

**Janusz Marszałkowski**  
**Akademia Marynarki Wojennej**

## **SYMULACYJNA METODA BADANIA MOŻLIWOŚCI MORSKIEGO RADARU NAWIGACYJNEGO**

### **STRESZCZENIE**

W artykule zawarto teoretyczne podstawy opisujące zależności między wybranymi parametrami technicznymi morskiego radaru nawigacyjnego a jego maksymalnym zasięgiem wykrywania w zmiennych warunkach hydrometeorologicznych. Przedstawione rozważania stanowią podstawę do budowy stanowiska umożliwiającego symulacyjne badanie zasięgów wykrywania obiektów na morzu. Artykuł jest prezentacją części wyników badań realizowanych w ramach projektu badawczego pt. „Automatyczny proces wyznaczania pozycji jednostki pływającej z wykorzystaniem metod nawigacji radarowej” finansowanego ze środków MNiSW na naukę w latach 2007–2010.

#### Słowa kluczowe:

bezzałogowe aparaty latające, siły morskie, przemysł.

### **WSTĘP**

Radar nawigacyjny eksploatowany na jednostkach pływających przeznaczony jest do wykrywania obiektów nawodnych i lądowych, określania współrzędnych ich położenia oraz w coraz większym zakresie realizowania funkcji antykolizyjnych. Istotną staje się również możliwość wykorzystania radaru obserwacji nawodnej do prowadzenia akcji ratowniczych związanych z poszukiwaniem rozbitków na morzu i naprowadzaniem pomocy (w ramach systemu GMDSS). Wyznaczanie współrzędnych położenia rozbitków w takiej sytuacji może odbywać się w oparciu o metody:

- aktywną z aktywną odpowiedzią — radar staje się odbiornikiem i interpretatorem impulsów elektromagnetycznych wysyłanych przez nadajnik zestawu ratowniczego rozbitków (transpondera radarowego) wyzwalanego impulsami sondującymi radaru;
- aktywną z pasywną odpowiedzią — radar wysyła i odbiera własne impulsy odbite od kadłubów (ich pozostałości) uczestniczących w katastrofie jednostek pływających i reflektorów radarowych, w jakie powinny być wyposażone łodzie i tratwy ratownicze.

Charakter oddziaływania i zmian właściwości fizycznych większości czynników składających się na morskie środowisko jest fluktuacyjny, niezdeterminowany, losowy. W konsekwencji powoduje to zmianę warunków propagacji fal radiowych (tłumienie sygnałów) i powstawanie zakłóceń typu biernego. Sygnał zakłócający łącznie z sygnałem użytecznym odbitym od wykrywanego obiektu oddziałuje na wejście odbiornika radaru. Rezultatem takiego działania jest zwiększenie się poziomu szumów własnych odbiornika, tym samym zmniejszenie jego zdolności detekcyjnych.

Celem zawartych w artykule rozważań jest przedstawienie założeń symulacyjnej metody określenia wpływu czynników związanych z technicznymi parametrami radaru nawigacyjnego i warunkami prowadzenia radiolokacyjnej obserwacji na jego maksymalną odległość wykrywania w funkcji prawdopodobieństwa wykrycia dla przypadku metody aktywnej z pasywną odpowiedzią.

### SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO

Istotne staje się uzyskanie pełnych charakterystyk związanych z możliwościami detekcyjnymi radaru nawigacyjnego w różnych warunkach radiolokacyjnej obserwacji (warunki hydrometeorologiczne). Takie charakterystyki powinny uwzględniać zależność między odległością wykrycia a prawdopodobieństwem ( $P_w$ ) wykrycia obiektu nawodnego liczonego dla określonej liczby obrotów anteny (oświetleń obiektu). Za maksymalny zasięg wykrycia danego obiektu powinno się przyjąć odległość, dla której prawdopodobieństwo wykrycia (dla ustalonej liczby obrotów anteny) przekroczy zadaną wartość (np.  $P_{zad} = 0.6$ ), przy założeniu że na  $m$  oświetleń obiektu nastąpi  $k$  jego wykryć. Konieczne staje się określenie prawdopodobieństwa wykrycia w czasie jednego oświetlenia wykrywanego obiektu  $P_{poj}$  zdarzenia polegającego na tym, że moc odebranego (odbitego) sygnału przekroczy próg porównania w odbiorniku radaru (po wzmocnieniu), oddzielnie dla każdego opromieniowania.

