
Sistemi Radar

Pierfrancesco Lombardo

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



Sistemi Radar

La rivelazione Radar (II)

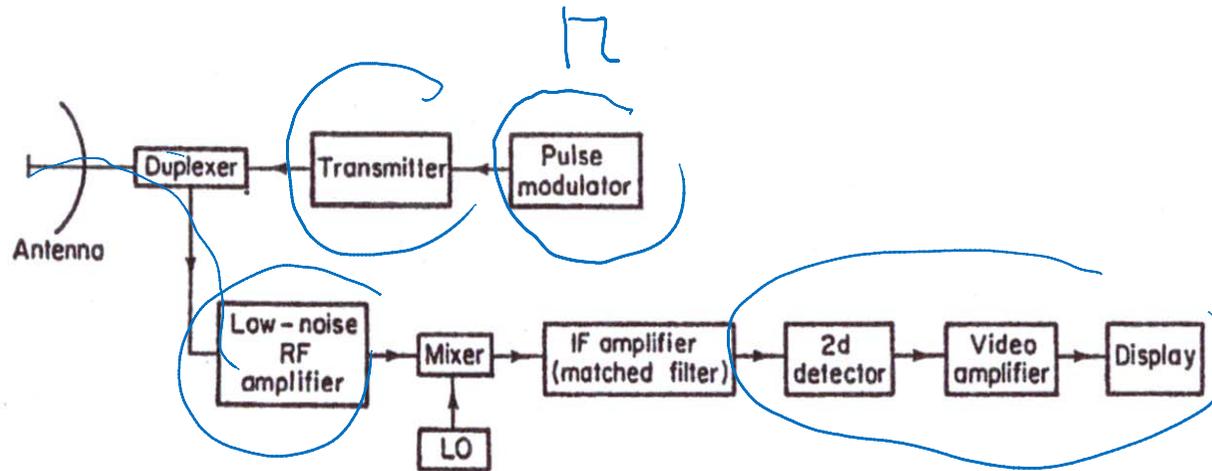


Diagramma a blocchi di un radar ad impulsi.



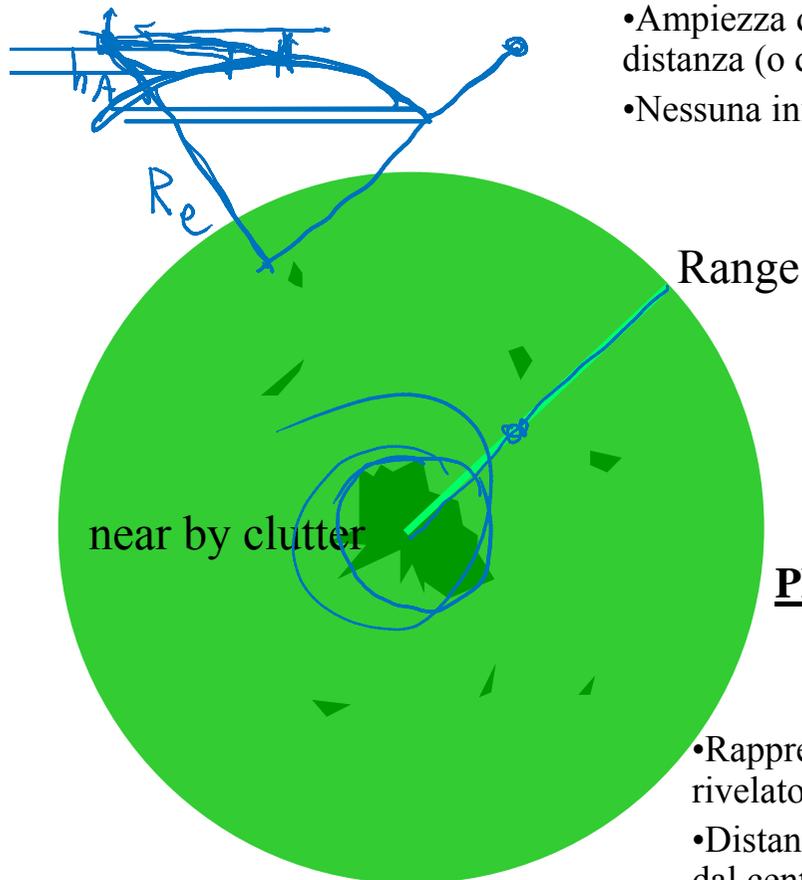
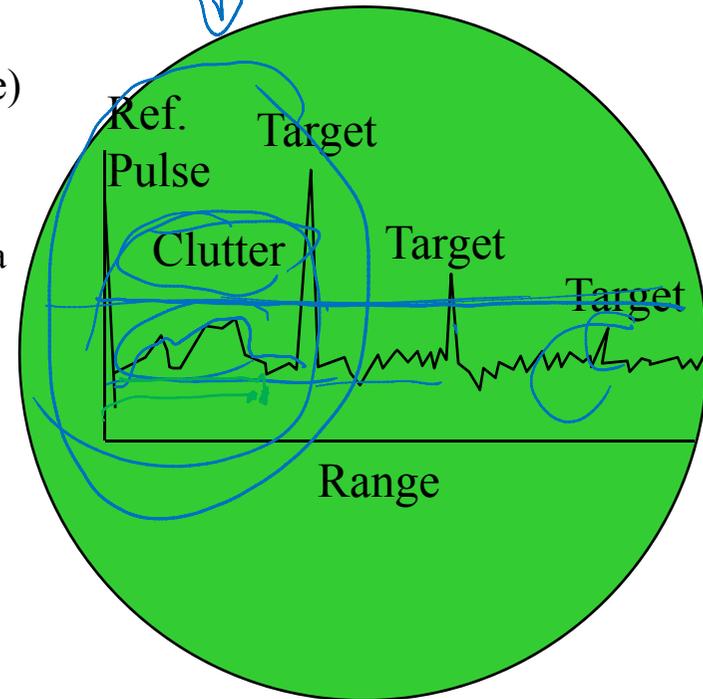
- La rivelazione è ottenuta per mezzo di opportune tecniche di elaborazione che consentono la differenziazione del segnale utile dai disturbi;
- affinché la rivelazione sia possibile il rapporto tra la potenza di segnale e la potenza di disturbo deve essere sufficientemente elevata: rapporto valutabile con equazione radar (link budget);
- Opportune tecniche di elaborazione possono essere applicate al fine di prendere la decisione in modo più affidabile.

