
Il Radar

Pierfrancesco Lombardo

Il Radar

Che cosa è un radar?

Ogni dispositivo che rivela e localizza oggetti irradiando energia elettromagnetica e utilizzando l'eco riflesso dall'oggetto può essere classificato come un RADAR.

RADio Detection And Ranging

Radar Primario e Secondario

Tipica installazione
di radar per Controllo
del Traffico Aereo Civile:

Radar secondario

Sfrutta risposta del trasponder
a bordo dell'aeromobile

Radar primario

Sfrutta riflessione del segnale
da parte dell'aeromobile



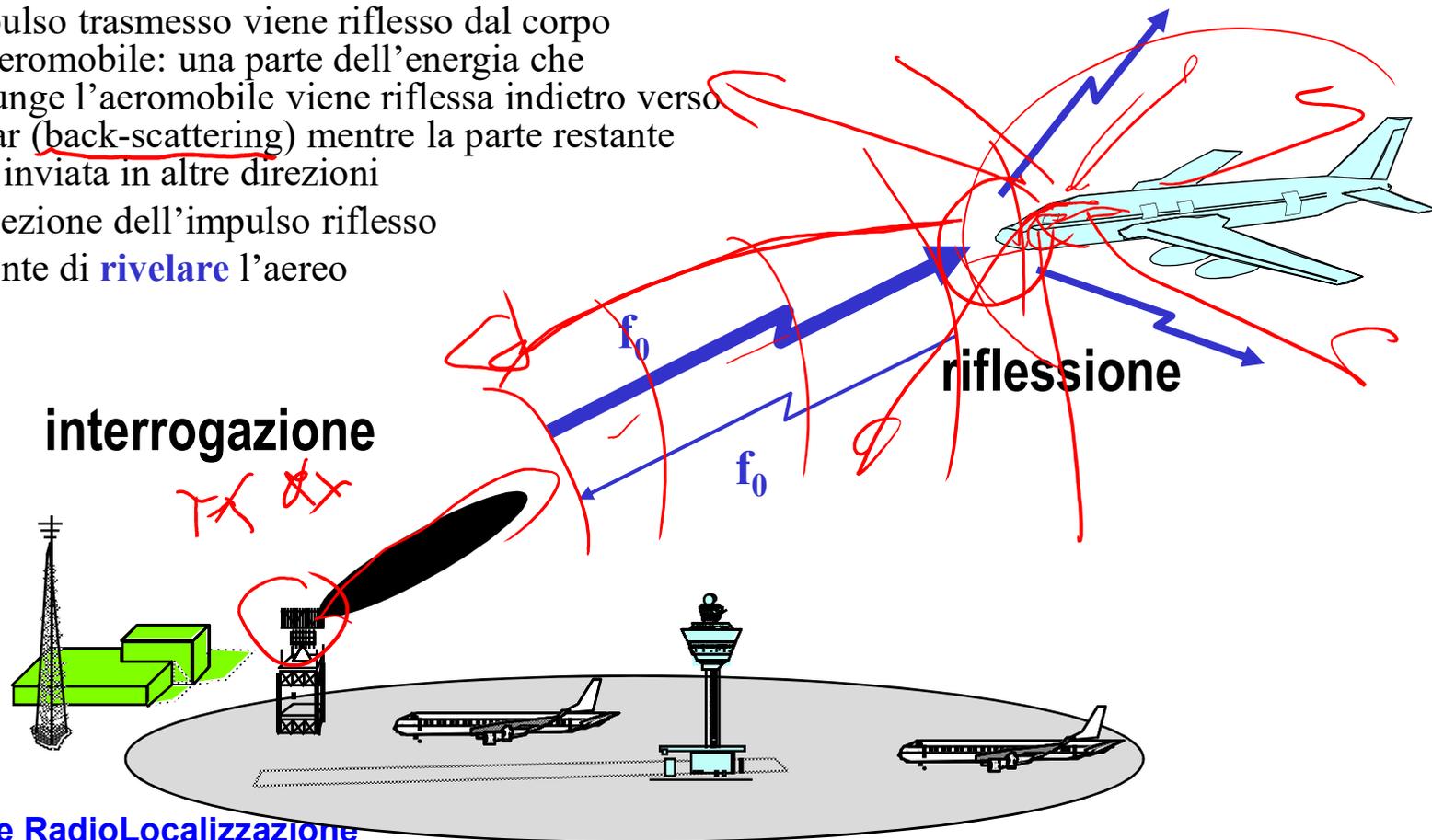
RadioTecnica e RadioLocalizzazione da: "A Family of Radars for Advanced Systems", E. Giaccari, C.A. Penazzi, Alta Frequenza, Aprile 1989

Il Radar Primario



- **Principio di funzionamento:**

- Il radar invia un impulso (ad esempio di forma rettangolare) su una frequenza portante assegnata
- L'impulso trasmesso viene riflesso dal corpo dell'aeromobile: una parte dell'energia che raggiunge l'aeromobile viene riflessa indietro verso il radar (back-scattering) mentre la parte restante viene inviata in altre direzioni
- La ricezione dell'impulso riflesso consente di **rivelare** l'aereo



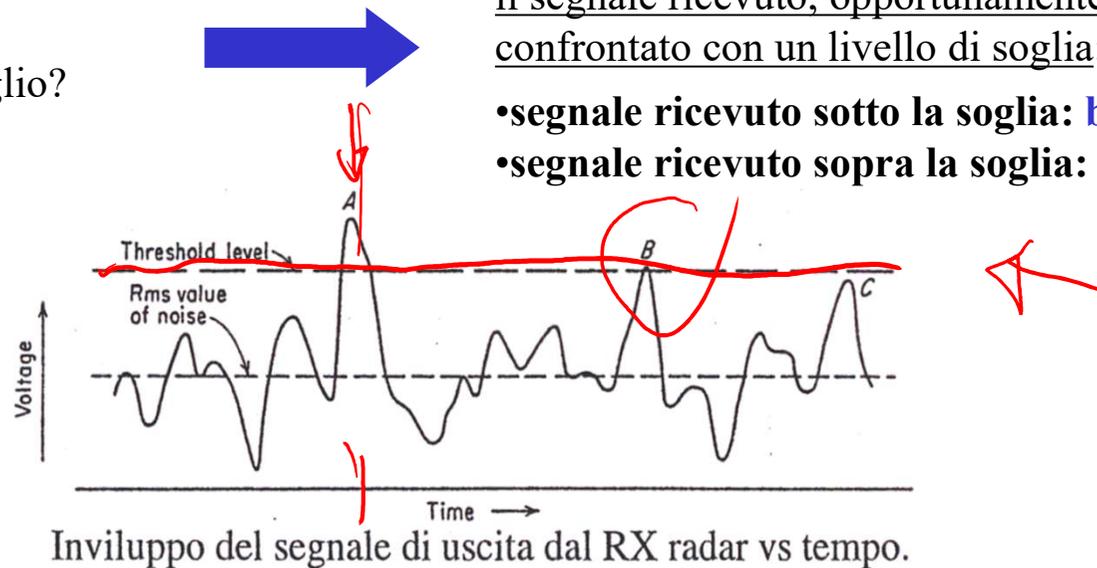
La rivelazione Radar (I)

RIVELAZIONE \Rightarrow la presenza del bersaglio è rivelata rivelando la presenza dell'eco relativa

Come fa il radar a rivelare la presenza dell'eco relativa ad un bersaglio?

il segnale ricevuto, opportunamente elaborato, è confrontato con un livello di soglia:

- segnale ricevuto sotto la soglia: **bersaglio assente**
- segnale ricevuto sopra la soglia: **bersaglio presente**



PROBLEMA: il segnale ricevuto è dato dalla somma dell'eco dal bersaglio (componente utile da rivelare) e da segnali di disturbo (indesiderati):

- **Noise**: rumore termico in genere di origine interna al ricevitore;
- **Clutter**: echi da bersagli ambientali quali terra, mare, pioggia;

