

## BUDOWA I ZASADY PRACY RADARU NAWIGACYJNEGO

Radar jest urządzeniem, które za pomocą promieniowania elektromagnetycznego określa kierunek i odległość do przedmiotów. Pewną grupę tych urządzeń stanowią radary nawigacyjne, które mają głównie pomagać w bezpiecznym prowadzeniu statku.

Radary nawigacyjne wykorzystują jako podstawowe pasmo częstotliwości, pasmo X (długość fali 3,2 cm), a jako dodatkowe, pasmo S (długość fali 10 cm). Inne pasma nie mają praktycznego znaczenia. W radarach określenie kierunku i odległości odbywa się niezależnie przez inne podzespoły i dlatego zostaną one omówione w dużym uproszczeniu.

### ODWZOROWANIE ODLEGŁOŚCI

Odległość do obiektu określa się wykorzystując stałość prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej i odległość do echa obiektu wyznaczana jest za pomocą czasu po jakim powraca impuls odbity:

$$d = 0,5 \cdot c \cdot t \quad (1)$$

gdzie:  $c$  — prędkość fali elektromagnetycznej [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] równa w przybliżeniu  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  
 $t$  — zmierzony czas [s].

W tym celu synchronicznie z wysłaniem impulsu sondującego z nadajnika wyzwała się we wskaźniku impuls podstawy czasu, który powoduje odchylenie z odpowiednią prędkością strumienia elektronów w lampie kineskopowej ze środka do jego krawędzi. Równocześnie z wyzwoleniem impulsu podstawy czasu uruchamiane są układy znaczników odległości. Impuls odbity od obiektu, odebrany przez antenę, zostaje poddany przemianie częstotliwości celem jej obniżenia, następnie zostaje wzmocniony. Obecnie zaczyna się stosować na wyjściu wzmacniacz mikrofalowy, który pop-

\* Dr inż. Tadeusz Stupak, Wyższa Szkoła Morska, Wydział Nawigacji, Instytut Nawigacji Morskiej, Al. Zjednoczenia 3, 81-345 Gdynia.

rawia jakość sygnału. Wzmocniony sygnał zostaje poddany demodulacji, otrzymujemy sygnał wizyjny o częstotliwości akustycznej, który przesłany jest do wzmacniacza wizyjnego we wskaźniku. Tam podawane są również impulsy znaczników odległości. W radarach produkowanych w latach 80-tych sygnał wizyjny jest podawany do układu syntezy, celem dokonania cyfrowej analizy w celu eliminacji pewnej ilości zakłóceń. W tym układzie sygnał wizyjny jest próbkowany w przedziałach o określonej długości, która powinna być na tyle mała by na danym zakresie na ekranie była mniejsza niż wymiar plamki. Jeżeli średnia wartość sygnału w danym przedziale przekracza określony poziom, to zostaje zapisany jako „jedyńka”, jeżeli nie, to jako „zero”. Następnie kilka (najczęściej trzy) kolejnych impulsów sondujących zapisanych w postaci zero-jedynekowej zostaje ze sobą porównanych i jeżeli w danym przedziale powtarza się sygnał jedynki, to wówczas na wejście lampy kineskopowej zostaje podany sygnał o określonej stałej amplitudzie, w innym przypadku nie ma sygnału.

Zastosowanie takiego układu powoduje, że wszystkie echa mają taką samą amplitudę i składają się z jednostkowych prostokątów. Słabe echa i szумы nie są na ekranie prezentowane. Również część zakłóceń, szczególnie interferencyjnych jest w tym układzie tłumiona. Jednak informacja o echach jest wówczas bardziej uboga, gdyż wszystkie echa mają taką samą jasność, jak również podobny kształt.

Rozróżnialność odległościowa radaru  $\Delta d$  jest to odległość w jakiej muszą znajdować się dwa obiekty punktowe aby na ekranie zostały zobrazowane jako dwa oddzielne echa i zależy ona od długości impulsu sondującego i wielkości plamki na ekranie, czyli:

$$\Delta d = \frac{c \cdot \tau}{2} + \frac{2dR}{D} \quad (2)$$

gdzie:  $\tau$  — czas trwania impulsu sondującego [s],

$c$  — prędkość fali elektromagnetycznej [ $m \cdot s^{-1}$ ],

$d$  — średnica plamki strumienia elektronów na ekranie [mm],

$R$  — zakres pracy radaru [m],

$D$  — średnica ekranu [mm].