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)

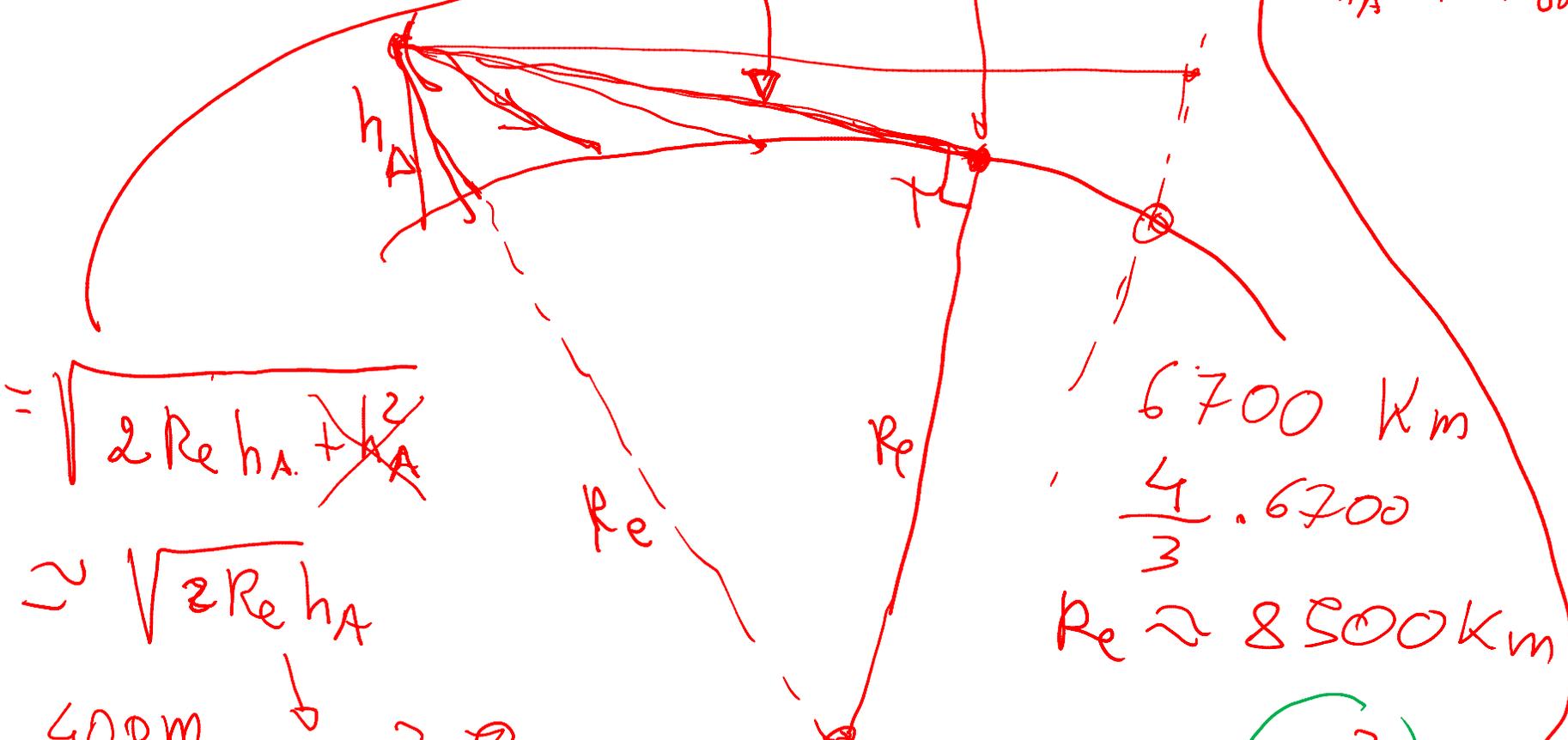
- Rappresentazione della posizione bersaglio rivelato sulla mappa dell'area monitorata;
- Distanza del bersaglio misurata radialmente dal centro;

