

CZYNNIKI DETERMINUJĄCE MOŻLIWOŚCI WYKRYWCZE MORSKIEGO RADARU NAWIGACYJNEGO

Czynniki determinujące możliwości wykrywcze morskiego radaru nawigacyjnego można podzielić na dwie zasadnicze grupy: czynniki wpływające na zasięg radaru oraz zakłócenia i zniekształcenia zobrazowania. Pierwsze z nich dzielą się na trzy rodzaje: czynniki geometryczne, techniczne i opady atmosferyczne.

Jedną z najważniejszych zalet mikrofal, która sprawiła, że znalazły one zastosowanie w radiolokacji morskiej jest prostoliniowość ich propagacji. Właściwość ta powoduje, że krzywizna Ziemi ogranicza zasięg radaru do tak zwanego widnokręgu radarowego. Przy założeniu prostoliniowości propagacji mikrofal, odległość widnokręgu radarowego D_w wynosi:

$$D_w = 1,93 \sqrt{h_a} \quad (1)$$

gdzie: D_w — odległość widnokręgu radarowego [w Mm],

h_a — wysokość instalacji anteny [w m], (F.J. W y l i e , 1960).

W rzeczywistości fale radarowe ulegają w atmosferze refrakcji. W normalnych warunkach atmosferycznych, gdy ciśnienie na powierzchni morza wynosi 1013 hPa i zmniejsza się wraz ze wzrostem wysokości o około 37 hPa na każde 300 m, temperatura powietrza nad powierzchnią wody równa się $+15^\circ\text{C}$ i maleje wraz z wysokością o 2°C na każde 300 m, a wilgotność względna jest stała i równa 60%, odległość widnokręgu radarowego wynosi:

$$D_{wn} = 2,2 \sqrt{h_a} \quad (2)$$

gdzie: D_{wn} — odległość widnokręgu radarowego w normalnych warunkach propagacji mikrofal [w Mm],

Dla obiektów o wysokości h_o równanie (2) przyjmuje postać (F.J. W y l i e , 1960) :

$$D_n = 2,2 (\sqrt{h_a} + \sqrt{h_o}) \quad (3)$$

* Dr inż. naw. Ryszard Wawruch, Wyższa Szkoła Morska, Wydział Nawigacji, Instytut Nawigacji Morskiej, Al. Zjednoczenia 3, 81-345 Gdynia.

gdzie: D_n — odległość wykrycia obiektu o wysokości h_o w normalnych warunkach propagacji [w Mm],

h_o — wysokość obiektu [w m], (F.J. W y l i e , 1960).

Jeżeli ze wzrostem wysokości nad poziomem morza temperatura powietrza znacznie maleje lub wilgotność względna wzrasta, występuje zjawisko refrakcji ujemnej, zwanej subrefrakcją. Ugięcie toru mikrofal w kierunku powierzchni Ziemi jest wtedy mniejsze niż w warunkach normalnych, a przy znacznym pionowym gradiencie temperatury występuje ugięcie drogi propagacji fali elektromagnetycznej w kierunku powierzchni Ziemi. Zjawisko to może spowodować ograniczenie zasięgu radaru do 40% zasięgu normalnego. Subrefrakcja występuje gdy zimne powietrze przesuwa się nad cieplejszą wodą, najczęściej w regionach polarnych.

Zjawisko przeciwne — superrefrakcja, ma miejsce gdy spadek temperatury jest mniejszy niż 2°C na każde 300 m wysokości lub gdy wilgotność powietrza maleje wraz ze wzrostem wysokości. Powoduje ono silniejsze zakrzywienie toru mikrofal w kierunku powierzchni Ziemi, zwiększając zasięg radaru. W skrajnych przypadkach impulsy radarowe mogą odbijać się wielokrotnie od powierzchni wody i inwersyjnej warstwy powietrza; rozchodząc się na odległości kilkanaście razy przewyższające normalny zasięg radaru. Superrefrakcja występuje:

- przy poziomym przemieszczaniu się ciepłych i suchych mas powietrza znad nagrzanego lądu nad chłodniejsze morze;
- w warunkach wyżowych, przy istnieniu prądów zstępujących, wywołujących inwersję temperatur;
- przy bezwietrznej słonecznej pogodzie.