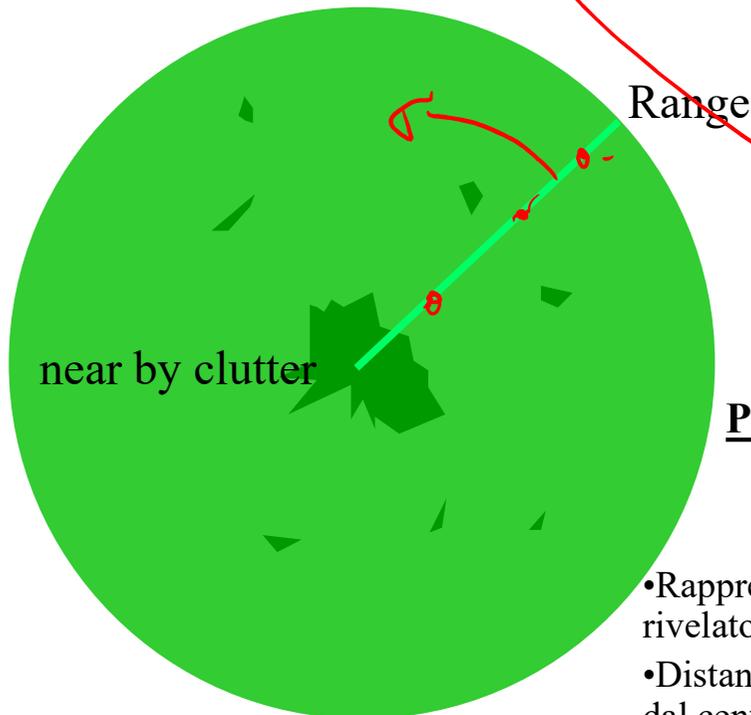
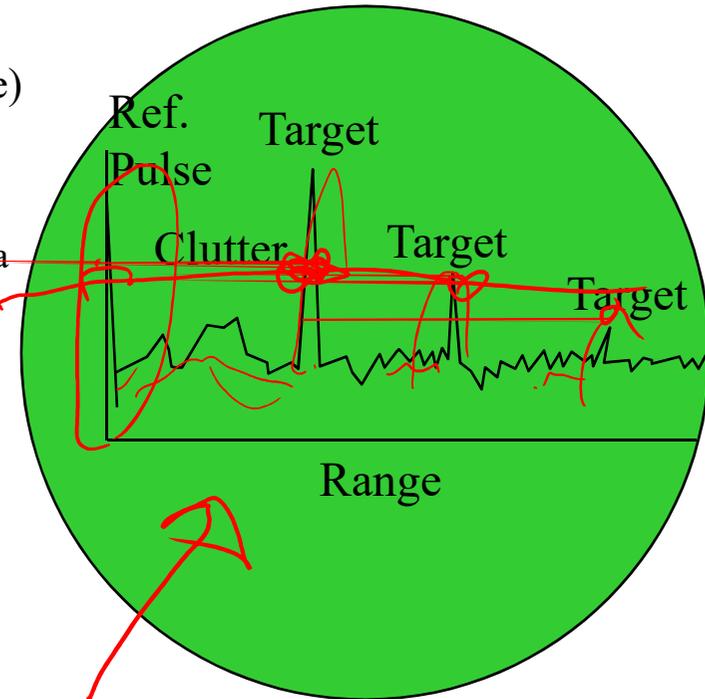
RadioTecnica e RadioLocalizzazione

Display Radar

A-Scope

(Rappresentazione rettangolare)

- Stessa rappresentazione di un oscilloscopio tradizionale;
- Ampiezza dell'eco in funzione della distanza (o del tempo di ritardo);
- Nessuna informazione angolare;



PPI: Plan Position Indicator

(Rappresentazione polare)

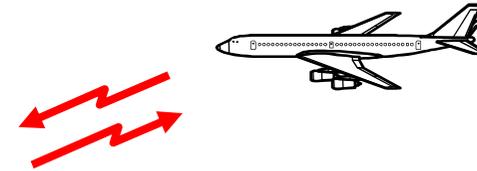
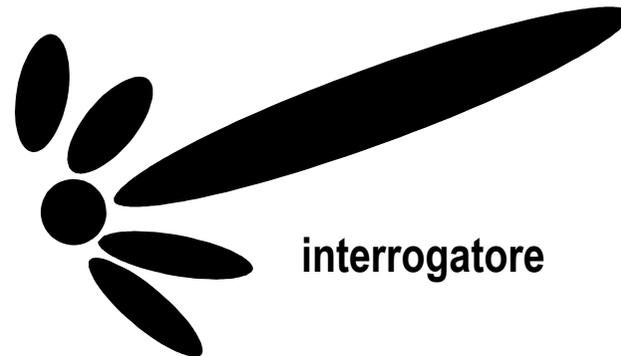
- Rappresentazione della posizione bersaglio rivelato sulla mappa dell'area monitorata;
- Distanza del bersaglio misurata radialmente dal centro;

Le misure del Radar Primario (I)

Misura di distanza:

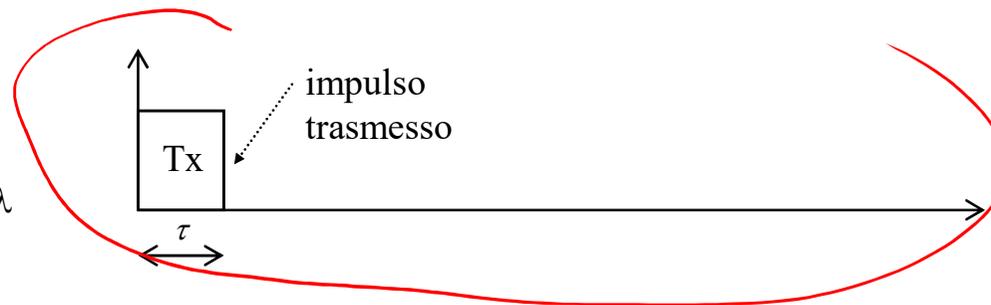
- Si misura la distanza dal ritardo (t_0) dell'eco ricevuta dal bersaglio (percorso 2-vie):

