

---

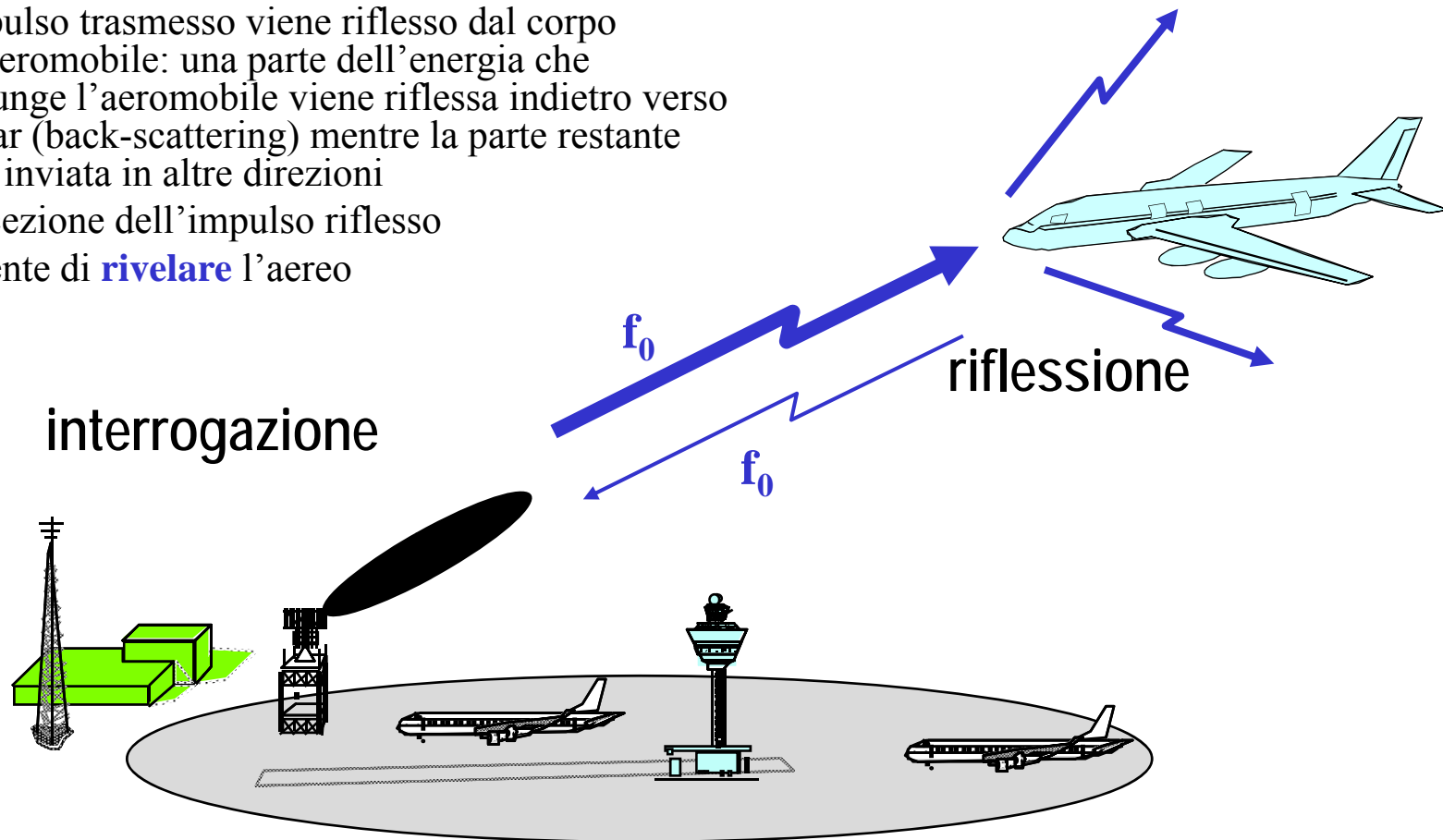
# Sistemi Radar

*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



# La rivelazione Radar (I)

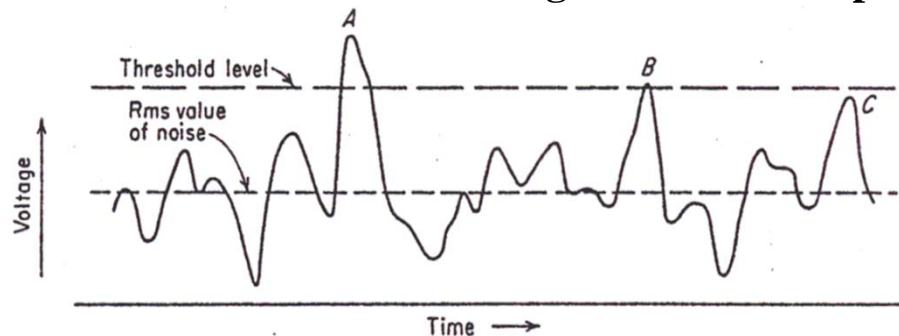
RIVELAZIONE  $\Rightarrow$  la presenza del bersaglio è rivelata rivelando la presenza dell'eco relativa

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**



Involuppo del segnale di uscita dal RX radar vs tempo.