## ROZWIĄZANIE PROBLEMU

Dla oceny prawdopodobieństwa  $P_{poj}$  założymy, że odbiornik radaru wyposażony jest w kwadratowy detektor (optymalne rozwiązanie dla odbioru słabych sygnałów) i na jego wejście przychodzą niekoherentne paczki echosygnatów (odbitych od wykrywanego obiektu). Przy takich założeniach prawdopodobieństwo  $P_{poj}$  za czas jednego oświetlenia obiektu nawodnego możemy wyznaczyć z zależności [4]:

$$P_{poj} = \left( \frac{l \cdot q + 1}{l \cdot q} \right)^{l-1} \cdot \exp\left( -\frac{y_0}{l \cdot q + 1} \right), \quad (1)$$

gdzie:  $l$  — liczba impulsów odebranych w czasie jednego oświetlenia obiektu;  
 $q$  — współczynnik wyróżnialności;  
 $y_0$  — unormowany próg porównania mocy dla określonego poziomu prawdopodobieństwa fałszywego alarmu i określonej liczby impulsów  $l$  (wyznaczony z tablic J. Pacharesa).

W celu obiektywizacji danych wynikowych obszar zjawisk podlegających badaniu powinno się poszerzyć o tłumiące i zakłócające oddziaływanie otoczenia. W modelu symulacyjnym uwzględnia się więc zbiór zjawisk związanych z fizycznymi właściwościami toru propagacji, istotnego dla zakresu mikrofalowego, oraz ich wpływ na zasięgi wykrywania radaru. Proponuje się opisywać stan otoczenia za pomocą dwóch niżej zdefiniowanych wielkości:

$sa$  — parametr opisujący aktualny stan atmosfery; jego wartość zależy od faktu występowania opadów oraz ich rodzaju i intensywności;  
 $sm$  — parametr opisujący aktualny stan morza w rejonie obserwacji.

Założono, że wielkość  $sa$  może przyjmować wartości takie, jak pokazano niżej:

$$sa = \begin{cases} 0 & \text{— atmosfera bez hydroopadów (tlen + para wodna),} \\ 1 & \text{— deszcz o małej intensywności 4 mm/godz. lub mgła} \\ & \text{o widoczności do 200 m,} \\ 2 & \text{— deszcz o średniej intensywności 8 mm/godz. lub mgła} \\ & \text{o widoczności do 100 m,} \\ 3 & \text{— deszcz o dużej intensywności 16 mm/godz. lub mgła} \\ & \text{o widoczności do 30 m.} \end{cases}$$

Poszczególne stany atmosfery charakteryzowane są przez odpowiednie współczynniki tłumienia oraz jednostkową skuteczną powierzchnię odbicia hydroopadów. Parametrem charakteryzującym stan morza jest jednostkowa skuteczna powierzchnia odbicia fali morskiej w funkcji rodzaju falowania.

Zasięg  $R$  wykrywania obiektu nawodnego o skutecznej powierzchni odbicia  $\sigma_c$  przez radar z uwzględnieniem wybranych parametrów technicznych radaru i właściwości otoczenia określa się z zależności [7]:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_i \cdot G_{\max}^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_c}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot q \cdot P_o \cdot L}} \cdot K_{osl} \cdot f(\rho, R) \cdot f(sz) \cdot Fe(\Theta), \quad (2)$$