$$R = \frac{c}{2} \Delta t$$



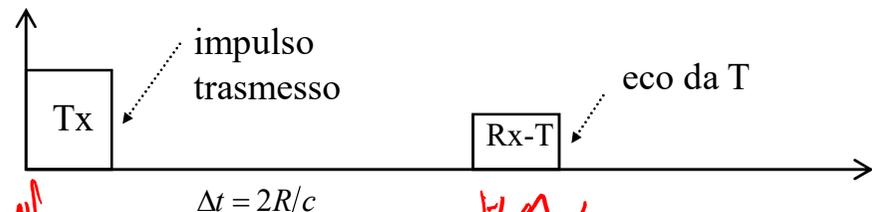
- **Segnale trasmesso:**

- impulso con durata τ e
- lunghezza d'onda della portante λ

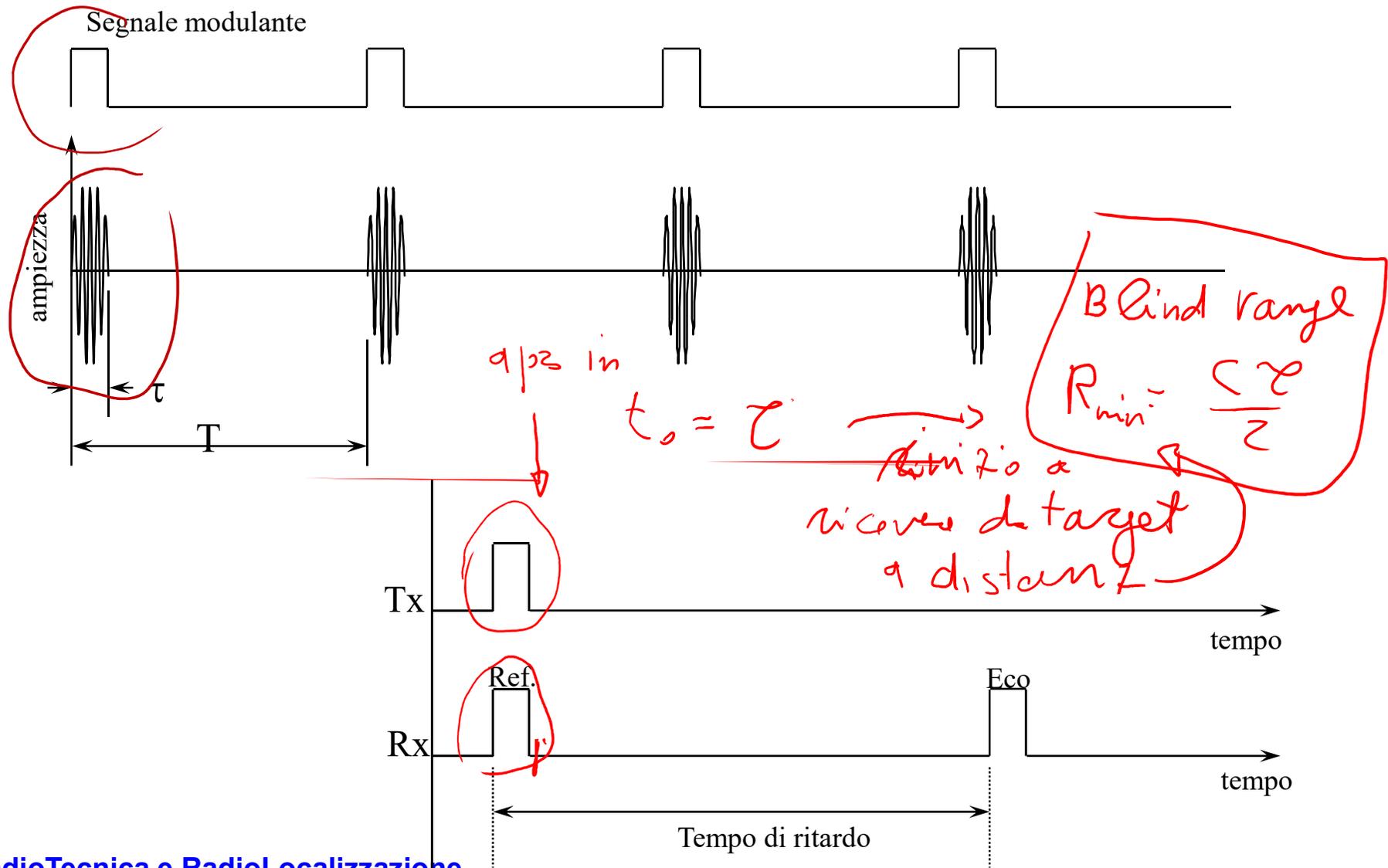


- **Segnale ricevuto:**

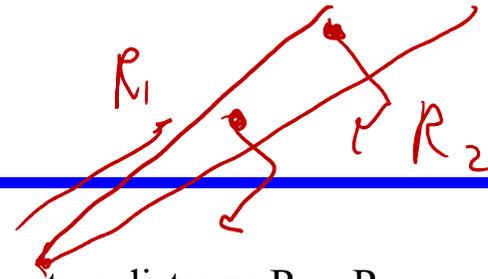
- eco riflessa da bersaglio a distanza R



Forma d'onda TX & Misura tempo di ritardo



Risoluzione in distanza



Condizione operativa: sono presenti due bersagli T_1 e T_2 rispettivamente a distanza R_1 e R_2 .

DOMANDA: il radar è in grado di discriminare (risolvere) i due bersagli? (cioè il radar vede i due bersagli come due echi distinti o come un'eco unica?)



RISPOSTA: dipende dalla distanza relativa dei due bersagli ($R_2 - R_1$) comparata con la risoluzione in distanza (Δr) del radar.



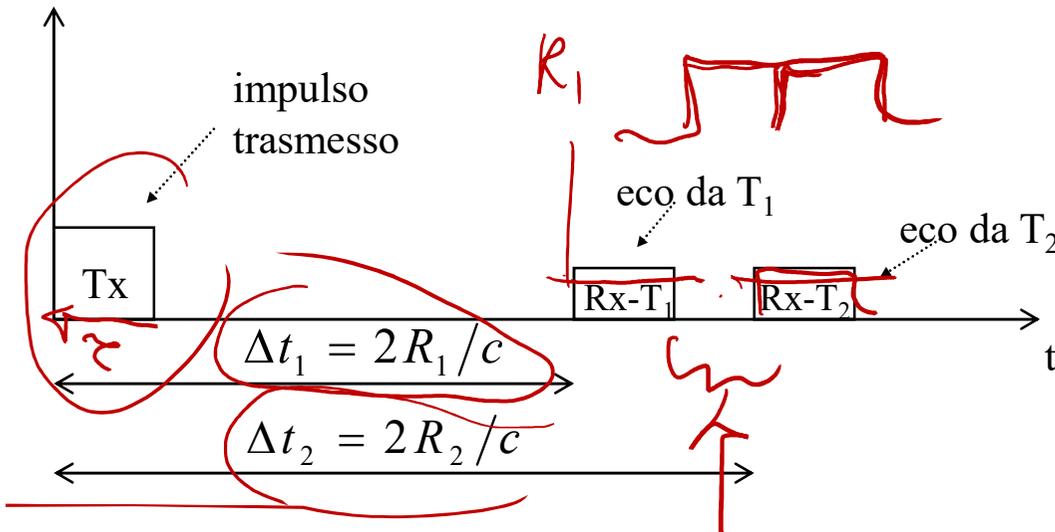
• I due bersagli sono discriminati (“risolti”) se è verificata la condizione:

$$\Delta t_2 - \Delta t_1 \geq \tau \Rightarrow R_2 - R_1 \geq \frac{c\tau}{2}$$

la **risoluzione in distanza** del radar è quindi data da:

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

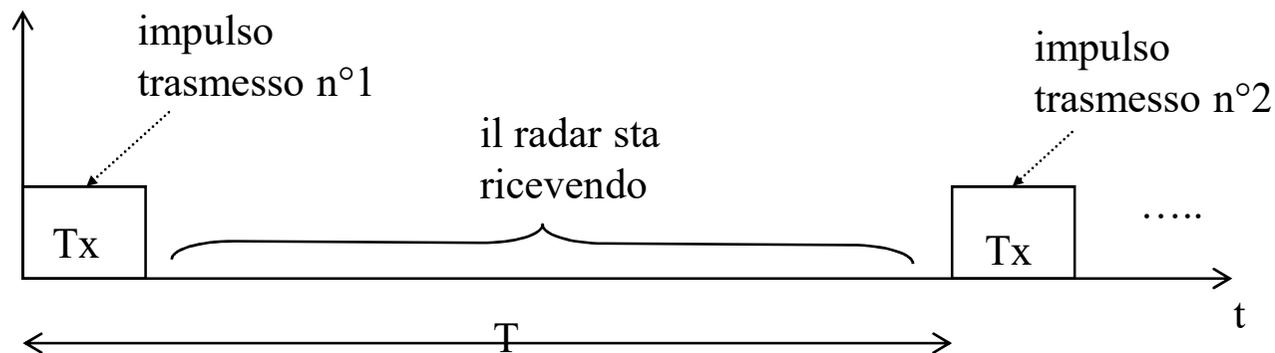
Handwritten calculation: $\frac{3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-6}}{2} = 150m$



Es: con $\tau = 1\mu s \Rightarrow \Delta r = 150m$: bersagli a distanza relativa minore di 150m sono visti dal radar come un unico bersaglio.