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;

## Sistemi Radar

# La rivelazione Radar (II)

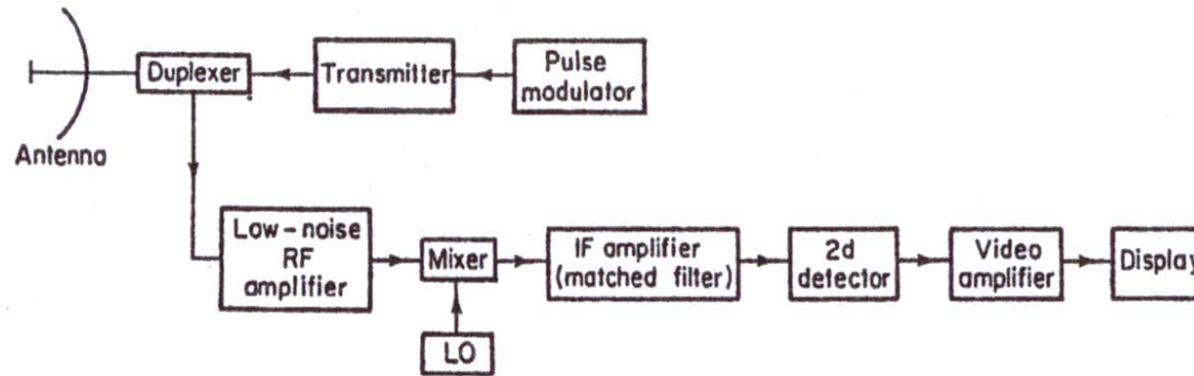


Diagramma a blocchi di un radar ad impulsi.



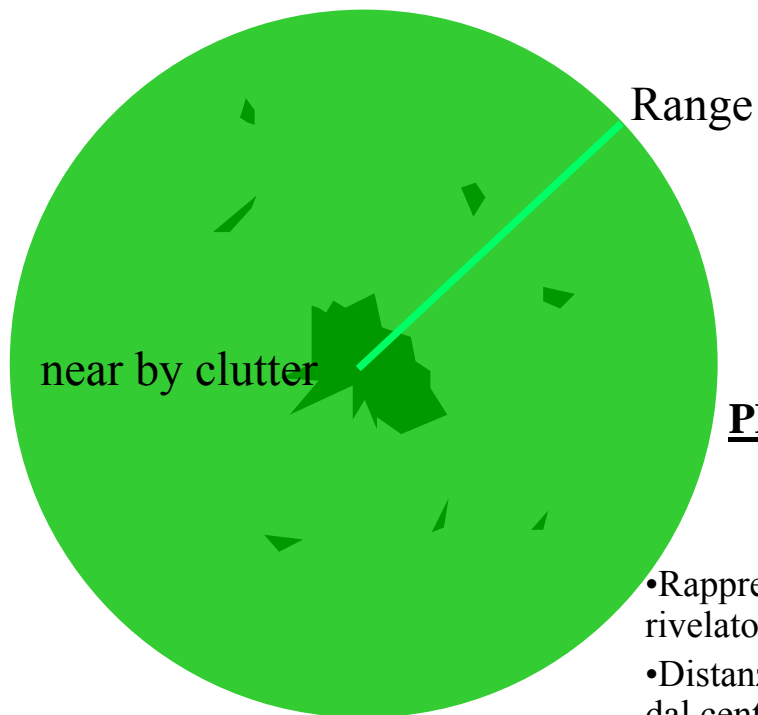
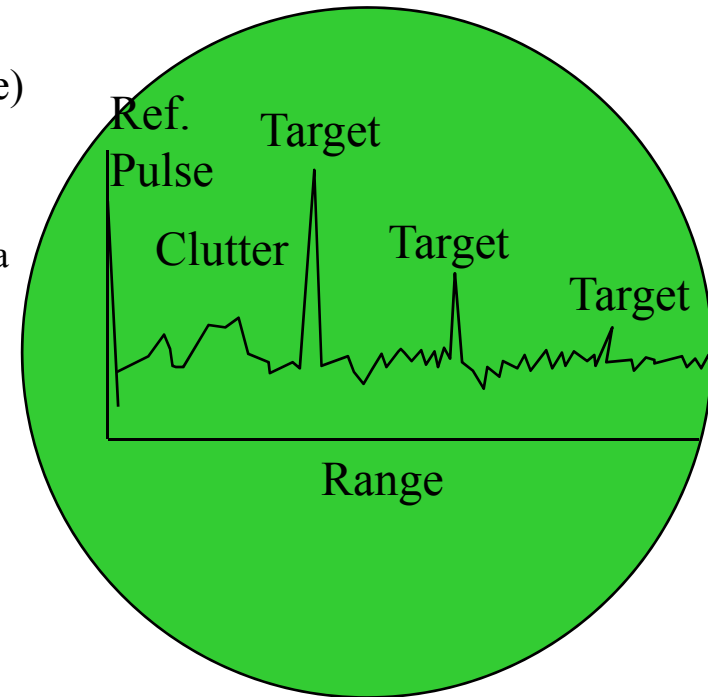
- La rivelazione è ottenuta per mezzo di opportune tecniche di elaborazione che consentono la differenziazione del segnale utile dai disturbi;
- affinchè la rivelazione sia possibile il rapporto tra la potenza di segnale e la potenza di disturbo deve essere sufficientemente elevata: rapporto valutabile 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**