Obiekt znajdujący się w pobliżu widnokręgu radarowego zostanie wykryty jeżeli będzie miał odpowiednie własności odbijające, a radar wyemituje impuls o wystarczającej energii. Maksymalny zasięg radaru w zależności od parametrów technicznych urządzenia i właściwości odbijających obiektów, przy pominięciu innych czynników zewnętrznych określa się tak zwane równania radarowe. Charakteryzując je należy zaznaczyć, że uwzględniają one: moc, względnie energię impulsu sondującego, generowanego przez nadajnik; właściwości nadawczo-odbiorcze i wysokość instalacji anteny; najmniejszą wartość mocy sygnału odbieranego przez odbiornik wystarczającą do wyraźnego wyróżnienia echa na ekranie wskaźnika; długość fal radarowych; właściwości odbijające obiektu oraz wysokość obiektu i fal morskich. W przypadku obiektów objętościowych analizowane równania mają postać pierwiastka czwartego lub ósmego stopnia z iloczynu lub ilorazu wymienionych czynników. Dla obiektów powierzchniowych zasięg radaru jest funkcją pierwiastka trzeciego, względnie siódmego stopnia.

O stopniu pierwiastka decyduje odległość od obiektu. Dla odległości mniejszych od tak zwanych granicznych, opisanych wzorami (4) i (5), pierwiastki mają odpowiednio stopnie: trzeci i czwarty, a dla większych odległości — siódmy i ósmy:

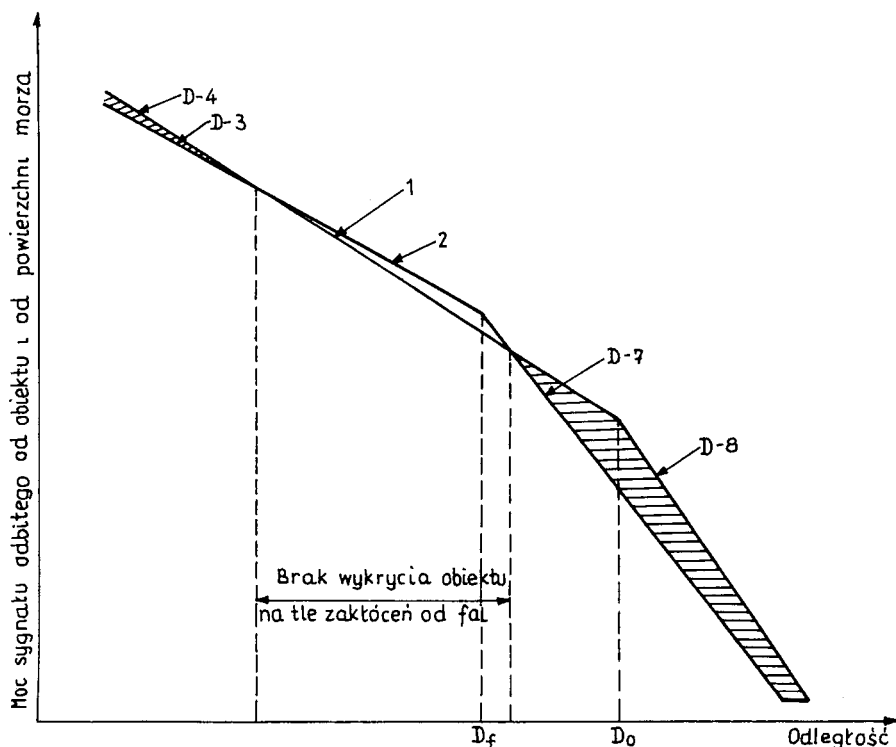
$$D_o = \frac{4 h_a h_o}{\lambda} \quad (4)$$

$$D_f = \frac{2 h_a h_{v/10}}{\lambda} \quad (5)$$

gdzie: D_o , D_f — są odległościami granicznymi odpowiednio dla obiektów objętościowych i powierzchniowych (powierzchnia morza) [w m],
 $h_{1/10}$ — jest znormalizowaną wysokością fal morskich wyznaczoną jako wartość średnia z wysokości fal najwyższych stanowiących 10 % pełnego zbioru [w m],
 λ — długość fali radarowej [w m].

Iloraz funkcji opisujących zasięgi radaru dla odbić od wymienionych typów obiektów odzwierciedla zmienność maskującego wpływu odbić od powierzchni morza na zobrazowanie radarowe w funkcji odległości oraz stanu morza i wysokości obiektu. Zagadnienie to ilustruje ryc. 1, (M.J. Skolnik, 1970).