Frequenza di ripetizione (PRF)

- **Segnale trasmesso:** **sequenza di impulsi** (ciascuno durata τ e lunghezza d'onda λ) con:
 - T periodo di ripetizione dell'impulso (**PRT: Pulse Repetition Time**);
 - $1/T$ frequenza di ripetizione dell'impulso (**PRF: Pulse Repetition Frequency**);



$$\delta = \tau/T \text{ DUTY CICLE}$$

ESEMPIO:

$$\tau = 1\mu\text{s} \ \& \ T = 1\text{ms}$$

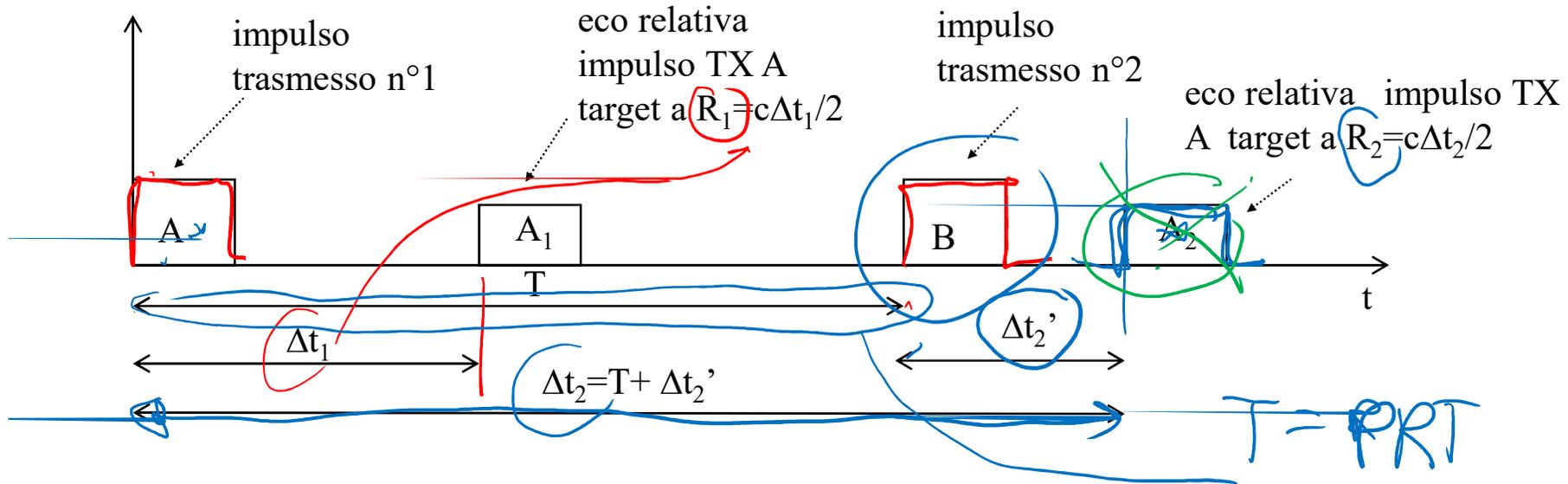
$$\Rightarrow \delta = 0.001$$

DOMANDA: il radar è in grado di misurare in modo non ambiguo il range di un bersaglio posto a distanza R?



RISPOSTA: dipende dalla distanza del bersaglio R comparata alla massima distanza non ambigua R_{na} .

Massima distanza non ambigua



•La distanza è misurata in modo non ambiguo se è verificata la condizione:

$$\Delta t \leq T \Rightarrow R \leq \frac{cT}{2}$$

•la massima distanza non ambigua è quindi data da

$$R_{na} = \frac{cT}{2}$$

•bersagli a distanza $R > R_{na}$ sono visti dal radar a distanza $R' = R \bmod(R_{na})$

R_{na} ≥ distanza max e cioè l'eco di un bersaglio

ESEMPIO: con $T=1\text{ms} \Rightarrow R_{na}=150\text{Km}$: bersagli a distanza maggiore di 150 Km sono visti dal radar su tracce successive

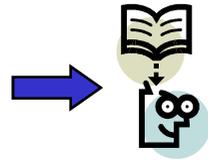
CAMBIA DALLO SPAZIO!

Localizzazione: misura dell'angolo (I)

Scansione fascio d'antenna

Sistema radar usa antenne direttive (tutta la potenza radiata in una direzione \Rightarrow il radar riesce a vedere a distanza maggiore).

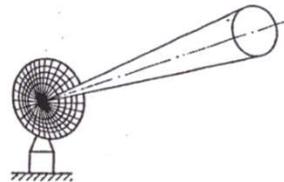
? DOMANDA: come fa il radar a rivelare e localizzare bersagli posti in una qualunque posizione angolare?



RISPOSTA: scansione ambiente tramite **rotazione azimutale dell'antenna** (scan rate ω_a tra 1 e 60 rpm).

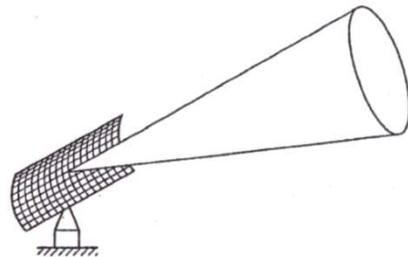
Forme fascio d'antenna

• Pencil beam



- fascio assialmente simmetrico
- larghezza del fascio dell'ordine di pochi gradi o meno
- utilizzati quando è necessario misurare continuamente entrambi azimuth e elevazione del bersaglio (ad es. per inseguimento)

• Fan beam



- fascio largo in una dimensione e stretto nell'altro;
- utilizzato quando ci sono vincoli sul max scan time;
- radar di ricerca ground based utilizzano fasci stretti in azimuth e larghi in elevazione;

Localizzazione: misura dell'angolo (II)

Risoluzione in angolo

• Localizzazione angolare del bersaglio:

direzione del bersaglio \equiv direzione del boresight d'antenna.

• Condizione operativa: sono presenti due bersagli T_1 e T_2 entrambi a distanza R separati azimutalmente di $\Delta\phi$.



DOMANDA: il radar è in grado di discriminare i due bersagli? (cioè il radar vede i due bersagli come due echi distinti?)



RISPOSTA: dipende dalla separazione angolare $\Delta\phi$ dei due bersagli comparata con la larghezza del fascio d'antenna ϕ_A :

- $\Delta\phi < \phi_A$: il radar vede un solo bersaglio;
- $\Delta\phi \geq \phi_A$: il radar discrimina i due bersagli;

$$\frac{\Delta}{L} = 2^\circ = \frac{2 \cdot \pi}{180} \text{ rad} \approx \frac{1}{30} \text{ rad}$$

- ✓ Risoluzione in range (durata impulso trasmesso)
- ✓ Risoluzione in angolo (larghezza del fascio d'antenna)

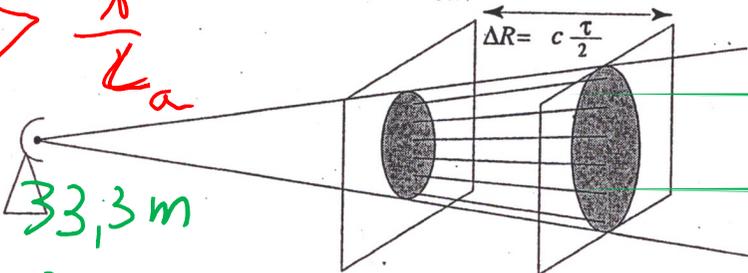
Cella di risoluzione spaziale

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 > \frac{\Delta}{L_a}$$

$$R = 1 \text{ Km} \quad \frac{1}{30} \cdot 10^3 \text{ m} = 33,3 \text{ m}$$

$$R = 10 \text{ Km} \quad \frac{1}{30} \cdot 10^4 \text{ m} = 330 \text{ m}$$

RadioTecnica e RadioLocalizzazione



Localizzazione: misura dell'angolo (III) ²⁰

Time on target & Numero di impulsi nel fascio

- ✓ radar trasmette impulsi con frequenza PRF
- ✓ fascio d'antenna ruota con velocità ω_a