# Le misure del Radar Primario (I)

## Misura di distanza:

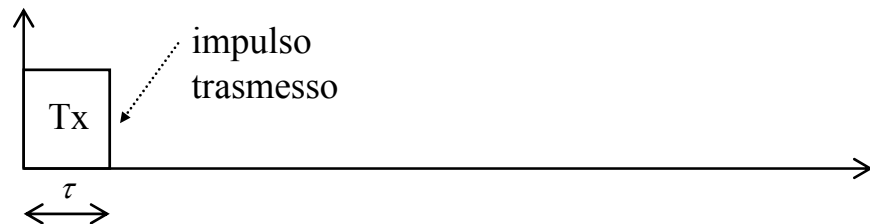
- Si misura la distanza dal ritardo ( $t_0$ ) dell'eco ricevuta dal bersaglio (percorso 2-vie):

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



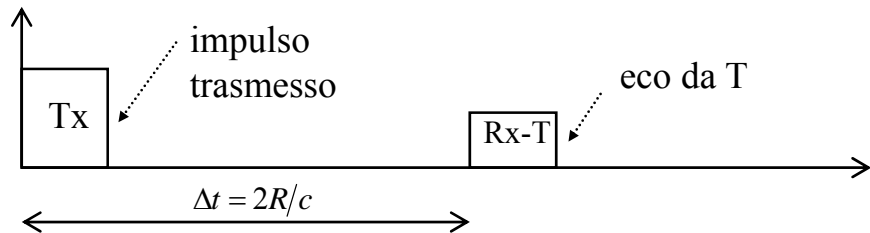
- **Segnale trasmesso:**

- impulso con durata  $\tau$  e
- lunghezza d'onda della portante  $\lambda$



- **Segnale ricevuto:**

- eco riflessa da bersaglio a distanza R



## Sistemi Radar

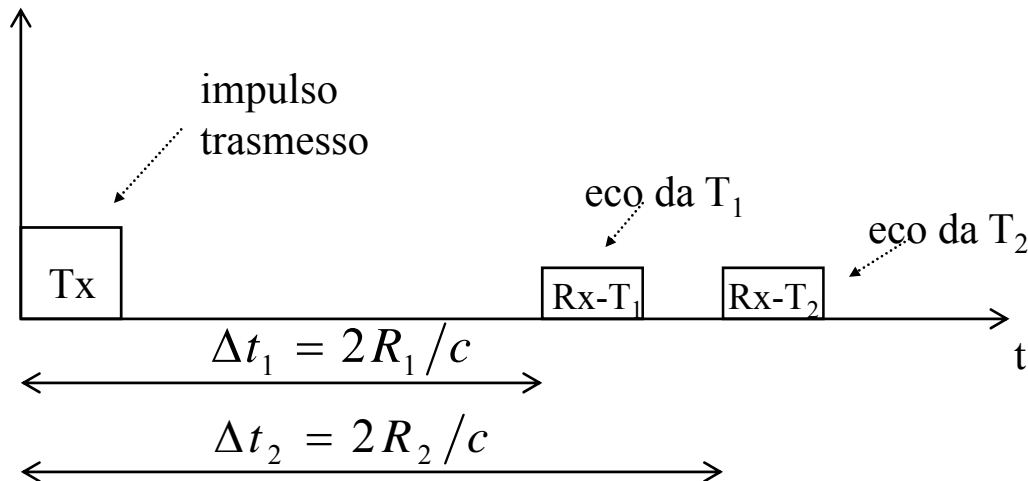
# Risoluzione in distanza

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 ( $\Delta r$ ) 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:

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

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

# Frequenza di ripetizione (PRF)

- Segnale trasmesso: **sequenza di impulsi** (ciascuno durata  $\tau$  e lunghezza d'onda  $\lambda$ ) 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:

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

$$\Rightarrow \delta = 0.001$$

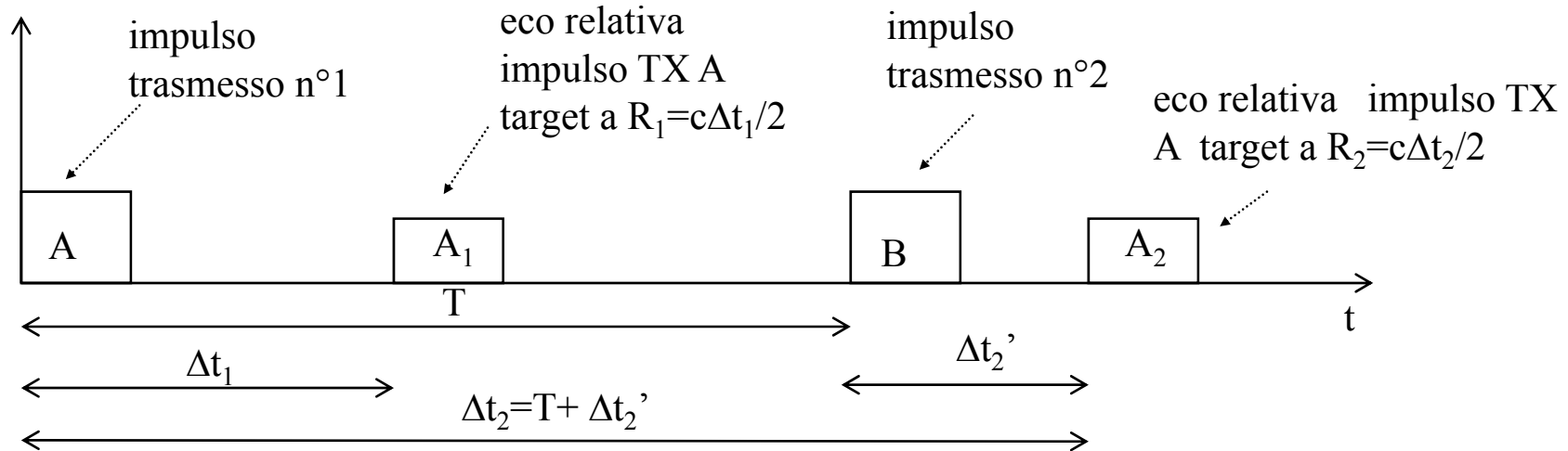
DOMANDA: il radar è in grado di misurare in modo non ambiguo il range di un bersaglio posto a distanza R?



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

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

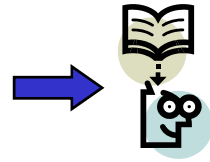
## Sistemi Radar

# 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).

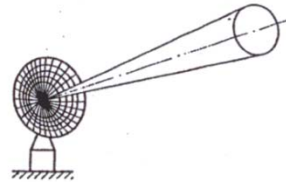
? DOMANDA: come fa il radar a rivelare e localizzare bersagli posti in una qualunque posizione angolare?



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

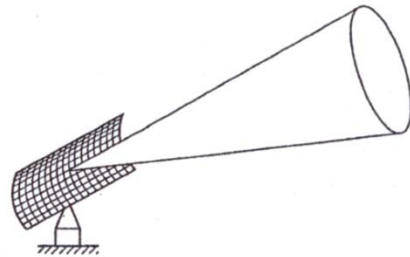
## Forme fascio d'antenna

### • 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?)

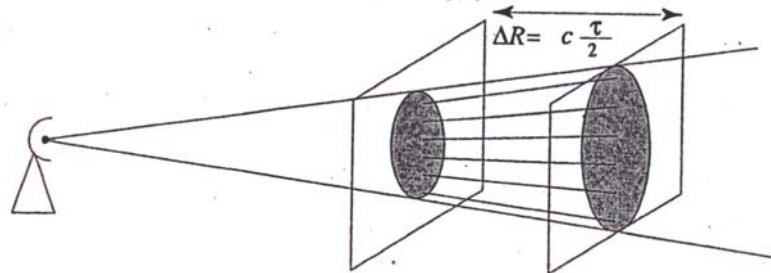


RISPOSTA: dipende dalla separazione angolare  $\Delta\phi$  dei due bersagli comparata con la larghezza del fascio d'antenna  $\phi_A$ :