- gdzie:  $P_i$  — moc impulsowa nadajnika;  
 $P_o$  — moc progowa (czułość) odbiornika radaru;  
 $q$  — współczynnik wyróżnialności rozumiany jako kontrast odebranego sygnału użytecznego na tle szumów i zakłóceń na wyjściu odbiornika radaru;  
 $G_{\max}$  — maksymalna wartość zysku kierunkowego anteny;  
 $\lambda$  — długość fali roboczej;  
 $\sigma_c$  — skuteczna powierzchnia odbicia wykrywanego obiektu;  
 $K_{osl}$  — współczynnik osłabienia — funkcja określająca wpływ sferycznej powierzchni morza i refrakcji na rozchodzenie się fal elektromagnetycznych w troposferze;  
 $f(\rho, R)$  — funkcja uwzględniająca tłumienie (osłabienie mocy) sygnału użytecznego (odbitego) w czystej atmosferze, w hydroopadach;  
 $f(sz)$  — funkcja uwzględniająca sumaryczne zakłócenia wprowadzane przez odbicia mikrofal od powierzchni morza, hydroopadów;  
 $Fe(\Theta)$  — napięciowa unormowana charakterystyka kierunkowa anteny radaru;  
 $L$  — współczynnik strat energii w liniach przesyłowych radaru.

Przy założeniu że warunkiem koniecznym wykrycia sygnału odbitego od wykrywanego obiektu przez detektory odbiornika radaru jest to, aby moc tego sygnału była co najmniej równa sumarycznej mocy szumów i zakłóceń na wyjściu odbiornika ( $q = 1$ ), wyznaczymy odpowiadającą temu zdarzeniu odległość położenia obiektu nawodnego od radaru, oznaczoną przez  $Runor$  (unormowana odległość odniesienia):

$$Runor = \sqrt[4]{\frac{P_i \cdot G_{\max}^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_c}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot P_o \cdot L}} \cdot K_{osl} \cdot f(\rho, R) \cdot f(sz) \cdot Fe(\Theta). \quad (3)$$

Jak wynika z powyższej zależności, każdemu położeniu obiektu nawodnego ( $R$ ) względem radaru odpowiada unormowana odległość odniesienia  $Runor$ . Podstawiając do zależności (2) oznaczenie  $Runor$  z zależności (3), za wspólne czynniki otrzymamy:

$$R = Runor(q)^{-1/4}, \text{ skąd } q = \left( \frac{Runor}{R} \right)^4. \quad (4)$$

Do wyznaczenia  $Runor$ ,  $q$ ,  $Ppoj$  niezbędne jest obliczenie poniżej przedstawionych wielkości:

— zasięgu energetycznego radaru wg zależności:

$$Re\ ner = \sqrt[4]{\frac{Pi \cdot G \max^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma c}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot Po}}; \quad (5)$$

— liczby impulsów w paczce:  $l = \frac{\Theta_\alpha \cdot Fp}{\Omega}$ ,

gdzie:  $\Theta_\alpha$  — szerokość charakterystyki anteny w płaszczyźnie poziomej;

$Fp$  — częstotliwość powtarzania impulsów sondujących;

$\Omega$  — prędkość kątowna anteny;

— skali wysokości  $Hx = 0.5 \cdot \sqrt[3]{\frac{Re \cdot \lambda^2}{\pi^2}}$ ;

— skali odległości  $Lx = \sqrt{2 \cdot Re \cdot Hx}$ ;

— unormowanej wysokości zainstalowania anteny radaru  $Y = ha / Hx$ ;

— unormowanej odległości do horyzontu radiolokacyjnego  $xo = \sqrt{Y}$ ;

— odległości do horyzontu radiolokacyjnego  $Ro = xo \cdot Lx$ .

Ponadto wykorzystując stosowne zależności zawarte w [4] i [7], należy wyliczyć:

— unormowaną charakterystykę napięciową radaru  $Fe(\Theta)$ ;

— odległość do górnej granicy strefy interferencyjnej  $Rin$ ;

— współczynnik osłabienia  $Kosl$  — w strefie oświetlonej, cienia i półcienia;

— osłabienie fal elektromagnetycznych w troposferze  $f(\rho, R)$ ;

— moc sygnałów zakłócających powstałych na skutek:

- odbicia od fal morskich,
- odbicia od hydroopadów.

