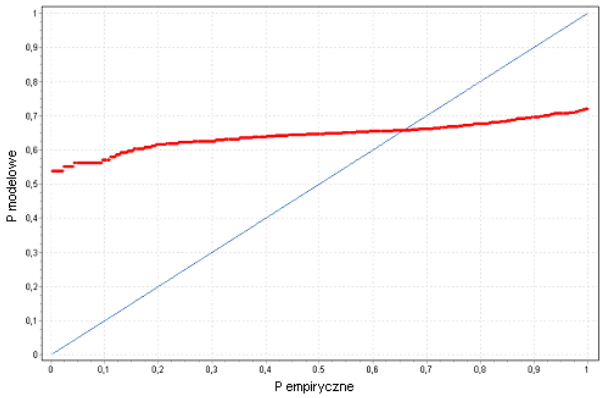
Skuteczna powierzchnia odbicia reflektorów niekonwencyjnych jest mniejsza niż wymagana w rezolucji IMO, a jakość ich wykonania często jest niewystarczająca do zapewnienia ich prawidłowego funkcjonowania. Każdy typ reflektora radarowego powinien zostać poddany odpowiednim pomiarom pozwalającym określić jego parametry techniczne. W celu zminimalizowania wpływu zakłóceń zewnętrznych na jakoś pomiaru badania te powinno się wykonywać w komorach bezechowych w warunkach zapewniających uzyskanie pola dalekiego. W praktyce badania w komorach bezechowych są możliwe dla reflektorów o niewielkich wymiarach geometrycznych. Reflektory o dużych wymiarach należy badać w warunkach poligonowych [2].

Dotychczas prowadzone badania modeli fluktuacyjnych dotyczyły obiektów dużych o skutecznej powierzchni odbicia większej od 10 m^2. Pomiary w komorze bezechowej pozwoliły wykazać, że stosowane do tej pory modele fluktuacyjne, których rozkłady statystyczne skutecznych powierzchni odbicia opisywane są rozkładami Rayleigya lub χ^2, nie są jedynymi modelami opisującymi obiekty występujące w przyrodzie. Badania wykazały, że istnieją również modele, w których skuteczną powierzchnię odbicia lepiej opisuje rozkład Weibulla. Jednym z takich modeli jest przedstawiony w niniejszym artykule model dla małych obiektów pływających (*Small Floating Object*) – SFO [10]. W radiolokacji morskiej rozkład Weibulla stosuje sie do opisu sygnałów zakłócających od powierzchni morza. Możliwość wykorzystania tego rozkładu do opisu sygnałów odbitych od obiektów o niewielkiej skutecznej powierzchni odbicia sugeruje, że obiekty te mają właściwości odbijające podobne jak zakłócenia od powierzchni morza. Radary morskie są standardowo wyposażone w układy tłumienia tego rodzaju zakłóceń – oznacza to, że ich użycie powoduje również znaczne tłumienie małych obiektów pływających [6, 8].

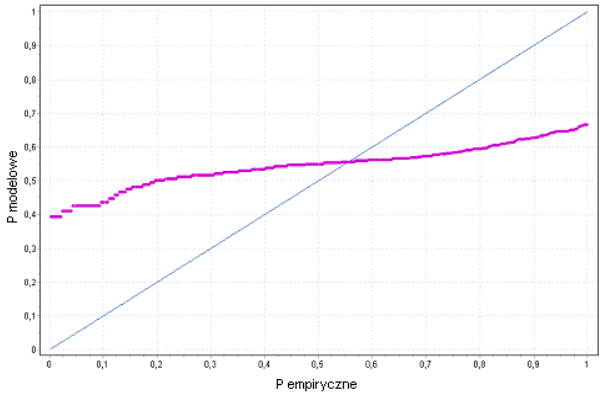
2. PRAWDOPODOBIEŃSTWO WYKRYCIA OBIEKTU WEDŁUG KLASYCZNYCH MODELI FLUKTUACYJNYCH

Jednym z podstawowych warunków pozwalającym na zakwalifikowanie reflektora do odpowiedniego modelu fluktuacyjnego jest określenie charakteru rozkładu skutecznej powierzchni odbicia reflektora. Na podstawie pomiarów wykonano obliczenia (za pomocą programu komputerowego EasyFit 4.0), pozwalające na dokonanie oceny zgodności dopasowania zbiorów danych z rozkładami χ^2, Rayleigha i Weibulla. Poszczególne hipotezy sprawdzano stosując standardowy test Kołmogorowa-Smirnowa dla rozkładów ciągłych [3, 10].

