

WAWRUCH Ryszard

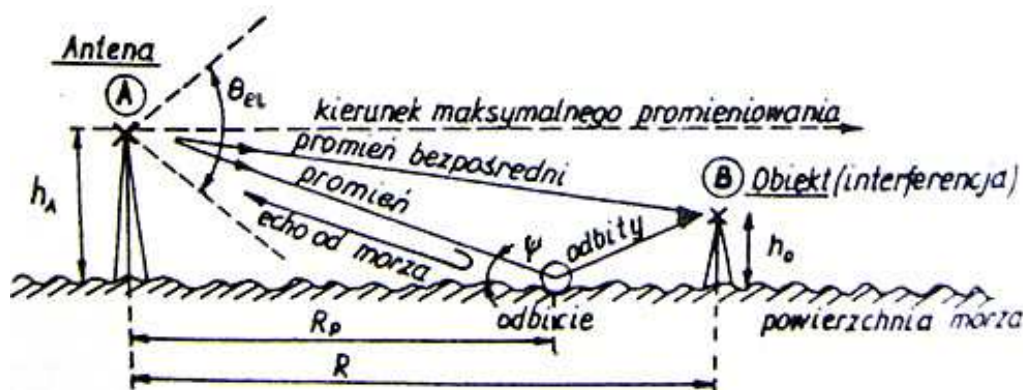
WYKORZYSTANIE PROGRAMU CARPET DO OKREŚLENIA MOŻLIWOŚCI WYKRYWCZYCH RADARU W FUNKCJI WYSOKOŚCI ANTENY RADAROWEJ I OBIEKTU

Streszczenie

W referacie przedstawiono skrótowo równania radarowe w zakresie dotyczącym radarów morskich oraz możliwości wykorzystania wersji 2 programu Carpet do demonstracji możliwości detekcyjnych tych radarów w funkcji wysokości instalacji anteny radarowej i obserwowanych obiektów oraz aktualnego stanu morza.

WSTĘP

Jednym z najistotniejszych zagadnień, które należy przedstawić w czasie szkolenia przyszłych użytkowników radarów morskich jest zależność możliwości detekcyjnych tych urządzeń od wysokości instalacji anteny radarowej, wysokości i rodzaju obiektów odbijających (obiekty punktowe, powierzchniowe i przestrzenne) oraz aktualnego stanu morza. W zależności od stanu morza, do obiektu mogą dotrzeć, oprócz impulsów bezpośrednich, również impulsy odbite od powierzchni wody, zwiększając lub obniżając prawdopodobieństwo wykrycia (rys. 1).



Rys. 1. Propagacja impulsów radarowych nad powierzchnią morza (A - antena radaru, h_A - wysokość instalacji anteny radarowej nad powierzchnią morza, B - obiekt, h_o - wysokość obiektu, θ_{el} - szerokość charakterystyki antenowej w płaszczyźnie pionowej, Ψ - kąt padania impulsów radarowych na powierzchnię morza, R - odległość między anteną radaru i obiektem, R_p - odległość między anteną radaru i punktem odbicia impulsów radarowych od powierzchni morza)

Źródło: opracowanie własne

1. RÓWNANIA RADAROWE

Przy niskich stanach morza, odbicia od powierzchni wody mają charakter lustrzany i do obiektu docierają impulsy bezpośrednie i odbite od tej powierzchni, a więc propagacja ma charakter interferencyjny. Dla danej wysokości fal morskich h_f , odbicia impulsów radarowych mają charakter odbić lustrzanych dla odległości R_L spełniających przybliżoną nierówność [3]:

$$R_L \geq 16h_f(h_A+h_o) / \lambda \quad (1)$$

gdzie:

- h_A wysokość instalacji anteny radarowej nad powierzchnią wody [m],
- h_f wysokość fal morskich [m],
- h_o wysokość nad powierzchnią wody obiektu odbijającego impulsy radarowe [m],
- R_L odległość występowania odbić lustrzanych od powierzchni wody [m],
- λ długość fali radarowej [m].

Odbicia od powierzchni wody mają charakter rozproszony, a więc propagacja jest wolnoprzestrzenna dla odległości R_W spełniających przybliżoną nierówność [3]:

$$R_W \leq 4h_f(h_A+h_o) / \lambda \quad (2)$$

gdzie:

- R_W odległość występowania odbić rozproszonych od powierzchni wody [m]

Dla wartości odległości między R_W i R_L , propagacja ma charakter mieszany.

