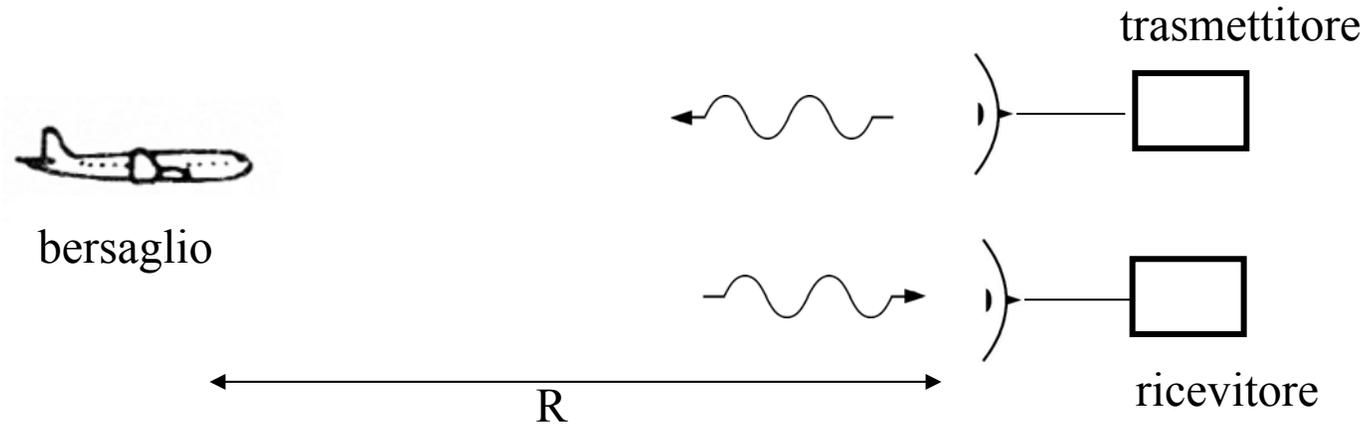


## schema a blocchi di una forma elementare di radar (spazio libero)



trasmettitore :  $P_t$     potenza trasmessa  
 antenna tx    :  $g_t$     guadagno  
 bersaglio     :  $\sigma$     sezione radar  
 antenna rx    :  $A_e$     area efficace  
 ricevitore    :  $P_r$     potenza ricevuta

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{g_t A_e \sigma}{(4\pi R^2)^2}$$

## equazione del radar

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{g_t A_e \sigma |F_t|^2 |F_r|^2}{(4\pi R^2)^2} \quad R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{g_t A_e \sigma P_t |F_t|^2 |F_r|^2}{(4\pi)^2 S_{\min}}}$$

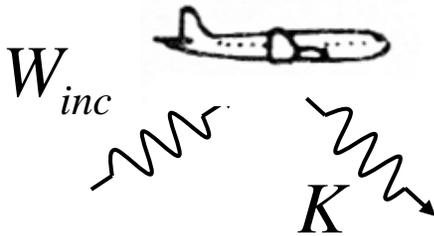
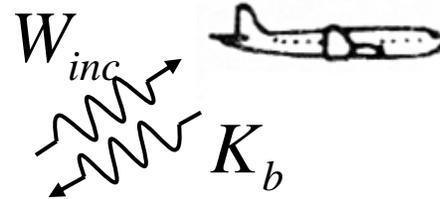
- $R_{\max}$  massima distanza di visibilità  
 $S_{\min}$  minimo livello di segnale rilevabile  
 $F_t$  path gain factor (propagazione radar-bersaglio)  
 $F_r$  path gain factor (propagazione bersaglio-radar)

$F_t$  ed  $F_r$  dipendono dalle condizioni di propagazione reali e possono essere definite in forma statistica, in molti casi è possibile assumere  $F_t = F_r$