Proponuje się na podstawie wartości prawdopodobieństwa  $P_{poj}$  dla każdego obrotu anteny ustalać fakt pojawienia się lub nie echa na ekranie wskaźnika radaru. Tworzony jest ciąg liczb 0 i 1, gdzie 1 odpowiada zdarzeniu pojawienia się echa wykrywanego obiektu na ekranie wskaźnika (gdy  $P_{poj} \geq P_{zad}$  dla danego oświetlenia), natomiast 0 — zdarzeniu niepojawienia się echa celu na ekranie wskaźnika (gdy  $P_{poj} < P_{zad}$  dla danego oświetlenia).

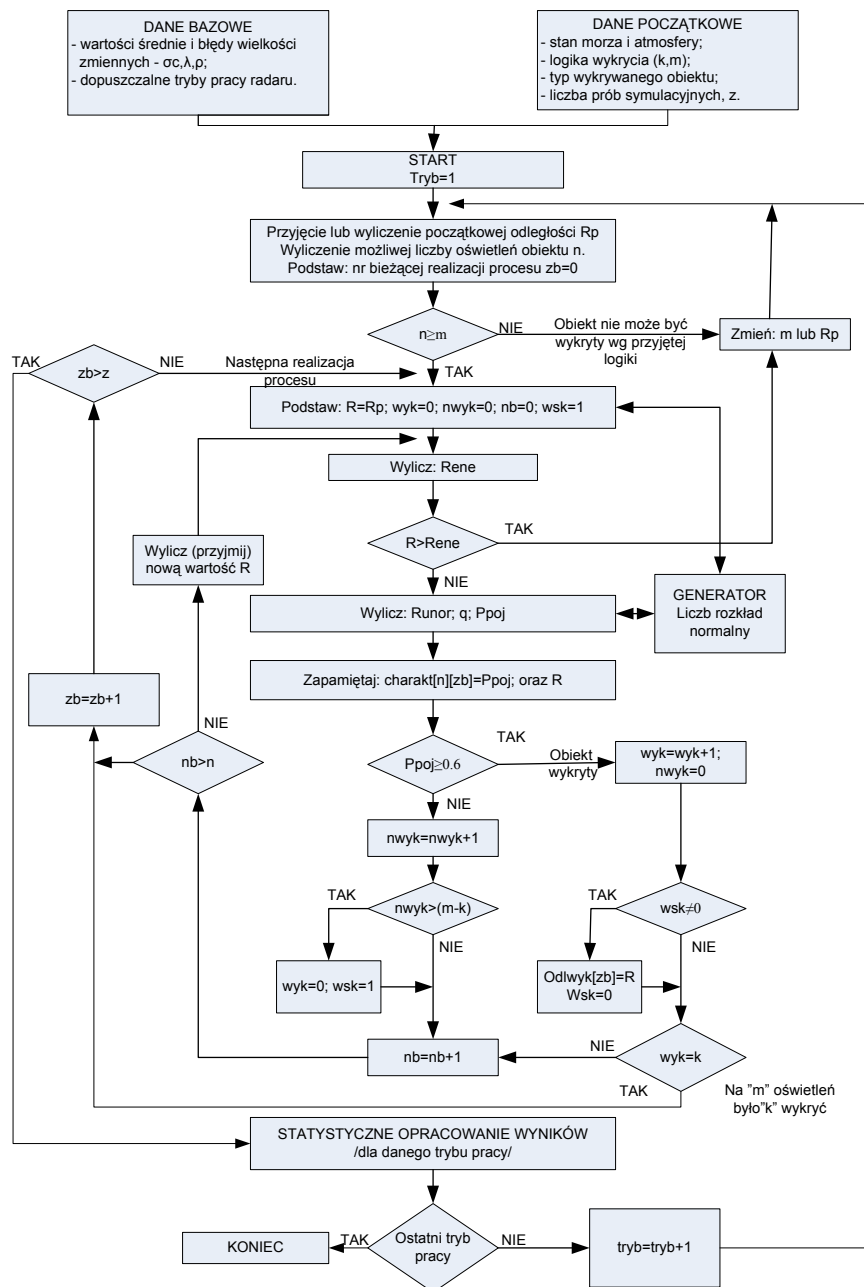
Dla każdego przypadku pojawienia się echa na ekranie wskaźnika odnotowywana jest (i zapamiętana) odpowiadająca odległość  $R$  wykrywanego obiektu od radaru. Wyniki (odległości wykrycia  $R$ ) otrzymane z badań symulacyjnych traktowane są jako z niezależnych obserwacji (z eksperymentów symulacyjnych) mających jednakowy rozkład zmiennych losowych. Uporządkowany szereg rozkładu może być poddany obróbce statystycznej, w ramach której mogą być obliczone podstawowe estymatory rozkładu: wartość średnia odległości wykrycia (wartość oczekiwana), wariancja oraz standardowe odchylenie.