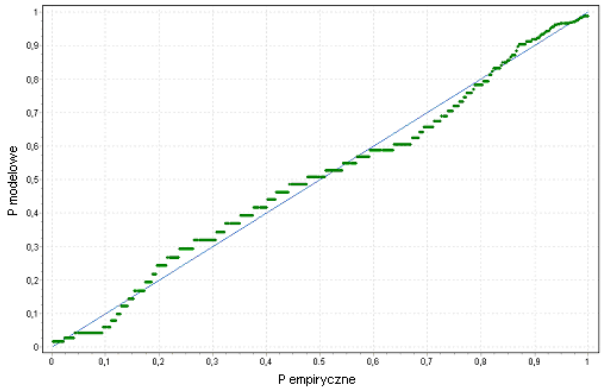
Uzyskane wyniki, przedstawione w postaci wykresów P-P, umożliwiają porównanie dystrybuant rozkładu empirycznego z teoretycznym (rys. 2, 3 i 4).



Rys. 2. Wykres P-P zgodności dopasowania danych reflektora Mobri M2 do rozkładu χ^2



Rys. 3. Wykres P-P zgodności dopasowania danych reflektora Mobri M2 do rozkładu Rayleigha



Rys. 4. Wykres P-P zgodności dopasowania danych reflektora Mobri M2 do rozkładu Weibulla

Wykresy P-P w łatwy sposób pozwalają ocenić dopasowanie rozkładów. Jeśli rozkład teoretyczny dobrze przybliża rozkład empiryczny, wówczas wszystkie punkty na wykresie powinny znaleźć się na przekątnej lub w jej pobliżu.

Z przeprowadzonej analizy zgodności dopasowania wynika, że we wszystkich rozpatrywanych przypadkach nie ma zgodności dopasowania rozkładów empirycznych z teoretycznymi.

Testy wykazały, że rozkłady empiryczne skutecznych powierzchni odbicia wszystkich badanych reflektorów nie spełniają warunków koniecznych do zakwalifikowania ich do teoretycznych rozkładów χ^2 i Rayleigha. W związku z powyższym zakwalifikowanie reflektorów do znanych modeli fluktuacyjnych niesie za sobą ryzyko wykonania błędnych obliczeń prawdopodobieństwa wykrycia reflektorów. Możliwe, że jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest to, że dotychczasowe badania modeli fluktuacyjnych dotyczyły obiektów o powierzchni skutecznej większej od 10 m^2 [9]. Niezbędne więc jest opracowanie modelu fluktuacyjnego dla obiektów o skutecznej powierzchni odbicia mniejszej od 10 m^2.

3. MODEL FLUKTUACYJNY SFO DLA MAŁYCH JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH

Analiza matematyczna rozkładu Weibulla stanowi podstawę do opracowania modelu fluktuacyjnego małych obiektów nawodnych SFO (*Small Floating Object*).

Gęstość rozkładu Weibulla [1] może być wyrażona wzorem:

$$P = \frac{\alpha}{\psi} \cdot \left(\frac{\sigma}{\psi}\right)^{\alpha-1} \cdot exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\psi}\right)^{\alpha}\right], \tag{1}$$

przy czym: α – parametr kształtu,
ψ – parametr skali.