$\sigma$  ed  $S_{\min}$  possono essere noti solo in termini probabilistici

## sezione radar (monostatica)

$$\sigma = 4\pi \frac{K_b}{W_{inc}}$$



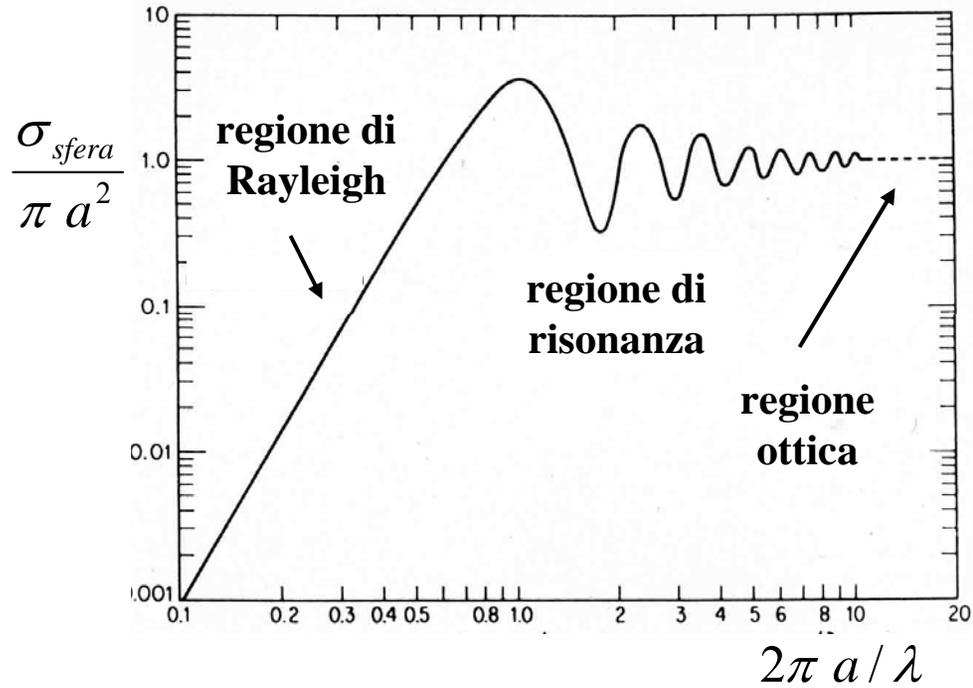
## sezione radar bistatica

$$\sigma_b = 4\pi \frac{K(\mathcal{G}, \varphi)}{W_{inc}(\mathcal{G}', \varphi')}$$

$W_{inc}$  densità di potenza incidente

$K$  intensità di radiazione diffusa

sezione radar di una sfera di raggio  $a$ , al variare della lunghezza d'onda  $\lambda$



$$\sigma = 9\pi a^2 (ka)^4 \quad \lambda \gg a$$

$$\sigma = \pi a^2 \quad a \gg \lambda$$

## sezioni radar di figure geometriche

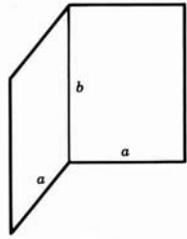
lastra piana metallica a forma di quadrato di lato  $a$

$$\sigma = \frac{4\pi a^4}{\lambda^2} \left( \frac{\sin(ka \sin \vartheta)}{ka \sin \vartheta} \right)^2$$

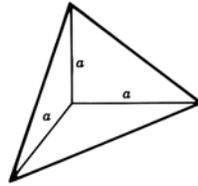
lastra piana metallica a forma di cerchio di raggio  $a$

$$\sigma = \frac{\pi a^2}{\tan^2 \vartheta} (J_1(2ka \sin \vartheta))^2$$

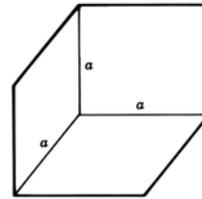
$\vartheta$  angolo di incidenza rispetto alla normale



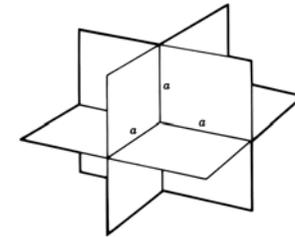
riflettore  
a diedro



riflettore a  
triedro  
triangolare



riflettore a  
triedro  
rettangolare

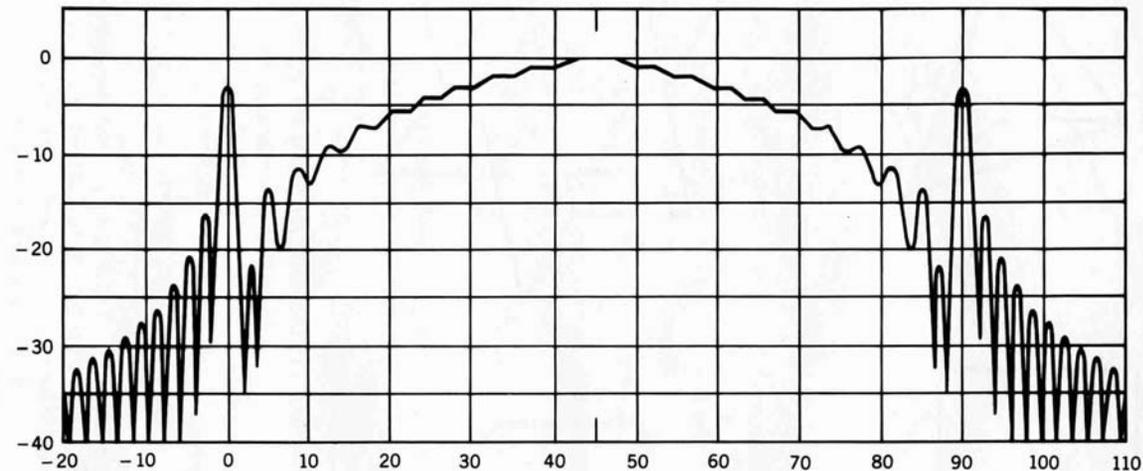


retro riflettore

### sezione radar calcolata di un riflettore a diedro

sezione radar [dB]  
riferita al valore  
massimo,  
cioè alla sezione  
radar frontale di un  
diedro di 45°  
d'apertura