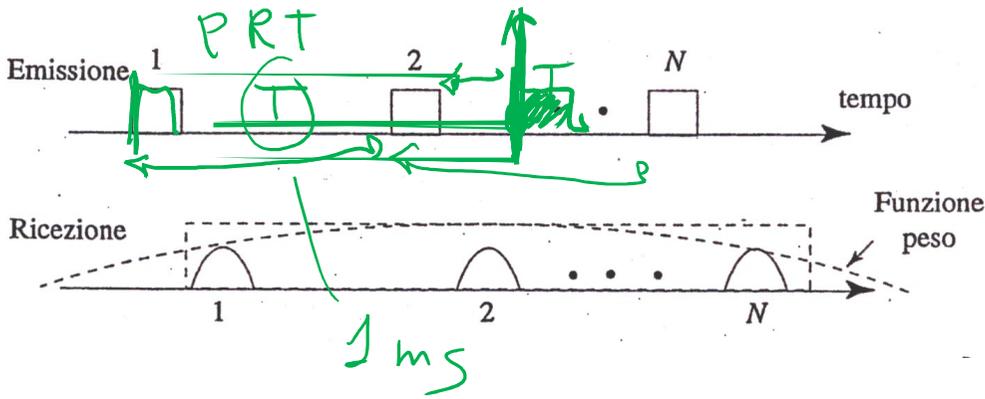
5 rpm

$$t_D = \frac{1^\circ}{5 \cdot \frac{360^\circ}{600} / 15} = \frac{1}{100} = 0.01 \text{ s}$$

Bersaglio puntiforme:

- permane nel fascio d'antenna (ϕ_A) per un tempo t_D (**dwelt time** o **time on target**)
- è colpito da un numero di impulsi pari a N (**impulsi nel fascio**)

$$t_D = \frac{\phi_A}{\omega_a} \quad \text{TIME ON TARGET}$$



$$N = \frac{\phi_A}{\omega_a} PRF \quad \text{IMPULSI NEL FASCIO}$$

$$\frac{100}{15} = 6.7 \text{ ms}$$

$$68 \text{ ms}$$

- valori elevati: rate di aggiornamento posizione bersaglio elevato ma numero impulsi nel fascio N basso
- valori bassi: rate di aggiornamento posizione bersaglio basso ma numero impulsi nel fascio N elevato

Trade-off tra data rate e probabilità di rivelazione

$$PRT > \frac{2R_{max}}{c \cdot \omega_a}$$

Esempio ATC: $\phi_A=1^\circ$, $\omega_a=6 \text{ giri/min}=36^\circ/\text{sec}$ e $PRF=1\text{KHz} \Rightarrow N=27$ (in genere per radar avvistamento $N=20 \div 30$)

$$N = \frac{t_D}{PRT}$$

Applicazioni

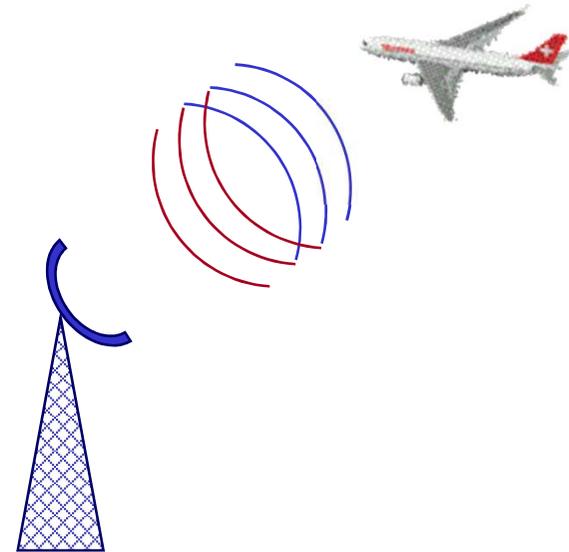
Sistemi
radar

- su **terra** ⇒ ATC (Air Traffic Control) controllo del traffico aereo in aria e nelle zone aeroportuali: rivelazione, localizzazione ed inseguimento di bersagli aerei e terrestri;
- in **aria** ⇒ Navigazione aerea: rivelazione e localizzazione di altri bersagli (aerei, navali e terrestri), radar meteo, radar altimetro, navigatore doppler;
- su **mare** (navi) ⇒ Sicurezza delle navi: rivelazione e localizzazione boe, altre navi e bersagli in generale (funzione anticollisione specie in scarsa visibilità);
- nello **spazio** ⇒ Telerilevamento per il monitoraggio ambientale: misure e mapping delle condizioni del mare, delle risorse idriche, della copertura dei ghiacci, dell'agricoltura, delle condizioni delle foreste, delle formazioni geologiche e dell'inquinamento ambientale.

Il RADAR anche per imaging e monitoraggio

Ra dio
D etection
A nd
R anging

Il RADAR serve allora a:
**RIVELARE AL PRESENZA E
MISURARE LA DISTANZA**
facendo uso di onde radio.



Attualmente ciò che si chiede ad un radar è molto di più:

- Misure di posizione (distanza, azimuth, quota)
- Misure di velocità
- Riconoscimento degli echi
- Costruzione di mappe del territorio

Applicazioni possibili:

- sorveglianza: rivelazione e localizzazione di oggetti (ad es. aerei, navi etc.);
- monitoraggio ambientale: studio della terra, analisi delle risorse etc.;

RadioTecnica e RadioLocalizzazione

Classificazione dei radar (I)

Due grandi categorie:

- ▶ Radar Primari → l'azione del ricevitore si sviluppa sull'eco determinata dalla riflessione di onde e.m.
- ▶ Radar Secondari → l'azione del ricevitore si sviluppa su una replica rigenerata a bordo di navi, di aerei, etc.



From: E. Giaccari, C.A. Penazzi - "A Family of Radars for Advanced Systems", Alta Frequenza, April 1989

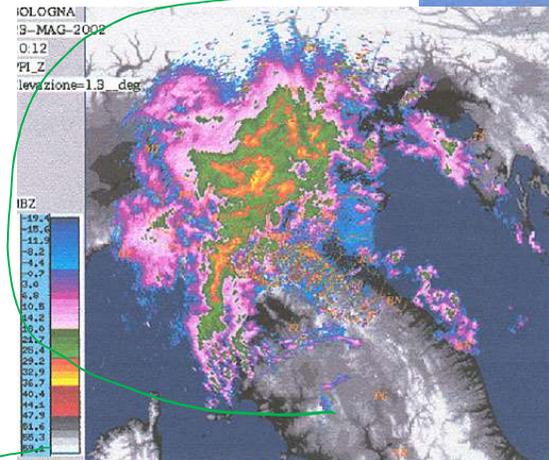
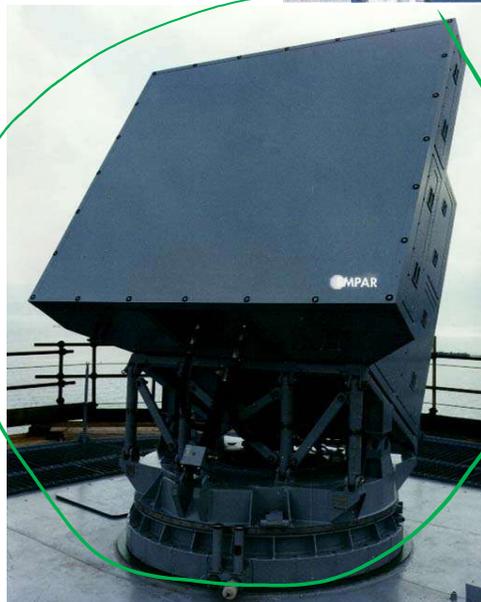
Classificazione dei radar (II)

I radar possono essere classificati in base a:

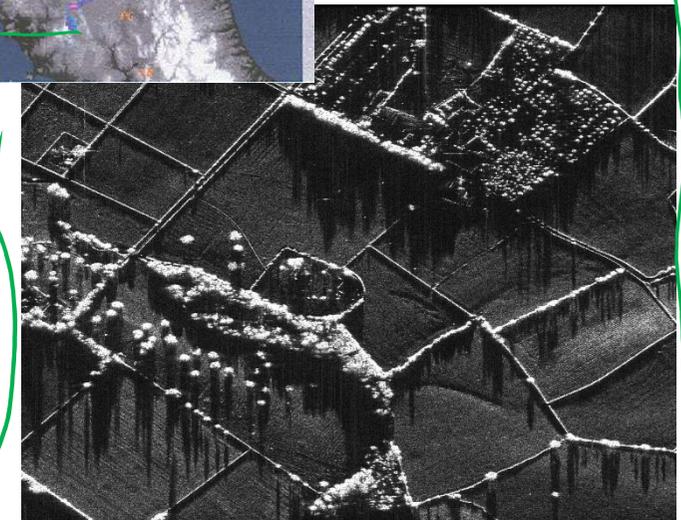
► la funzione sviluppata

- Radar di avvistamento
- Radar costieri
- Radar meteorologici
- Radar aeroportuali (TAXI)
- Radar di precisione per atterraggio (PAR)
- Radar di avvistamento precoce (Early Warning)
- Radar di navigazione
- Radar anticollisione
- Radar portuali
- Radar di inseguimento
- Radar di guida
- Radar altimetri
- Radar di immagine
- Radar multifunzionali

