

# Radiolokacja

Wykład 1

Idea pracy morskiego radaru  
nawigacyjnego



# Wstęp

RADAR – „Radio Detection And Ranging”

- Czyli urządzenie mające na celu wykrycie obiektu oraz pomiar odległości do niego.
- Radar to urządzenie pracujące na falach radiowych, wykorzystujące anteny kierunkowe do emitowania w przestrzeń wiązek zmodulowanego promieniowania elektromagnetycznego w celu wykrywania obiektów umieszczonych w przestrzeni.
- Każdy obiekt odbija pewną część promieniowania (echo), która wraca do odbiornika i po przekształceniach może zostać zaprezentowana operatorowi.



# Wstęp

- Oprócz fali elektromagnetycznej do wykrywania i pomiaru odległości można użyć fali akustycznej jak np. sonar, echosonda, ASDIC (*Anti-Submarine Detection Investigation Committee*) oraz zwykły gwizdek.
- Jednakże dopiero odkrycie w 1940 r. magnetronu wężkowego umożliwiło wykorzystanie do tego celu fali elektromagnetycznej, której długości była rzędu centymetra (mikrofale).



# Wstęp

- Odkrycie to umożliwiło transmisję skupionej wiązki (beam) energii w postaci fali elektromagnetycznej do wykrywania stosunkowo małych obiektów zlokalizowanych w dużych odległościach od obserwatora jak statki w odległości rzędu 10 – 15 mil morskich.

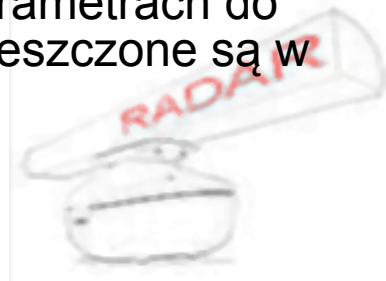


# Historia radiolokacji

- 1885 - H. Hertz - eksperymenty w celu zweryfikowania opublikowanej w 1864 roku teorii pola elektromagnetycznego opracowanej przez J. Maxwella. Zbudował urządzenie, które pracowało na częstotliwości ok. 450 MHz i emitowało impulsy.
  - Udowodnił, iż fale elektromagnetyczne mają właściwości zbliżone do fal świetlnych, i różnią się częstotliwością. Eksperyment dowiódł także, iż fale elektromagnetyczne mogą być odbijane przez metalowe przedmioty.
- C. Hulsmeyer. Około 1900 roku zbudował urządzenie, zbliżone koncepcyjnie do współczesnego monostatycznego radaru impulsowego - rozwinięcie koncepcji Hertza.  
1904 r. radar opatentowano jako pomoc nawigacyjną (nie znalazł zastosowania).
- Ok. 1921 H. Taylor i L. Young - obserwacje fluktuacji sygnału radiowego pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem umieszczonymi na przeciwległych brzegach rzeki (radar bistatyczny o fali ciągłej).
- Pojawienie się ciężkich bombowców strategicznych zintensyfikowało prace nad udoskonaleniem radaru. Początkowy wybór technologii radaru bistatycznego nie dał zadowalających rezultatów, co zwróciło uwagę na wynalazek Hulsmeyera.
- Rozwój radaru monostatycznego: początkowo pracujący na znacznie niższych niż obecnie częstotliwościach. Dopiero wynalazek magnetronu (lampy mikrofalowej wysokiej częstotliwości i dużej mocy) pozwolił na użycie radaru w celu wykrywania na dużych odległościach, zarówno w zastosowaniach morskich jak i lotniczych.

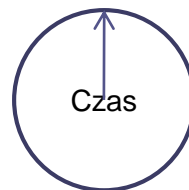
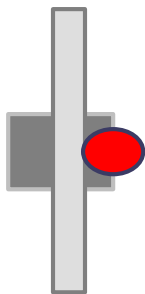
# Historia radiolokacji

- Okres powojenny - burzliwy rozwój radiolokacji spowodowany wynalezieniem tranzystora oraz klistrona (lampa mikrofalowa generująca falę bieżącą). Dzięki rozwojowi elektroniki zaczęto wykorzystywać w radarach zjawisko Dopplera do identyfikacji obiektów ruchomych. Nowe stabilne generatory elektroniczne umożliwiły budowę radarów monoimpulsowych ;
- Techniki impulsowe umożliwiły zwiększenie zasięgów oraz dokładności radarów. Kolejnym krokiem były radary z syntetyczną aperturą umożliwiające na wykonanie dokładnych map terenu. Postęp w rozwoju technik cyfrowych z kolei pozwolił na obróbkę sygnału radiolokacyjnego a tym samym na uzyskanie większych dokładności i skuteczności identyfikacji obiektów.
- Obecnie na początku XXI w. rozwój radiolokacji trwa nadal. Budowa coraz bardziej zaawansowanych układów scalonych pozwoliła na konstruowanie radarów do bardzo specjalistycznych zastosowań, przy zmniejszających się rozmiarach urządzeń. Udoskonalenie złącz półprzewodnikowych pozwala natomiast na budowę nadajników mikrofalowych małych rozmiarów o wystarczających parametrach do zastosowania w radarach morskich. nadajnik i odbiornik radaru umieszczone są w jednym urządzeniu



# Podstawowe zadanie (cykl pracy)

- Podstawowym zadaniem RADAR'u jest pomiar czasu pomiędzy momentem transmisji a momentem odebrania echa;
- Na podstawie zmierzonego czasu możliwe jest wyznaczenie odległości do obiektu.