Dla obiektów punktowych, czyli obiektów, których wymiary są mniejsze od przestrzeni zajmowanej impulsem sondującym (statki i pływające oznakowanie nawigacyjne), równanie zasięgu radaru przedstawia się zwykle w postaci [1, 2, 3]:

$$R = [P_n G S_{sk} \zeta / (4\pi)^2 P_{o\ min}]^{1/4} F \quad (3)$$

gdzie:

- F bezwymiarowy współczynnik interferencji przy obiekcie promieniowania bezpośredniego i odbitego od powierzchni wody,
- G bezwymiarowy zysk energetyczny anteny radarowej,
- P_n amplituda mocy impulsu sondującego wytworzonego przez nadajnik radarowy [W],
- $P_{o\ min}$ minimalna wartość amplitudy mocy impulsu sondującego odbitego od obiektu i odebranego przez radar, umożliwiającą wzrokowe wykrycie echa tego obiektu na zobrazowaniu radarowym [W],
- R odległość wykrycia [m],
- S_{sk} pole powierzchni skutecznej anteny radarowej [m²],
- ζ równoważna (skuteczna) powierzchnia odbicia obiektu [m²].

Współczynnik interferencji wyraża się przybliżonym wzorem [3]:

$$F \approx 2|\sin\Delta\Phi| \approx 2|\sin(2\pi h_A h_o / \lambda R)| \quad (4)$$

gdzie:

- $\Delta\Phi$ przesunięcie fazowe przy obiekcie odbijającym między impulsem przychodzącym bezpośrednio i odbitym od powierzchni wody.

Z powodu interferencji promieniowania bezpośredniego i odbitego od powierzchni wody, charakterystyka radarowa ma w płaszczyźnie pionowej charakter listkowy. Współczynnik interferencji jest funkcją trygonometryczną okresowo zmienną, przyjmującą wartości w przedziale $\langle 0, 2 \rangle$ i powoduje, w funkcji odległości, zaniki sygnału sondującego i wzmocnienia jego amplitudy. Ostatnie maksimum współczynnika interferencji występuje w odległości granicznej R_{gr} w przybliżeniu równej [3]:

$$R_{gr} \approx 4h_A h_o / \lambda \quad (5)$$

W odległościach większych od granicznej, do obserwacji obiektów nawodnych wykorzystuje się tylko dolny listek charakterystyki promieniowania radarowego w płaszczyźnie pionowej, który odchyła się od powierzchni wody o kąt α równy w przybliżeniu [3]:

$$\alpha \approx \lambda / 4h_A \quad (6)$$

Współczynnik interferencji przyjmuje dla tak dużych odległości wartość argumentu funkcji trygonometrycznej opisanej zależnością (4), a równanie radaru dla obiektów punktowych można zapisać, jako [1, 2, 3]:

$$R = [(4\pi)^2 P_n G S_{sk} (h_A h_o)^4 \zeta / \lambda^4 P_{o \min}]^{1/8} = [(4\pi)^2 P_n G S_{sk} \zeta / \lambda^4 P_{o \min}]^{1/8} (h_A h_o)^{1/2} \quad (7)$$

Równania radarowe dla obiektów innych niż punktowe różnią się przede wszystkim stopniem pierwiastka. Pierwiastki czwartego i ósmego stopnia w równaniach (3) i (7) przyjmują odpowiednio postać pierwiastków trzeciego i siódmego stopnia dla obiektów powierzchniowych oraz drugiego i szóstego stopnia dla obiektów przestrzennych.

Podsumowując powyższe rozważania na temat możliwości wykrywczych morskich radarów nawigacyjnych należy stwierdzić, że, przy pominięciu tłumienia atmosferycznego i zakłóceń hydrometeorologicznych, zależą one od:

1. Częstotliwości pracy radaru (pasmo „X” lub „S”).
2. Energii impulsów sondujących i parametrów anteny oraz wysokości jej instalacji nad powierzchnią morza.
3. Czułości odbiornika i jakości filtrów cyfrowych zastosowanych do obróbki sygnału wizyjnego (MTI, MTD i SPFA).
4. Właściwości odbijających obiektu, jego kształtu, wielkości i wysokości.
5. Stanu morza.