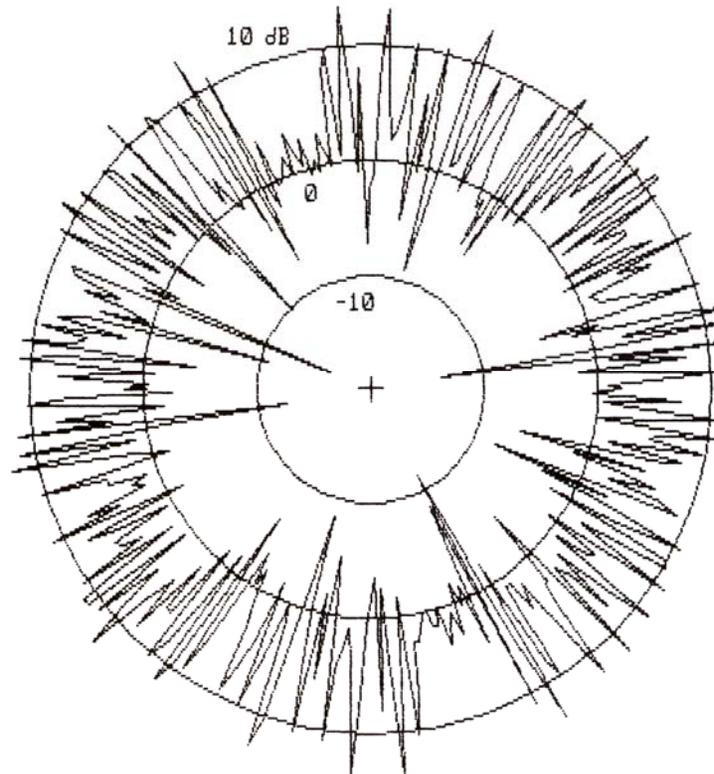
$$\sigma_{\max} \approx \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$$



