



Radary i telekomunikacja satelitarna

Plan wykładu

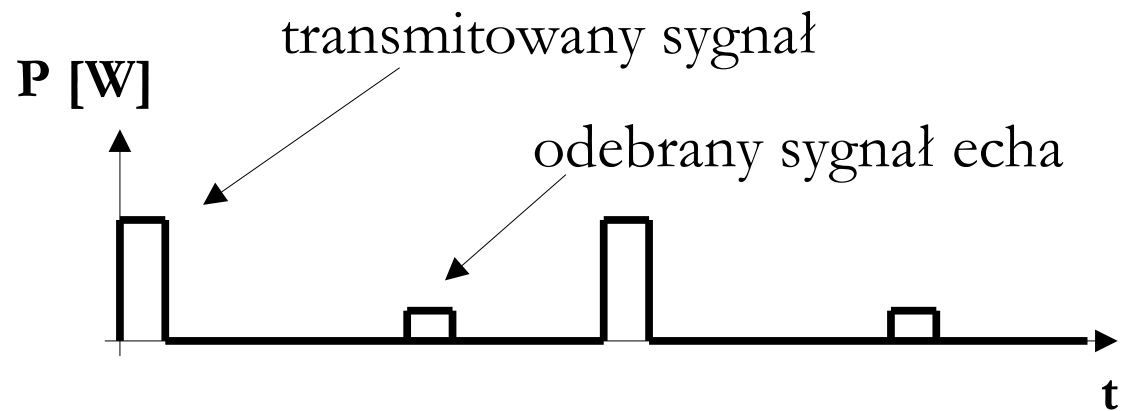
1. **Radary:** idea i zastosowania
2. **Równanie** radaru
3. Co może **wykryć** radar?
4. **Typy i konfiguracje** radarów
5. **Systemy satelitarne:** orbity i (krótko) o konstelacjach

Koncepcja radaru

RA**D**io **D**etection **A**nd **R**anging

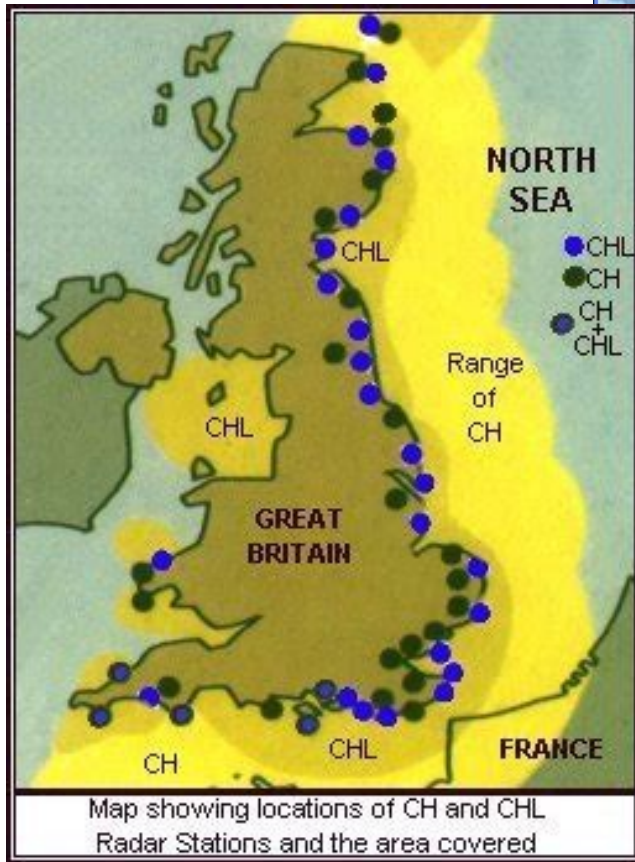


Radar aktywny:
(transmitter & receiver)



Pierwsze zastosowania: WW2

The British Chain Home Radar



© MIT Lincoln Laboratory

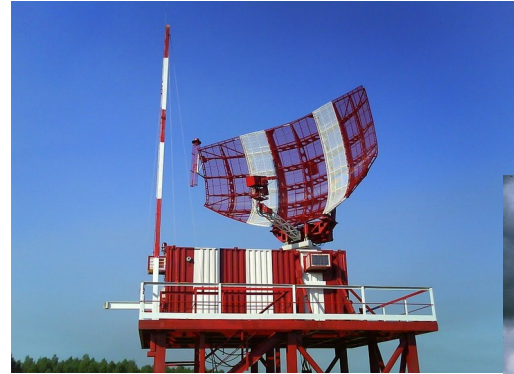
Zastosowania radarów



wojskowe:



lotniskowe:



meteorologiczne:



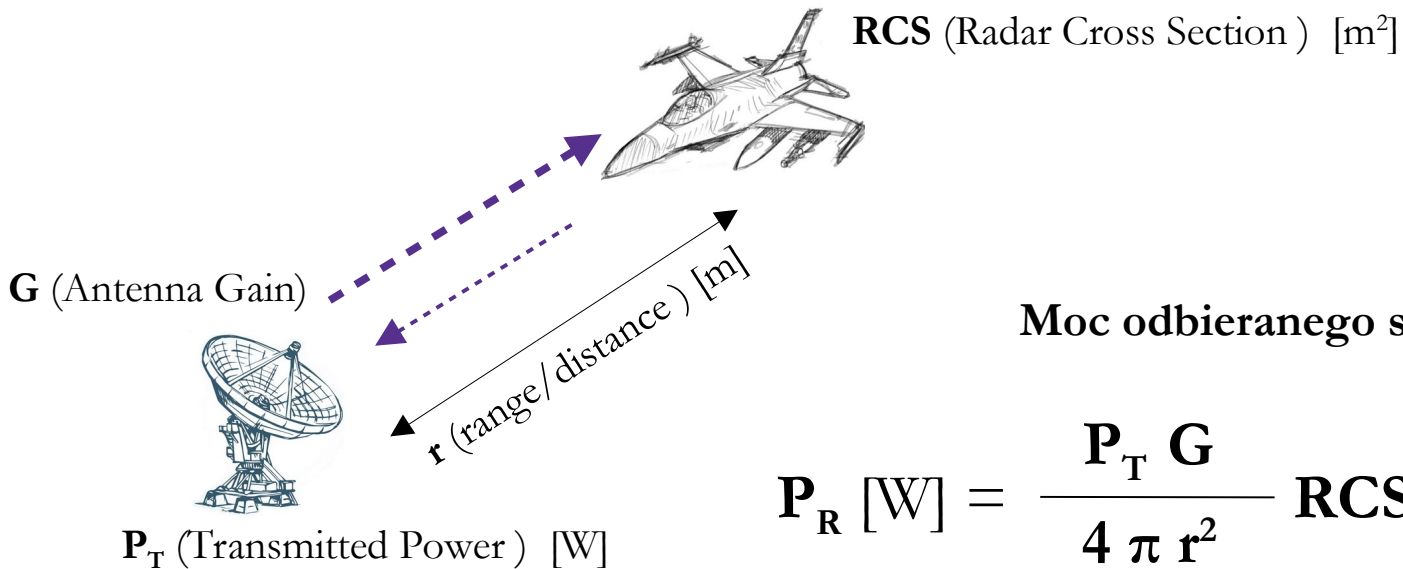
na jachtach,
statkach,
samolotach:



samochodowe:



Równanie radaru



Moc odbieranego sygnału:

$$P_R [W] = \frac{P_T G}{4 \pi r^2} \text{RCS} \frac{A_s}{4 \pi r^2} \frac{1}{L}$$