Sistemi Radar

max distance clutter

$$R_{\text{max clutter}} = \sqrt{(R_e + h_A)^2 - R_e^2}$$

$h_A = 4\text{m}$ 8km
 100m 40km
 $h_A = 400\text{m}$ 80km



$$= \sqrt{2 R_e h_A + h_A^2}$$

$$\approx \sqrt{2 R_e h_A}$$

400m ↓

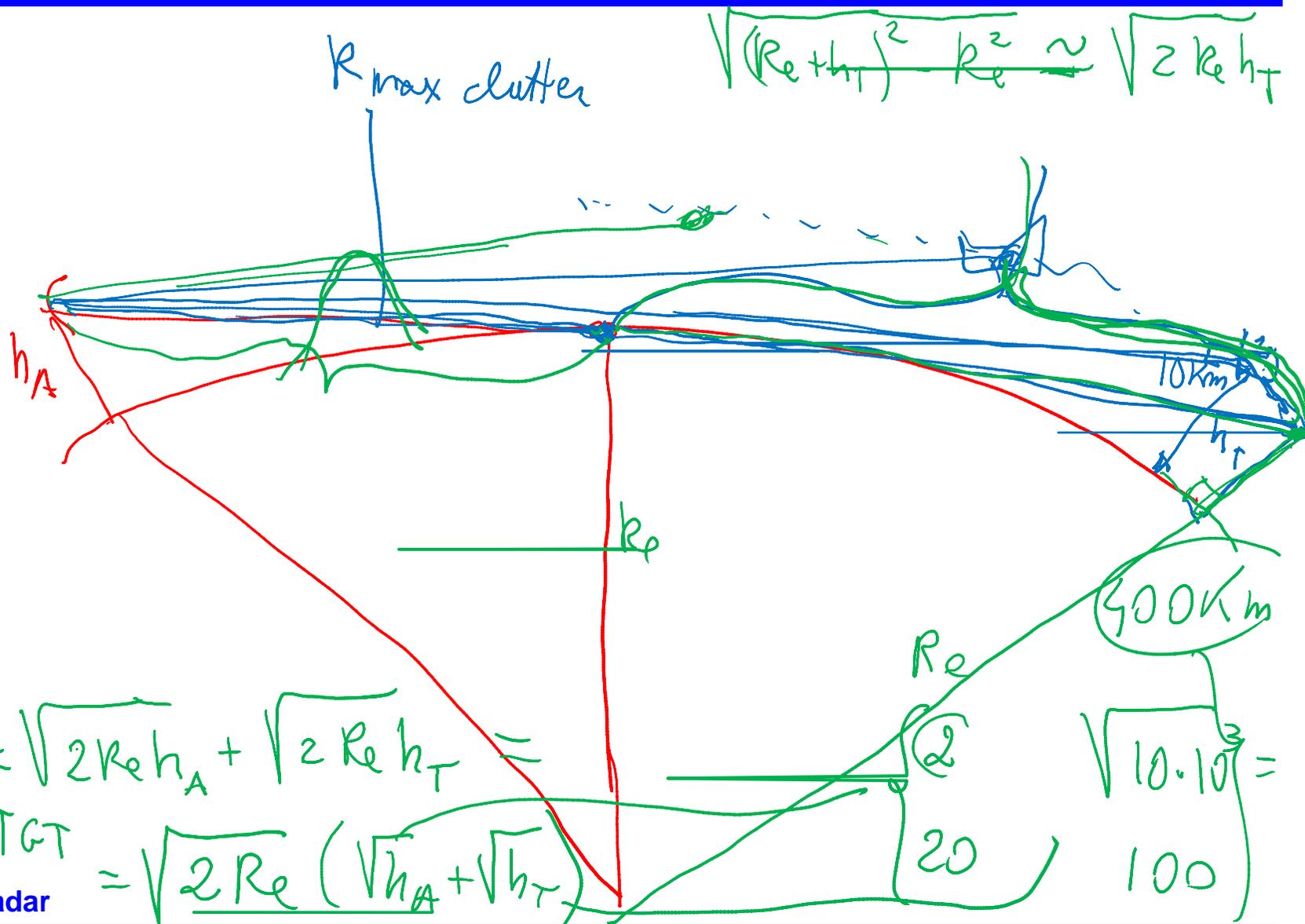
2.8000

6700 Km

$$\frac{4}{3} \cdot 6700$$

$R_e \approx 8500\text{Km}$

$$\sqrt{16 \cdot 10^3 h_A} = 4 \cdot 10^3 \sqrt{h_A} \text{ m}$$



Sistemi Radar

Le misure del Radar Primario (I)

Misura di distanza:

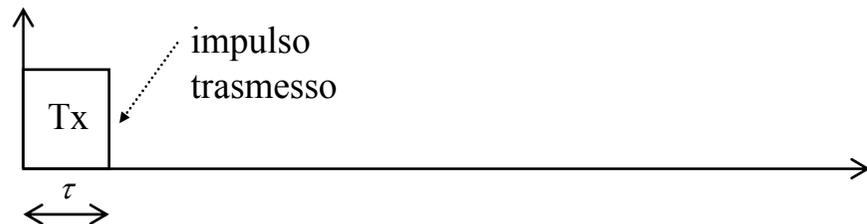
- Si misura la distanza dal ritardo (t_0) dell'eco ricevuta dal bersaglio (percorso 2-vie):