Dla obecnie eksploatowanych radarów nawigacyjnych rozróżnialność odległościowa wynosi od 10 m do 200 m, w zależności od zakresu pracy i typu radaru, a dla małych radarów jachtowych może być jeszcze gorsza.

O jakości i dokładności odwzorowania odległości do echa na ekranie decyduje układ podstawy czasu, a mianowicie jego liniowość. Układ ten ma zapewnić stałą prędkość poruszania się plamki elektronów na ekranie. Jeżeli ta prędkość nie jest stała wówczas odstępstwa pomiędzy stałymi kręgami na ekranie są jednakowe, co dla nawigacyjnego wykorzystania radaru ma mniejsze znaczenie, ale dla interpretacji zdjęć obrazu radarowego może być bardzo istotne. Regulację liniowości zwykle może wykonać radiooficer i w nowoczesnych radarach najczęściej nie sprawia to kłopotów.

Drugim istotnym elementem jest kompensacja opóźnienia impulsu w radarze. Czas wędrówki impulsu sondującego w radarze odpowiada w wolnej przestrzeni odległości co najmniej kilkunastu metrów. To opóźnienie musi być skompensowane do wartości błędu nie przekraczającej kilku, kilkunastu metrów. Błąd ten jest stałym błędem pomiaru odległości.

Na ekranie radaru pracującego na najmniejszym zakresie, aby stwierdzić dokładność kompensacji opóźnienia impulsu należy zaobserwować odwzorowanie linii prostej, na przykład nabrzeża, falochronu czy brzegów kanału. Jeżeli zamiast linii prostej na ekranie w pobliżu własnej pozycji linia ta jest ściągnięta lub rozciągnięta, to opóźnienie to należy poprawić, czego może dokonać serwis. W instrukcji radaru nie podaje się dokładności odwzorowania, a jedynie dokładność skalowania znaczników, a nie jest to, to samo. Przy pomiarach odległości za pomocą radaru największą dokładność mają stałe kręgi odległości, mniejszą ruchomy krąg odległości, a najmniejszą interscan czyli kreska namiarowa o regulowanej długości. W nowoczesnych radarach, które możemy łatwo wyróżnić, ponieważ odczyt odległości ruchomego kręgu dokonywany jest w nich na wskaźniku cyfrowym, a nie na mechanicznej tarczy dokładności ruchomego i stałych kręgów są równie wysokie, ponieważ są one sterowane z tego samego zegara, którego częstotliwość zmienia się wraz z zakresami pracy.

## ODWZOROWANIE KIERUNKU

Celem umożliwienia dokładnego pomiaru kierunku i osiągnięcia wysokiej wartości rozdzielczości kątowej zobrazowania, antena radarowa powinna emitować fale w płaszczyźnie poziomej kierunkowo, w możliwie jak najwęższej wiązce. Powoduje to, że ma ona w tej płaszczyźnie kształt listkowy; składa się z tak zwanego listka głównego — służącego do wykrywania obiektów i pomiaru ich pozycji oraz całego szeregu listków (wiązek) bocznych będących przyczyną powstawania zakłóceń obrazu radarowego. Kształt charakterystyki w płaszczyźnie poziomej przedstawiono na ryc. 1. Szerokość listka głównego zależy od długości fali elektromagnetycznej i rozpiętości anteny w płaszczyźnie promieniowania wyrażając się zależnością:

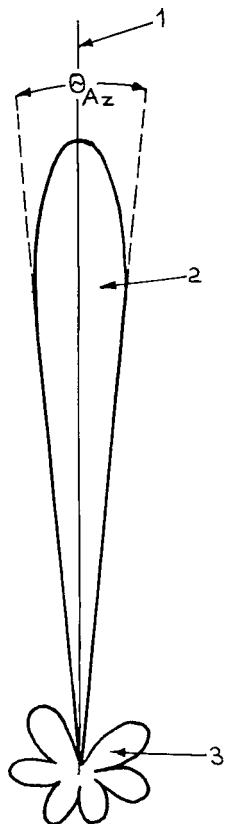
$$\theta_{Az} = a \frac{\lambda}{Da} \quad (3)$$

gdzie:  $\theta_{Az}$  — szerokość charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie poziomej [°],  
 $\lambda$  — długość fali radarowej [m],  
 $a$  — współczynnik zależny od kształtu i typu anteny,  
 $Da$  — rozpiętość anteny w płaszczyźnie promieniowania [m].