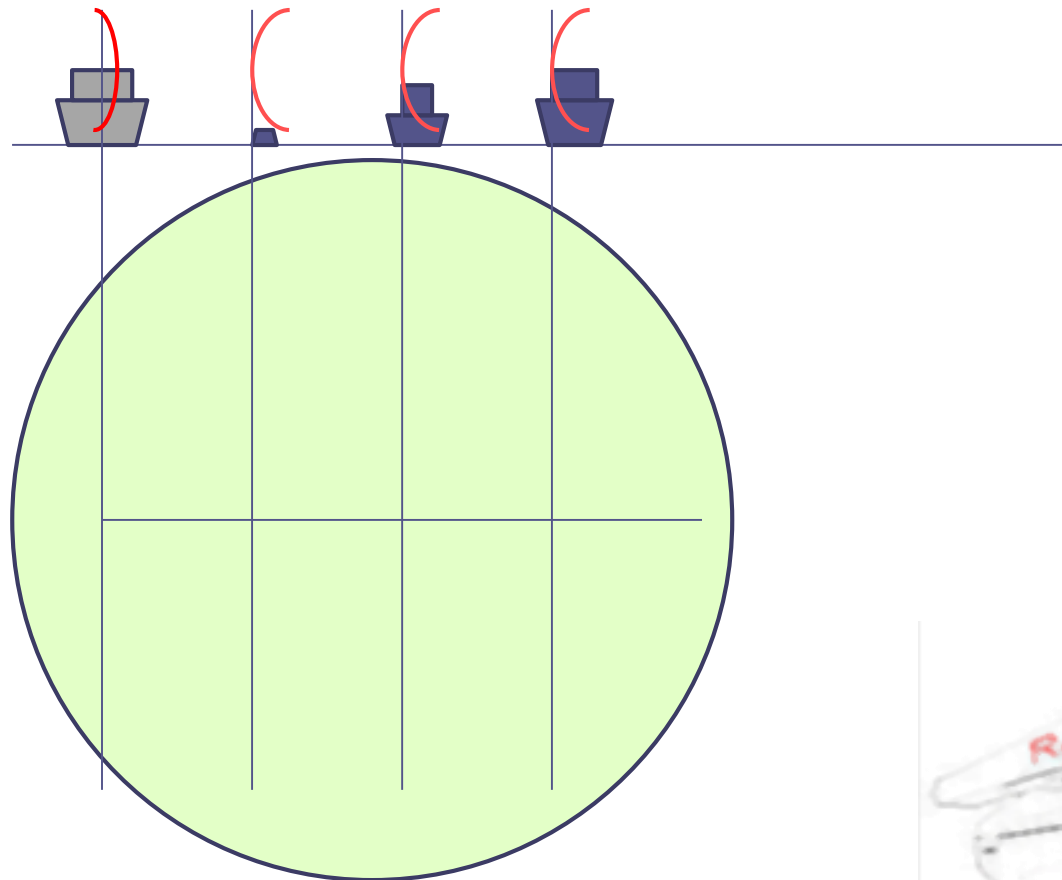


$$\text{Odległość} = \frac{\text{Czas}[s] \times \text{prędkość} \left[ \frac{m}{s} \right]}{2} [m]$$