Duża liczba czynników wpływających na właściwości detekcyjne radarów morskich sprawia, że w czasie zajęć dydaktycznych warto wykorzystać specjalistyczne oprogramowanie w celu przedstawienia możliwości wykrycia następujących obiektów przy różnych stanach morza (np. zerowym i w warunkach sztormowych):

- a) wysokiej (skalistej) i niskiej linii brzegowej,
- b) dużego statku i małej jednostki pływającej wyposażonej w reflektor radarowy zainstalowany na minimalnej wysokości równej co najmniej 1m nad poziomem morza, na radarze zainstalowanym na:

- a) dużym statku (wysokość instalacji anteny radarowej rzędu 20-30m n.p.m.),
- b) małej jednostce pływającej (wysokość instalacji anteny radarowej rzędu 1-6m n.p.m.),
- c) lotniczej jednostce poszukiwawczo-ratowniczej lecącej, zgodnie z zaleceniami międzynarodowymi, na wysokości 1000m.

Możliwości takie stwarza program Carpet 2 opisany w rozdziale 2.

2. SYMULACJE Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU CARPET 2

Carpet (Computer Aided Radar Performance Evaluation Tool) 2 napisany przez TNO Physics and Electronics Laboratory jest rozbudowanym programem komputerowym pozwalającym na prowadzenie symulacji rozwiązań równań radarowych, związanych głównie z otaczającym środowiskiem i jego wpływem na pracę radarów impulsowych stosowanych w transporcie morskim, lądowym i powietrznym. Umożliwia on przedstawienie w sposób poglądowy wpływu różnych czynników na charakterystykę promieniowania w płaszczyźnie pionowej i możliwości wykrywcze radarów morskich.

Dla analizy równań radarowych szczególnie przydatne są sporządzane automatycznie przez komputer wykresy przedstawiające:

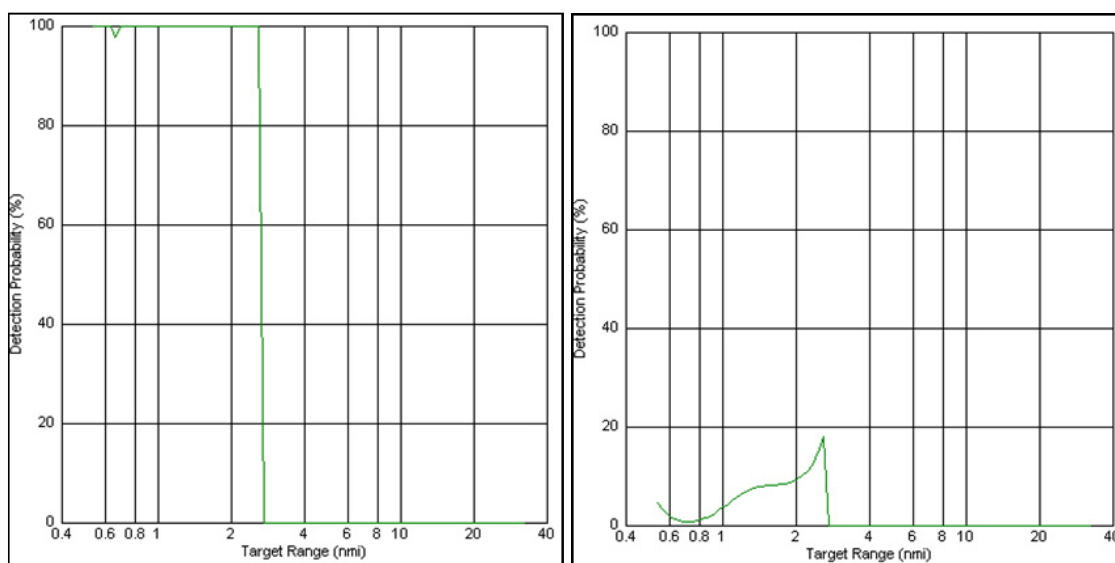
1. Prawdopodobieństwo wykrycia obiektu w funkcji odległości do niego.
2. Moc impulsu odbitego od obiektu oraz poziom zakłóceń od powierzchni morza i szumów w funkcji odległości do obiektu.
3. Charakterystykę promieniowania radarowego w płaszczyźnie pionowej.
Poszczególne wykresy prezentują kolejne rysunki. Zostały one obliczone dla:
 1. Obiektów na wysokościach 1m, 6m i 30m n.p.m.
 2. Stanów morza 0 i 8 stopni w skali Douglasa.
 3. Radaru Raytheon Pathfinder ST MK2 pracującego w paśmie „X” z anteną zainstalowaną na wysokościach:
 - a) 1m (zgodnie z zaleceniami IMO najmniejsza wysokość obiektu radiolokacyjnego równa minimalnej wysokości instalacji anteny transpondera poszukiwawczo-ratowniczego),
 - b) 6m (przyjmowana do obliczeń wysokość instalacji anteny radarowej na morskich pływających jednostkach poszukiwawczo-ratowniczych)
 - c) 25m (przybliżona wysokość instalacji anteny radarowej na dużych statkach morskich,
 - d) 83m (wysokość anteny radaru brzegowego planowanego do instalacji na Rozewiu,
 - e) 1000m (wysokość odpowiadająca zaleceniom międzynarodowym na temat wysokości lotu jednostki lotniczej prowadzącej akcję poszukiwawczo-ratowniczą).