Do określenia wpływu morskiego środowiska na zasięg wykrywania obiektów nawodnych wykorzystano autorski program realizujący procedury zawarte w algorytmie modelu symulacyjnego, a realizacja procesu symulacji przebiegała według następującego schematu:

- ustalono:
  - parametry techniczne radaru nawigacyjnego (możliwe, dopuszczalne warianty ustawień parametrów technicznych — tryby pracy),
  - logikę wykrycia określającą liczbę pojedynczych wykryć przy zadanej liczbie kolejnych (następujących po sobie) oświetleń wykrywanego obiektu;
- zmieniano według zadanych rozkładów:
  - wielkości charakteryzujące stan morza i atmosfery,
  - wielkości opisujące propagację mikrofal,
  - zmianę skutecznej powierzchni rozproszenia wykrywanego obiektu;
- określano:
  - charakter zmian prawdopodobieństwa wykrycia obiektu w funkcji jego odległości od radaru.

Istotnymi danymi wejściowymi prezentowanej metody badań są parametry określające logikę wykrywania. Dla przedstawionych poniżej przykładowych wyników badań przyjęto  $m = 3$  i  $k = 2$ , co oznacza, że obiekt uznaje się za wykryty, jeśli na  $m = 3$  jego kolejne oświetlenia wystąpiło  $k = 2$  razy zdarzenie polegające na osiągnięciu przez prawdopodobieństwo wykrycia wartości zadanej.

Na rysunku 1. przedstawiony został algorytm, w oparciu o który funkcjonuje model symulacyjny. Stanowi on również podstawę do realizacji aplikacji komputerowej.



Rys. 1. Algorytm symulacyjnego modelu wyznaczania charakterystyk zasięgowych radaru:

*Rp* — przyjęta do obliczeń początkowa odległość położenia wykrywanego obiektu od radaru;

*Tryb* — numer trybu pracy radaru dla którego wykonywane są obliczenia;

*n*, *nwyk*, *wsk*, *wyk*, *nb*, *zb* — wskaźniki (liczby całkowite) umożliwiające bieżącą realizację procesu symulacji