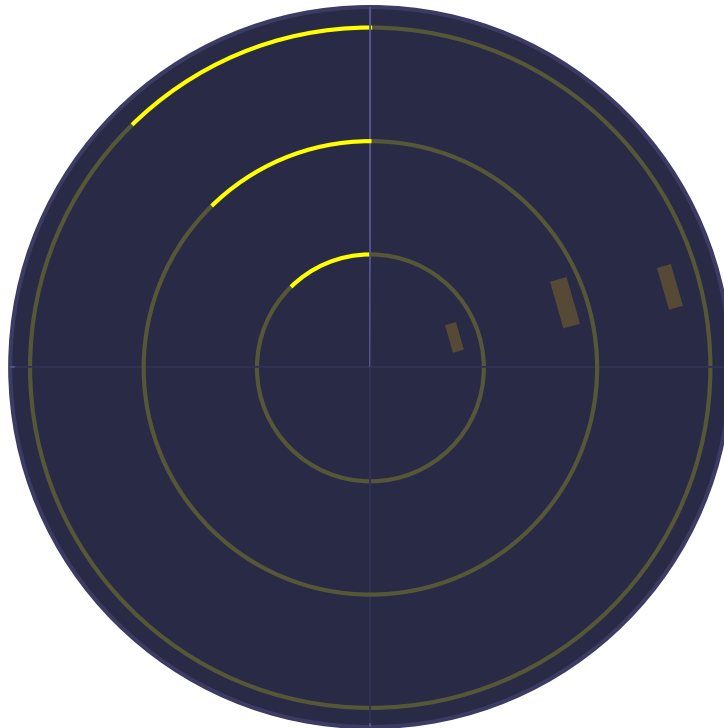
# A-scan display

- Sposób pomiaru czasu w radarach wypracowany w latach 1940





# Radial -scan Plan Position Indicator (PPI)



# Podstawa czasu (timebase)

Zakres <i>Range scale</i> [Nm]	Czas <i>Timebase</i> duration [ $\mu$ s]	Kręgi stałe <i>Calibration</i> [Nm]	Interwał <i>Interval</i> [ $\mu$ s]	Uwagi
0.75	9.3	0.25	3.1	3 kręgi stałe
1.5	18.5	0.25	3.1	6 kręgów stałych
3	37	0.5	6.2	
6	74.1	1	12.4	
12	148.2	2	24.7	
24	296.3	4	49.4	
48	592.6	8	98.8	



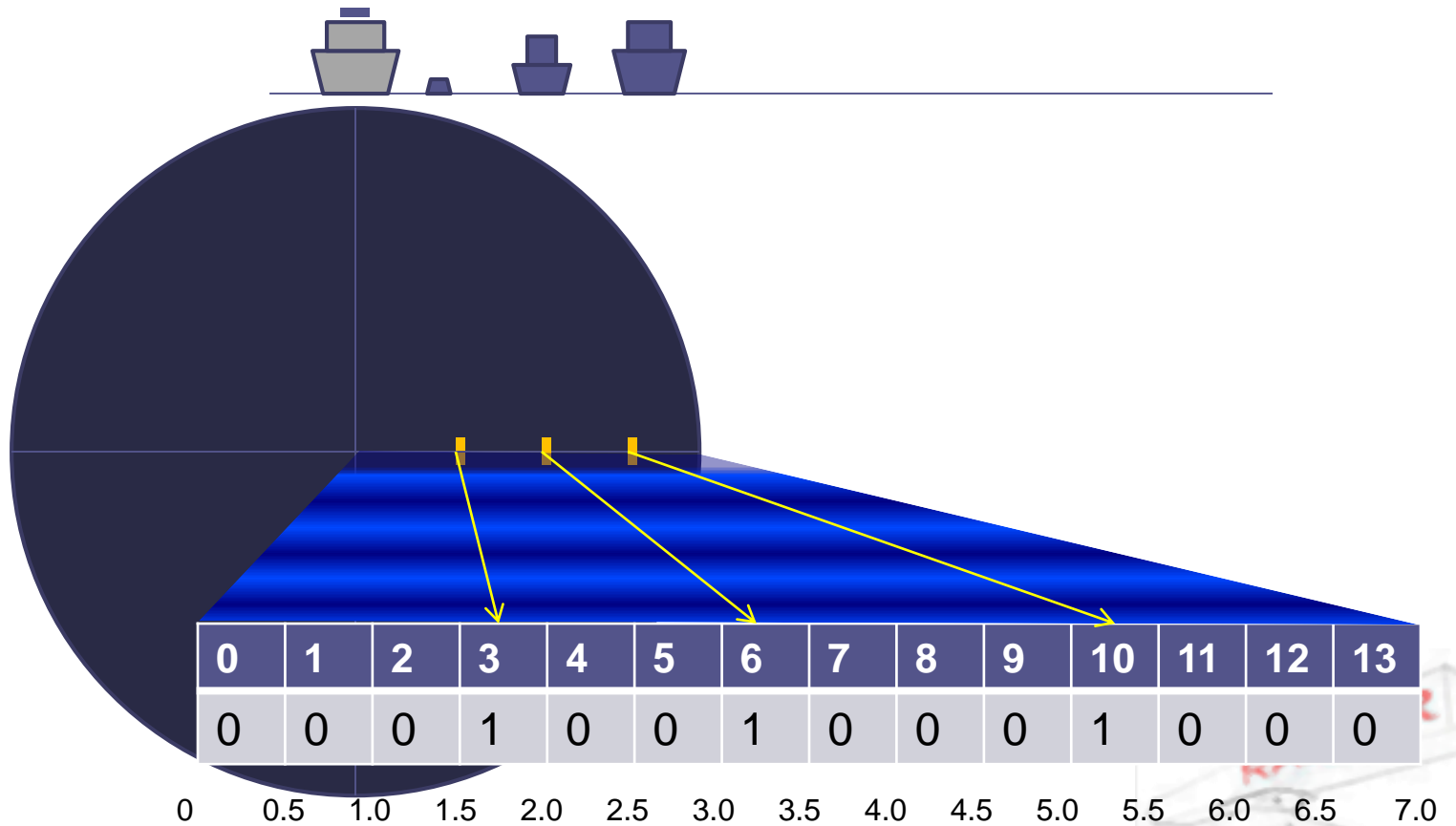
# Radial-scan, Raster-scan - synthetic display