L (Losses) - inne straty mocy w systemie radarowym

Apertura skuteczna anteny radaru:

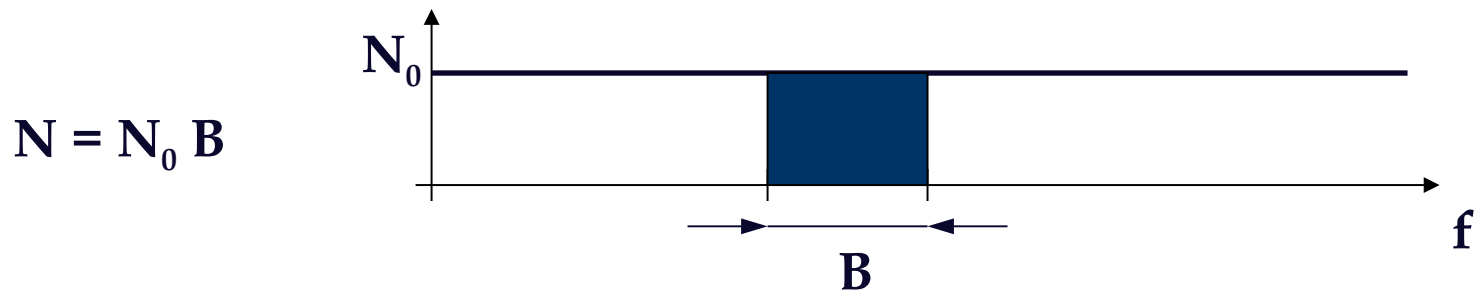
$$A_s = \frac{\lambda^2}{4 \pi} G \implies P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \text{RCS}}{(4 \pi)^3 r^4 L}$$

Szumy

noises, noise temperature, noise figure

Szumy termiczne N:

- generowane przez każdy obiekt o temperaturze większej niż 0 K
- szumy AGWN (Additive White Gaussian Noise):



$$N_0 = k T_0 + k T_e = k T_s = k T_0 \left(1 + \frac{T_e}{T_0}\right)$$

stała Boltzmann:
 $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ [W/Hz/K]}$

temperatura otoczenia
(zazwyczaj 290 K)

temperatura szumowa
odbiornika (equipment)

temperatura szumowa
całego systemu

współczynnik szumów systemu
- noise figure (F albo n_f)

$$N = k T_s B$$

Co z tego wynika dla radarów?

Stosunek mocy S/N w odbieranym sygnale radarowym:

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2 RCS}{(4\pi)^3 r^4 L}$$
$$N = k T_s B$$
$$S/N = \frac{P_T G^2 \lambda^2 RCS}{(4\pi)^3 r^4 k T_s B L}$$

Diagram illustrating the relationship between radar parameters and the received signal-to-noise ratio (S/N). The equation for S/N is shown with terms grouped into two categories:

- zależne od radaru** (dependent on the radar): P_T , G^2 , λ^2 , r^4 , k , T_s , B , and L .
- zależne od celu/obiektu** (dependent on the target/object): RCS .

Przykład:

Radar wykrywa cele z $RCS = 2 \text{ m}^2$ na 200 km. Chcemy zwiększyć zasięg dwukrotnie.

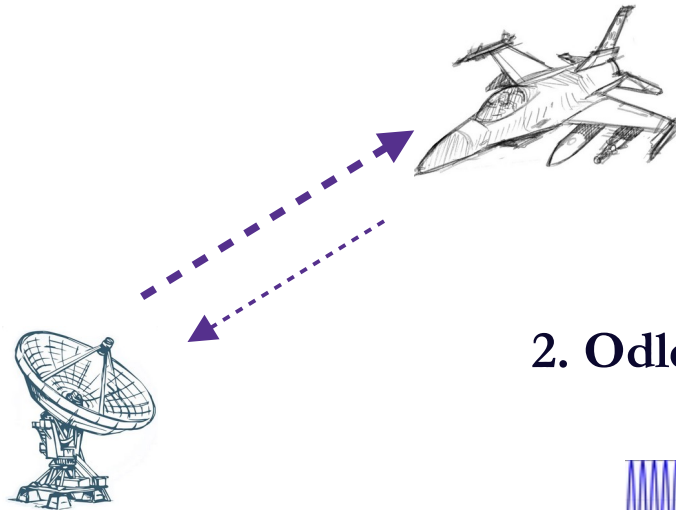
Musimy:

- zwiększyć moc 16-krotnie (o 12 dB), albo
- zwiększyć zysk anteny 4-krotnie (o 6 dB), albo
- liczyć się ze spadkiem wykrywalności: min. RCS wzrośnie do 32 m^2

$$SNR [\text{dB}] = 10 \log_{10} (S/N)$$

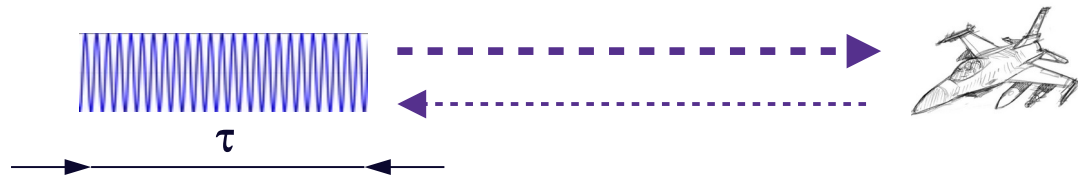
Co może wykryć radar?

(1)



1. Obecność obiektu (gdy SNR jest wystarczająco duży, vide poprzedni slajd)

2. Odległość do obiektu:



dokładność: $\Delta r = \frac{\tau c}{2}$

Ale, radar z falą FM
(frequency modulated / chirped pulse):

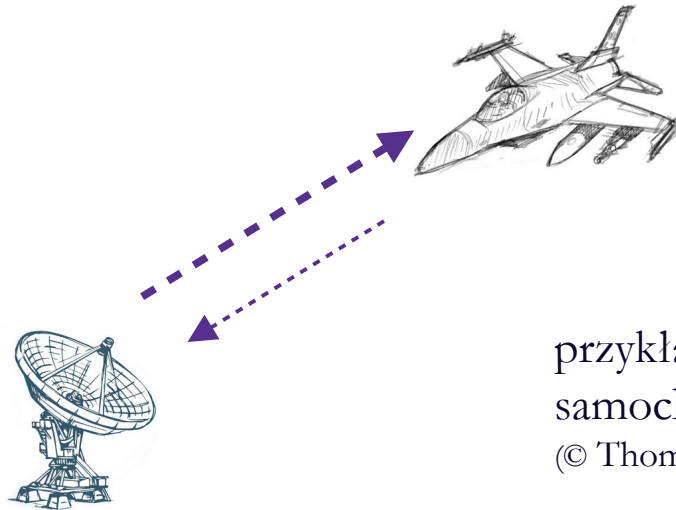


+ matched filter

dokładność: $\Delta r = \frac{c}{2B}$

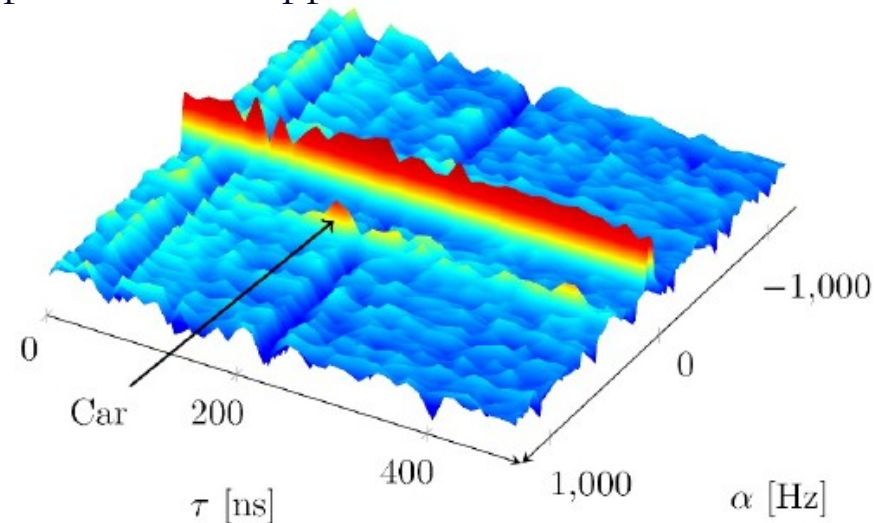
Co może wykryć radar?