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



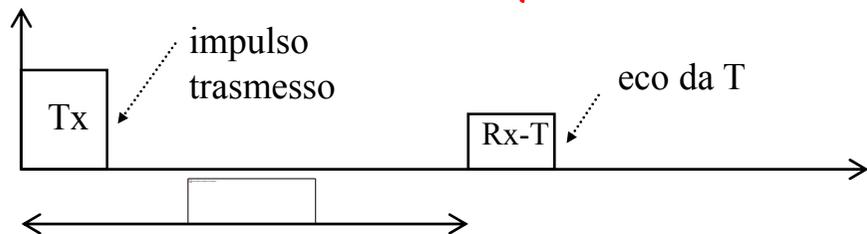
- **Segnale trasmesso:**

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



- **Segnale ricevuto:**

- eco riflessa da bersaglio a distanza R



Sistemi Radar

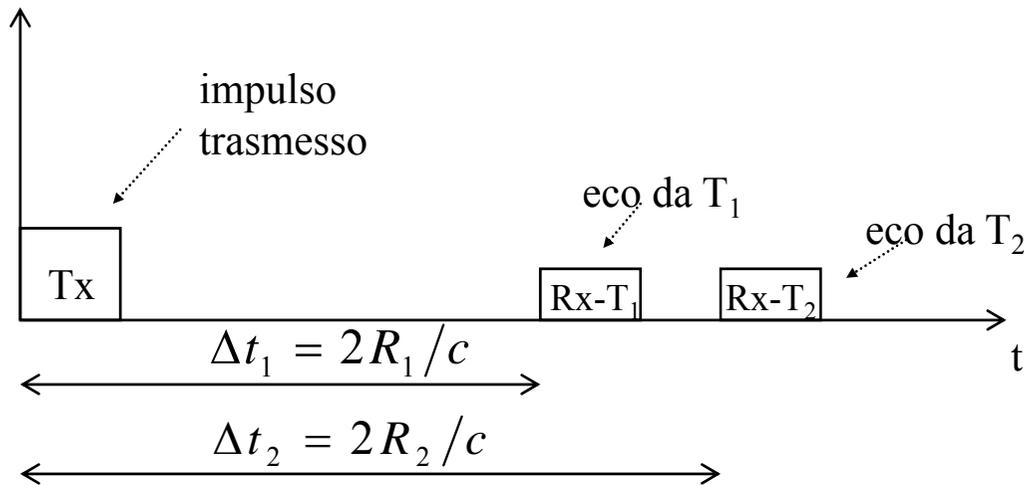
Risoluzione in distanza

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.



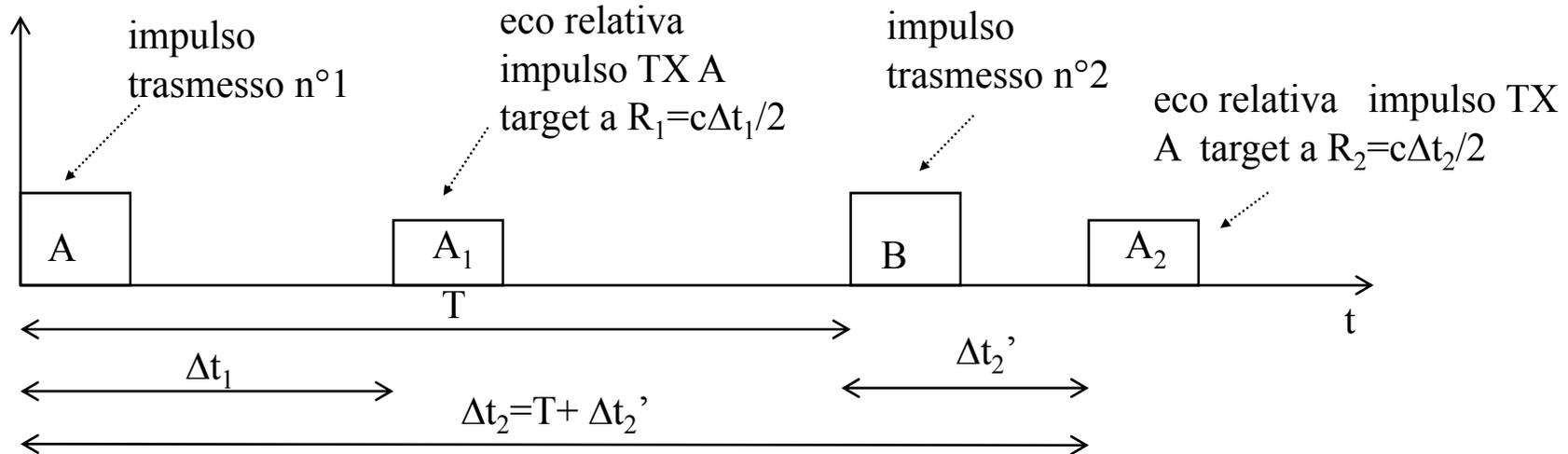
• I due bersagli sono discriminati (“risolti”) se è verificata la condizione:

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

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

Sistemi Radar

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 $R' = R \bmod(R_{na})$

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

Sistemi Radar

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).



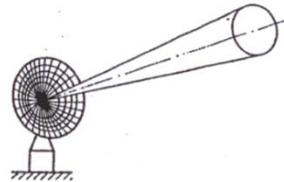
DOMANDA: come fa il radar a rivelare e localizzare bersagli posti in una qualunque posizione angolare?



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

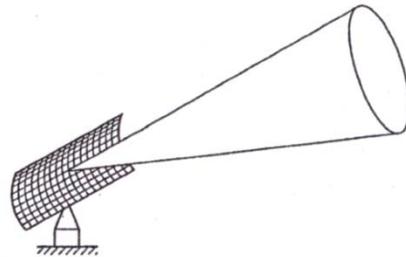
Forme fascio d'antenna

• 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;

Sistemi Radar

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?)

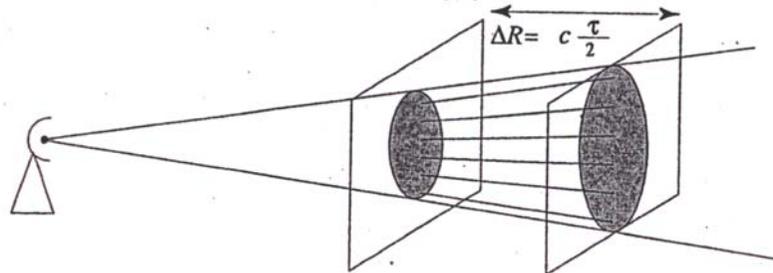


RISPOSTA: dipende dalla separazione angolare $\Delta\phi$ dei due bersagli comparata con la larghezza del fascio d'antenna ϕ_A :

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

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

Cella di risoluzione spaziale



Localizzazione: misura dell'angolo (III)