European Multifunction Phased Array Radar
From: E. Giaccari, C.A. Penazzi - "A Family of Radars for Advanced Systems", Alta Frequenza, April 1989



radar meteo di San Pietro Capofiume (BO)



High-res (<1 m) DRA X band image (rural scene) British Crown Copyright 1997/DERA
From: C.J. Oliver, S. Quegan, "Understanding Synthetic Aperture Radar Images", Artech House, 1998

Classificazione dei radar (III)

► la piattaforma usata

- Radar terrestri (Ground-Based) (fissi/trasportabili/mobili)
- Radar navali (Ship-Borne)
- Radar avionici (Air-Borne)
- Radar satellitari (Space-Borne/Space-Based)

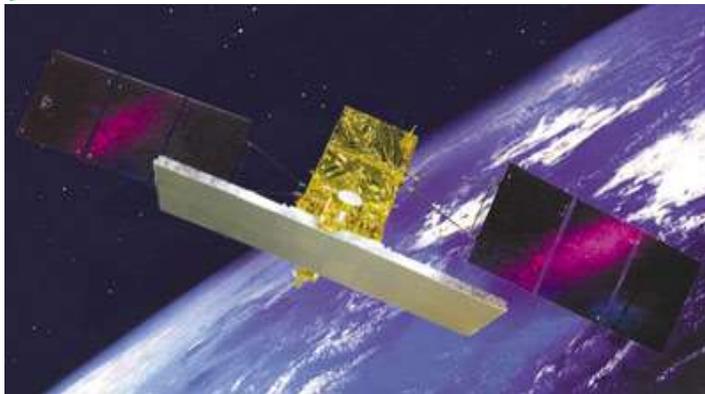
EMPAR



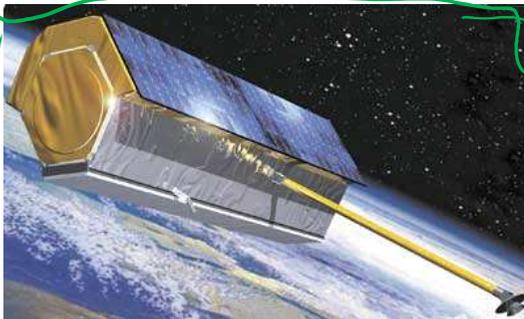
AWACS:
Airborne Warning
and Control
System



SOSTAR-X
Stand Off Surveillance and Target
Acquisition Radar

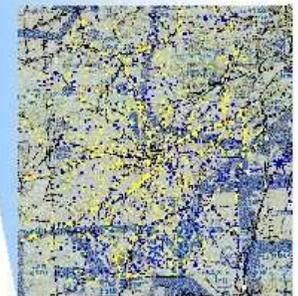
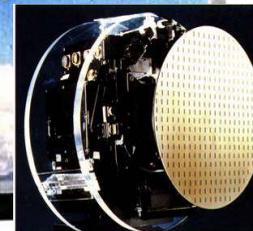


COSMO-SkyMed



TerraSAR-X

<http://www.skyrocket.de/space/>



GRIFO Multimode Radar
Courtesy of FIAR

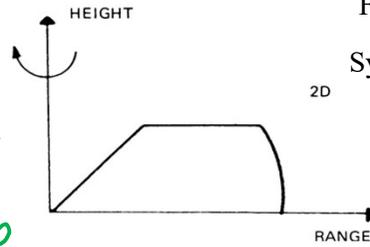
RadioTecnica e RadioLocalizzazione

Classificazione dei radar (IV)

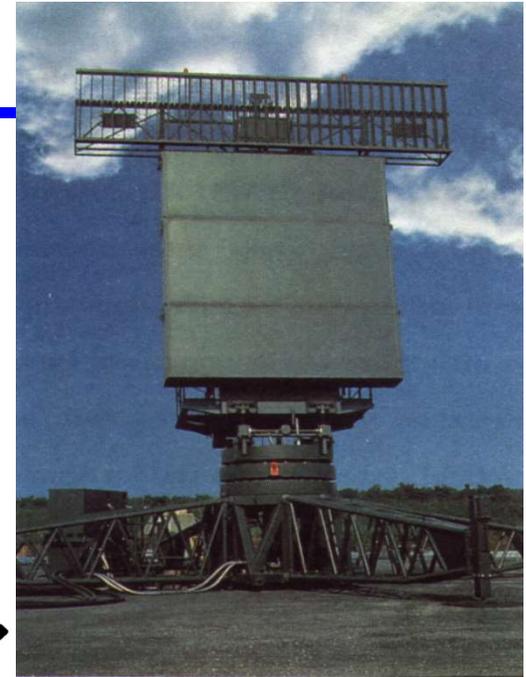
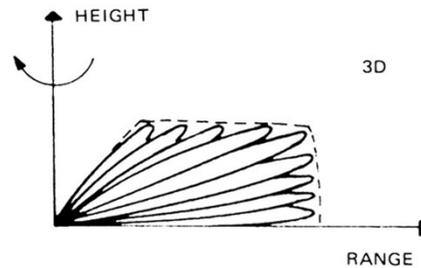
▶ la portata

- Radar di corto raggio
- Radar di medio raggio
- Radar di lungo raggio

T, PRT
k_{na}



From: E. Giaccari, C.A. Penazzi - "A Family of Radars for Advanced Systems", Alta Frequenza, April 1989



▶ le dimensioni esplorate

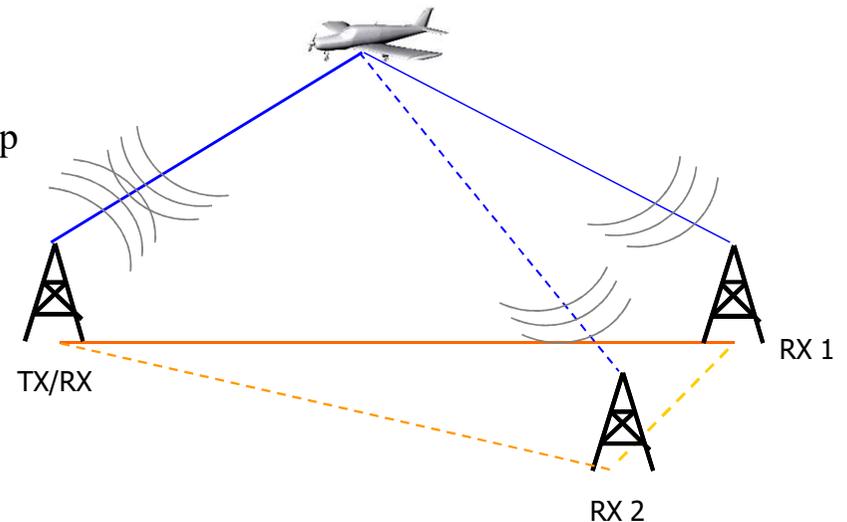
- Radar 2D
- Radar 3D

▶ la forma del segnale usato in trasmissione

- Radar in onda continua (CW) modulata o no
- Radar ad impulsi → r. a impulsi semplici, r. a codice (posizione, frequenza, fase), r. chirp
- Radar pulsed-Doppler

▶ la geometria del sistema TX-RX

- Radar monostatici
- Radar bistatici
- Radar multistatici



Classificazione per forma d'onda e geometria

Due possibili modi di funzionamento:

1) Radar **ad impulsi** (Pulsed Radar):