Rysunki 2-4 przedstawiają prawdopodobieństwo wykrycia w funkcji odległości do obiektów na wysokościach 6m i 30m, dla wysokości instalacji anteny radarowej równej odpowiednio 6m i 25m oraz dla stanów morza 0 i 8 stopni w skali Douglasa.

Na kolejnych rysunkach 5 i 6 ukazano moc impulsu odbitego od obiektu na wysokościach 1m i 25m n.p.m., przy stanie morza 8 stopni w skali Douglasa, dla różnych wysokości instalacji anteny radarowej. Poszczególne linie na wykresach oznaczają:

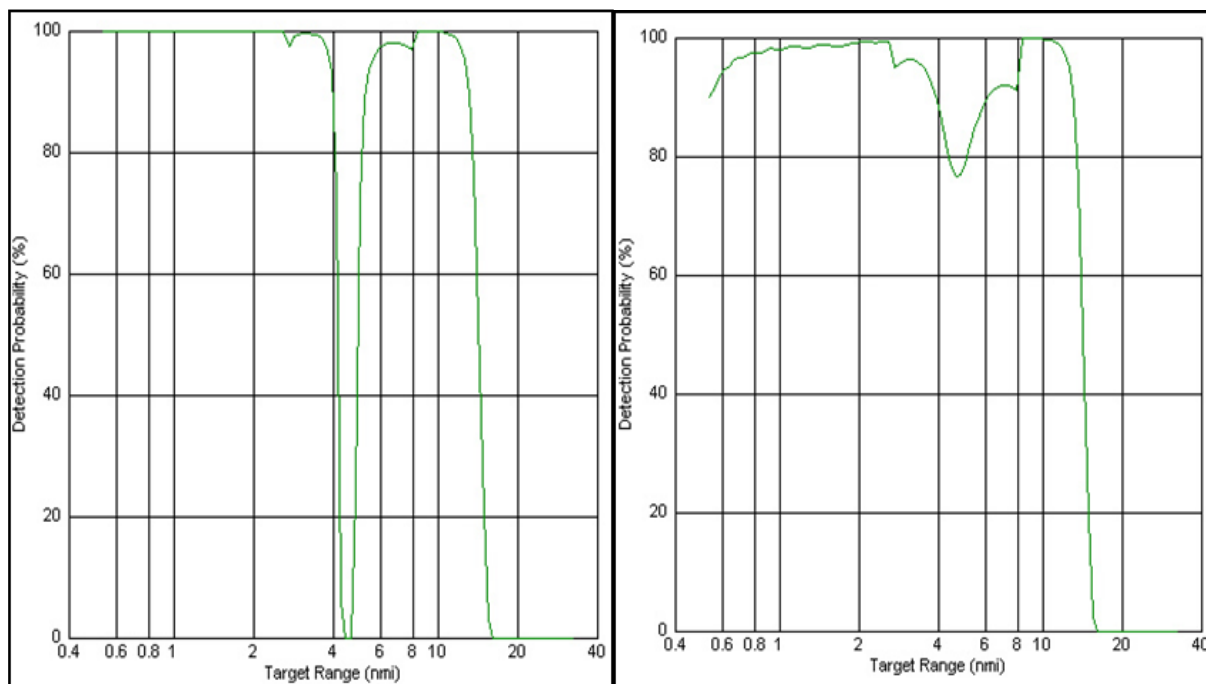
1. Linia zielona oznaczona okręgami – moc impulsu odbitego od obiektu.
2. Linia niebieska oznaczona trójkątami – poziom szumów.
3. Linia czerwona oznaczona gwiazdkami – poziom zakłóceń od powierzchni wody.