Time on target & Numero di impulsi nel fascio

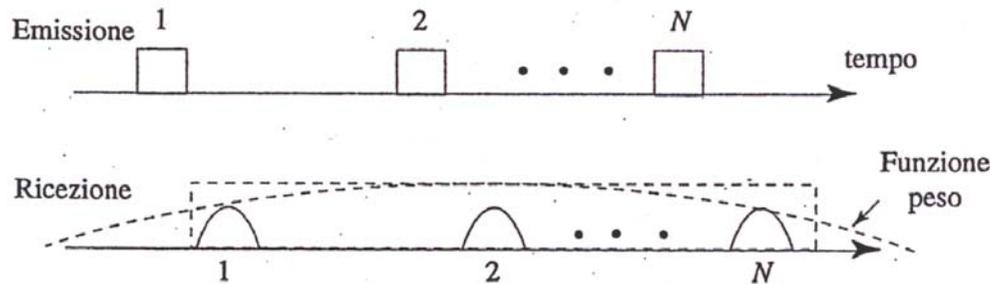
- ✓ radar trasmette impulsi con frequenza PRF
- ✓ fascio d'antenna ruota con velocità ω_a

Bersaglio puntiforme:

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

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

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



Scan rate ω_a
da 1 a 60 rpm

- 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

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

Frequenza Doppler e misura di velocità radiale

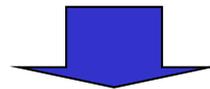
• Segnale trasmesso: impulso di durata τ su portante f_c $s_{tx}(t) = \text{rect}_\tau(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$

• Eco riflessa da un bersaglio in movimento (a meno di un fattore di scala, i.e. trascurata attenuazione segnale tx \rightarrow rx)

$$s_{rx}(t) = s_{tx}\left(t - \frac{2R}{c}\right) = \text{rect}_\tau\left(t - \frac{2R}{c}\right) \cdot \cos\left[2\pi f_c\left(t - \frac{2R}{c}\right)\right] =$$

R_0 : distanza radar-bersaglio all'istante $t=0$;
 \dot{R} : velocità radiale (lungo la direzione di range) del bersaglio.

$$= \text{rect}_\tau\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \cos\left[2\pi f_c\left(t - \frac{2(R_0 + \dot{R}t)}{c}\right)\right] = \text{rect}_\tau\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \cdot \cos\left[2\pi\left(f_c - \frac{2\dot{R}}{\lambda}\right)t - \frac{4\pi}{\lambda}R_0\right]$$



• L'eco riflessa dal bersaglio in movimento è traslata in frequenza rispetto alla frequenza portante della quantità:

$$f_d = -\frac{2\dot{R}}{\lambda} = -\frac{2v_r}{\lambda} \quad \text{FREQUENZA DOPPLER}$$



- a) Dalla misura dello spostamento in frequenza tra trasmissione e ricezione (misura di Doppler) è possibile ricavare una misura della velocità radiale del bersaglio.
- b) La differenza fra la frequenza dell'eco riflessa dal bersaglio ed il clutter permette di rivelare meglio il bersaglio

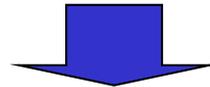
Frequenza Doppler e misura di velocità radiale

- fra un impulso ed il successivo ho quindi sfasamento di

$$2\pi f_d T = -\frac{4\pi}{\lambda} v_r T$$

- Noto che per un bersaglio con $f_d=1/T$ ho sfasamento nullo (appare fermo!)
- Questo accade per qualsiasi $f_d=n/T$ con N intero.
- Più in generale :

NON distinguo gli sfasamenti causati da $f_d=1/T$ da quelli causati da $f_d'=f_d+n/T$



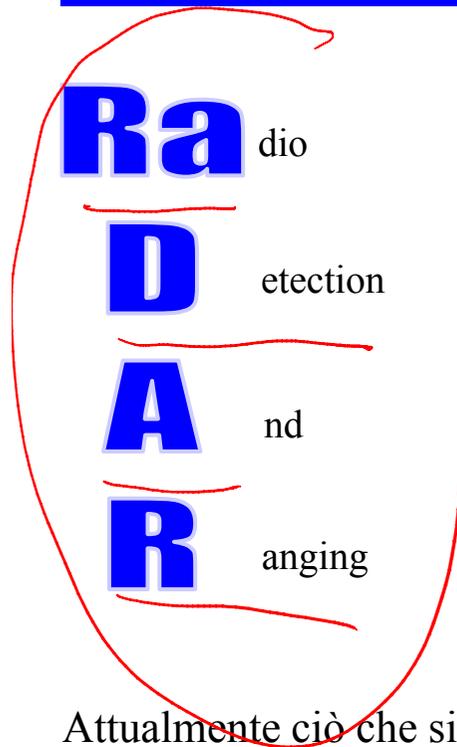
AMBIGUITA' IN FREQUENZA DOPPLER

Max zona non ambigua $1/T = \text{PRF}$



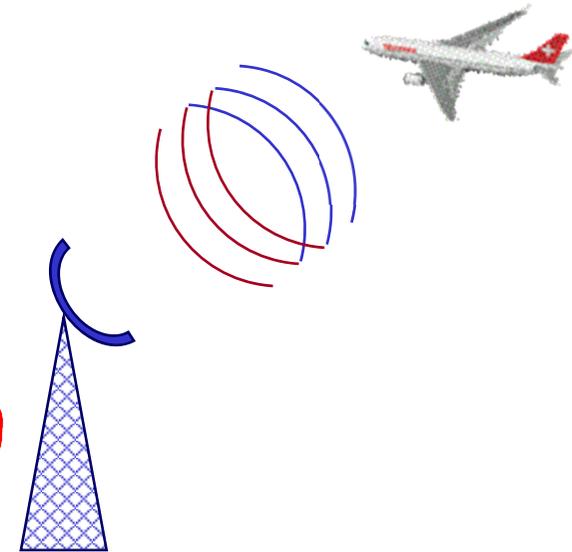
Zona non abigua da $-\text{PRF}/2$ a $+\text{PRF}/2$

Il RADAR anche per imaging e monitoraggio



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

RIVELAZIONE
~~RILEVAZIONE~~



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.;

Sistemi Radar

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.