(2)



3. Prędkość (radialna) obiektu: poprzez efekt Dopplera:

przykład z radaru
samochodowego:
(© Thoma et al. 2023)



4. Kierunek: zysk anteny $G \uparrow \Rightarrow 2\theta_{3dB} \downarrow$

\Rightarrow rozdzielczość kątowna radaru \uparrow i zależy od λ/D [rad]

\uparrow wymiar anteny

5. Rozmiar obiektu (RCS, ale ma to ograniczenia, vide technologia stealth)

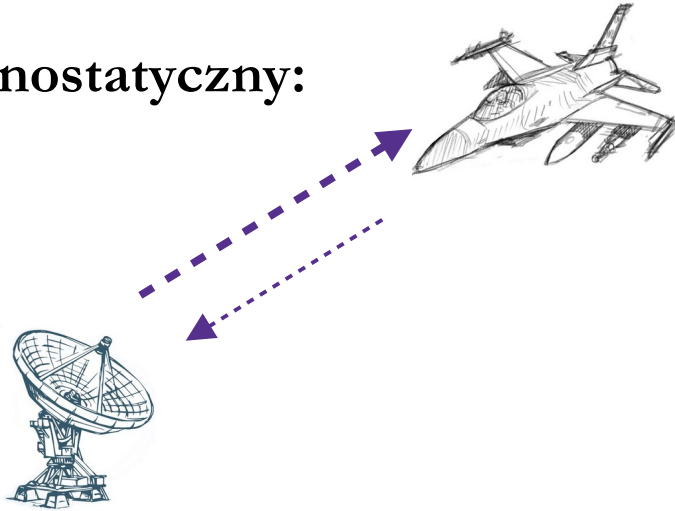
6. Kształt i materiał \Rightarrow czym jest obiekt

(charakterystyka w szerokim paśmie częstotliwości,

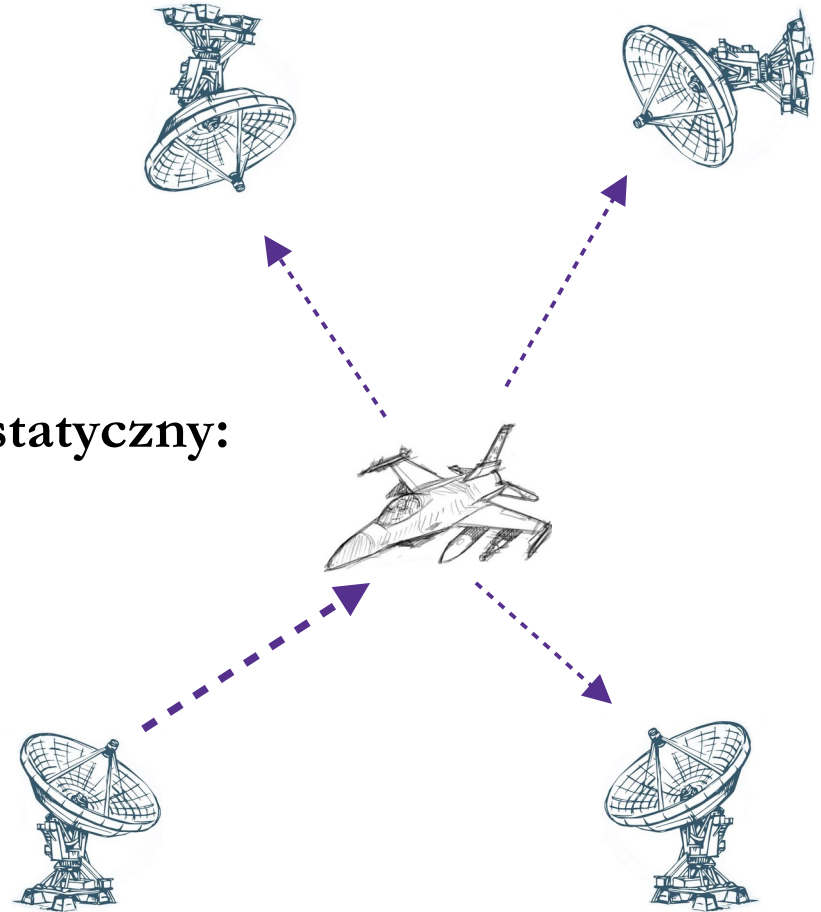
współczynniki odbicia zależne od ϵ , μ i σ materiału obiektu)

Konfiguracje radarów

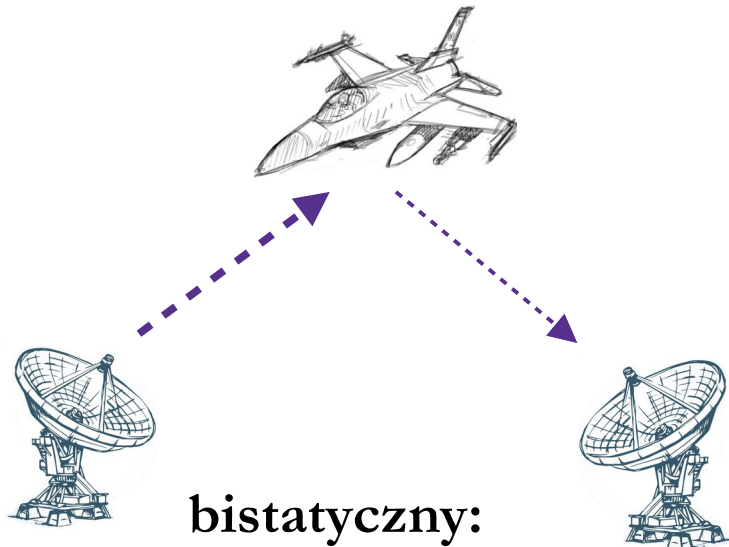
monostatyczny:



multistatyczny:



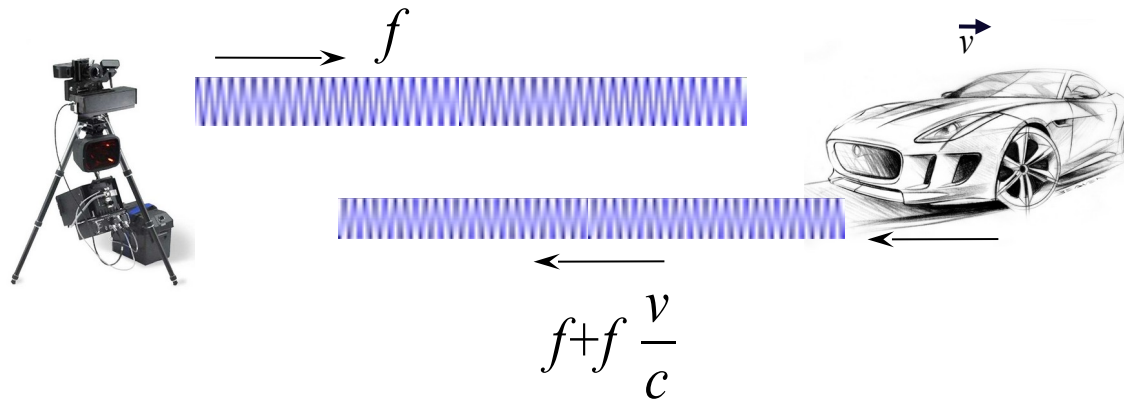
bistatyczny:



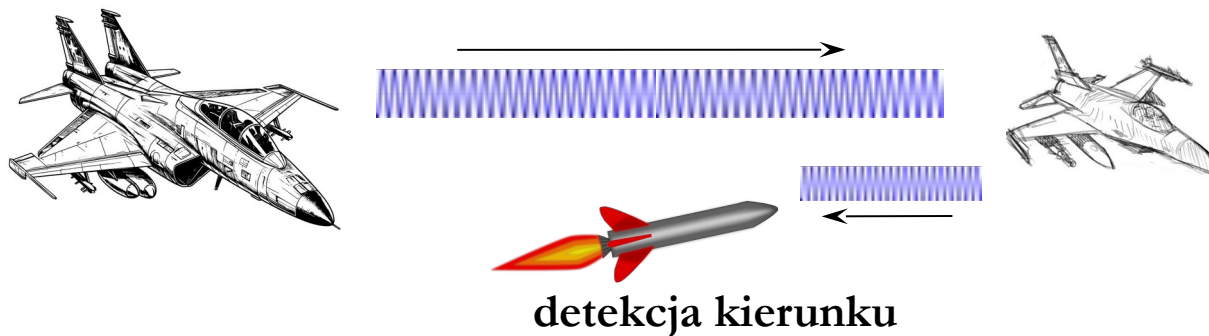
Radar z falą ciągłą (1)

Continuous Wave (CW) Radar

Doppler radar (detekcja prędkości):



Semi-active radar homing (samonaprowadzanie pocisków):

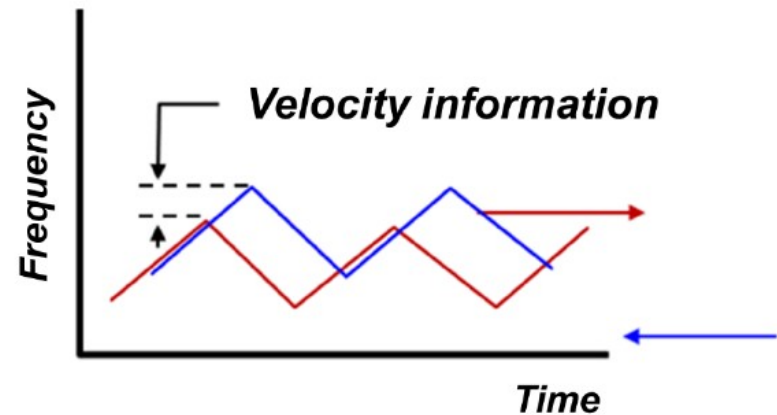
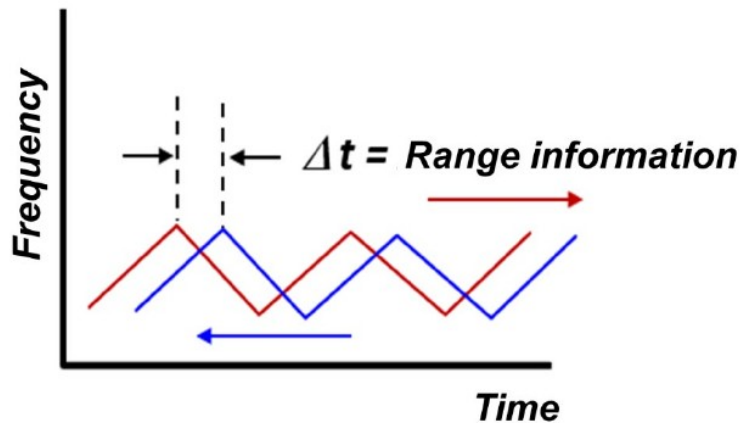
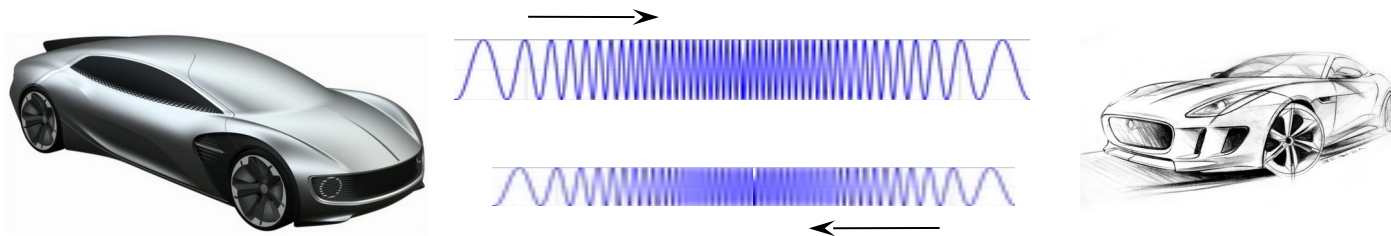


Radar z falą ciągłą (2)

Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Radar

Radary samochodowe:

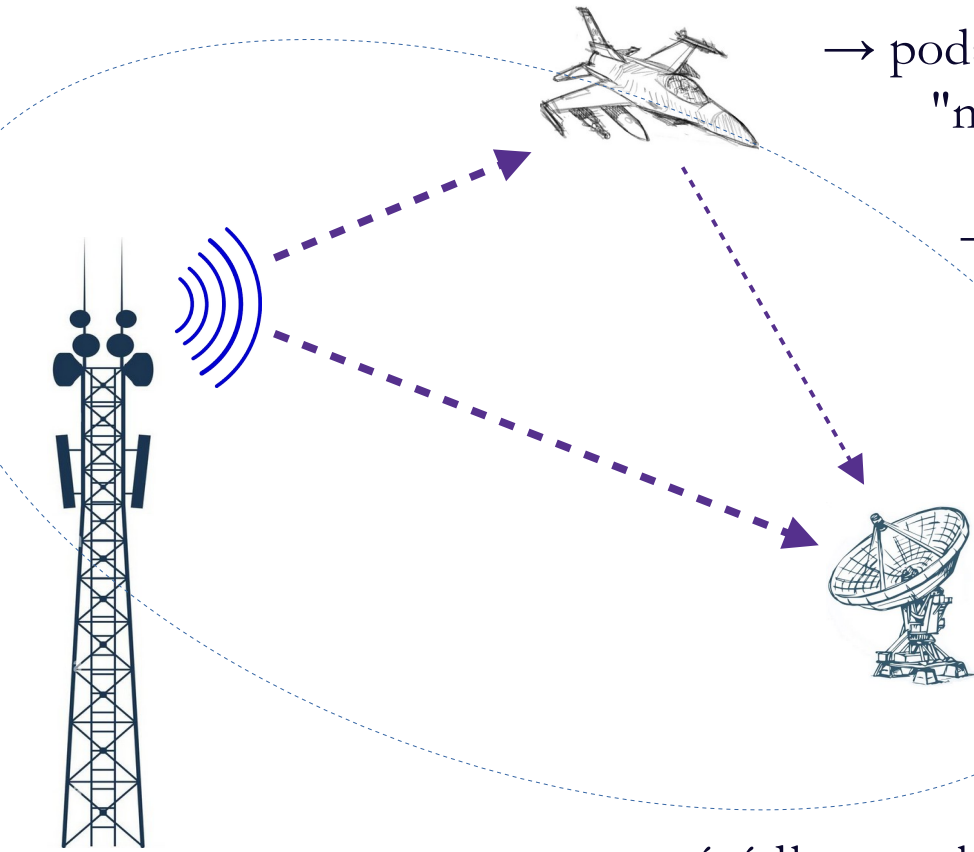
- detekcja prędkości, odległości, kierunku
- popularne pasma: 21-26 i 76-81 GHz