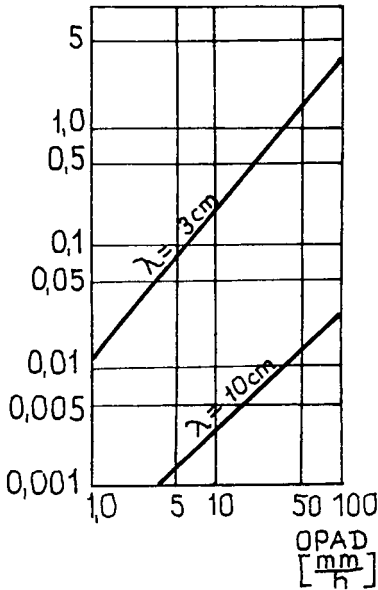
Pośród czynników zewnętrznych na zasięg radaru wpływają też opady atmosferyczne: mgła, deszcz, śnieg i grad. Wielkość tłumienia jednostkowego wprowadzane go przez opady deszczu i mgłę przedstawiono przykładowo dla fal o długości 3 cm i 10 cm na ryc. 2 i 3, (M. Tólczo, 1979).



Ryc. 1. Maskujący wpływ zakłóceń od powierzchni morza na zobrazowanie radarowe w funkcji odległości.
 1 — moc sygnału odbitego od obiektu, 2 — moc sygnału odbitego od powierzchni morza,
 D — odległość, D_o i D_f — odległości graniczne odpowiednio dla sygnałów odbitych od obiektu i od powierzchni morza

Fig. 1. Masking effect of radar image disturbances caused by sea surface as a function of distance.
 1 — intensity of signal reflected from object, 2 — intensity of signal reflected from sea surface,
 D — distance, D_o , D_f — limits for signals reflected from object and from sea surface

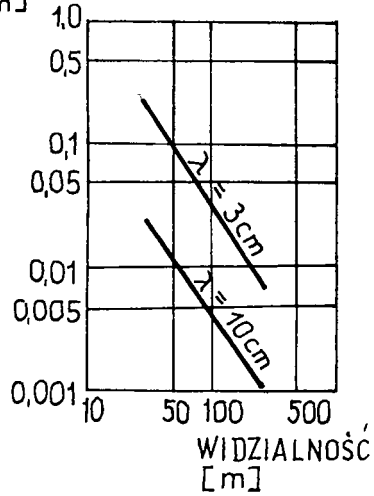
TŁUMIENIE
[$\frac{dB}{km}$]



Ryc. 2. Tłumienie jednostkowe wprowadzane przez opad deszczu o podobnym natężeniu przy temperaturze powietrza $+18^{\circ}\text{C}$, dla fal radarowych o długościach 3 i 10 cm (pasma: X i S). Według: M. Tołoczki, 1979

Fig. 2. Unit-suppression caused by rainfall, characterized by intensity and air temperature $+18^{\circ}\text{C}$ for radar wavelengths 3 cm and 10 cm (X and S band), (M. Tołoczko, 1979)

TŁUMIENIE
[$\frac{dB}{km}$]

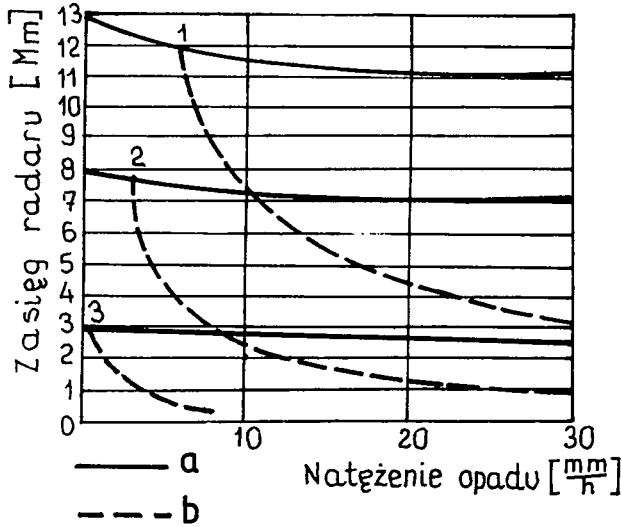


Ryc. 3. Tłumienie jednostkowe wprowadzane przez mgłę przy temperaturze powietrza 0°C , dla fal radarowych o długościach 3 i 10 cm (pasma: X i S). Według: M. Tołoczki, 1979

Fig. 3. Unit-suppression caused by fog at 0°C temperature for radar wavelengths 3 cm and 10 cm (X and S band), (M. Tołoczko, 1979)