Sistemi Radar

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)

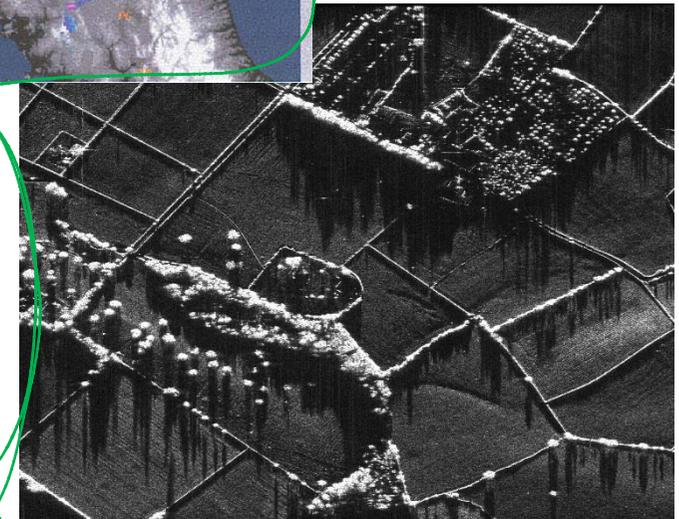
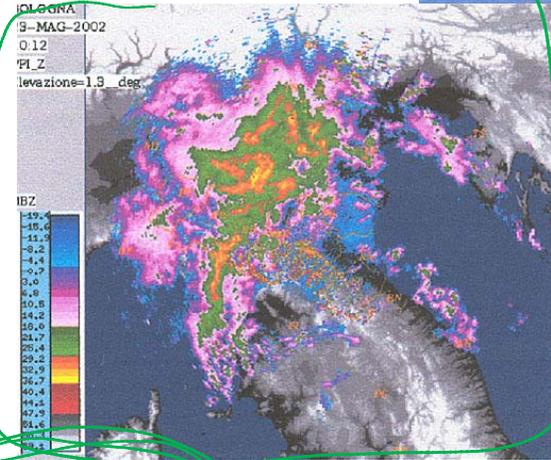
I radar possono essere classificati in base a:

► 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



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

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

Sistemi Radar

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)

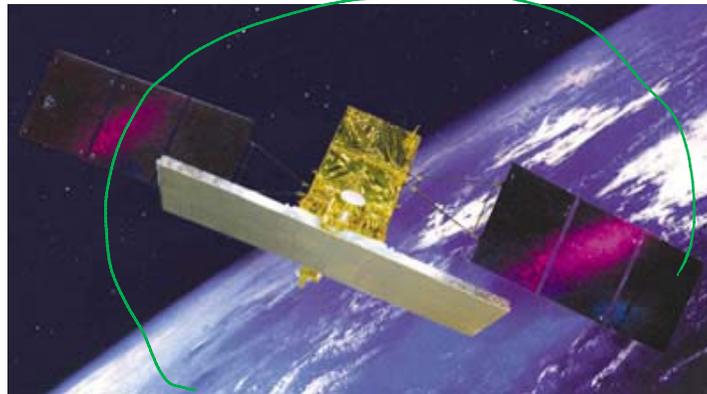
EMPAR



AWACS:
Airborne Warning
and Control
System

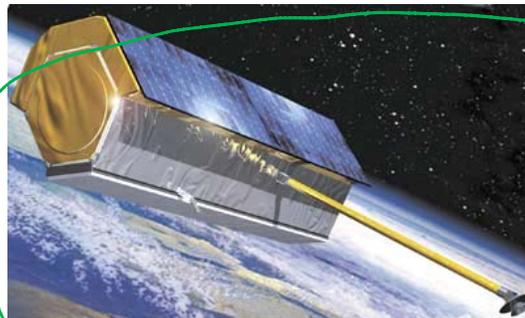


SOSTAR-X
Stand Off Surveillance and Target
Acquisition Radar



COSMO-SkyMed

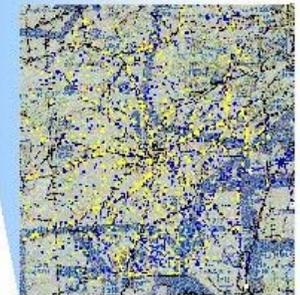
TerraSAR-X



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



GRIFO Multimode Radar
Courtesy of FIAR



Sistemi Radar

Classificazione dei radar (IV)