- Wskaźniki typu PPI (plan position indicator) – nazywane wskaźnikami czasu rzeczywistego real-time displays
- Brak możliwości przetwarzania danych (odległość, kierunek)
- Rozwój technik komputerowych oraz obniżenie kosztów pamięci w latach 1970 -1980
- Rewolucja techniczna na polu wskaźników radarowych
- Powstanie nowego typu wskaźnika radarowego kontrolowanego komputerowo
- Synthetic display PPI: raster-scan, radial-scan (radary cyfrowe)



# Synthetic display Plan Position Indicator (PPI)

6 Nm



# Radary cyfrowe (synthetic display)

- Liczba komórek pamięci 1200 dla każdego cyklu pracy;
- Powracające echo jest zapisywane jako '1' w odpowiedniej do przedziału czasowego komórce pamięci;
- Czas zapisu komórek pamięci zależy od zakresu;
- Czas odczytu i czas odchylenia podstawy czasu jest taki sam, najczęściej odpowiadający zakresowi 12 Nm (!).



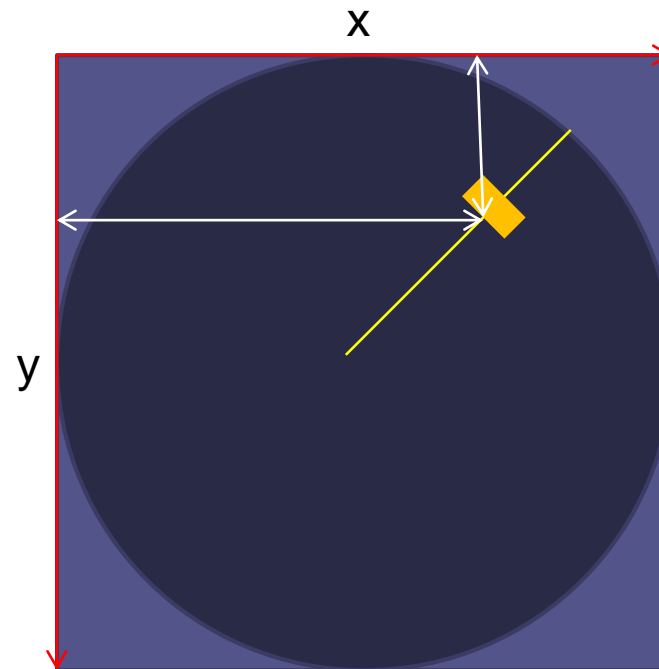
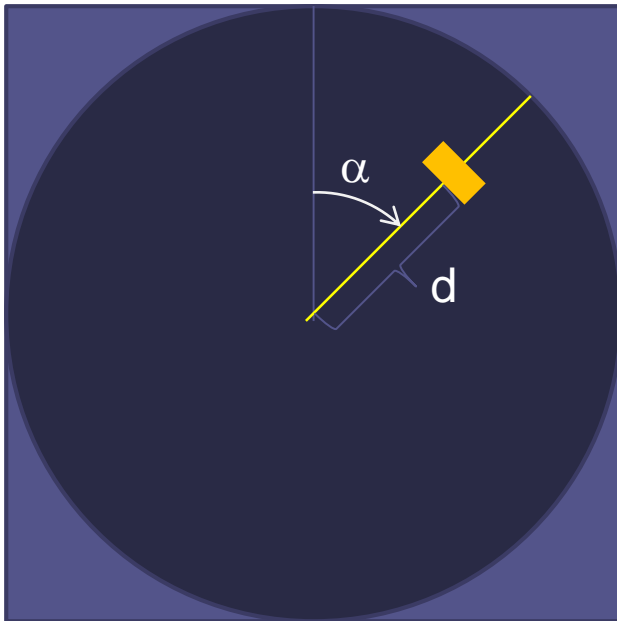
# Radary cyfrowe (synthetic display)

<b>Zakres</b> <i>Range scale</i> <i>[Nm]</i>	<b>Czas zapisu</b> <i>Write time</i> <i>[<math>\mu</math>s]</i>	<b>Czas odczytu</b> <i>Read-out</i> <i>[<math>\mu</math>s]</i>	<b>Czas odchylenia</b> <i>Sweep time</i> <i>[<math>\mu</math>s]</i>
0.75	9.3	148	148
1.5	18.5	148	148
3	37	148	148
6	74.1	148	148
12	148.2	148	148
24	296.3	148	148
48	592.6	148	148



# Synthetic display, raster-scan

- Zamiana współrzędnych biegunowych na współrzędne prostokątne ekranu CRT.



# Podstawy morskiego RADAR'u nawigacyjnego

- Generowania fal radiowych w postaci krótkich impulsów;
- Wysyłanie tych impulsów w przestrzeń w postaci wąskiej wiązki wykonującej ciągły obrót w płaszczyźnie poziomej;
- Odbicie tych impulsów przez jakikolwiek obiekt znajdujący się w otoczeniu;
- Odebranie impulsów odbitych (ech) przez antenę radaru;
- Wzmocnienie, a następnie wyświetlenie tych ech w taki sposób aby zarówno namiar jak i odległość były widoczne niezwłocznie i jednocześnie.





# Fale radiowe

Poprzez falę elektromagnetyczną (radiową) rozumiemy zaburzenie pola elektromagnetycznego, propagujące ze skończoną prędkości (prędkość światła).