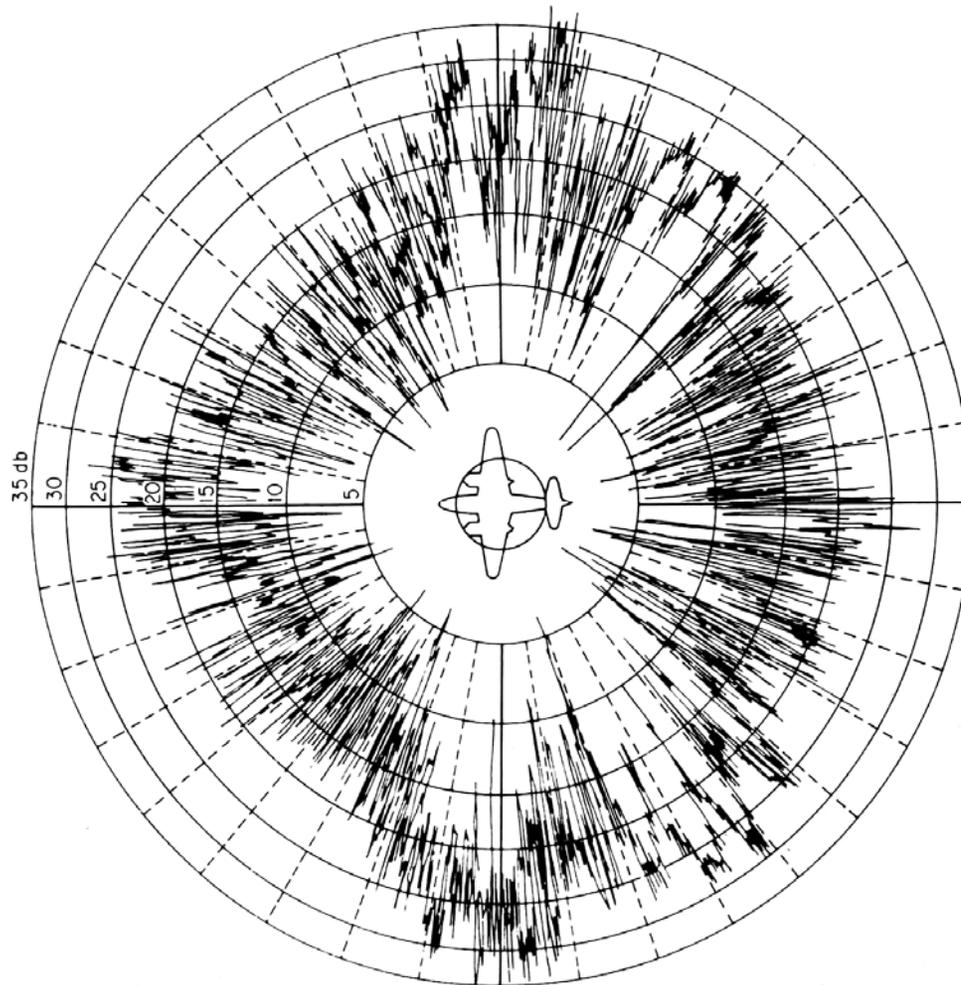
gradi

## composizione delle sezioni radar

$$\sigma = \left| \sum_i \sqrt{\sigma_i} e^{j\phi_i} \right|^2$$



sezione radar di 5 sfere uguali (calcolata)



sezione radar sperimentale del bombardiere B-26 alla lunghezza d'onda di 10 cm, in funzione dell'angolo di azimut

## Misura della distanza

la misura di distanza è la misura del ritardo d'eco; il segnale trasmesso deve essere marcato in modo che siano definibili i tempi di trasmissione e d'eco.

L'informazione può essere dedotta:

- dall'ampiezza (radar ad impulsi)
- dalla frequenza (radar CW-FM)
- dalla fase (radar CW a frequenze multiple)

## **Misura della velocità**

la misura della velocità radiale è la misura dello slittamento della frequenza d'eco causata dall'effetto Doppler. Il radar CW il radar MTI e il radar Doppler ad impulsi usano lo spostamento Doppler per distinguere i bersagli mobili da quelli fissi.

Sarebbe possibile misurare la velocità anche monitorando la variazione della distanza. I due metodi sarebbero equivalenti se il mezzo di propagazione fosse non dispersivo.