- $\Delta\phi < \phi_A$ : 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

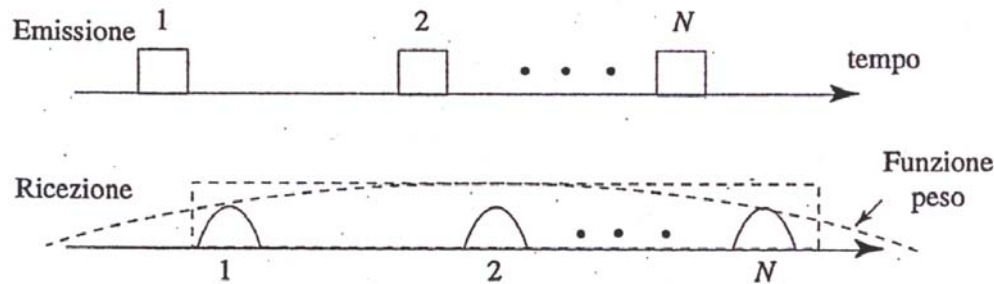
- ✓ radar trasmette impulsi con frequenza PRF
- ✓ fascio d'antenna ruota con velocità  $\omega_a$

Bersaglio puntiforme:

- permane nel fascio d'antenna ( $\phi_A$ ) 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  $\omega_a$   
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= $36^\circ$ /sec e PRF=1KHz  $\Rightarrow$   
N=27 (in genere per radar avvistamento N=20÷30)

## Sistemi Radar

# Frequenza Doppler e misura di velocità radiale

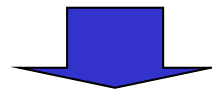
• Segnale trasmesso: impulso di durata  $\tau$  su portante  $f_c$   $s_{tx}(t) = \text{rect}_\tau(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$

• 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

## Sistemi Radar

# Frequenza Doppler e misura di velocità radiale

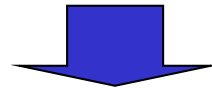
---

- 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  $1/T = \text{PRF}$



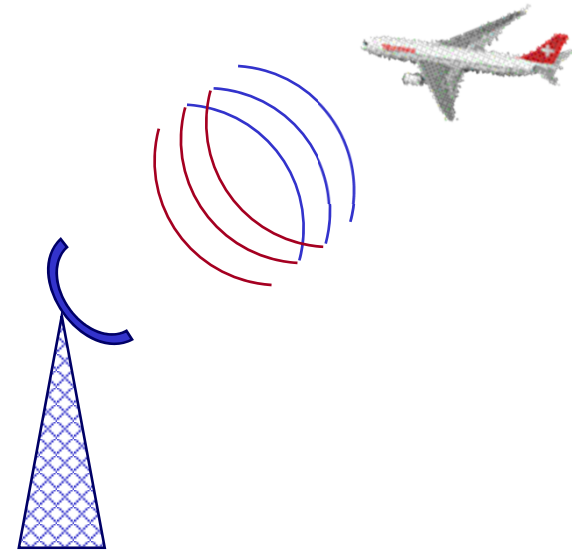
Zona non abigua da  $-\text{PRF}/2$  a  $+\text{PRF}/2$

# Il RADAR anche per imaging e monitoraggio

---

**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.;

## 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

## Sistemi Radar

---

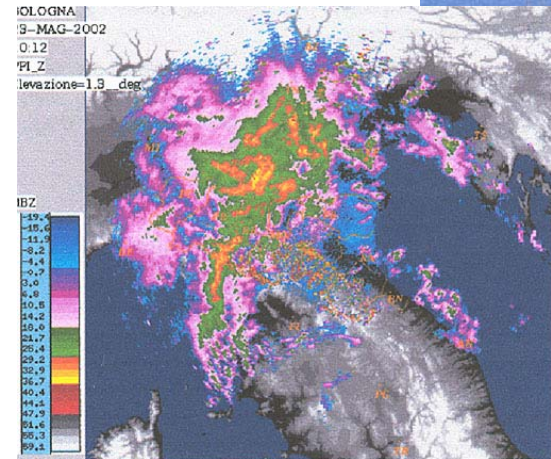
# Classificazione dei radar (II)