Na początku XIX stulecia fizyk angielski J.C. Maxwell stworzył teorię pola elektromagnetycznego, która określa istotę fal elektromagnetycznych.

Równania te z praktycznego punktu widzenia sprowadzają się do interpretacji słownej:

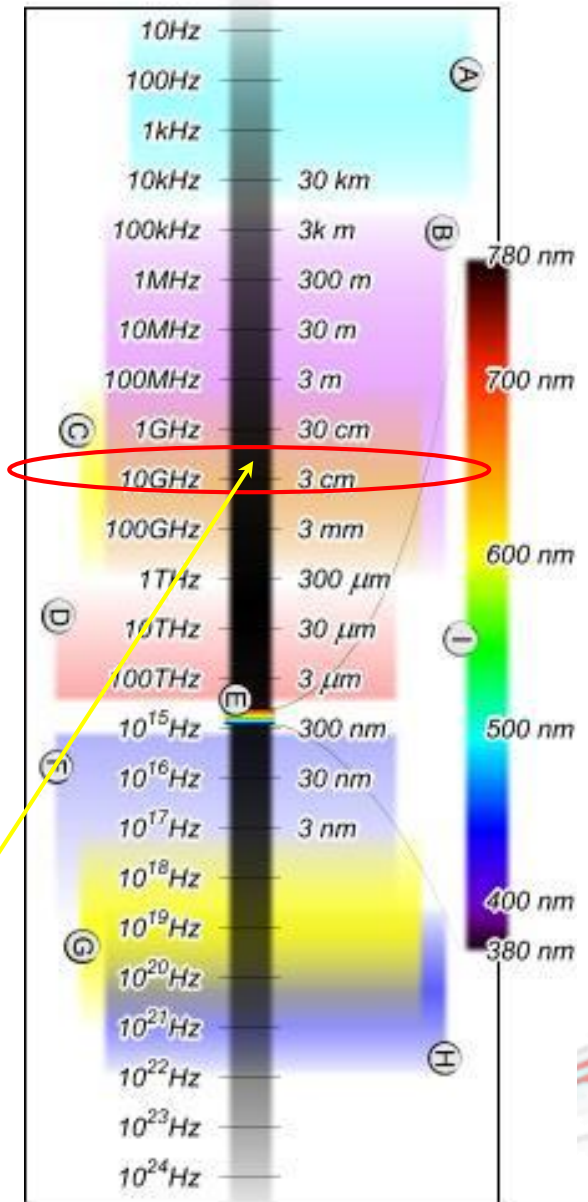
- Zmiennemu polu magnetycznemu zawsze towarzyszy zmienne pole elektryczne,
- Zmiennemu polu elektrycznemu zawsze towarzyszy zmienne pole magnetyczne,
- Zmienne pole magnetyczne wytwarza zamknięte pętle sił,
- Fala elektromagnetyczna rozchodzi się w próżni z prędkością światła, a w innych ośrodkach zależnie od ich właściwości,
- Rozkład przestrzenny, siła i kierunek pola w przestrzeni jest zdefiniowany poprzez rozkład ładunków elektrycznych ich źródła.



# Fale radiowe

- A - fale radiowe bardzo długie (ELF, SLF, ULF, VLF)
- B - fale radiowe
- C - mikrofae
- D - podczerwień
- E - światło widzialne
- F - ultrafiolet
- G - promieniowanie rentgenowskie (promieniowanie X)
- H - promieniowanie gamma
  
- I - widmo światła widzialnego

Pasmo fal radiowych wykorzystywane we współczesnych radarach morskich (X, S)



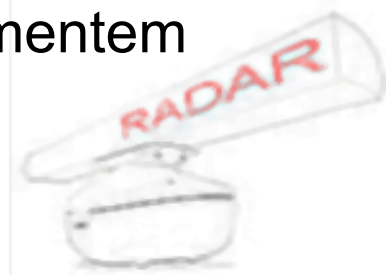
# Rodzaje radarów

- przeznaczenia
  - morskie,
  - lotnicze,
  - lądowe,
- zastosowania
  - śledzenie obiektów,
  - meteorologiczne,
  - wczesne ostrzeżenie itp.,
- trybu pracy
  - radary pracujące na fali ciągłej;
  - Radary impulsowe;
- częstotliwości pracy
  - pasma mikrofalowe,
  - inne.



# Rodzaje radarów

- radary emitujące falę ciągłą CW (continuous wave) używa się szczególnie dla pomiarów przesunięcia Dopplera w celu dokładnego pomiaru prędkości szybko poruszających się obiektów, a także do naprowadzania rakiet balistycznych;
- Radary impulsowe PR (pulse radar) można dodatkowo podzielić ze względu na częstotliwość powtarzania impulsów PRF (pulse repetition frequency).
  - W radarach o małym PRF, gdzie nie jest istotny pomiar przesunięcia Dopplera stosuje się prostsze układy elektroniczne,
  - Natomiast większe PRF oprócz pomiaru odległości i namiaru na obiekt umożliwiają bezpośredni pomiar jego prędkości, lecz konieczne jest stosowanie bardziej zaawansowanych układów.
- Dobór częstotliwości natomiast jest kluczowym elementem pracy systemu radiolokacyjnego.