→ Transmitted signal
← Received signal

Radary pasywne

Passive Covert/Bistatic Radars



Tx: illuminator of opportunity

→ podstawowe zalety: ograniczenia emisji EM, "niewidzialność", niski koszt

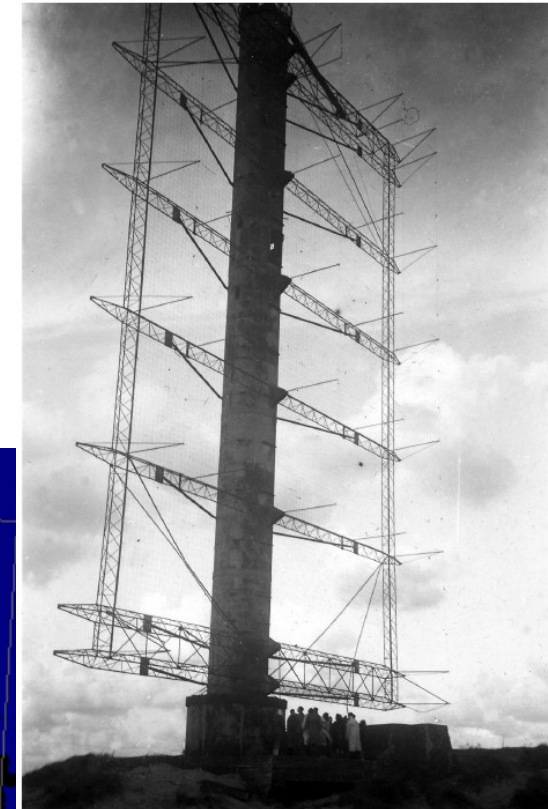
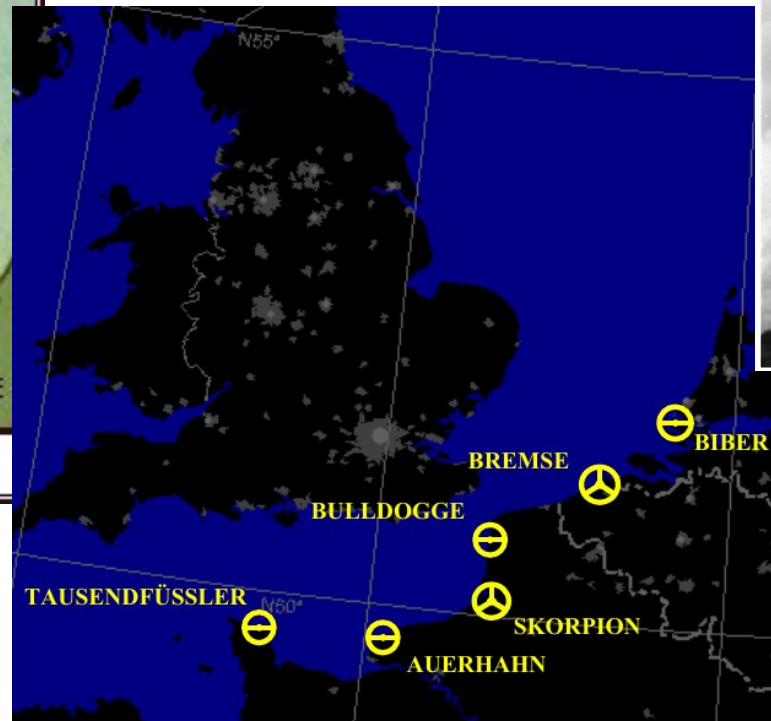
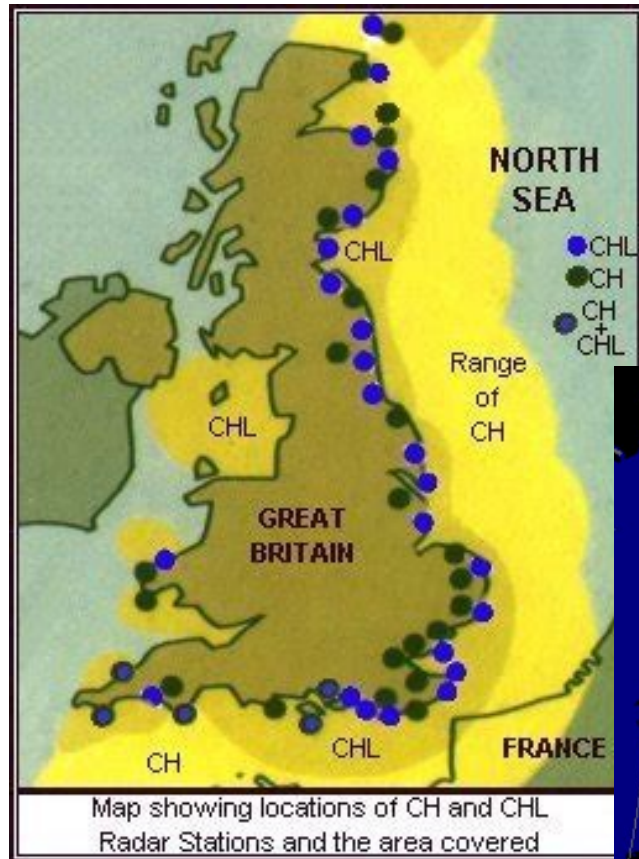
→ konieczność dostosowania się do nadawanego sygnału

→ korelowanie dwóch sygnałów: pomiar TDoA

→ efekt: cel na elipsie, w której ogniskach znajdują się Tx i Rx

→ źródła sygnałów dla radarów pasywnych: stacje bazowe, nadajniki telewizyjne/rozgłośni radiowych, satelity telekomunikacyjne, inne radary

I znów WW2: Klein Heidelberg



© Jeroen Rijpsma

Technologia stealth

→ konstrukcja powierzchni samolotu:
gładkie i ukośnie powierzchnie

→ materiał i farba pochłaniające
fale EM na częstotliwościach radarów

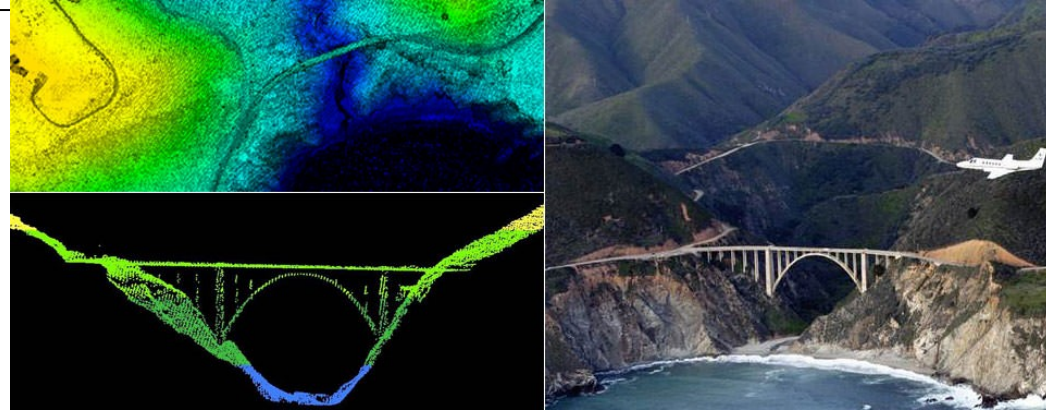
→ zmniejszanie śladu termicznego
(ukrywanie dyszy) i hałasu



Przykładowe wartości:

Obiekt	RCS [m²]
Samochód	100
Rower	2
Człowiek	1
Ptaki	0.01
Owady	0.0001
Kontenerowiec	10 000
Statek przybrzeżny	500
Samolot pasażerski	50
Helikopter	3
Su-27	20
Mig-29, F-16	5
F-35 Stealth	0.005

A jeżeli nie MHz/GHz, to...