▶ la portata

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

▶ le dimensioni esplorate

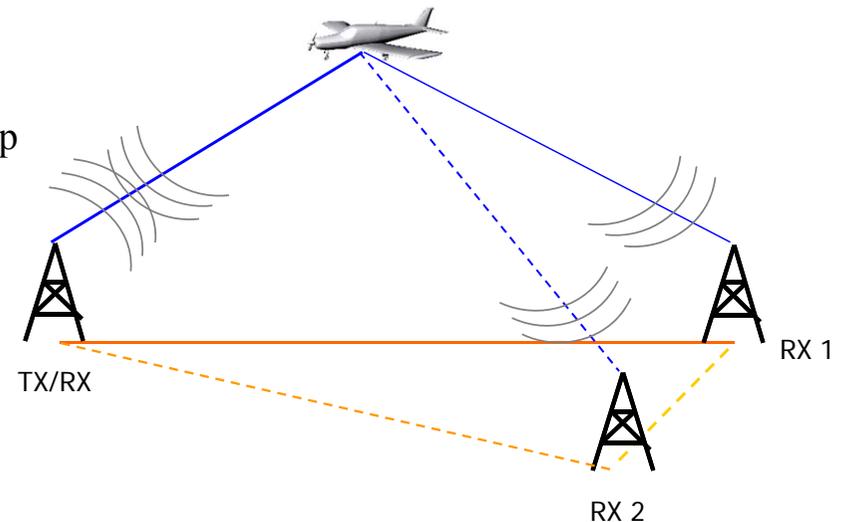
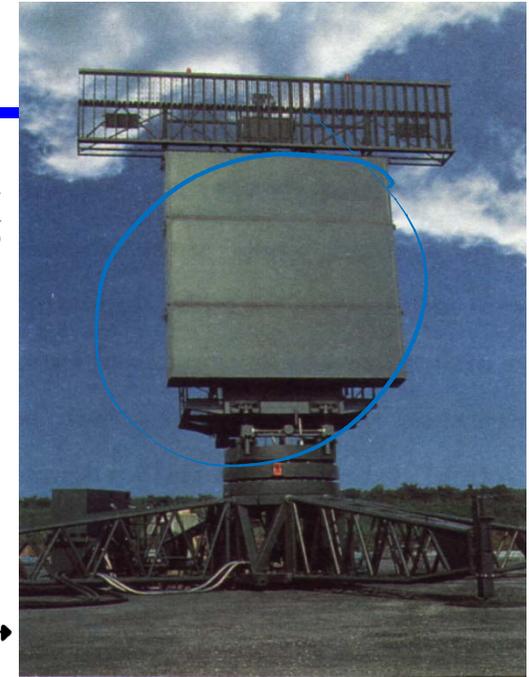
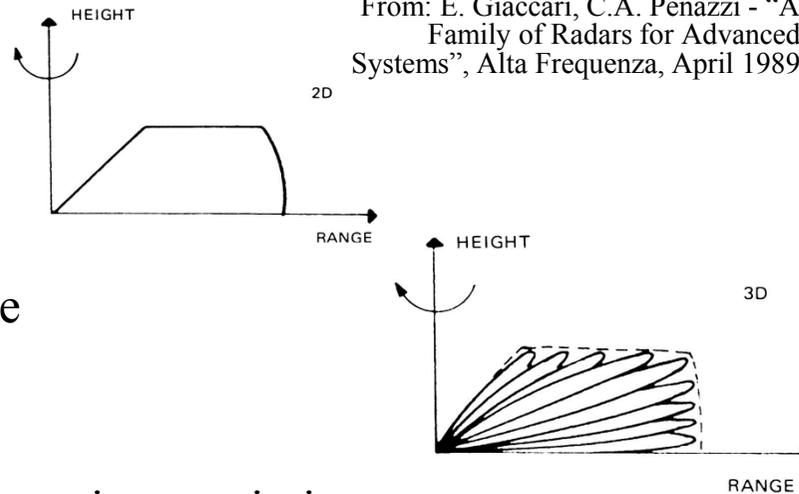
- Radar 2D
- Radar 3D

▶ 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



Sistemi Radar

Classificazione per forma d'onda e geometria

Due possibili modi di funzionamento:

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

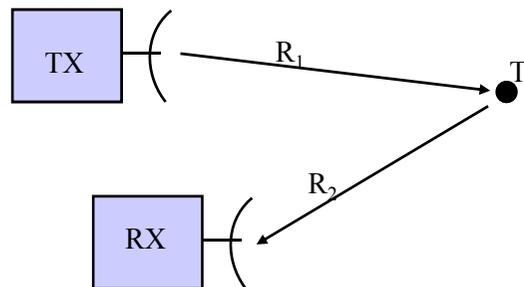
- il segnale trasmesso è un impulso;
- possibili configurazioni con una (TX/RX) o due (TX e RX) antenne;
- consente sia la rivelazione che la misura di distanza;

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

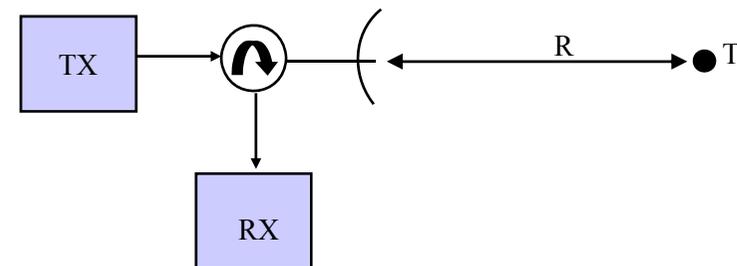
- il segnale trasmesso è un tono puro (sinusoide);
- configurazione a due antenne (TX e RX);
- consente la rivelazione mentre la misura di distanza è possibile solo se si trasmettono forme d'onda opportunamente modulate;

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)



Sistemi Radar

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)