Dystrybuanta wyrażona jest wzorem:

$$P_d = 1 - exp\left[-\left(\frac{x}{\psi}\right)^{\alpha}\right]. \tag{2}$$

Dystrybuantę rozkładu Weibulla należy potraktować jako prawdopodobieństwo wykrycia celu w funkcji odległości. W tym wypadku zmienna x jest stosunkiem sygnału/szumu wyrażonym wzorem:

$$x = \frac{P_o}{P_z + P_{omin}}, \tag{3}$$

przy czym:

P_o – moc sygnału użytecznego odebrana przez radar [W],
$P_{o\,\min}$ – czułość odbiornika [W],
P_z – moc sygnału zakłóceń [W].

Po uwzględnieniu zysków i strat sygnału można zależność (3) przekształcić do postaci:

$$P_o = \frac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma \Theta_a f_p}{(4\pi)^3 6 \eta_a L r^4} \cdot F^4, \tag{4}$$

przy czym:

F – współczynnik interferencji F [bezwymiarowy],
G – zysk antenowy [bezwymiarowy],
λ – długość fali [m],
Θ_a – szerokość listka głównego charakterystyki promieniowania, anteny radaru w płaszczyźnie poziomej [rad],
f_p – częstotliwość powtarzania [Hz],
η_a – prędkość obrotowa anteny [rad/s],
L – współczynnik zysków i strat [bezwymiarowy].

Moc sygnałów zakłóceń P_z jest sumą wszystkich sygnałów zakłócających i można określić ją wzorem:

$$P_z = P_m + P_{ra} + P_j + P_{o\min}, \tag{5}$$

przy czym:

P_m – moc sygnału zakłóceń od powierzchni morza [W],
P_{ra} – moc sygnału zakłóceń opadów atmosferycznych [W],
P_j – moc sygnału zakłóceń aktywnych [W].

Dla badań uwzględniających jedynie wpływ zakłóceń od powierzchni morza P_m zależność (5) przyjmie postać:

$$P_z = P_m + P_{o\min}. \tag{6}$$

Zmienna P_m jest wypadkową P_{m1} i P_{m2}, którą można obliczyć z następującej zależności:

$$P_m = \frac{P_{m1} \cdot P_{m2}}{P_{m1} + P_{m2}}. \tag{7}$$

Po odpowiednich podstawieniach i przekształceniach otrzymuje się zależność:

$$P_m = \frac{3P_i G^2 \lambda^2 \Theta_a c \tau \sigma_{os} R_T^4}{(4\pi)^3 r^3 \left(r^4 + R_T^4\right)}, \tag{8}$$

przy czym:

c – prędkość światła [m/s],

σ_{os} – jednostkowa powierzchnia odbijająca powierzchni morza [bezwymiarowa].

Po odpowiednich podstawieniach i przekształceniach uzyskuje się:

$$P_z = \frac{3P_i G^2 \lambda^2 \Theta_a c \tau \sigma_{os} R_T^4}{(4\pi)^3 r^3 \left(r^4 + R_T^4\right)} + mF_s kT\Delta f. \tag{9}$$

Po podstawieniu do (9) wszystkich niezbędnych zmiennych i ich rozwinięciu otrzymuje się zależność na stosunek sygnał/szum:

$$x = \frac{\dfrac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma \Theta_a f_p}{(4\pi)^3 6\eta_a L r^4} \cdot F^4}{\dfrac{3P_i G^2 \lambda^2 \Theta_a c \tau \sigma_{os} R_T^4}{(4\pi)^3 r^3 \left(r^4 + R_T^4\right)} + mF_s kT\Delta f}. \tag{10}$$

Po tych przekształceniach uzyskuje się końcową postać zależności opisującej prawdopodobieństwo wykrycia małego obiektu pływającego o skutecznej powierzchni odbicia mniejszej od 10 m^2, jako opis prawdopodobieństwa wykrycia modelu SFO:

$$P_d = 1 - exp\left[-\left(\frac{\dfrac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma \Theta_a f_p}{(4\pi)^3 6\eta_a L r^4 \psi} \cdot F^4}{\dfrac{3P_i G^2 \lambda^2 \Theta_a c \tau \sigma_{os} R_T^4}{(4\pi)^3 r^3 \left(r^4 + R_T^4\right)} + mF_s kT\Delta f}\right)\right], \tag{11}$$