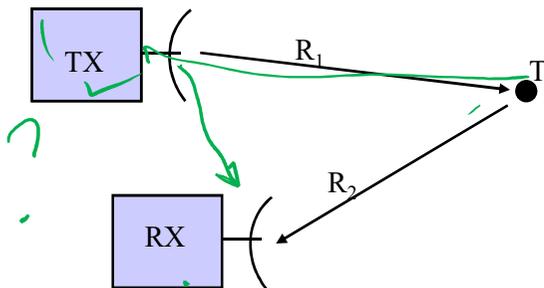
- il segnale trasmesso è un impulso;
- possibili configurazioni con una (TX/RX) o due (TX e RX) antenne;
- consente sia la rivelazione che la misura di distanza;

2) Radar **in onda continua** (Continuous Wave Radar):

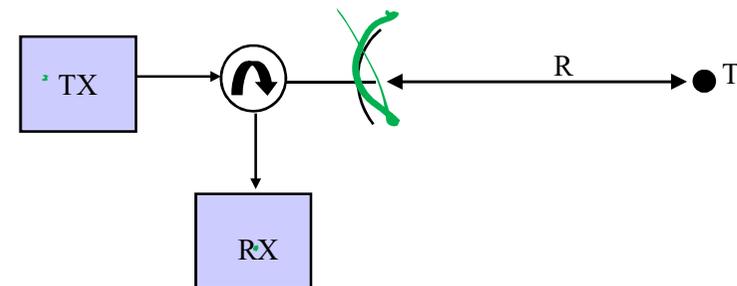
- il segnale trasmesso è un tono puro (sinusoide);
- configurazione a due antenne (TX e RX);
- consente la rivelazione mentre la misura di distanza è possibile solo se si trasmettono forme d'onda opportunamente modulate;

Due possibili configurazioni per il radar ad impulsi:

1) Radar **BISTATICO**: TX e RX in postazioni separate



2) Radar **MONOSTATICO**: TX e RX co-locati (necessario duplexer)



Classificazione dei radar (V)

- ▶ tecnologia utilizzata per i suoi componenti
 - Tipo di antenna (r. a scansione meccanica, r. a phased array)
 - Tipo di trasmettitore (r. a magnetron, r. a klystron, radar a TWT, r. a stato solido)
 - Tipo di ricevitore (r. incoerenti, r. coerenti, r. pseudocoerenti)
 - Tecniche di elaborazione utilizzate (r. analogici, r. digitali)

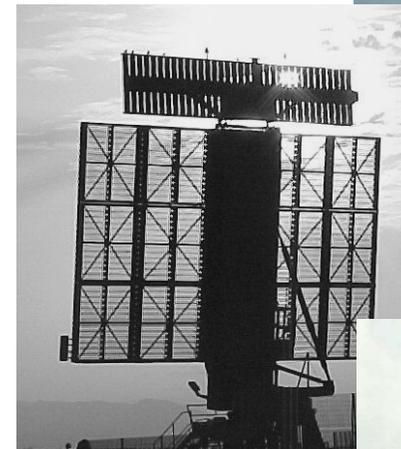
- ▶ la frequenza portante adoperata

- HF (3-30MHz)
- VHF (30-300MHz)
- UHF (300-1000MHz)
- L (1-2GHz)
- S (2-4GHz)
- C (4-8GHz)
- X (8-12GHz)
- Ku (12-18GHz)
- K (18-27GHz)
- Ka (27-40GHz)
- W (mm) (40-300GHz)

Reflector



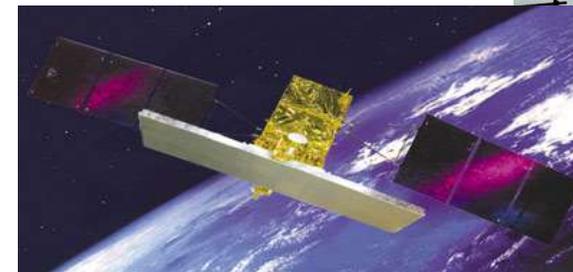
3D Active Antenna Array



Passive Phased Array



Active Phased Array



Spettro e.m.

Band designation	Nominal frequency range	Specific radiolocation (radar) bands based on ITU assignments for Region 1
HF	3-30 MHz	
VHF	30-300 MHz	
UHF	300-1000 MHz	420-450 MHz [(420-430) 430-440 (440-450)]; (890-942 MHz)
L	1-2 GHz	1215-1400 MHz [1215-1300 (1300-1350) 1350-1400]
S	2-4 GHz	(2.3-2.5 GHz); 2.7-3.6 GHz [(2.7-3.1) 3.1-3.4 (3.4-3.6)]
C	4-8 GHz	5.25-5.85 GHz [5.25-5.35 (5.35-5.65) 5.65-5.85]
X	8-12 GHz	8.5-10.68 GHz [8.5-9 (9-9.2) 9.2-9.3 (9.3-9.5) 9.5-10.5 (10.5-10.68)]
Ku	12-18 GHz	13.4-14 GHz; 15.7-17.7 GHz [15.7-17.3 (17.3-17.7)]
K	18-27 GHz	24.05-24.25 GHz
Ka	27-40 GHz	33.4-36 GHz
W (mm)	40-300 GHz	59-64 GHz; 76-81 GHz; 92-100 GHz [92-95 (95-100)]; 126-142 GHz [(126-134 (134-142)]; 144-149 GHz; (231-235 GHz); 238-248 GHz [(238-241) 241-248]

30 MHz radioband

88-108 MHz FM

cell 80-900
TV 450-860 MHz

In alcune bande l'applicazione radar è servizio primario, in altre è servizio secondario.