© geodesy.noaa.gov/INFO/facts/lidar.shtml

Lidary (LIght Detection And Ranging):

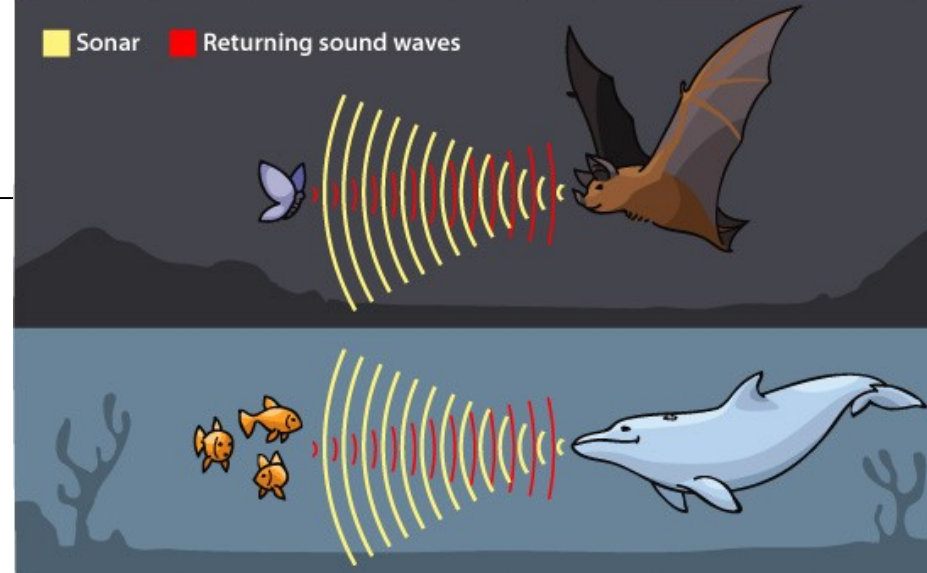
- zakres częstotliwości: promieniowanie IR, widzialne, UV
- b. dokładna estymacja odległości (3D laser scanning),
również kąta i prędkości radialnej
- zastosowania: głównie tworzenie dokładnych map (3D point clouds)
oraz skanowanie/obrazowanie terenu, budynków,
struktur geologicznych, roślinności, itp.

Kamera/ludzkie oko? => pasywny lidar ;-)

Echolokacja

Prędkość dźwięku (v) zależy od temperatury, ciśnienia, zasolenia:

- w powietrzu ~ 340 m/s
- w wodzie ~ 1500 m/s



© todropsience.tumblr.com

Częstotliwości słyszalne: do 20 kHz, powyżej: ultradźwięki

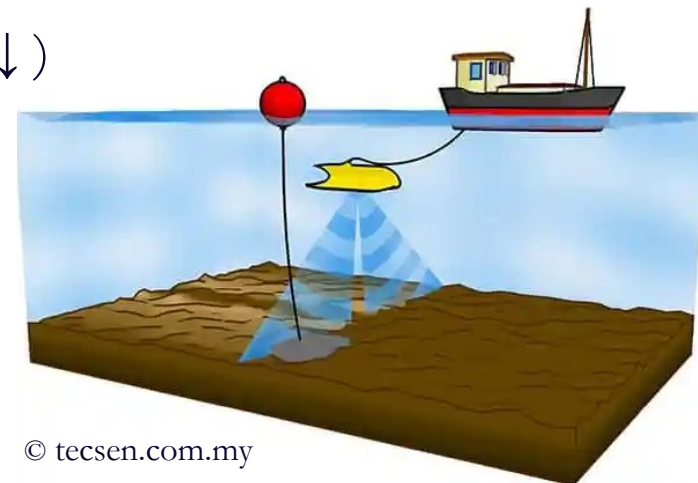
Nietoperze: do 200 kHz

Delfiny: do 150 kHz

SONAR: SOund Navigation And Ranging

- pasmo (B) to kHz, nawet do 1 MHz ($f \uparrow \Rightarrow$ zasięg \downarrow)

- rozdzielczość przestrzenna: $\approx \frac{v}{2B}$

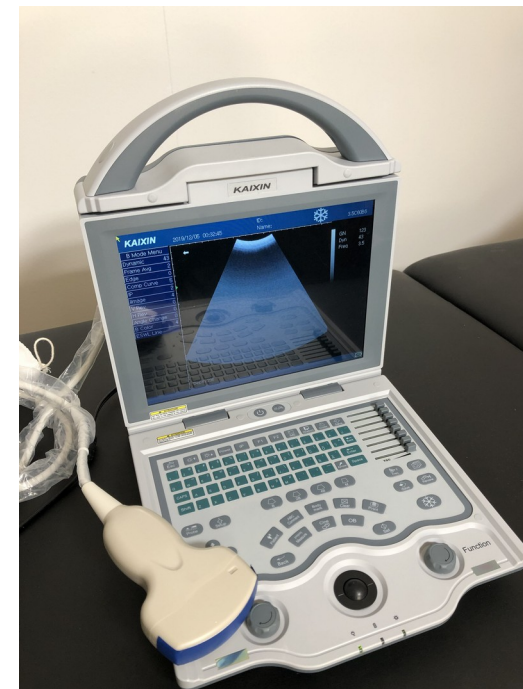


© tecsen.com.my

Zastosowania w medycynie

Badania USG

(ultrasonografia medyczna):
- częstotliwości do 40 MHz



Radiologia (badania RTG):

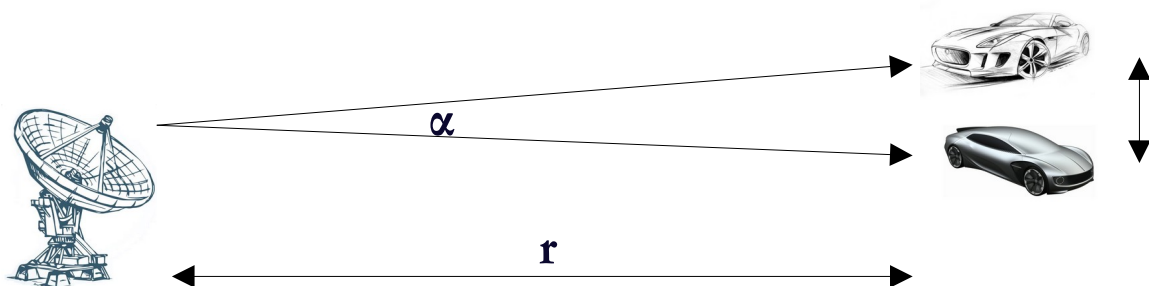
- fale EM $10\text{-}35\text{ EHz}$ (10^{18} Hz)



A jeżeli chcemy "patrzeć" dalej?