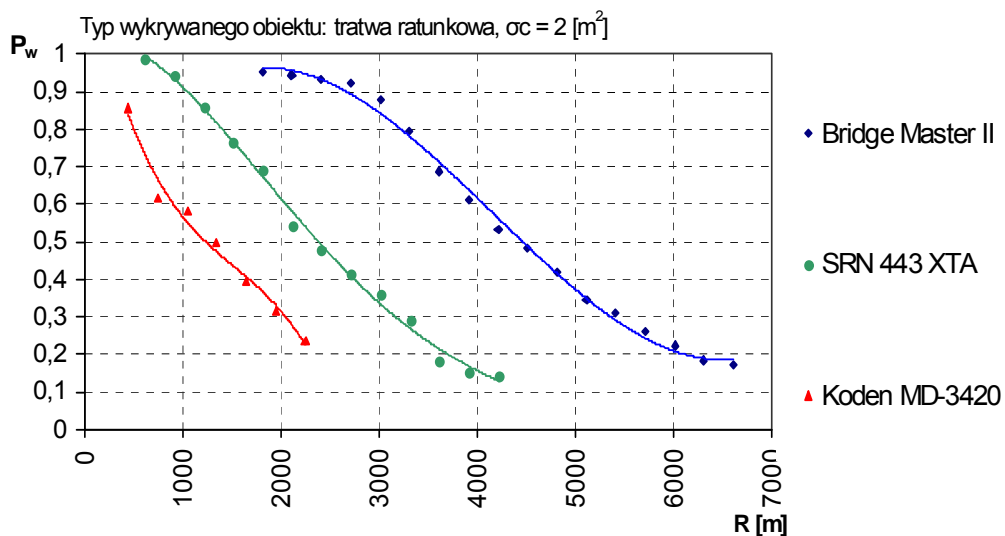
## Dwa przykłady obliczeń dla radaru Bridge Master II

Typ wykrywanego obiektu — reflektor radarowy, wartość średnia $\sigma = 10 \text{ [m}^2\text{]}$							
WARUNKI OTOCZENIA — ŚRODOWISKA							
Stan morza 0 Stan atmosfery 0		Stan morza 3 Stan atmosfery 0		Stan morza 6 Stan atmosfery 1		Stan morza 9 Stan atmosfery 2	
R[m]	$P_w$	R[m]	$P_w$	R[m]	$P_w$	R[m]	$P_w$
11852.1	0.154	10613.8	0.243	8551.7	0.199	6124.3	0.176
11552.1	0.189	10313.8	0.295	8251.7	0.128	5824.3	0.255
11252.1	0.195	10013.8	0.374	7951.7	0.143	5524.3	0.294
10952.1	0.265	9713.8	0.491	7651.7	0.336	5224.3	0.378
10652.1	0.436	9413.8	0.561	7351.7	0.411	4924.3	0.415
10352.1	0.498	9113.8	0.686	7051.7	0.482	4624.3	0.499
10052.1	0.562	8813.8	0.790	6751.7	0.567	4324.3	0.554
9752.1	0.744	8513.8	0.853	6451.7	0.675	4024.3	0.635
9452.1	0.867	8213.8	0.920	6151.7	0.687	3724.3	0.744
9152.1	0.898	7913.8	0.954	5851.7	0.772	3424.3	0.827
8852.1	0.970	7613.8	0.968	5551.7	0.796	3124.3	0.845
8552.1	0.974	7313.8	0.972	5251.7	0.865	2824.3	0.895
8252.1	0.985	7113.8	0.984	4951.7	0.955	2524.3	0.945
7952.1	0.991	6813.8	0.988	4651.7	0.967	2224.3	0.976
7652.1	0.992	6513.8	0.990	4351.7	0.987	1924.3	0.987
7352.1	0.996	6213.8	0.991	4351.7	0.991		
7052.1	0.998	5913.8	0.992				
MAKSYMALNY ZASIĘG WYKRYCIA							
10052 m		9413 m		6751 m		4324 m	