przy czym:

m – współczynnik widzialności [bezwymiarowy],

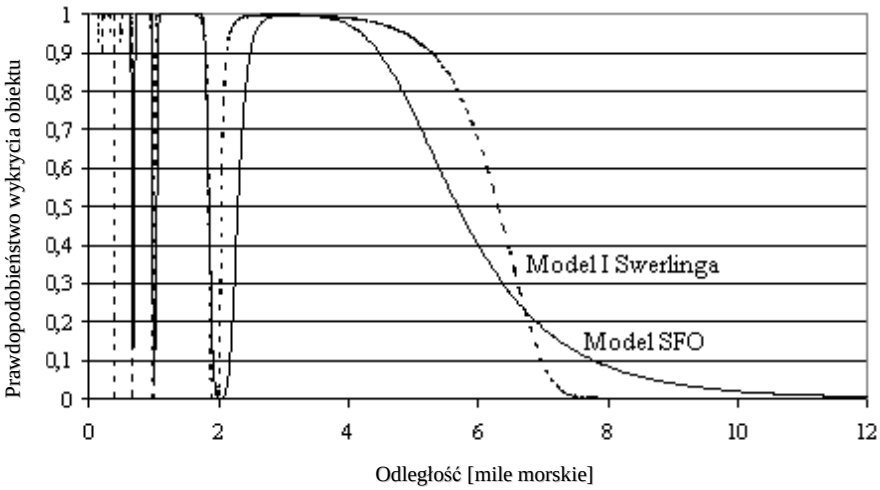
k – stała Boltzmana,

Δf – pasmo przenoszenia odbiornika radarowego.

4. ANALIZA PORÓWNAWCZA MODELU SFO IDENTYFIKACJI MAŁEGO OBIEKTU PŁYWAJĄCEGO

Obliczenia prawdopodobieństwa wykrycia małego obiektu pływającego P_d przeprowadzono dla nowego modelu SFO i porównano z obliczeniami dla I modelu Swerlinga. Przyjęto, że wysokość instalacji anteny radaru wynosi 15 m npm, a reflektor zainstalowano na wysokości 4 m npm. Wysokość ta jest najniższą wysokością montażu reflektora dopuszczaną przez Polską Normę [6], a więc najmniej korzystna.

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki prawdopodobieństwa wykrycia obiektu w funkcji odległości dla stanu morza 0.



Rys. 5. Prawdopodobieństwo wykrycia reflektora Mobri M2 dla stanu morza 0

Z analizy wykresów przedstawionych na rysunku 5 wynika, że przy stanie morza 0 dla I modelu fluktuacyjnego Swerlinga już w niewielkich odległościach widoczne są strefy zaniku, z czego w odległości 0,4 mili występuje bardzo głęboka strefa, w której P_d maleje do wartości bliskiej zera. Tak duży spadek wartości P_d sugeruje, że na tej odległości nastąpi zanik echa na ekranie radaru i zostanie zerwany proces śledzenia przez układ ARPA. Dla modelu SFO pierwsze znaczące spadki wartości P_d pojawiają się na odległości 0,6 i 1,0 mili morskiej. W tych samych odległościach pojawiają się równie głębokie strefy zaniku dla I modelu Swerlinga. Oznacza to, że na tych odległościach oba badane modele wskazują na występowanie stref zaniku i możliwość zerwania procesu śledzenia przez ARPA.

Kolejna dla obu modeli głęboka strefa zaniku znajduje się w odległości 1,9 mili morskiej. Jednak w tym wypadku strefa zaniku dla modelu SFO jest dwukrotnie szersza niż dla I modelu Swerlinga.