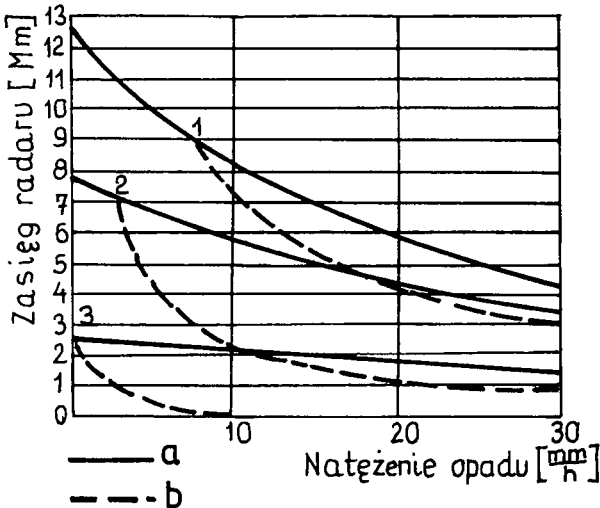
Z wykresów wynika, że tłumienie w paśmie X ($\lambda = 3\text{ cm}$) jest znacznie większe niż w paśmie S ($\lambda = 10\text{ cm}$). Mgła wpływa na możliwości wykrywcze radaru w bardzo małym stopniu. Najsilniejsze tłumienie wprowadzają intensywne opady deszczu, które mogą ograniczyć zasięg radaru do 60% wartości normalnej (M. Łuczniak, J. Witkowski, 1983). Ze względu na właściwości fizyczne kryształów, opady śniegu i gradu wywołują znacznie słabsze tłumienie niż deszcz. Wielkość tłumienia zależy nie tylko od natężenia opadu lecz również od pozycji obiektu odbijającego promieniowanie mikrofalowe w stosunku do strefy opadów. Ilustrują to ryc. 4 i 5, na których przedstawiono wpływ opadów deszczu i śniegu na możliwości wykrywcze obiektu znajdującego się w strefie opadu ciągłego — linia przerywana oraz poza nią — linia ciągła (F.J. Wyllie, 1960).

Druga grupa czynników determinujących możliwości wykrywcze morskiego radaru nawigacyjnego, to zakłócenia i zniekształcenia zobrazowania. Wyróżnia się dziewięć podstawowych ich rodzajów: zniekształcenia instrumentalne, sektory cienia i półcienia, echa pośrednie własne i obce, echa na kierunkach listków bocznych, echa



Ryc. 4. Wpływ opadu deszczu na możliwości wykrywcze radaru o długości fali 3 cm (pasmo X), a — obiekt poza strefą opadu ciągłego, b — obiekt w obszarze opadu ciągłego, 1 — echo statku o pojemności brutto 10 000 RT wykrywane na radarze w warunkach normalnych z odległości 12,5 Mm, 2 — echo statku o pojemności brutto 1000 RT wykrywane na radarze w warunkach normalnych z odległości 7,5 Mm, 3 — echo małej łodzi lub pławy wykrywane na radarze w warunkach normalnych z odległości 2,5 Mm. Według: F.J. Wylie, 1960

Fig. 4. Impact of rainfall on detection possibilities of radar (3 cm wavelength), a — object outside rainfall area, b — object within rainfall area, 1 — echo of ship (10 000 RT tonnage) detected by radar in normal conditions from 12,5 n.m., 2 — echo of ship (1000 RT tonnage) detected by radar in normal conditions from 7,5 n.m., 3 — echo of small boat detected by radar in normal conditions from 2,5 n.m. (F.J. Wylie, 1960)



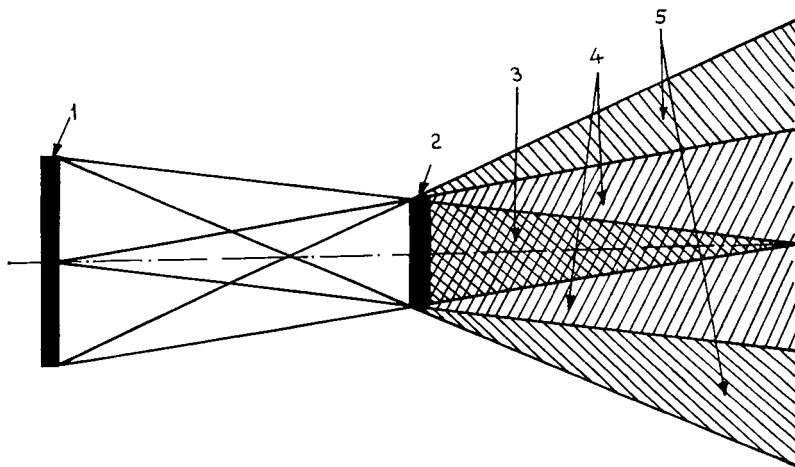
Ryc. 5. Wpływ opadu gradu lub śniegu na możliwości wykrywcze radaru o długości fali 3 cm. Oznaczenia jak na ryc. 4. Według: F.J. Wylie, 1960

Fig. 5. Impact of hail and snowfall on detection possibilities of radar (3 cm wavelength), (F.J. Wylie, 1960)

wielokrotne, echa z poprzedniego cyklu pracy, zakłócenia od opadów atmosferycznych i zakłócenia interferencyjne.