Synthetic Aperture Radar (SAR)

rozdzielczość kątowna radaru $\alpha = \frac{\lambda}{D}$



rozdzielczość
w płaszczyźnie kąta
(dokładność obrazowania):

$$\Delta d = \frac{\lambda r}{D}$$

np. dla:

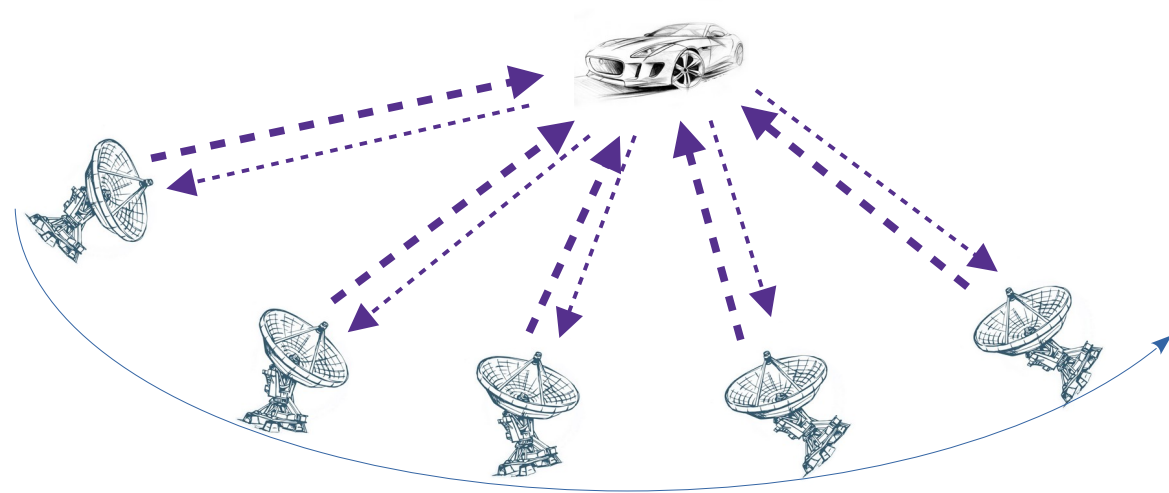
$f = 10 \text{ GHz}$ ($\lambda = 3 \text{ cm}$),

$r = 500 \text{ km}$

i wymaganej $\Delta d = 1 \text{ m}$:

$D = \dots 15\,000 \text{ m!}$

Możemy sobie "złożyć" dużą antenę:



rozdzielczość w płaszczyźnie
kąta radaru SAR:

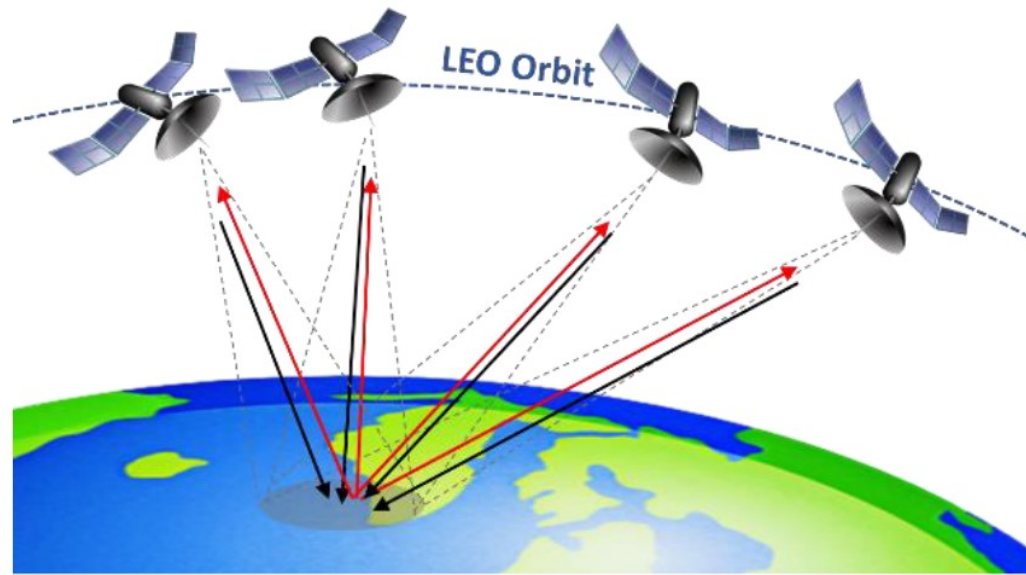
$$\Delta d = \frac{D}{2}$$

Satelitarne radary SAR

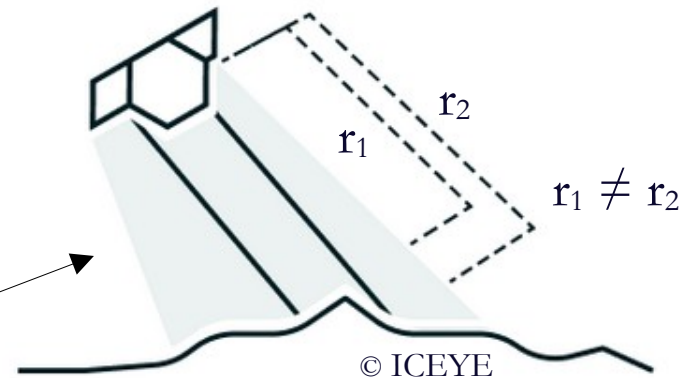
- działają niezależnie od pory dnia/nocy i zachmurzenia
- pozwalają na regularną obserwację danego terenu

→ rozdzielczość zdjęć radarowych:

- w jednym wymiarze: $D/2$
- rozdzielczość w drugim wymiarze (przestrzenna) wynika z nachylenia wiązki radarowej do powierzchni Ziemi:

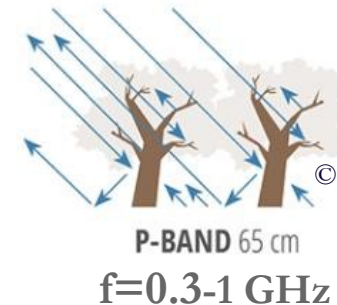
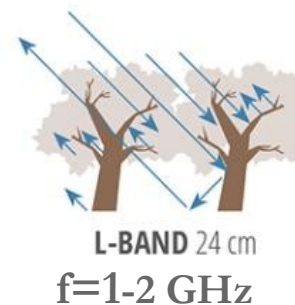
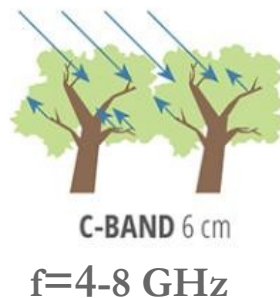
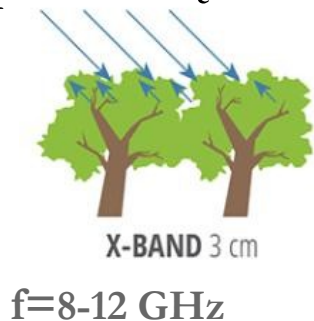