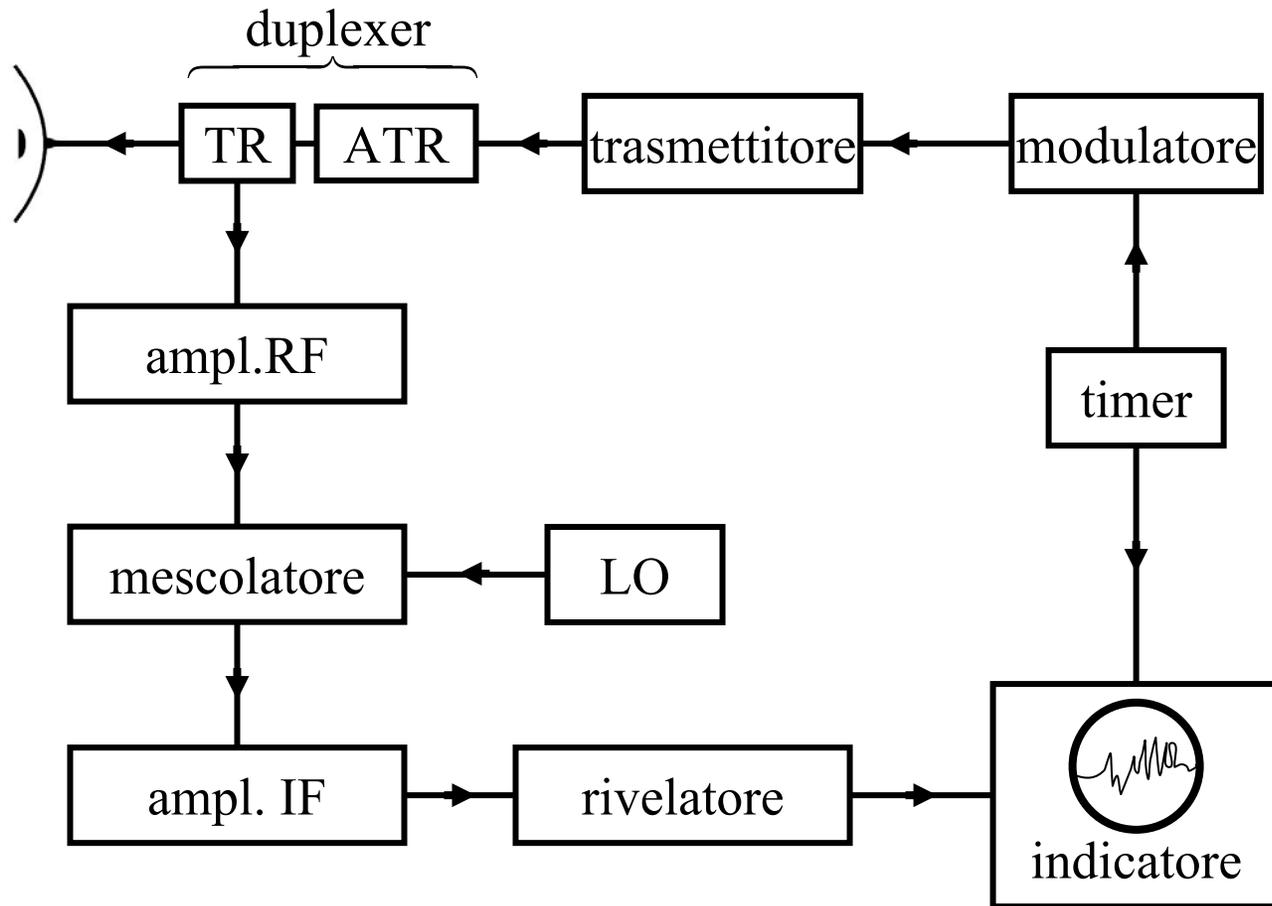
## **Misura della posizione angolare**

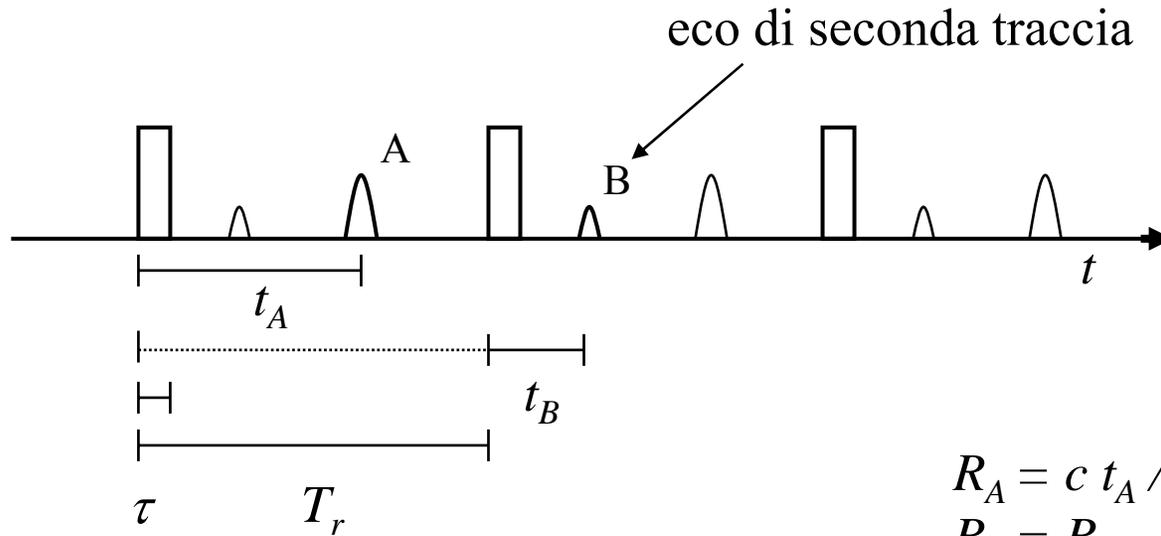
la misura della posizione angolare (azimut ed elevazione) può essere correlata alla direzione di massima intensità d'eco ricevuto con un'antenna molto direttiva.

È possibile fare una misura d'angolo con molti fasci sovrapposti, un altro modo è quello impiegato dal radar monoimpulso

Si può aumentare l'accuratezza a spese dell'ambiguità usando due antenne (o più) distanti tra loro molte lunghezze d'onda (interferometro) tanto maggiore è la base dell'interferometro, tanto maggiore è l'accuratezza.