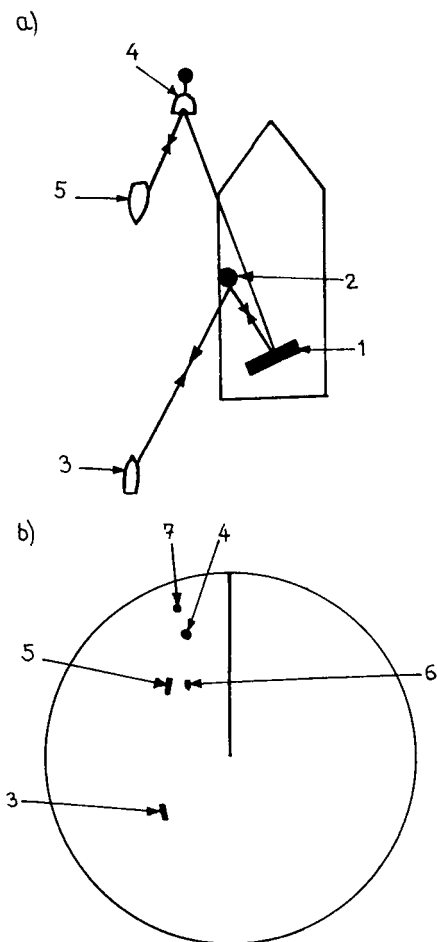
Zniekształcenia instrumentalne wynikają z samej zasady pracy radaru i są spowodowane niepoprawnym działaniem jego układów lub błędnym wyborem parametrów technicznych. Należą do nich przede wszystkim zniekształcenia promieniowe i kątowe ech radarowych. Długość echa obiektu punktowego mierzona wzdłuż promienia ekranu wskaźnika panoramicznego zależy od czasu trwania impulsu sondującego, średnicy ekranu i zakresu pracy radaru. W skali ekranu równa się połowie długości impulsu sondującego. Rzeczywista pozycja obiektu znajduje się zawsze na wewnętrznej krawędzi echa. Mierząc odległość, należy więc ustawić znacznik ruchomego kręgu odległości stycznie do tej krawędzi. Wielkość tego zniekształcenia wzrasta wraz ze zmniejszaniem zakresu pracy i zwiększaniem średnicy lampy. Na zakresach większych niż 3 Mm zniekształcenie to jest wrokoowo niewidoczne. Szerokość kątowa echa obiektu punktowego jest równa szerokości charakterystyki promieniowania anteny radarowej w płaszczyźnie poziomej. Wielkość tego zniekształcenia zależy od odległości do obiektu odbijającego i wzrasta wraz ze zwiększaniem zakresu pracy radaru. Powoduje ono rozciągnięcie kątowe ech w obu kierunkach. W związku z tym mierząc kąt należy ustawić kreskę pomiarową na środku echa radarowego.

Przedmioty znajdujące się na drodze propagacji mikrofal tworzą ekran odbijający padające na nie promieniowanie. W związku z tym występują za nimi obszary, do których promieniowanie nie dociera, są to tak zwane sektory cienia lub gdy jest ono tylko osłabiane — sektory półcienia. Zasadę powstawania sektorów wyjaśnia ryc. 6. Ich wielkość zależy od stosunku długości anteny radarowej do wymiarów liniowych przeszkody w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji fali elektromagnetycznej.



Ryc. 6. Zasada powstawania sektorów cienia i półcienia radarowego. 1 — antena radaru, 2 — przeszkoda, 3 — sektor cienia, 4 — sektor silnego półcienia, 5 — sektor słabego półcienia
 Fig. 6. Principles of forming sectors of radar shadow and semi shadow. 1 — radar antenna, 2 — obstacle, 3 — shadow sector, 4 — sector of distinct semi-shadow, 5 — sector of weak semi-shadow