© M. Reza et al. 2022



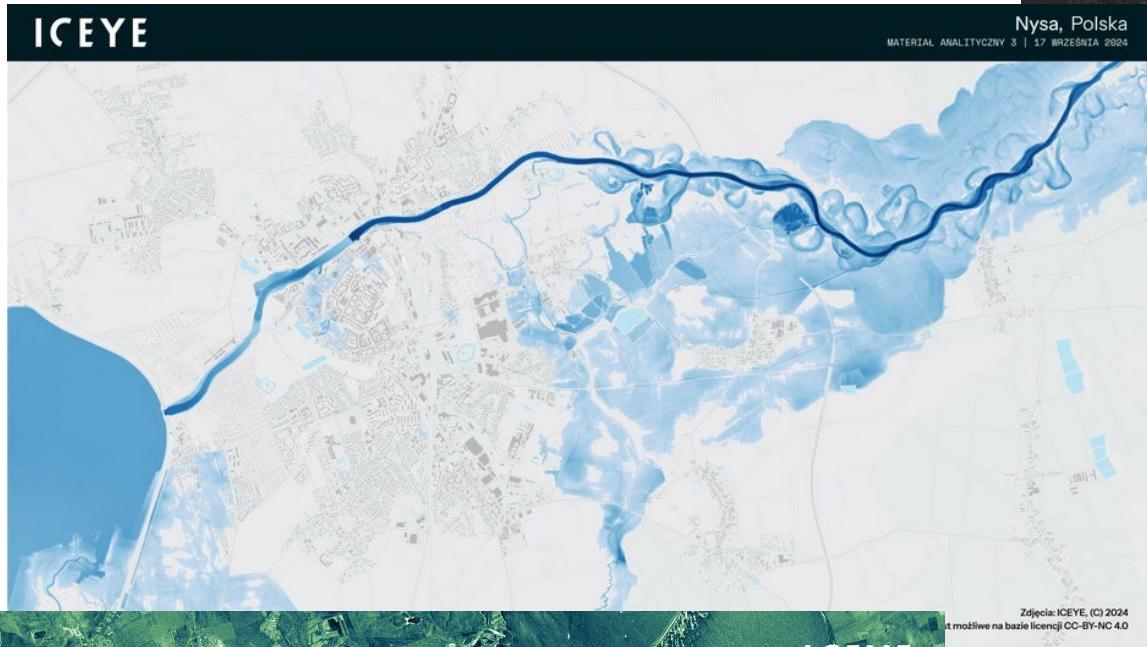
© ICEYE

→ dobór pasma częstotliwości do zastosowania:



© earthdata.nasa.gov

Zdjęcia radarowe SAR



- ICEYE** (R. Modrzewski & P. Laurila):
- około 40 satelitów SAR
 - pasmo X-Band
 - zdjęcia o rozdzielczości nawet 25 cm

Satelite telekomunikacyjne



Orbity satelitów

Kiedy satelita może krążyć po orbicie?

$$\frac{G M m}{r^2} = \frac{m v^2}{r}$$

siła grawitacji

siła odśrodkowa


$$v = \sqrt{\frac{G M}{R + h}}$$

G → stała grawitacji

M → masa Ziemi

m → masa satelity

v → prędkość satelity

r → odległość od środka Ziemi

$$r = R + h$$

R → promień Ziemi

h → wysokość orbity

Orbity i konstelacje



Orbity GEO (Geostationary Earth Orbit):

- wysokość 35 786 km, b. duże opóźnienia
- satelita "zawieszony" nad jednym punktem na równiku
- zastosowania: głównie broadcasting (telewizja),
satelity meteo, również dostęp do internetu

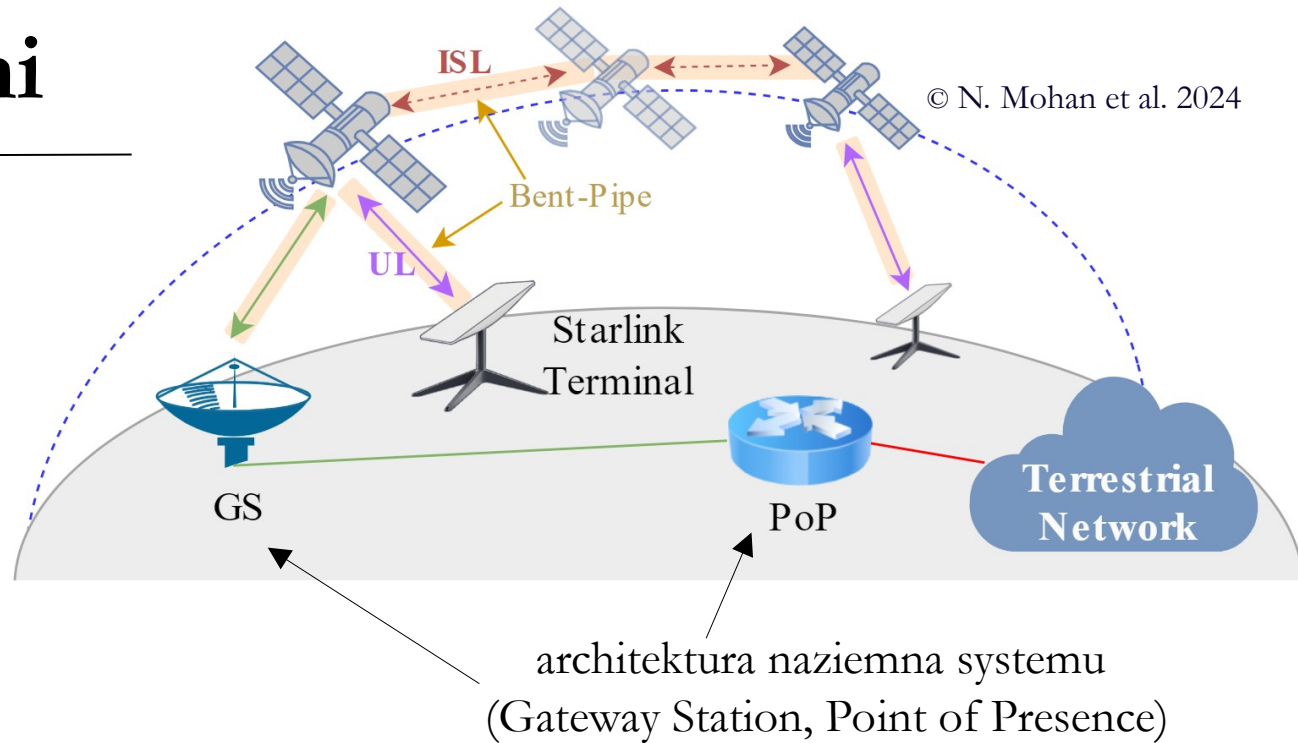
Orbity MEO (Medium Earth Orbit):

- wysokość 5-25 tys. km,
- obecnie głównie satelity nawigacyjne GPS Navstar/Galileo
- Navstar: orbity o czasie obiegu Ziemi 12 godzin

Orbity LEO (Low Earth Orbit):

- wysokość do 2 tys. km,
- najpopularniejsze dla systemów dostępu do sieci i transmisji danych,
przede wszystkim Starlink (ponad 7 tys. satelitów), również OneWeb (około 600 satelitów), w planach Kuiper (Amazon), Apple kupił Globalstar (30 satelitów)
- również satelity meteo i obrazowania powierzchni Ziemi

Starlink i inni



Starlink:

- satelity umieszczane na orbicie przez rakietę SpaceX
- łącza międzysatelitarne (częstotliwości świetlne / laser)
- dla klienta: dostęp do internetu 40-200 Mbit/s
- terminale z anteną (układ antenowy) wymagającą widoczności nieba
- komunikacja terminal \leftrightarrow satelita w paśmie Ku (12-18 GHz)

Organizacja **3GPP** (standaryzująca sieci mobilne) włączyła już segment NTN (Non Terrestrial Networks) do specyfikacji sieci 5/6G

Dziękuję za wspólne zajęcia!