# Częstotliwości wykorzystywane w radiolokacji

Oznaczenie pasma	Częstotliwość [GHz]	Nowe oznaczenie literowe
VHF	0,1 - 0,3	A
UHF	0,3 - 0,5	B
	0,5 - 1,0	C
L	1 - 2	D
S	2 - 3	E
	3 - 4	F
C	4 - 6	G
	6 - 8	H
X	8 - 10	I
	10 - 12	J
Ku	12 - 18	J
K	18 - 26,5	J<20, K>20
Ka	26,5 - 40	K
fale milimetrowe	40 - 100	L<60, M>60

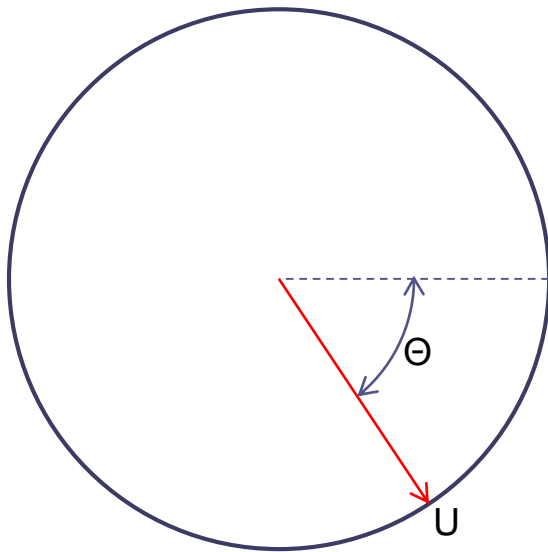
# Natężenie promieniowania

- Wielkość fizyczna określana jako strumień promieniowania wysyłana w jednostkowy kąt bryłowy; jednostką natężenia jest wat na steradian:

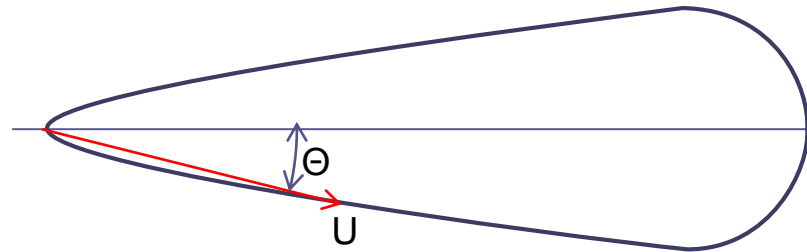
$$U = \frac{m \cdot c}{4\pi} \left[ \frac{W}{sr} \right]$$



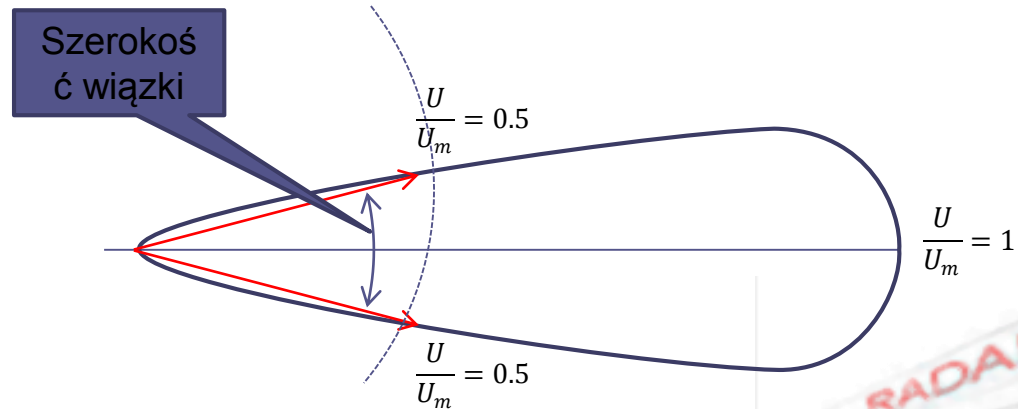
# Układ promieniowania (radiation pattern)



Antena izotropowa, natężenie promieniowania nie zależy od kąta  $\Theta$



Natężenie promieniowania  $U$ , zmienia się w funkcji kąta  $\Theta$ . Maksymalna wartość natężenia występuje gdy  $\Theta=0^\circ$ ;



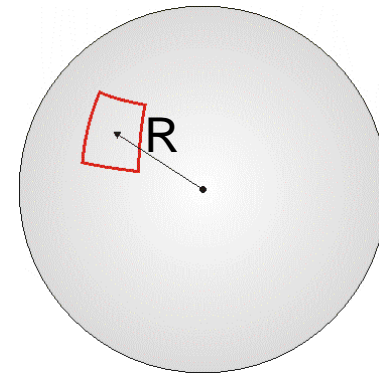
Znormalizowany układ promieniowania anteny kierunkowej;



# Gęstość mocy

- Dla radaru z anteną izotropową gęstość mocy padającej wynosi:

$$P_D = \frac{\text{Moc transmitowana}}{\text{powierzchnia kuli}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$