L3 L4 GPS
L1, L2, L5

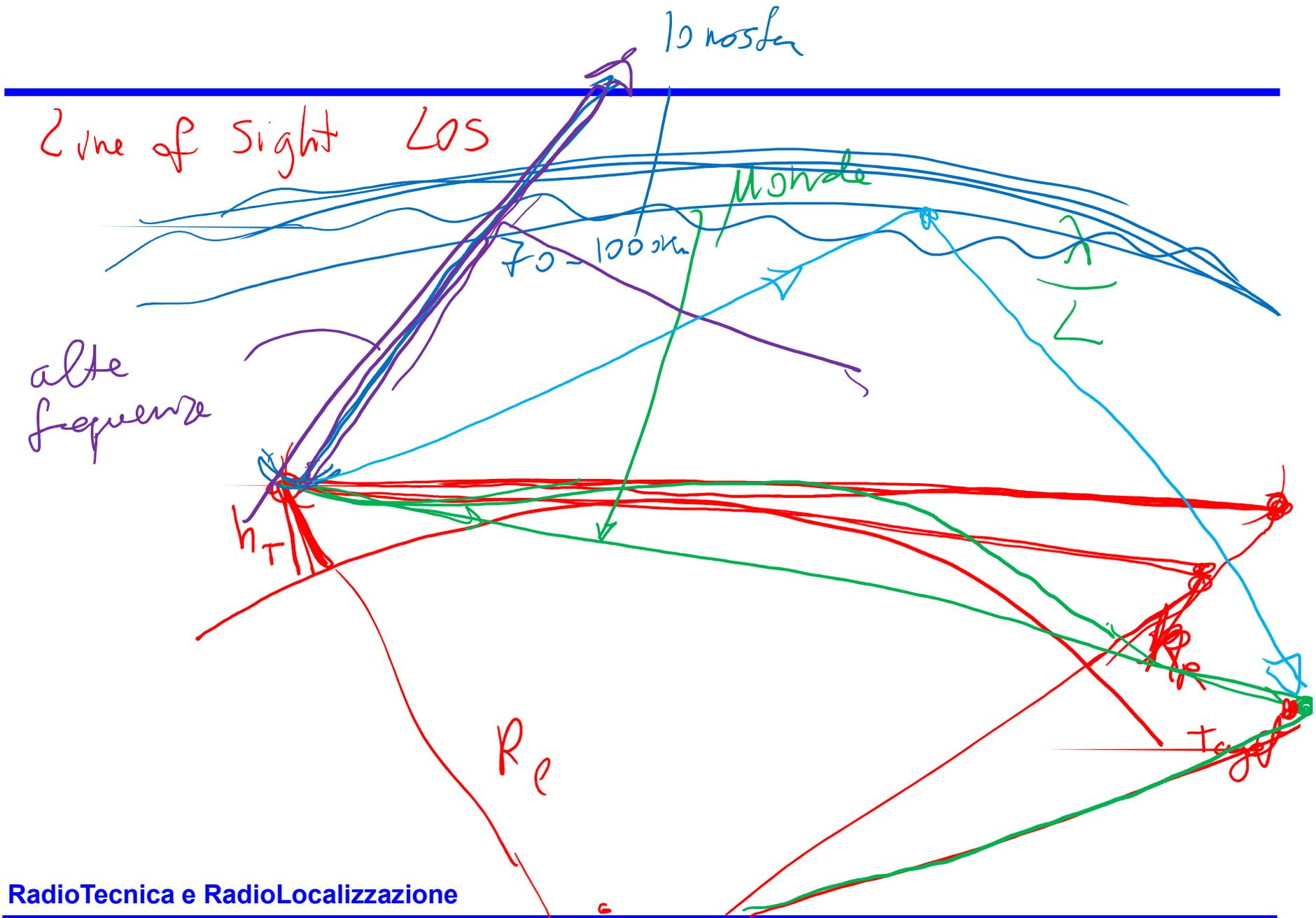
25 GHz

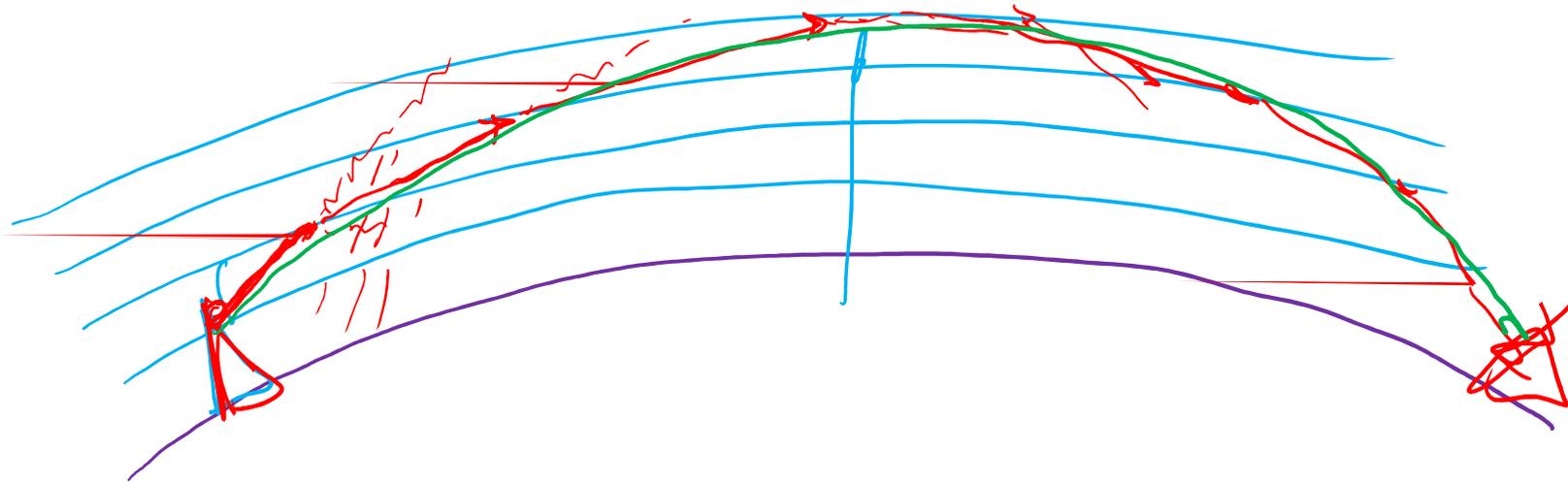
77 GHz

Microonde $\lambda \sim 30 \text{ cm} - 3 \text{ cm}$
1 GHz 10 GHz

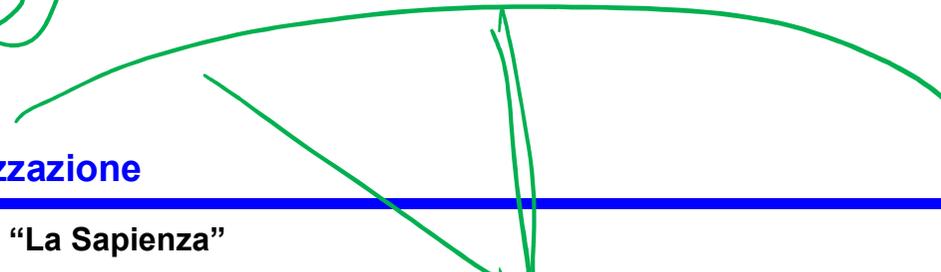
- Sistemi radar convenzionali operano generalmente a frequenze che si estendono da 220 MHz a 35 GHz (regione delle microonde);
- Non ci sono limiti predefiniti: ad es. skywave HF over the horizon (OTH) radar operano a 4-5 MHz mentre radar millimetrici operano a 94 GHz;
- Scelta della frequenza dipende dal tipo di applicazione.

RadioTecnica e RadioLocalizzazione

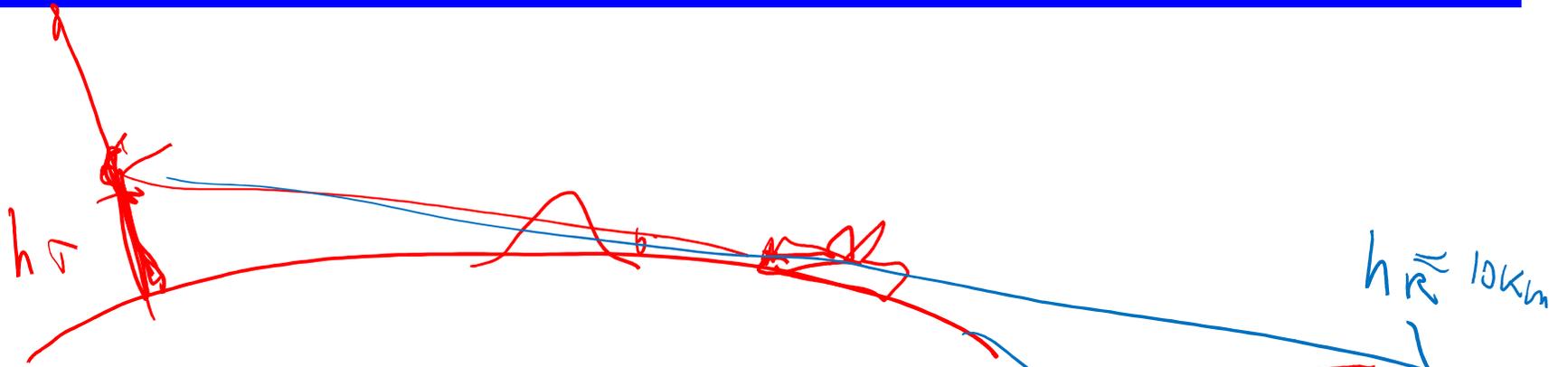




$$R_e = \frac{4}{3} \cdot R_g = 8500 \text{ Km}$$



$$h_T = 100 \text{ m}$$



$$R = \sqrt{2 R_e h_T} = \sqrt{2 \cdot 8500 \cdot 10^3 \cdot 100} = \sqrt{17 \cdot 10^8} = 4,1 \cdot 10^4 \text{ m} = 41 \text{ km}$$

$$R_2 = \sqrt{2 R_e} (\sqrt{h_T} + \sqrt{h_R}) = \sqrt{2 \cdot 8500 \cdot 10^3} (\sqrt{100} + \sqrt{10'000}) = \sqrt{17 \cdot 10^6} (10 + 100) = 4,1 \cdot 10^3 \cdot 110 = 440 \text{ km}$$