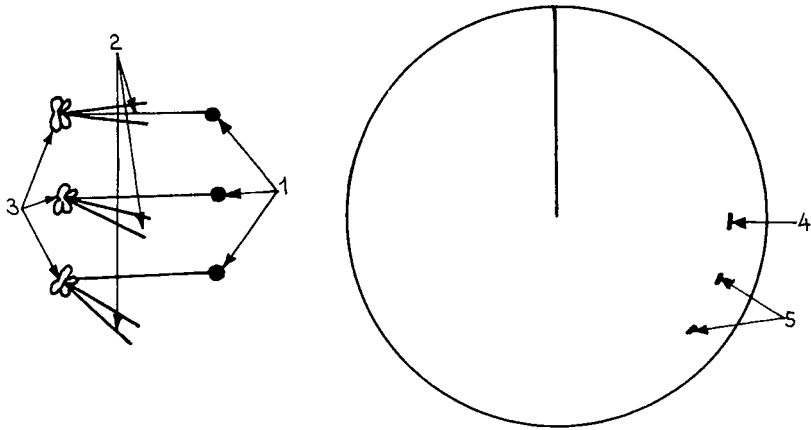
Echa pośrednie powstają na skutek lustrzanego odbicia impulsu sondującego od znajdującego się na drodze jego propagacji obiektu o dużej równoważnej powierzchni odbicia, za którym występuje sektor cienia i półcienia radarowego. Echa pośrednie, własne, wywoływane są odbiciami impulsów od elementów konstrukcyjnych statku, na którym jest umieszczony radar, na przykład: masztów, osprzętu przeładunkowego, komina itp. Występują one w sektorach cienia lub półcienia wytworzonego przez te elementy, w odległościach odpowiadających ich wartościom rzeczywistym. Określenie echa pośredniego - obcego, stosuje się jeżeli rolę lustra spełniają obiekty zewnętrzne, znajdujące się poza statkiem, na którym jest radar. Występują one w sektorach cienia i półcienia za tymi obiektami w odległościach większych od rzeczywistych i równych sumie odległości: radar — lustro i lustro — obiekt odbijający. Amplituda ech pośrednich jest zawsze niższa od amplitudy ech rzeczywistych. Zasadę powstawania ech pośrednich przedstawiono na ryc. 7.



Antena radarowa emituje i odbiera dochodzące do niej sygnały na kierunkach listka głównego i listków (wiązek) bocznych. Amplituda listków bocznych jest zawsze znacznie mniejsza, tym nie mniej, jeżeli w niewielkiej odległości od anteny znajdzie się obiekt o dużej równoważnej powierzchni odbicia, to moc promieniowania przez wiązki boczne może okazać się wystarczająca do ukazania na ekranie radaru sygnału odebranego z ich kierunku. Echa od wiązek bocznych uwidaczniają się jako szereg coraz słabszych rozświetleń ekranu rozciągniętych wzdłuż łuku okręgu, symetrycznie wokół pozycji rzeczywistej echa. Przy dużej amplitudzie odbić zakłócenie to może przyjmować kształt ciągłego łuku, a nawet okręgu, którego najgrubsze miejsce wyznacza pozycję rzeczywistą obiektu. Zasadę powstawania ech od wiązek bocznych przedstawia ryc. 8.

Ryc. 7. Zasada powstawania ech pośrednich, a - sytuacja rzeczywista, b — zobrażowanie radarowe, 1 — antena radaru, 2 — lustro własne (maszt), 3 i 5 — obiekty zewnętrzne, 4 - lustro zewnętrzne (pława), 6 — echo pośrednie własne obiektu nr 3, 7 — echo pośrednie obce obiektu nr 5

Fig. 7. Principles of forming indirect echoes, a — real situation, b — radar image, 1 - radar antenna, 2 - own mirror (mast), 3 and 5 — outer objects, 4 exterior mirror, 6 — indirect own echo of object No 3, 7 — indirect strange echo of object No 5

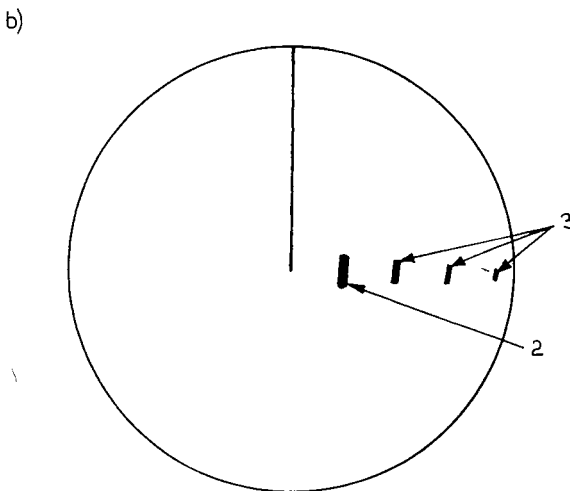
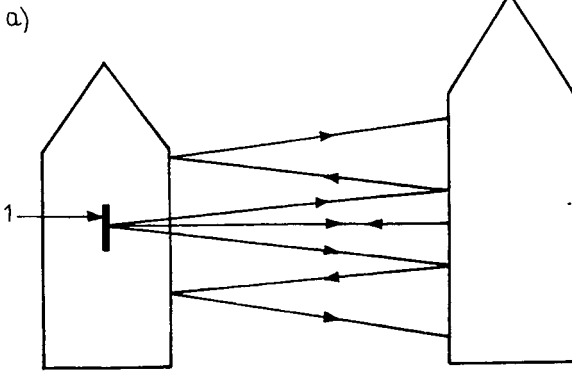