Ostatni rysunek 7 przedstawia przykładowo charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie pionowej dla wysokości instalacji anteny radarowej 1m i 83m, obiektu na wysokości 1m i stanów morza 0 i 8 stopni w skali Douglasa.



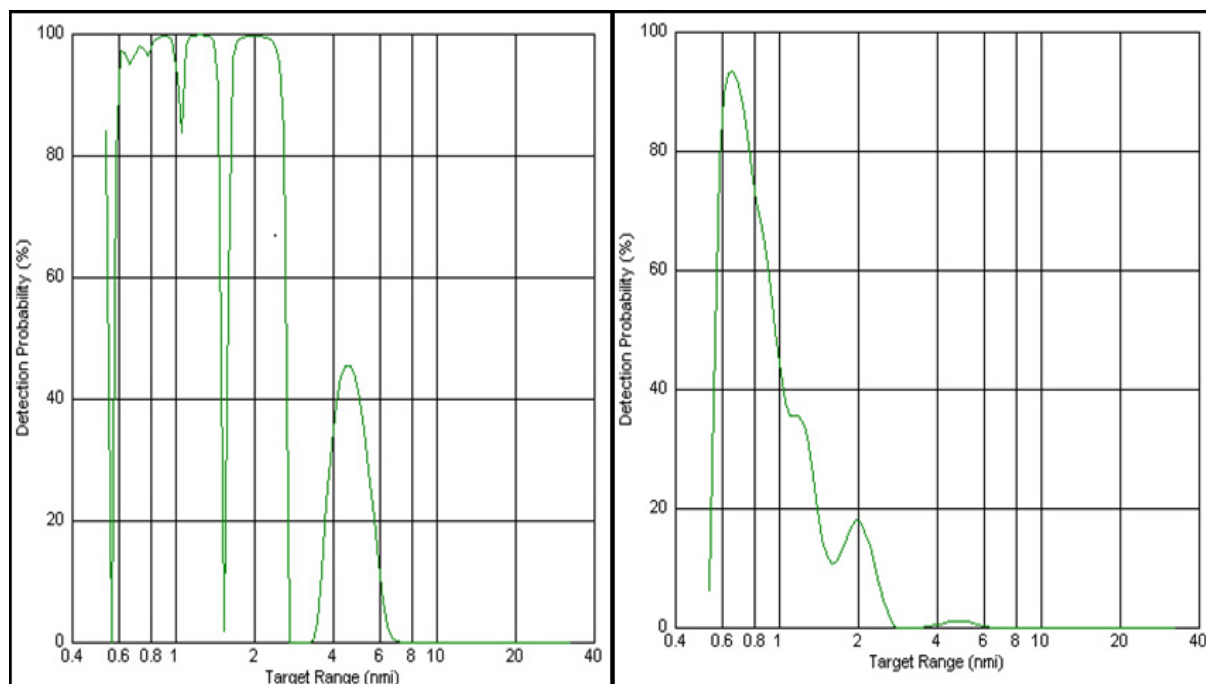
Rys. 2. Prawdopodobieństwo wykrycia w funkcji odległości do obiektu na wysokości 6m radarem pasma „X” z anteną zainstalowaną na wysokości 6m dla stanów morza 0 i 8 stopni w skali Douglasa