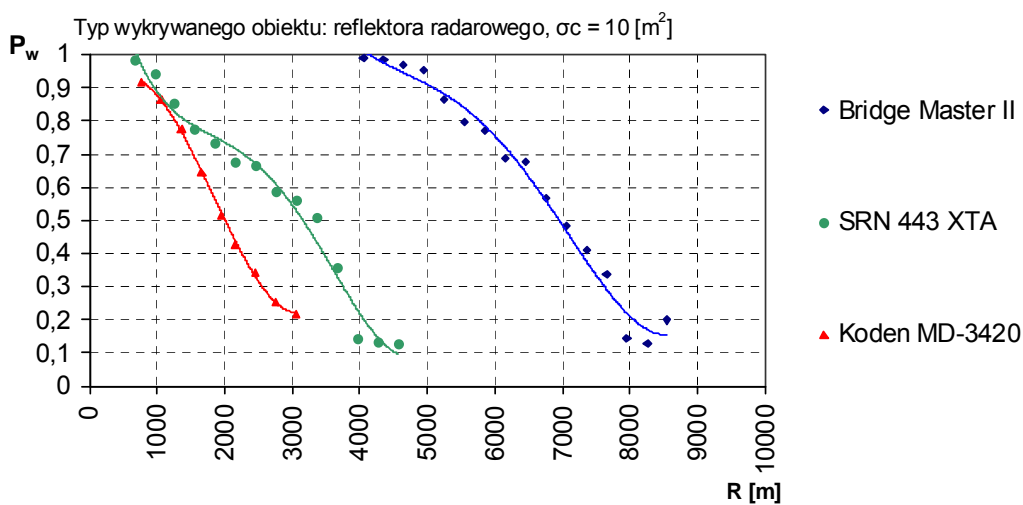
Typ wykrywanego obiektu — tratwa ratunkowa, wartość średnia $\sigma = 2 \text{ [m}^2\text{]}$							
WARUNKI OTOCZENIA — ŚRODOWISKA							
Stan morza 0 Stan atmosfery 0		Stan morza 3 Stan atmosfery 0		Stan morza 6 Stan atmosfery 1		Stan morza 9 Stan atmosfery 2	
R[m]	$P_w$	R[m]	$P_w$	R[m]	$P_w$	R[m]	$P_w$
7122.3	0.163	6612.4	0.173	4365.7	0.132	3574.1	0.145
6822.3	0.189	6312.4	0.185	4065.7	0.193	3274.1	0.231
6522.3	0.262	6012.4	0.224	3765.7	0.243	2974.1	0.355
6222.3	0.305	5712.4	0.261	3465.7	0.256	2674.1	0.391
5922.3	0.336	5412.4	0.311	3165.7	0.372	2374.1	0.425
5622.3	0.381	5112.4	0.346	2865.7	0.445	2074.1	0.489
5322.3	0.462	4812.4	0.420	2565.7	0.489	1774.1	0.534
5122.3	0.534	4512.4	0.483	2265.7	0.526	1474.1	0.599
4822.3	0.593	4212.4	0.531	1965.7	0.648	1174.1	0.679
4522.3	0.648	3912.4	0.614	1665.7	0.752	874.1	0.865
4222.3	0.760	3612.4	0.688	1365.7	0.846		
3922.3	0.824	3312.4	0.793	1065.7	0.899		
3622.3	0.885	3012.4	0.878				
3322.3	0.945	2712.4	0.921				
3022.3	0.965	2412.4	0.934				
2722.3	0.972	2112.4	0.945				
2422.3	0.989	1812.4	0.951				
MAKSYMALNY ZASIĘG WYKRYCIA							
5122 m		4212 m		2265 m		1774 m	



W celu lepszego przedstawienia danych uzyskanych z symulacji można posłużyć się wykresami ułatwiającymi porównanie możliwości kilku radarów, tak jak pokazano to poniżej.



Rys. 2. Porównanie charakterystyk wykrywania dla: stanu morza 3 i stanu atmosfery 0



Rys. 3. Porównanie charakterystyk wykrywania dla: stanu morza 6 i stanu atmosfery 1

## PODSUMOWANIE

Problem znajomości i prawidłowej interpretacji możliwości morskiego radaru nawigacyjnego można rozpatrywać w dwóch aspektach:

- po pierwsze w odniesieniu do potrzeby opracowywania przez potencjalnego użytkownika sprzętu radarowego wymagań taktyczno-technicznych dla producentów urządzeń przyszłościowych, projektowanych zgodnie z rozwojem nowych technologii;
- po drugie w aspekcie optymalnego wykorzystania możliwości radaru nawigacyjnego eksploatowanego w różnych, często zmiennych warunkach hydrometeorologicznych.