W odległości 2,0 do 6,3 mili morskiej dla I modelu Swerlinga występuje szeroka strefa, w której $P_d > 0{,}5$. Nieco węższa jest strefa dla modelu SFO. Strefa, w której $P_d > 0{,}5$, mieści się wówczas w zakresie 2,3 do 5,7 mili morskiej. Obie strefy wyznaczają zakres odległości, w którym wykrycie obiektu ma decydujące znaczenie z punktu widzenia bezpieczeństwa żeglugi. Porównanie prawdopodobieństw wykrycia dla I modelu Swerlinga z modelem SFO wykazuje, że w stosując I model Swerlinga, uzyskujemy wynik sugerujący, że sygnał echa reflektora będzie wykrywany z większym prawdopodobieństwem i w większej odległości niż w wypadku zastosowania modelu SFO. Jednak na podstawie badań w warunkach rzeczywistych można uznać, że zastosowanie modelu SFO pozwala na uzyskanie wyników bardziej zbliżonych do rzeczywistości [4, 5].

5. WNIOSKI

Uzyskane wyniki pozwalają na założenie, że opracowany fluktuacyjny model SFO z rozkładem Weibulla może być stosowany do analitycznych obliczeń prawdopodobieństwa wykrycia małych obiektów nawodnych o skutecznej powierzchni odbicia $\sigma < 10\ \mathrm{m}^2$.

Model SFO pozwala na:

- bardziej precyzyjne określenie jakości wykrycia małych jednostek pływających niż dotychczas stosowane modele klasyczne i może mieć różnorodne zastosowania praktyczne,
- wykorzystanie do określania jakości wykrycia małych jednostek pływających przez radary nawigacyjne instalowane na konkretnym statku lub okręcie, umożliwiając załodze statku poznanie możliwości wykrywczych własnych urządzeń radiolokacyjnych – ma to bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo żeglugi,
- precyzyjne planowanie osłony radiolokacyjnej wybranych akwenów morskich, wybrzeża lub konkretnych jednostek pływających,
- wykorzystywanie do analizy przez Izby Morskie i do celów szkoleniowych sytuacji radiolokacyjnych występujących podczas kolizji morskich lub sytuacji nadmiernego zbliżenia.

LITERATURA

1. Balicki A., Mamać W., *Metody wnioskowania statystycznego,* Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2000.
2. Harre I., *Statistical Properties of RCS*, German Navy Workshop, Eckernförde 2003.

3. Huizing A.G., Theil A., *CARPET Version 2.11 Computer-Aided Radar Performance Evaluation Tool,* Developed at the TNO Physics and Electronics Laboratory 2003.
4. Lisowski J., *Komputerowe wspomaganie nawigatora z wykorzystaniem informacji z systemu ARPA,* Przegląd Telekomunikacyjny, 2007, nr 12.
5. Lisowski J., Małecki J., Żak B., *Radar nawigacyjny w okrętowych systemach nawigacyjnych wykorzystujących sieci neuronowe,* X Konferencja Naukowa „Sterowanie i regulacja w radiolokacji i obiektach latających", Jelenia Góra 1999.
6. Long M.W., *Radar Reflectivity of Land and Sea,* third edition, Artech House, Boston Londyn 2001.
7. *PN-EN ISO 8729:1999 Statki i technika morska – Morskie reflektory radarowe*, Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa 2004.
8. Skolnik M., *Radar Handbook, Third Edition,* McGRAW-HILL International Editions Professional Publishing, January 22, 2008.
9. Swerling P., *Coherence and Noncoherence in Radar Signature Analysis*, The RAND Corporation, Santa Monika 1967.
10. Szklarski A., *Radiolokacyjna wykrywalność biernych reflektorów radarowych na małych pływających jednostkach morskich*, rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2009.

THE SYNTHESIS OF FLUCTUATIONAL MODEL OF SMALL FLOATING OBJECTS IDENTIFICATION BY MEANS OF PASSIVE RADAR REFLECTORS

Summary

The paper presents the issues related to the probability of surface objects detection. The classical fluctuation models and the new fluctuation model for small floating objects with 10m2 radar cross section surface are described. The possibilities of detection of examined passive radar reflectors by the radars on board merchant vessels were determined. Probability of detection of passive radar reflectors calculated using the classical fluctuation models was compared with the results obtained using the proposed new fluctuation model.