Źródło: badania własne



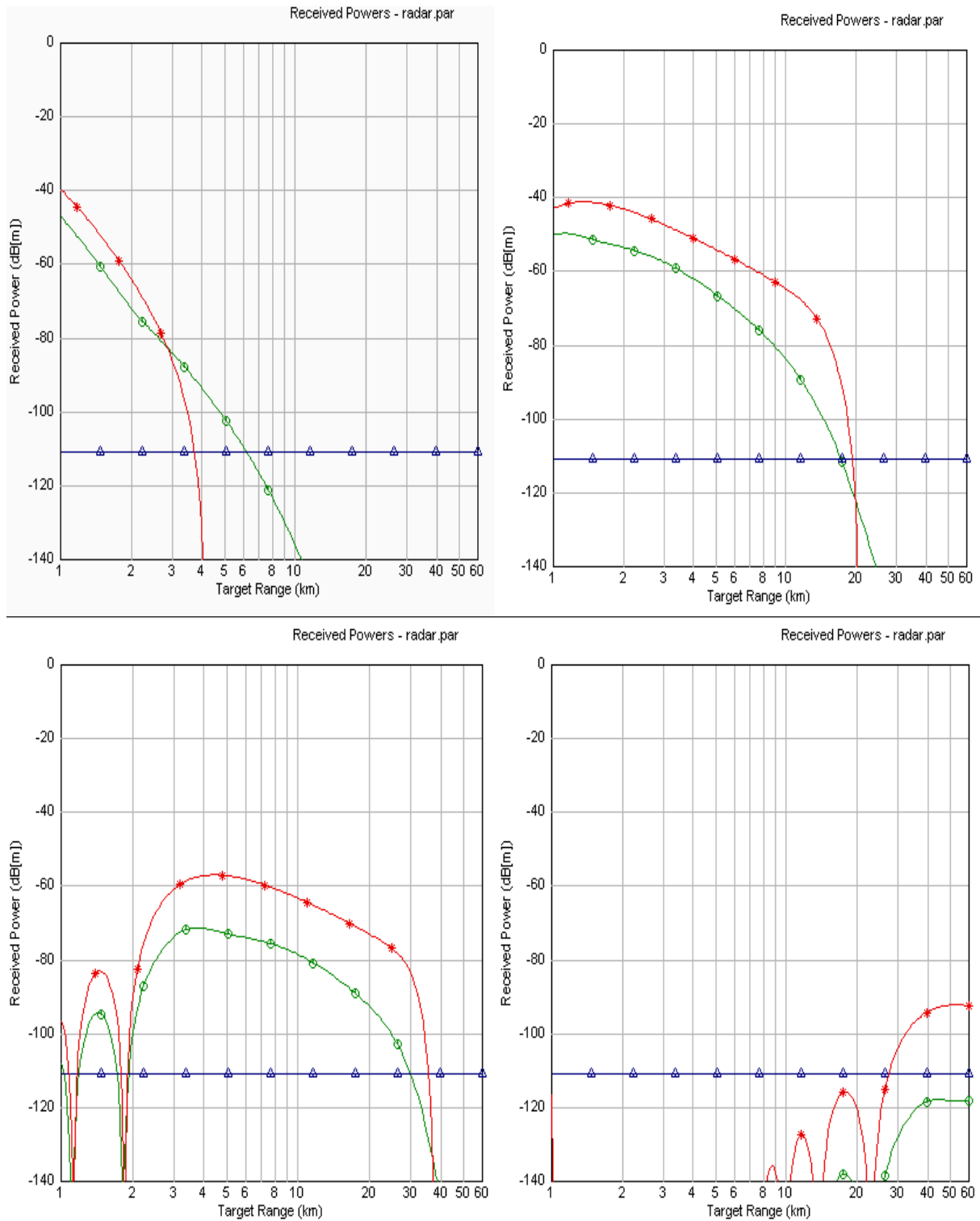
Rys. 3. Prawdopodobieństwo wykrycia w funkcji odległości do obiektu na wysokości 30m radarem pasma „X” z anteną zainstalowaną na wysokości 6m dla stanów morza 0 i 8 stopni w skali Douglasa