## schema a blocchi di un semplice radar ad impulsi





$$R_A = c t_A / 2$$

$$R_B = R_{n.a.} + c t_B / 2$$

$\tau$

durata dell'impulso

$$T_r = 1 / f_r$$

periodo di ripetizione degli impulsi

$f_r$

frequenza di ripetizione degli impulsi

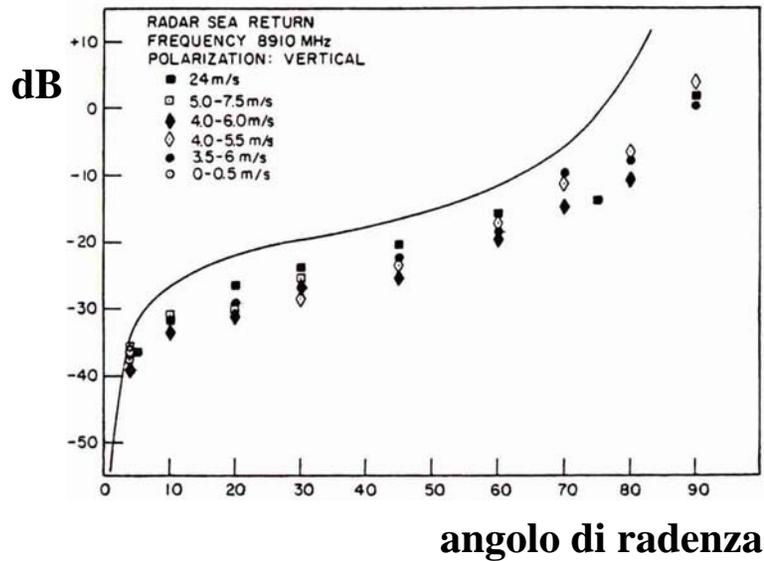
$$R_{n.a.} = c T_r / 2$$

massima distanza non ambigua

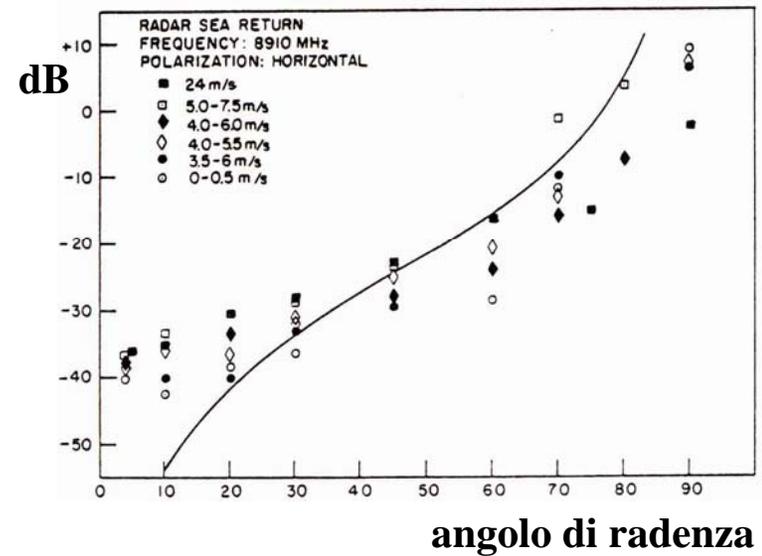
# clutter

sezione radar normalizzata della superficie del mare per diversi valori della velocità del vento

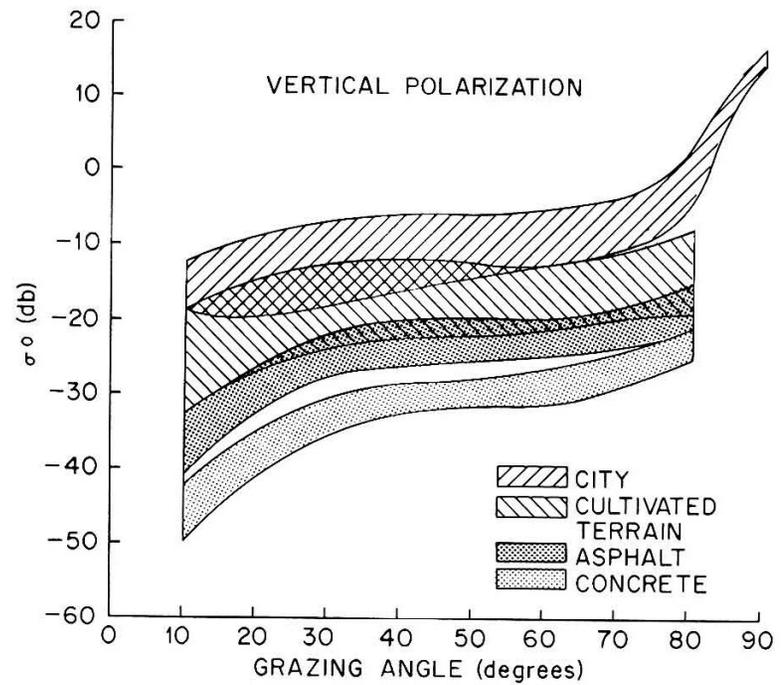
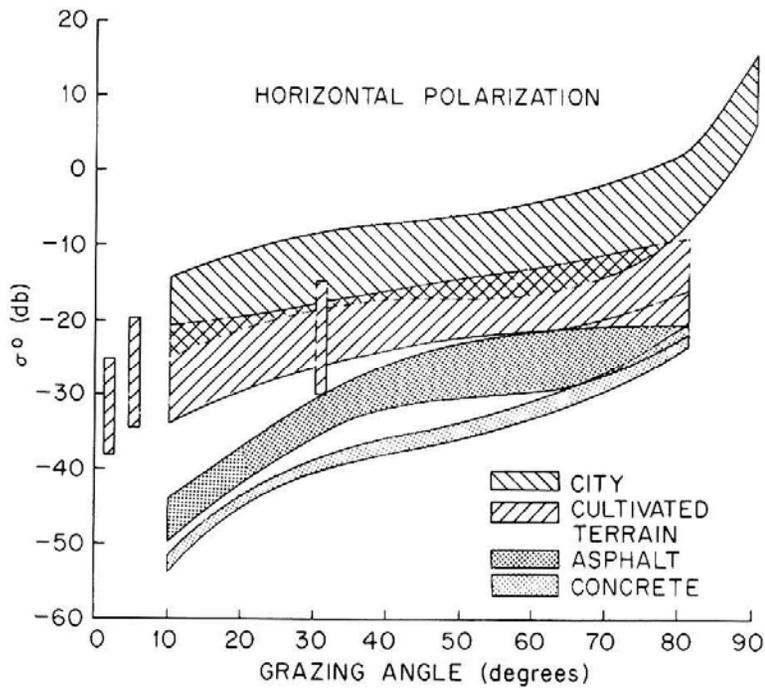
(polarizzazione verticale)