I radar possono essere classificati in base a:

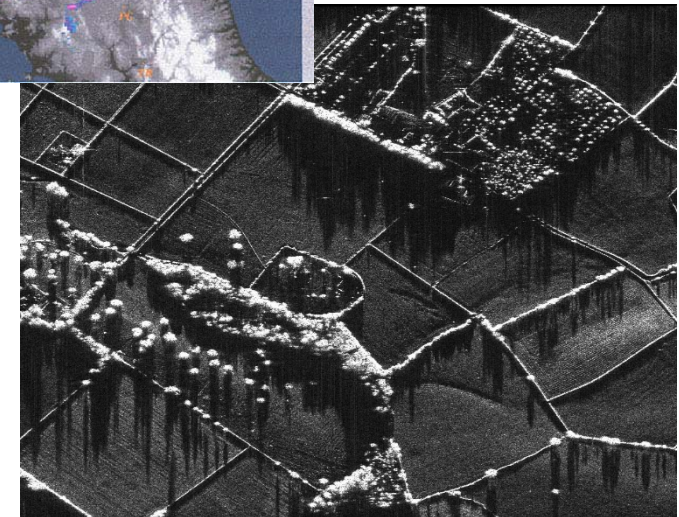
► la funzione sviluppata

- 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

## 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)

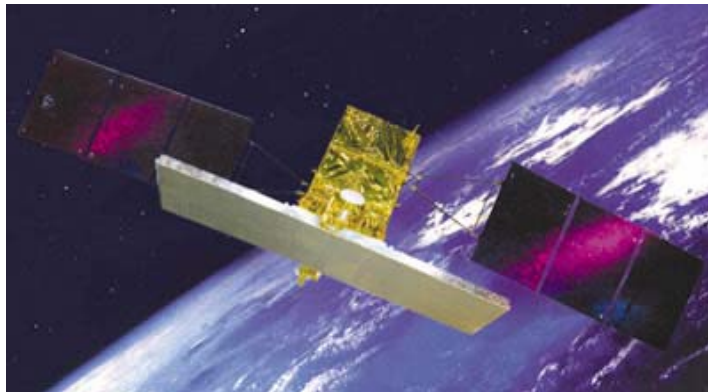
EMPAR



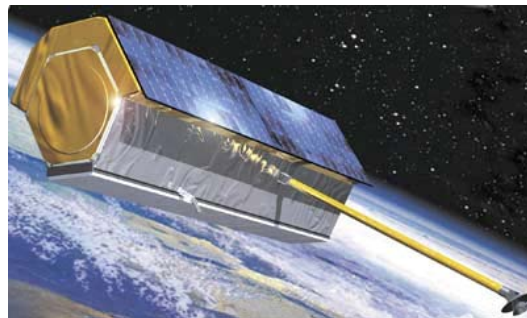
AWACS:  
Airborne Warning  
and Control  
System