Źródło: badania własne



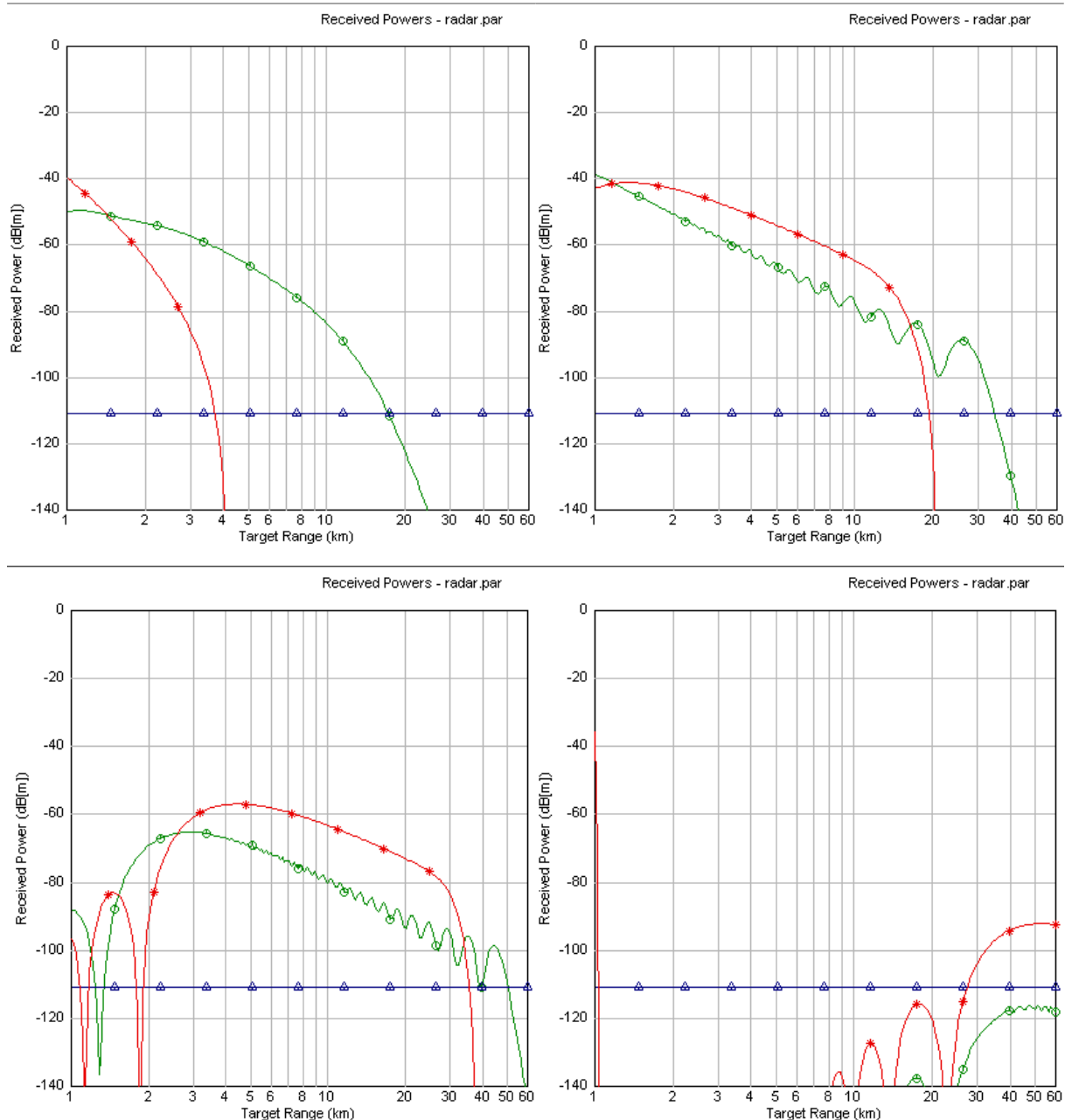
Rys. 4. Prawdopodobieństwo wykrycia w funkcji odległości do obiektu na wysokości 6m radarem pasma „X” z anteną zainstalowaną na wysokości 25m dla stanów morza 0 i 8 stopni w skali Douglasa

Źródło: badania własne



Rys. 5. Moc impulsu odbitego od obiektu na wysokości 1 m n.p.m. przy stanie morza 8 stopni w skali Douglasa dla radaru pasma „X”, którego antena jest zainstalowana na wysokościach: 1, 25, 83 i 1000m n.p.m.