Obecnie eksploatowane radary nawigacyjne pasma X mają charakterystyki w płaszczyźnie poziomej o szerokości rzędu  $0,25^\circ - 1^\circ$ .

W płaszczyźnie pionowej charakterystyka promieniowania nie może być zbyt wąska. Antena radaru nie jest stabilizowana i ulega wraz ze statkiem, na którym jest zainstalowana, przechyłom wzdłużnym i poprzecznym. Przy wzburzonym morzu i zbyt wąskiej charakterystyce wystąpiłyby problemy z objęciem promieniowaniem powierzchni morza w całym zakresie obserwacji. Dlatego też zawiera się ona zwykle w granicach od  $20^\circ$  do  $30^\circ$ .

W charakterystyce promieniowania w płaszczyźnie pionowej można wyróżnić dwie strefy: bezpośrednią i interferencyjną. Impulsy radarowe są emitowane wewnątrz wiązki we wszystkich kierunkach. Część z nich dochodzi bezpośrednio do obiektu i ulega odbiciu od niego. Jest to tak zwane promieniowanie bezpośrednie. Część impulsów dochodzi do powierzchni morza i dopiero po odbiciu od niej natrafia



Ryc. 1. Charakterystyka promieniowania anteny radarowej w płaszczyźnie poziomej we współrzędnych biegunowych

Fig. 1. Emission characteristics of radar antenna in horizontal plane in radial coordinates

na drodze propagacji na obiekt. Jest to tak zwane promieniowanie pośrednie (ryc. 2). W powietrzu występuje wzajemne oddziaływanie (interferencja) obu rodzaj promieniowania mogącego spowodować wzrost amplitudy natężenia wypadkowego pola elektromagnetycznego (gdy spotykające się impulsy mają zgodne fazy) lub jej osłabienie (gdy impulsy są w przeciwfazie). To wzajemne oddziaływanie obu rodzaj promieniowania sprawia, że charakterystyka radarowa ma w płaszczyźnie pionowej kształt listkowy z wyraźnie zaznaczonymi maksimami i minimami gęstości mocy promieniowanej. Kąt naświetlenia powierzchni Ziemi impulsami radarowymi jest bardzo mały, interferencja fali elektromagnetycznej, a co się z tym wiąże charakterystyka listkowa występuje dopiero w pewnej odległości od anteny. W odległościach mniejszych praktycznie całe promieniowanie rozchodzi się jako bezpośrednie. Wartość odległości granicznej, oddzielającej obie strefy promieniowania: bezpośrednią i interferencyjną, jest równa w przypadku rozpatrywania odbić od obiektów oraz od powierzchni morza i wynosi:

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

$$D_f = \frac{2 h_a h_{1/10}}{\lambda} \quad (5)$$

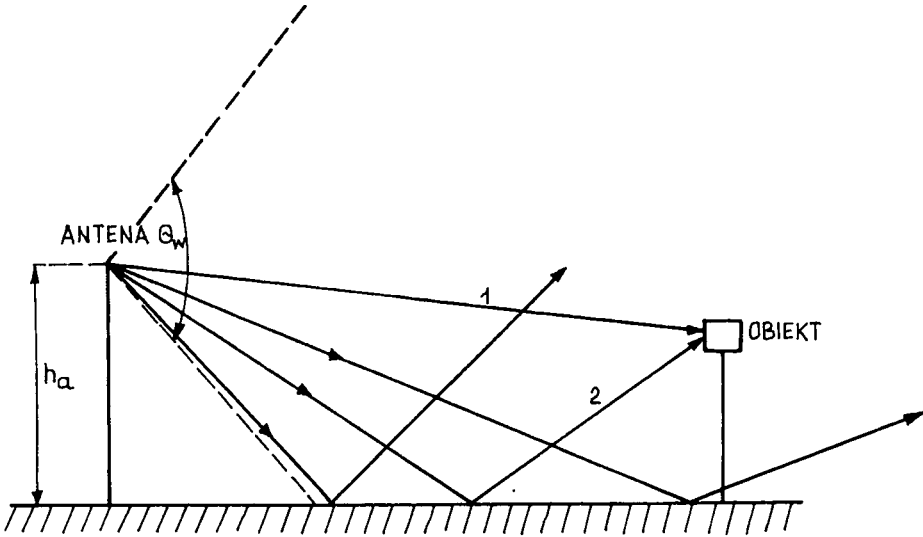
gdzie:  $D_o$ ,  $D_f$  — odległość graniczna odpowiednio dla odbić od obiektów i powierzchni morza [m],