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

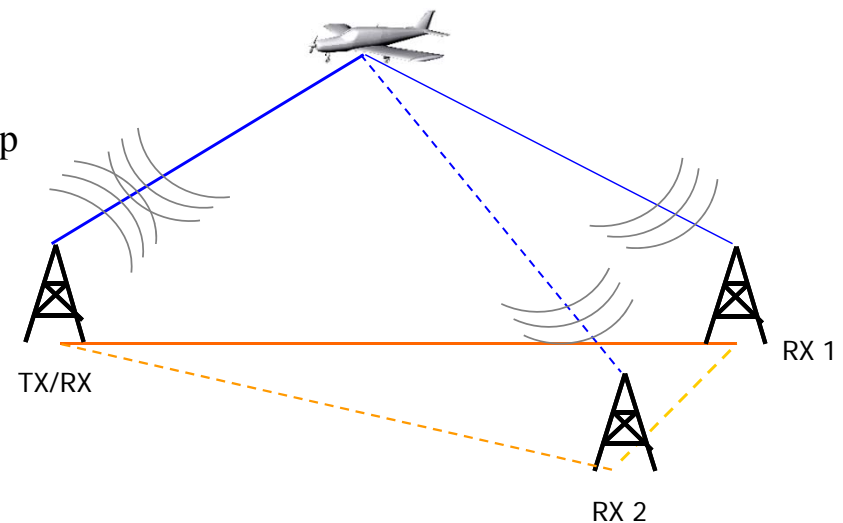
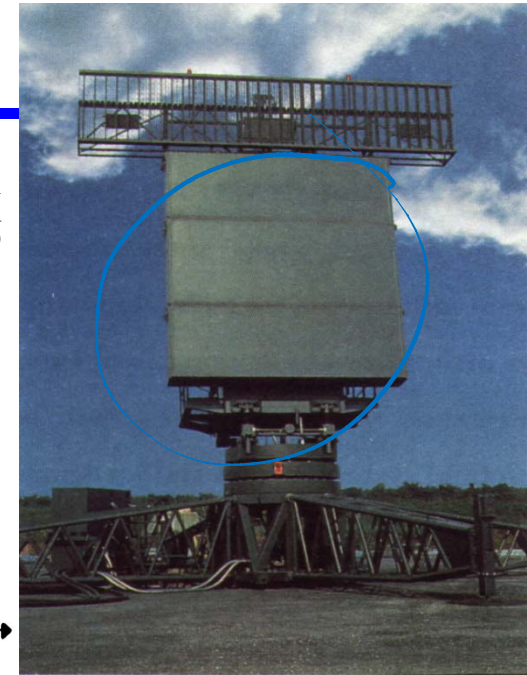
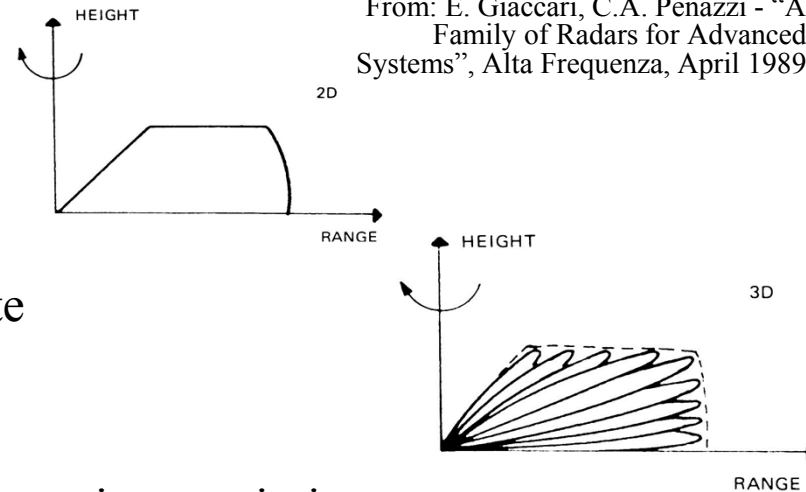
- Radar 2D
- Radar 3D

## ▶ 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):

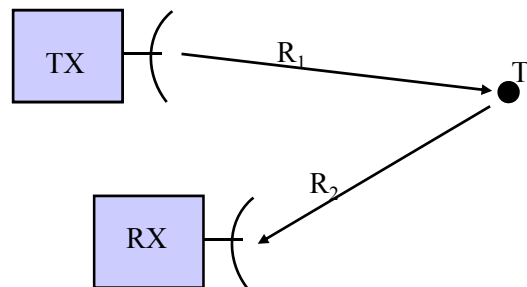
- il segnale trasmesso è un impulso;
- possibili configurazioni con una (TX/RX) o due (TX e RX) antenne;
- consente sia la rivelazione che la misura di distanza;

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

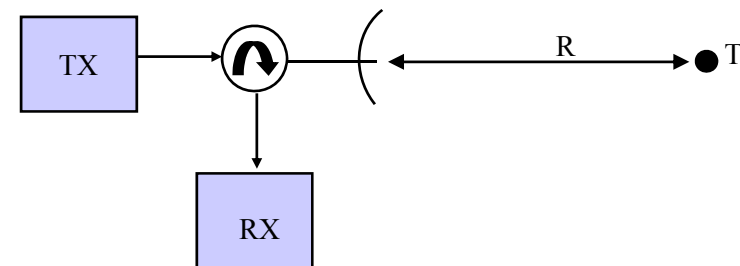
- il segnale trasmesso è un tono puro (sinusoide);
- configurazione a due antenne (TX e RX);
- consente la rivelazione mentre la misura di distanza è possibile solo se si trasmettono forme d'onda opportunamente modulate;

## 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

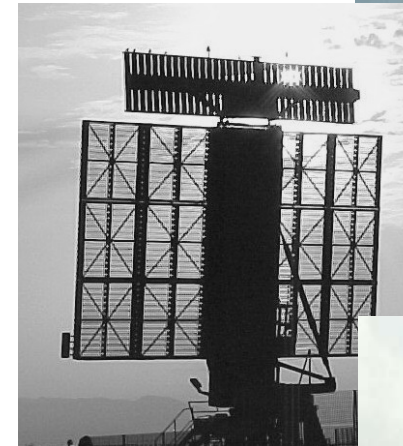
# Classificazione dei radar (V)