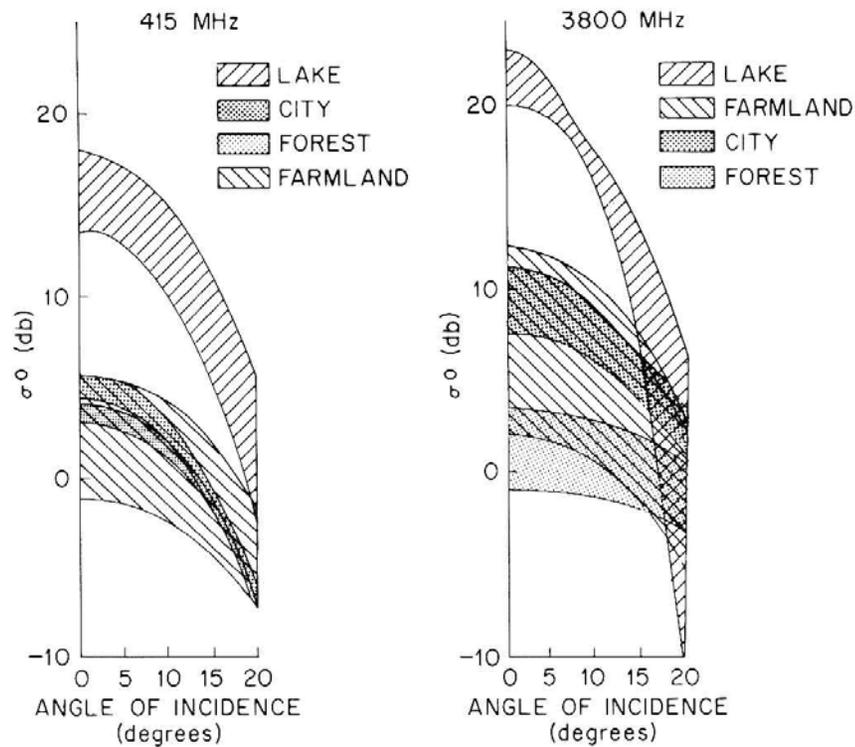
(polarizzazione orizzontale)



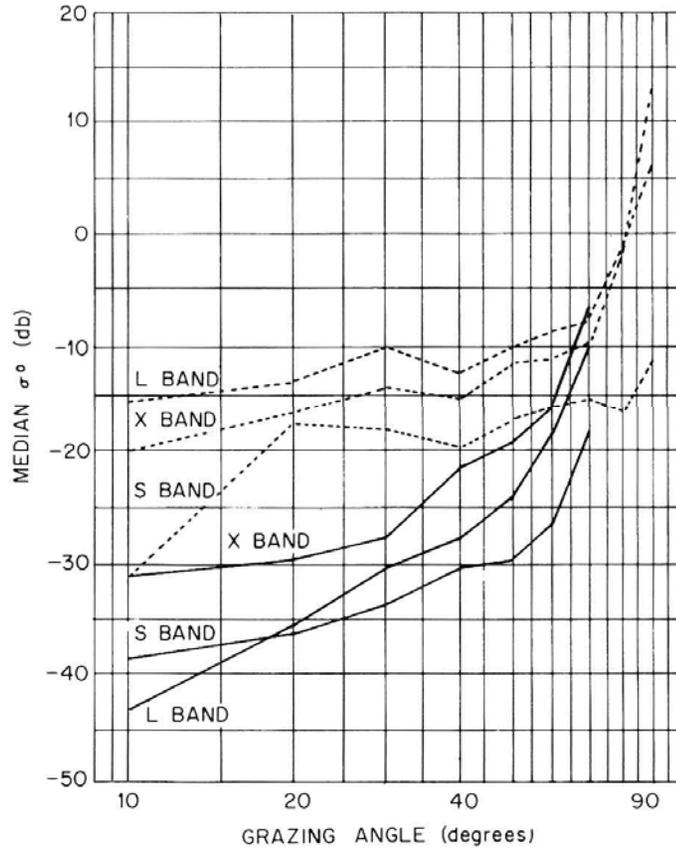
echi radar misurati su diversi terreni e per diversi angoli di radenza



echi radar misurati su diversi terreni e per diversi angoli d'incidenza prossimi alla normale