$h_a$  — wysokość instalacji anteny radarowej [m],

$h_o$  — wysokość obiektu [m],

$h_{1/10}$  — znormalizowana wysokość fal morskich wyznaczona jako wartość średnia z wysokości fal najwyższych stanowiących 10% pełnego zbioru [m].

Przykładowy wykres charakterystyki promieniowania radarowego w płaszczyźnie pionowej przedstawiono na ryc. 3. Wynika z niego, że posiada ona dwie strefy martwe. Jedna występuje wokół pozycji radaru, a jej promień zależy od wysokości instalacji anteny zgodnie z wyrażeniem:



Ryc. 2. Interferencja mikrofal  
Fig. 2. Interference microwaves

$$D_M = h_a \cdot \operatorname{ctg} \frac{\theta_p}{2} \quad (6)$$

gdzie:  $D_M$  — promień strefy martwej wokół miejsca instalacji anteny radarowej [m],  
 $\theta_p$  — szerokość charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie pionowej [°].

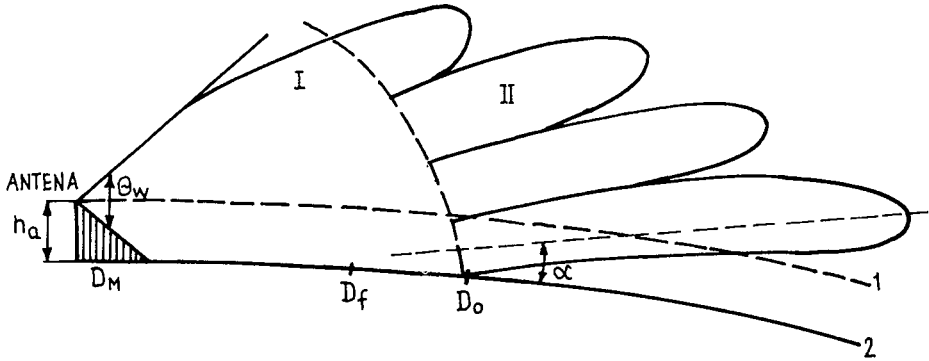
Druga strefa martwa występuje w odległościach większych od granicznej opisanej równaniami (4) lub (5) i spowodowana jest odchyleniem dolnego listka charakterystyki interferencyjnej w kierunku od powierzchni Ziemi. Wartość kąta zawartego pomiędzy dolnym listkiem charakterystyki i powierzchnią morza jest wprost proporcjonalna do długości fali radarowej i odwrotnie proporcjonalna do wysokości instalacji anteny. Można ją opisać wyrażeniem empirycznym:

$$\alpha = \frac{\lambda}{4h_a} \quad (7)$$

gdzie:  $\alpha$  — kąt zawarty pomiędzy najniższym listkiem charakterystyki promieniowania radarowego w płaszczyźnie pionowej i powierzchnią Ziemi [°],  
 $\lambda$  — długość fali radarowej [m].

Rozdzielczość kątowna radaru oznacza kąt o jaki mają być oddalone dwa obiekty punktowe, aby na ekranie odwzorowane były jako dwa oddzielne echa. W praktyce warunek jest spełniony dla kątów zawartych między 0,6 a 0,8  $\theta$ .