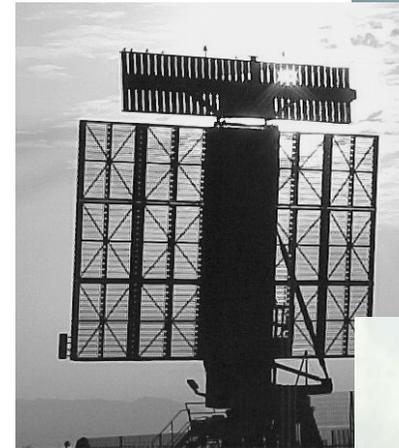
- ▶ la frequenza portante adoperata

- 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



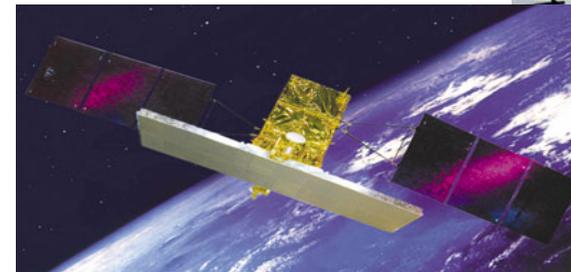
3D Active Antenna Array



Passive Phased Array



Active Phased Array

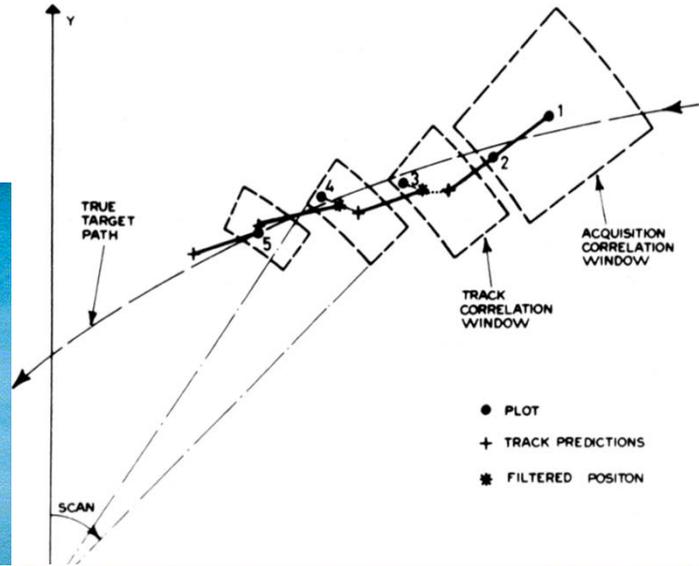


Sistemi Radar

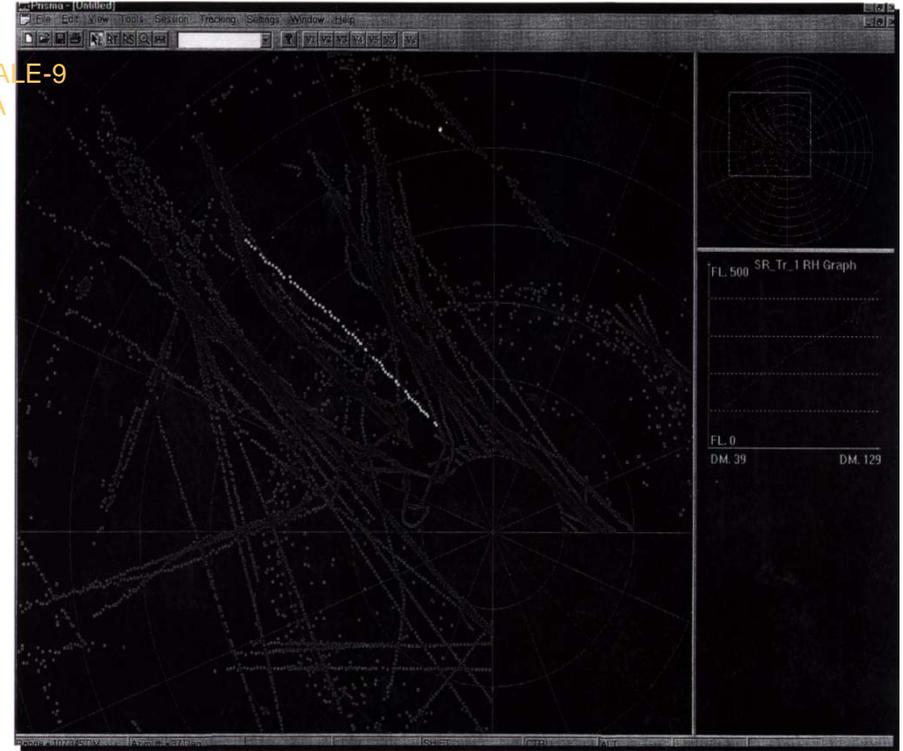
Tracciamento Radar



G-33 PRIMARY ANTENNA AND ALE-9 MSSR ANTENNA



Sistemi Radar



Alcuni sistemi Radar a cui ci dedichiamo ...

Tipologie di radar primario & compiti relativi:

- Radar di ricerca:

- Rivelare la presenza di uno o più bersagli;
- Localizzare il bersaglio (Stimare i parametri geometrici caratteristici del bersaglio: distanza, angolo di azimuth, angolo di elevazione, velocità)
- Identificare il bersaglio (Stimare caratteristiche che permettano di riconoscerlo: velocità, caratteristiche di riflessione, estensione geometrica, profilo, ecc...)
- Tracciare il moto dei bersagli rivelati (Stima della sequenza di posizioni e predizione)

- Radar di tracciamento

- Stima accurata e continua della sequenza di posizioni di uno specifica bersaglio

- Radar di navigazione & SMR

- Identificazione di bersagli in moto (lento) sulla superficie
- Analisi della superficie e del contesto ambientale

- Radar di immagine

- Formazione di immagini radar della superficie o di oggetti sfruttando tempi di integrazione lunghi

Sistemi Radar

Organizzazione corso

Materiale didattico:

e-learning Sapienza Moodle

<https://elearning2.uniroma1.it/course/view.php?id=4792>

- Slides lezione

- Testo di riferimento consigliato a.a. 2017-2018:

“Elaborazione del segnale radar”, Giovanni Picardi, Franco Angeli ed.

“Radar principles”, Nadav Levanon, Wiley

- esercizi & test (ogni 1-2 settimane) su e-learning Sapienza.

Esame:

- Esercizio di dimensionamento.... circa 3,5 ore

- Prova teorica a domande aperte.... circa 3 ore <

Conclude le prove una discussione delle prove

Esercizi sottomessi:

-valgono il 50% del voto e sostituiscono la prova di dimensionamento.

Sistemi Radar