Źródło: badania własne

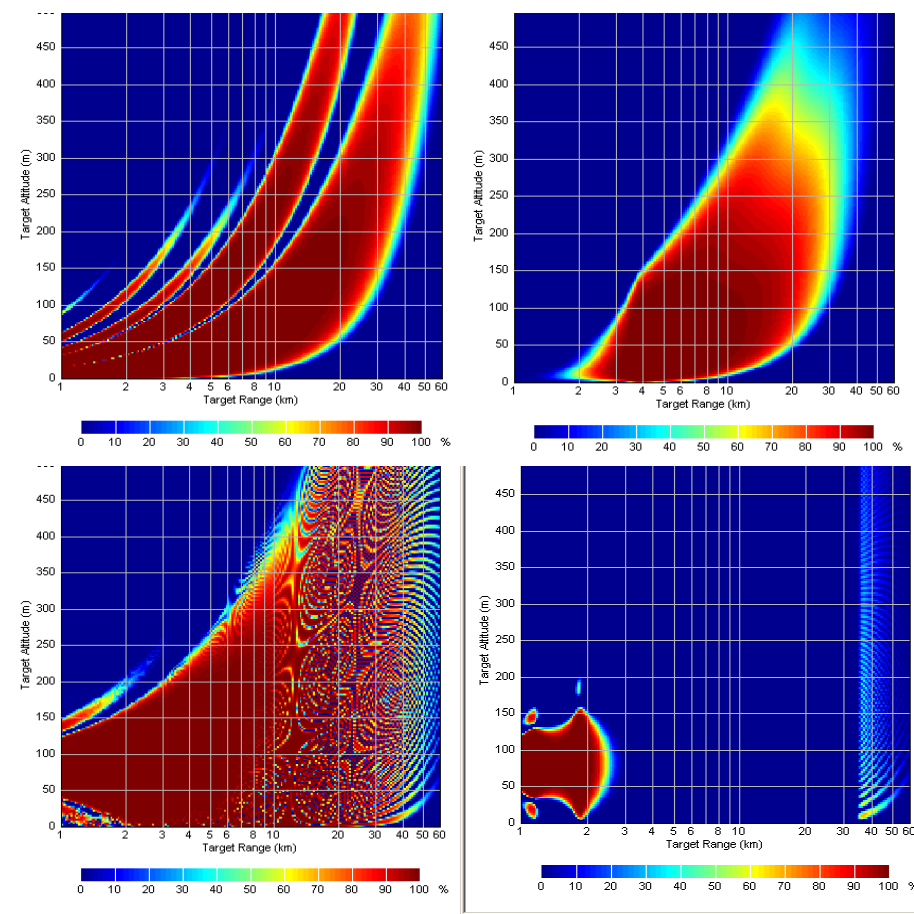


Rys. 6. Moc impulsu odbitego od obiektu na wysokości 30m n.p.m. przy stanie morza 8 stopni w skali Douglasa dla radaru pasma „X”, którego antena jest zainstalowana na wysokościach: 1, 25, 83 i 1000m n.p.m.

Źródło: badania własne

PODSUMOWANIE

Przedstawione w referacie przykładowe wykresy otrzymane przy pomocy programu Carpet przedstawiają rzeczywiście w poglądowy sposób właściwości detekcyjne i charakterystyki propagacyjne radarów w funkcji wysokości instalacji ich anteny i obiektu odbijającego impulsy oraz stanu morza, przybliżając równania radarowe i ułatwiając przeprowadzenie oceny możliwości wykrywczych radarów morskich. Wadą aktualnie dostępnej wersji oprogramowania jest brak możliwości jej wykorzystania do oceny właściwości detekcyjnych radarów pracujących na fali ciągłej, zarówno dopplerowskich jak i wykorzystujących modulację częstotliwościową.



Rys. 7. Charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie pionowej dla wysokości instalacji anteny radarowej 1m i 83m, obiektu na wysokości 1m, przy stanach morza 0 i 8 stopni w skali Douglasa.

Źródło: badania własne

BIBLIOGRAFIA

1. Skolnik M., *Radar Handbook*, McGraw Hill Book Co., 1970.
2. Stupak T., *Analiza parametrów radarowego równania zasięgów*, Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni, nr 22, Gdynia, 2008.
3. Tołoczko M., *Zarys morskiej radiolokacji*, Wyższa Szkoła Morska w Gdyni, Gdynia, 1979.

UTILIZATION OF CARPET PROGRAMME FOR DETERMINATION OF RADAR DETECTION CAPABILITY IN FUNCTION OF THE HEIGHTS OF RADAR ANTENNA AND OBJECT

Abstract

Paper presents in brief radar equations in the scope concerning maritime radars and capabilities

of utilization of program Carpet version 2 for demonstration of these radars detection capability in function of the height of their antennas installation and observed objects and current sea state.

Autorzy:

dr inż. **Ryszard Wawruch** – Akademia Morska w Gdyni, Wydział Nawigacyjny, Katedra Nawigacji, wawruch@am.gdynia.pl