Do odwzorowania położenia kątownego echa obiektu na ekranie, czyli zapewnienia synchronicznego ruchu podstawy czasu i anteny są wykorzystywane dwa rodzaje układów. Układy selsynowe pozwalają na zapewnienie synchronicznego z ruchem anteny ruchu podstawy czasu. Układ ten stosowany jest powszechnie do początku lat 80-tych. Jest on rozbudowany i pozwala na uzyskanie dokładności odwzorowania ru-



Ryc. 3. Charakterystyka promieniowania anteny radarowej w płaszczyźnie pionowej  
 Fig. 3. Emission characteristics of radar antenna in vertical plane

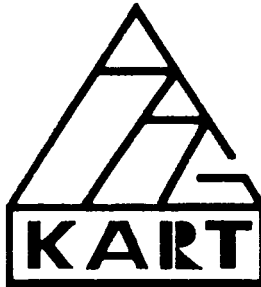
chu w granicach około  $0,5^\circ$ , ale chwilowe wahania mogą być do kilku stopni. W nowych radarach stosuje się cyfrowe układy do przekazania położenia anteny i uzyskuje się wirowanie podstawy czasu za pomocą cewek stałych. Położenie kątowne anteny określane jest za pomocą 1024 impulsów na 1 obrót, czyli dokładność tego układu jest około  $0,3^\circ$ . Dla określenia dokładności kątownego położenia echa na ekranie należy uwzględnić jeszcze kilka czynników. Położenie początkowe podstawy czasu zgodnie z kierunkiem osi elektrycznej anteny ustawiane jest na podstawie uzyskania zgodności pomiaru kątów radarowych z kątami mierzonymi na te same obiekty miernikiem optycznym. Jest to możliwe do wykonania z dokładnością nie większą niż  $0,5^\circ$ . Dodatkowe ograniczenia wprowadza układ sprzężenia z żyrokomпасem, który pozwala na stabilizację obrazu względem północy żyrokomпасowej. Układ pomiaru kąta to układ kreski pomiarowej, który jest układem mechanicznym o niewielkiej dokładności (około  $0,5^\circ$ ). Wszystkie te ograniczenia powodują, że określenie położenia kątownego obiektu za pomocą radaru jest możliwe z dokładnością od  $1,0^\circ$  do  $3,0^\circ$ .

Innym utrudnieniem, co nie oznacza, że mniej ważnym, jest problem zniekształceń ech kątownych i odległościowych, szczególnie podczas obserwacji odwzorowania na ekranie obszarów lądowych. Echa radarowe mogą pochodzić od bardzo różnych punktów, które podczas obserwacji wzrokowej nie są charakterystyczne. Odwzorowywane są różne nierówności, uskoki terenu. Na niewielkich zakresach pracy radaru obserwuje się linię brzegu, przy większych zakresach odwzorowują się wały brzegowe, wydmy lub wzgórza. Podczas obserwacji lądu na radarze należy pamiętać, że ten przyrząd budowany jest w innym celu i czy obserwowane echo pochodzi od obiektu, który nas interesuje.

## CONSTRUCTION OF NAVIGATIONAL RADAR AND PRINCIPLES OF ITS WORK

### Summary

Basic information on construction of navigational radar and principles of its work are presented in the article. Navigational radars utilize two microwave bands: X band — 3,2 cm and S band — 10 cm. Special emphasis was put on discussing three aspects of the work of navigational radar: — principle of distance measurement — for currently used radars accuracy of measuring distance is 10 to 200 m, — principle of angle measurement — precision of angular location of object is 1 to 3 degrees, — problems of distance and angular deformations, arising during observations of land areas are also discussed in the article.



**ZAKŁAD FOTOLOTNICZY I FOTOINTERPRETACJI  
PAŃSTWOWE PRZEDSIĘBIORSTWO  
GEODEZYJNO-KARTOGRAFICZNE**

00-950 Warszawa, ul. Jasna 2/4  
skr. pocz. 372 tel. 27 94 88 fax. 27 76 27 tlx. 812355

**WYKONUJE** zdjęcia lotnicze:

*panchromatyczne*

*spektrostrefowe*

*termalne*

**OFERUJE** kompleksowe opracowania  
wykonane przez zespół specjalistów na potrzeby:

- » Planowania Przestrzennego i Urbanistyki «
- » Ochrony Środowiska «
- » Rolnictwa «
- » Gospodarki Wodnej «
- » Ochrony Zabytków «
- » Archeologii «

Analiza środowiska wykonana na podstawie zdjęć lotniczych  
pozwała nam przedstawić Państwu wiarygodny jego obraz  
w czasie konkurencyjnym dla metod tradycyjnych.

---