- Dla obiektu w odległości  $R$ , przy mocy impulsu  $P_t$  gęstość mocy padającej wynosi:

$$P_D = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$





# Wzmocnienie anteny

- Morskie systemy radarowe wykorzystują anteny kierunkowe o wzmocnieniu  $G_t$  i aperturze anteny  $A_e$ , czyli takie które promieniują w określonym kierunku co daje nam wiązkę w kształcie wycinka sfery

$$P_D = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2}$$

$$G_t = K \frac{4\pi}{\Theta_e \Theta_a} \left[ \frac{W}{sr} \right]$$

$G_t$	Wzmocnienie anteny nadawczej
K	$K \leq 1$ – współczynnik definiujący fizyczną aperturę radaru
$\Theta_e$	Wertykalny kąt rozsyłu wiązki radarowej
$\Theta_a$	Horyzontalny kąt rozsyłu wiązki radarowej

# Energia odbita od obiektu

- Wprowadzając wskaźnik  $\sigma$  definiujący ilość energii padającej w stosunku do energii rozproszonej przez dany obiekt, gęstość mocy rozproszonej w pobliżu anteny odbiorczej możemy zapisać następująco:

$$P_s = \left( \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \right) \sigma \left( \frac{1}{4\pi R^2} \right) = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi R^2)^2}$$

Gęstość mocy  
[w/m<sup>2</sup>]  
wytworzona w  
pobliżu obiektu

Moc [w]  
przechwycona  
przez obiekt

Izotropowe  
rozpraszanie mocy  
przez obiekt [1/m<sup>2</sup>] w  
kierunku odbiornika



# Radarowy przekrój poprzeczny (skuteczna powierzchnia odbicia)

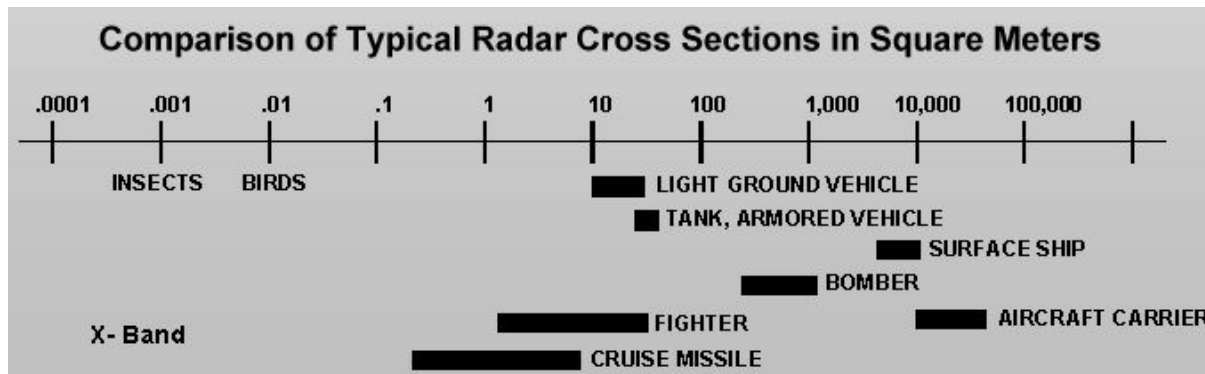
- Wskaźnik  $\sigma$  - radarowy przekrój poprzeczny RPP (radar cross section RCS) – jest to pole powierzchni, które przechwytyjąc część energii, rozprasza ją izotropowo wytwarzając echo równe odbitemu od obiektu.
- Najbardziej typową izotropową powierzchnią odbicia jest sfera, dla której RCS jest niezależny od jej ustawienia.

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{\text{Gęstość mocy padającej}}{\text{Gęstość mocy rozpraszanej}} [m^2]$$



# Radarowy przekrój poprzeczny (skuteczna powierzchnia odbicia)

- RCS jest zależny od kształtu obiektu, wielkości, położenia względem radaru, oraz materiału z jakiego jest zrobiony (własności odbijających);
- Obiekt rzeczywisty nigdy nie rozprasza impulsu sondującego izotropowo;
- RCS jest teoretycznym polem powierzchni.



# Moc wiązki odbitej

- Przyjmując efektywna aperturę anteny jako  $A_{er}$ , moc wiązki odbitej od obiektu jest następująca:

$$P_r = P_s A_{er} = \frac{P_t G_t \sigma A_{er}}{(4\pi)^2 R^4}$$

- Przyjmując  $G_r$  za wzmocnienie anteny odbiorczej:

$$G_r = \frac{4\pi A_{er}}{\lambda^2}$$

- moc odebrana wynosi:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} [W]$$



# Moc odebrana

- Dla radarów monostatycznych wzmocnienia anteny są jednakowe przy nadawaniu i odbiorze:

$$G_t = G_r = G$$

- Zatem moc odebrana wynosi:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} [w]$$



# Moc odebrana

- Powyższe równanie nie uwzględnia strat na obwodach radaru i otoczeniu L oraz wzmacnienia operacyjnego  $G_p$ :