- ▶ 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



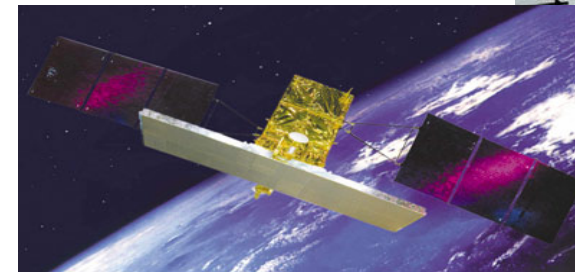
3D Active Antenna Array



Passive Phased Array



Active Phased Array

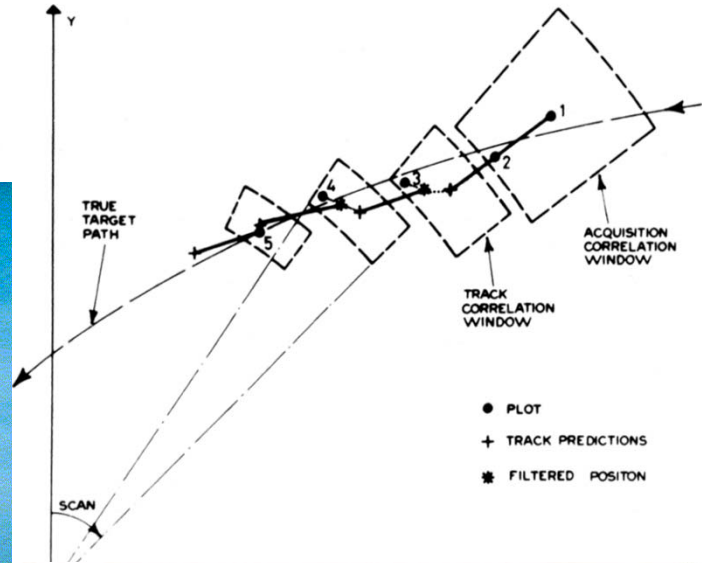


## Sistemi Radar

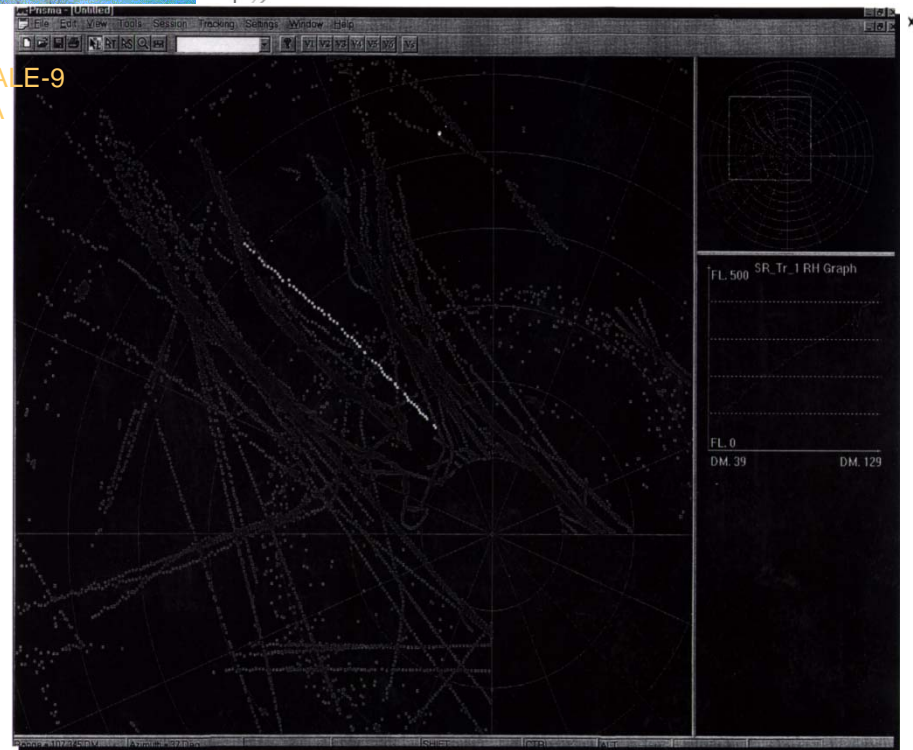
# Tracciamento Radar



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**

---