Ryc. 8. Powstawanie ech od listków bocznych.

1 — obiekt odbijający, 2 — wiązka główna promieniowania radarowego, 3 — wiązki boczne, 4 — rzeczywista pozycja echa radarowego obiektu nr 1, 5 — echa od wiązek bocznych

Fig. 8. Formation of echoes from side leaflets.

1 — reflecting object, 2 — main beam of radar radiation, 3 — side beams, 4 — real position of radar echo of object No 1, 5 — echoes from side beams



Ryc. 9. Proces powstawania ech wielokrotnych,

a — sytuacja rzeczywista, b — zobrazowanie radarowe, 1 — antena radaru, 2 — pozycja echa rzeczywistego, 3 — echa wielokrotne

Fig. 9. Formation of multiple echoes, a — real situation, b — radar image, 1 — radar antenna, 2 — position of real echo, 3 — multiple echoes

Innym zniekształceniem występującym w przypadku gdy w pobliżu anteny radaru statkowego znajduje się obiekt o dobrych właściwościach odbijających są echa wielokrotne. Powstają one na skutek wielokrotnego odbicia impulsu sondującego pomiędzy statkiem, na którym znajduje się radar i obiektem. Na ekranie wskaźnika uwidaczniają się w formie całego szeregu ech o coraz słabszej amplitudzie, leżących na kierunku echa rzeczywistego w odległościach wzajemnych równych odległości: radar — obiekt. Zasadę powstawania ech wielokrotnych ilustruje ryc. 9.

W warunkach silnej superrefrakcji radar może wykryć obiekty o dużej skutecznej powierzchni odbicia, znajdujące się w odległościach przewyższających znacznie zasięg urządzenia. Impulsy podstawy czasu odchylające plamkę elektronów od środka ekranu lampy wskaźnika do jego krawędzi, są wytwarzane cyklicznie i rozpoczynają się w momencie wysłania przez radar impulsu sondującego. Częstotliwość ich jest tak dobrana, aby na ekranie nie mogły być zobrazowane echa obiektów znajdujących się w zasięgu pracy radaru, lecz poza aktualnie użytym zakresem obserwacji. W warunkach superrefrakcji echa od wielkich obiektów mogą być więc ukazane na ekranie wskaźnika, jeżeli odległość od nich jest większa od odległości odpowiadającej częstotliwości sondowania i powtarzania impulsów podstawy czasu. Pojawiają się one wtedy na ekranie wskaźnika w czasie kolejnego cyklu pracy urządzenia. Minimalne wartości odległości, dla których przy zadanej wartości częstotliwości impulsów radaru, echo od obiektu może być ukazane na ekranie wskaźnika jako echo z poprzedniego cyklu pracy, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1
Table 1

Wartość minimalnej odległości do obiektu, którego echo z poprzedniego cyklu pracy radaru może być zobrazowane na ekranie wskaźnika panoramicznego w funkcji częstotliwości powtarzania impulsów, według: M. Łuczniak, J. Witkowski, 1983.

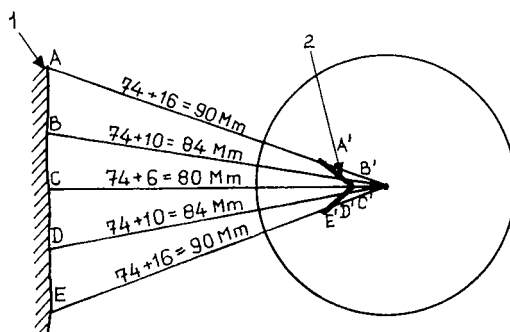
Values of minimum distance from object, which echo from previous radar cycle can be imaged on panoramic index screen as a function of impulse frequency (M. Łuczniak, J. Witkowski, 1983)