Prezentowana w artykule metoda badania możliwości morskiego radaru nawigacyjnego w szerszym aspekcie może być wykorzystana jako element symulacyjnego modelu określania i analizowania obszarów radiolokacyjnego pokrycia w systemie obserwacji technicznej MW czy cywilnego systemu monitorowania ruchu jednostek pływających.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Barton D. K., Leonov S. A., editors, *Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition)*, Artech House Inc., 1998.
- [2] Curry R. G., *Radar system performance modelling. Second edition*, Artech House Inc., 2005.
- [3] Hamish M., *Modern radar systems*, Artech House Inc., 2001.
- [4] Hrynkiewicz E., *Metodyka oceny odległości wykrywania celów powietrznych i nawodnych stacjami radiolokacyjnymi*, WSMW, Gdynia 1980.
- [5] Knott E. F., Schaeffer J. F., Tuley M. T., *Radar Cross Section. Second edition*, SciTech Publishing, 2004.
- [6] Mahafza B. R., *Radar systems analysis and design using Matlab*, Chapman & Hall /CRC, 2000.
- [7] Marszałkowski J., *Radiolokacja morska, cz. I, Możliwości taktyczno-techniczne morskiej techniki radiolokacyjnej*, AMW, Gdynia 2004.
- [8] Marszałkowski J., *Wpływ falowania morza na zasięgi wykrycia morskich radarów nawigacyjnych*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 1999, nr 1.

- [9] Marszałkowski J., Sobczyk J., *Użytkowanie morskich radarów nawigacyjnych*, AMW, Gdynia 2000.
- [10] Skolnik M. I., *Introduction to radar systems. International edition*, McGraw-Hill, 1981.
- [11] Skolnik M. I., *Radar handbook. Second edition*, McGraw-Hill, 1990.
- [12] Baganz D., Hanses H-D., *Stealth Technologie. Beim einwurf von Marineuberwasserschiffen am Beispiel der Radar-Signatur*, „Soldat Und Technik”, 1993, Nr 5.
- [13] Yamada N., *Radar Cross Section for Pedestrian in 76 GHz Band*, R&D „Review of Toyota CRDL”, 2004, Vol. 39, No 4.

#### Źródła elektroniczne

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Anechoic\\_chamber\\_wall.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Anechoic_chamber_wall.jpg) (marzec 2008).
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Near\\_and\\_far\\_field](http://en.wikipedia.org/wiki/Near_and_far_field) (kwiecień 2008).
- [3] <https://my.garmin.com/shop/store/assets/images/products/010-00363-00/en/rf-lg.jpg> (marzec 2008).
- [4] <http://panasonic.pl/images/products/mid/aw-ph600aw-ch600.gif> (marzec 2008).
- [5] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Radar> (luty 2008).
- [6] [http://www.raytheon.com/capabilities/products/stellent/groups/public/documents/image/cms04\\_019464.jpg](http://www.raytheon.com/capabilities/products/stellent/groups/public/documents/image/cms04_019464.jpg) (luty 2008).
- [7] [http://www.raytheon.com/capabilities/products/stellent/groups/public/documents/image/cms04\\_019531.jpg](http://www.raytheon.com/capabilities/products/stellent/groups/public/documents/image/cms04_019531.jpg) (luty 2008).

### **ABSTRACT**

The paper describes theoretical fundamentals of interdependence between some technical parameters of a navigational radar and its maximum detection range under changing weather conditions. The analyses form a base for building a stand to be used to investigate the ranges of detecting objects at sea. The paper presents part of results of investigations conducted within the framework research project called 'Automatic process of fixing a vessel's position with radar navigation methods' financed by Ministry of Science and Higher Education.

Recenzent dr hab. inż. Stanisław Kołaczyński, prof. AMW