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2 L G_p}{(4\pi)^3 R^4}$$



# Równanie radaru

- Maksymalny zasięg radaru  $R_{max}$ , przy założeniu  $S_{min}$  jako minimalnego sygnału, który może być wykryty wynosi:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2 L G_p}{(4\pi)^3 S_{min}}} [m]$$





# Zasięg maksymalny radaru

- Maksymalny zasięg w wolnej przestrzeni to maksymalna odległość, z której dany radar może wykryć określony obiekt przy braku wpływu krzywizny Ziemi i tłumienia fali elektromagnetycznej. Zatem przyjmujemy

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_i \cdot G_0 \cdot A_{sk} \cdot \sigma}{4 \cdot \pi^2 \cdot P_{\min}}}$$

gdzie:

- $P_i$  - moc impulsu,
- $G_0$  - zysk anteny,
- $A_{sk}$  - skuteczna powierzchnia anteny,
- $\sigma$  - powierzchnia odbicia obiektu RPP,
- $P_{\min}$  - minimalna moc impulsu po odbiciu od obiektu.



# Zasięg maksymalny radaru

- Po przekształceniach dla radaru impulsowego otrzymujemy:

$$R_{\max} = f \left( \sqrt[4]{(P_i \cdot \tau) (G_0 \cdot A_{sk}) \left( \frac{\zeta_r}{F} \right) \sigma} \right)$$

The equation is annotated with colored boxes and callouts:

- Red box:** Parameters of the transmitter ( $P_i \cdot \tau$ )
- Green box:** Antenna parameters ( $G_0 \cdot A_{sk}$ )
- Blue box:** Receiver parameters ( $\frac{\zeta_r}{F}$ )
- Yellow box:** Target properties ( $\sigma$ )

Parametry nadajnika

Parametry anteny

Parametry odbiornika

Właściwości obiektu

gdzie:

$\tau$  - czas trwania impulsu,

$\zeta_r$  - współczynnik dostrojenia częstotliwości radaru,

$\sigma$  - radarowy przekrój poprzeczny

$F$  - współczynnik szumów odbiornika.

*Zasięgu maksymalny w wolnej przestrzeni jest proporcjonalny do pierwiastka czwartego stopnia z parametrów radaru i obiektu, dlatego dopiero 16-krotna zmiana któregośkolwiek z nich spowoduje dwukrotny wzrost zasięgu.*



# Definicje

- **Moc impulsu** radarowego jest to szczytowa moc impulsu sondującego. Dla statków handlowych o nieograniczonym zasięgu pływania stosuje się moce od kilku do kilkudziesięciu kW (Nie dotyczy radarów bezmagnetronowych).
- **Czas trwania impulsu** jest to okres czasu, jaki upływa między momentami, w których wartość impulsu przewyższa 0.9 jego amplitudy. Jak widać z równania czas trwania impulsu wpływa tak samo na zasięg radaru jak moc impulsu. W celu zwiększenia maksymalnego zasięgu radaru należy stosować dłuższy czas trwania impulsu sondującego.



# Definicje

- **Zysk anteny** jest energetyczną miarą kierunkowości anteny nadawczej. Parametr ten jest definiowany jako iloraz maksymalnej mocy promieniowanej przez antenę kierunkową na głównym kierunku promieniowania do maksymalnej mocy promieniowania anteny bezkierunkowej na tym samym kierunku co antena kierunkowa. Zysk anteny jest zależny od jej konstrukcji oraz stosunków wymiarów do długości promieniowanej fali.
- zysk anteny jest wprost proporcjonalny do rozmiarów anteny a odwrotnie do kwadratu długości promieniowanej fali. Stąd anteny radarów 10 cm mają znacznie gorszą kierunkowość niż anteny radarów 3 cm.



# Definicje

- ***Współczynnik jakości regulacji radaru*** zależny jest od staranności przeprowadzenia procesu regulacji, zawiera się w granicach od 0 do 1. Wartość 0 przyjmuje wówczas gdy został popełniony kardynalny błąd, np.: w procesie regulacji zapomniano wyregulować wzmocnienie do granicy widzialności szumów własnych, pozostawiając pokrętło w lewym skrajnym położeniu. Wartość 1 przyjmuje gdy optymalna regulacja powoduje pełne wykorzystanie potencjału wykrywania radaru.



# Definicje

- **Współczynnik szumów odbiornika** jest parametrem określającym ile razy dany odbiornik pogarsza stosunek sygnału do szumu na wyjściu w porównaniu z odbiornikiem który nie powoduje szumów. Parametr ten jest ściśle związany z minimalną mocą sygnału powodującą wyświetlenie echa na ekranie radaru. Minimalna moc sygnału określa czułość odbiornika, którą ograniczają szумы własne. Szumami własnymi nazywane są zakłócenia występujące w radarze na skutek ruchu elektronów. Przy dużym wzmocnieniu są one wyświetlane i uniemożliwiają wykrycie słabych ech. Aby echo było widoczne, sygnał powracający od niego musi być o większej mocy niż szумы własne.
- Współczynnik szumów podawany jest w decybelach i wynosi kilkanaście dB w radarach starszych do kilku dB w radarach nowszego typu.



Koniec