Częstotliwość powtarzania impulsów Impulse frequency [s ⁻¹]	Odległość [Mm] Distance [n.m.]
500	162
800	101
1000	81
1100	74
1500	54
1600	51
2000	40,5
3200	25

Teoretycznie istnieje możliwość ukazania się tego zakłócenia na wszystkich zakresach obserwacji. W praktyce na małych zakresach jest to niemożliwe w związku ze zbyt małą energią impulsu sondującego. Echa z poprzedniego cyklu pracy można bardzo łatwo wyróżnić na ekranie wskaźnika w związku z silnym ich zniekształceniem odległościowym wywołanym brakiem zgodności między aktualnie zastosowaną skalą

Ryc. 10. Zasada powstawania zniekształceń odległościowych ech z poprzedniego cyklu pracy radaru. Zakres 24 Mm, częstotliwość powtarzania impulsów równa 1100Hz, 1 — linia brzegowa, 2 — zniekształcony obraz linii brzegowej jako echo z poprzedniego cyklu pracy radaru. Według: M. Łuczniak, J. Witkowski, 1983

Fig. 10. Principle of arising distance deformations of echoes belonging to previous radar cycle - 24 n.m. range, impulse frequency - 1 100 Hz, 1 — coast-line, 2 — deformed image of coast-line as echo from previous radar cycle (M. Łuczniak, J. Witkowski, 1983)



zobrazowania i rzeczywistymi odległościami do obiektów. Ilustruje to ryc. 10, (M. Łuczniak, J. Witkowski, 1983).

Zakłócenia od powierzchni morza są spowodowane odbiciami impulsu sondującego od części fal morskich prostopadłych do kierunku propagacji mikrofal. Ich występowanie ma w znacznej mierze charakter losowy i cechuje się małą stabilnością. Amplituda i zakres zakłócenia zależy od wysokości, kształtu i kierunku fal morskich oraz wysokości umieszczenia anteny radarowej. Najsilniejsze zakłócenia powodują wysokie, silnie załamujące się fale, szczególnie na kierunku wiatru. Amplituda zakłóceń jest największa w pobliżu pozycji radaru i maleje wraz ze wzrostem odległości od niej. Na ekranie tworzą one najczęściej nieregularną elipsę wydłużoną w kierunku wiatru. Pozycja anteny radarowej znajduje się w jednym z ognisk elipsy.

Opady atmosferyczne nie tylko tłumią fale elektromagnetyczne ale powodują również powstawanie zakłóceń widocznych w formie punktowych rozjaśnień ekranu. Charakteryzują się one przypadkowością rozkładu przestrzennego i małą stabilnością czasową. Ich amplituda zależy od rodzaju i natężenia opadu, kształtu drobin oraz długości fali radarowej. Bardziej intensywne są w paśmie X niż S. Najbardziej intensywne zakłócenia wprowadza śnieg i grad, szczególnie gdy płatki śniegu są duże i mokre, a średnica kulek lodowych gradu przekracza 10 mm. Deszcz wywołuje zakłócenia o znacznie mniejszej amplitudzie.

Zakłócenia interferencyjne powstają w wyniku odbierania przez radar impulsów wysyłanych przez inne urządzenia pracujące na zbliżonej częstotliwości. Na średnich i dużych zakresach obserwacji tworzą one punktowe rozświetlenia ekranu układające się w charakterystyczne wzory, najczęściej spiralnie skręconych krzywych, wygiętych w kierunku obrotu anteny. Na małych zakresach, mogą one powodować zakłócenia w formie linii prostych rozchodzących się promieniście ze środka zobrazowania.

LITERATURA

- Łuczniak M., Witkowski J., 1983: *Morskie radary nawigacyjne*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk.
- Skolnik M.J., 1970: *Radar Handbook*. Mc Graw-Hill Book Company.
- Tołoczko M., 1979: *Zarys morskiej radiolokacji*. Wyższa Szkoła Morska, Gdynia.
- Wylie F.J., 1960: *The use of radar at sea*. The Institut of Navigation, Holls and Carter, London.

RYSZARD WAWRUCH

FACTORS DETERMINING DETECTION POSSIBILITIES OF MARINE NAVIGATIONAL RADAR

Summary

Factors determining detection possibilities of marine navigational radar can be divided into two basic group.

1. Factors affecting radar range, which include: geometrical factors, technical aspects, precipitation.

2. Factors implying image disturbances and deformations: instrumental distortions, shadow and semi-shadow sectors, indirect echoes, side-direction echoes, multiple echoes, echoes from previous cycles, disturbances caused by sea surface, disturbances caused by precipitation and interference disturbances.