# dipendenza degli echi radar dall'angolo di radenza

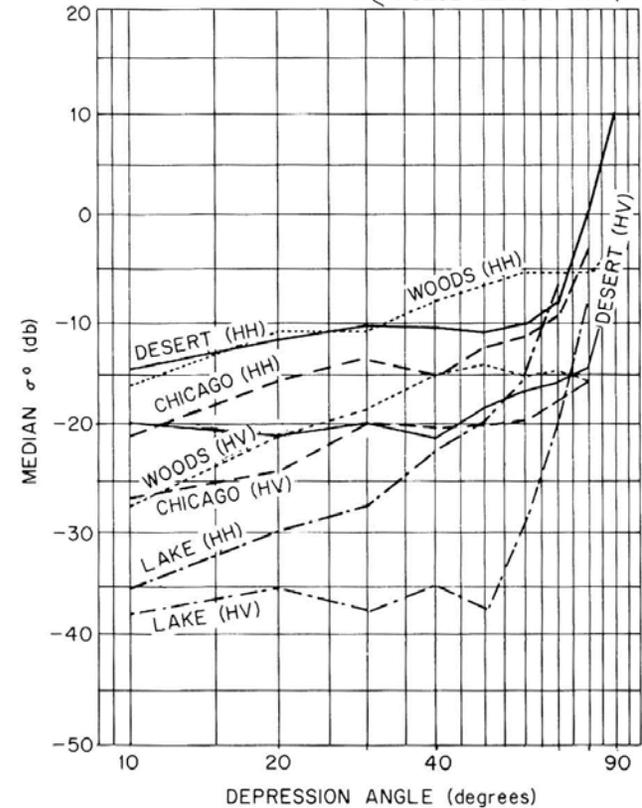


variazioni con la frequenza

HV - HORIZONTAL TRANSMIT  
 VERTICAL RECEIVE  
 HH - HORIZONTAL TRANSMIT  
 HORIZONTAL RECEIVE

TARGETS

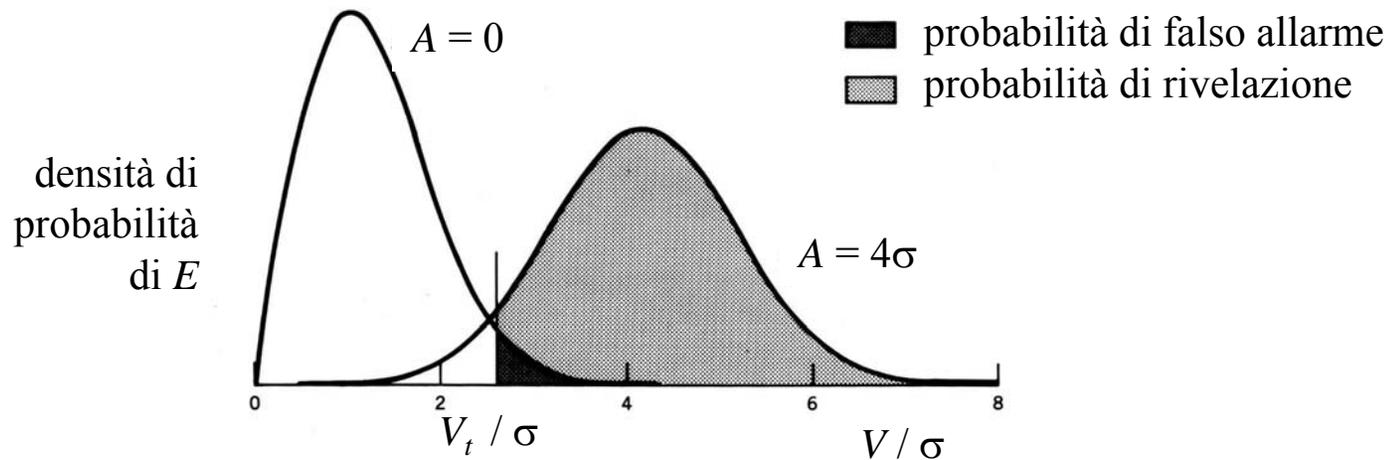
- DESERT OF NEW MEXICO  
PULSE LENGTH: 2.5  $\mu$ sec
- WOODS OF NEW JERSEY  
PULSE LENGTH: 2.5  $\mu$ sec
- CITY OF CHICAGO  
PULSE LENGTH: 0.5  $\mu$ sec
- LAKE MICHIGAN  
PULSE LENGTH: 0.5  $\mu$ sec



componenti co- e cross-polarizzate

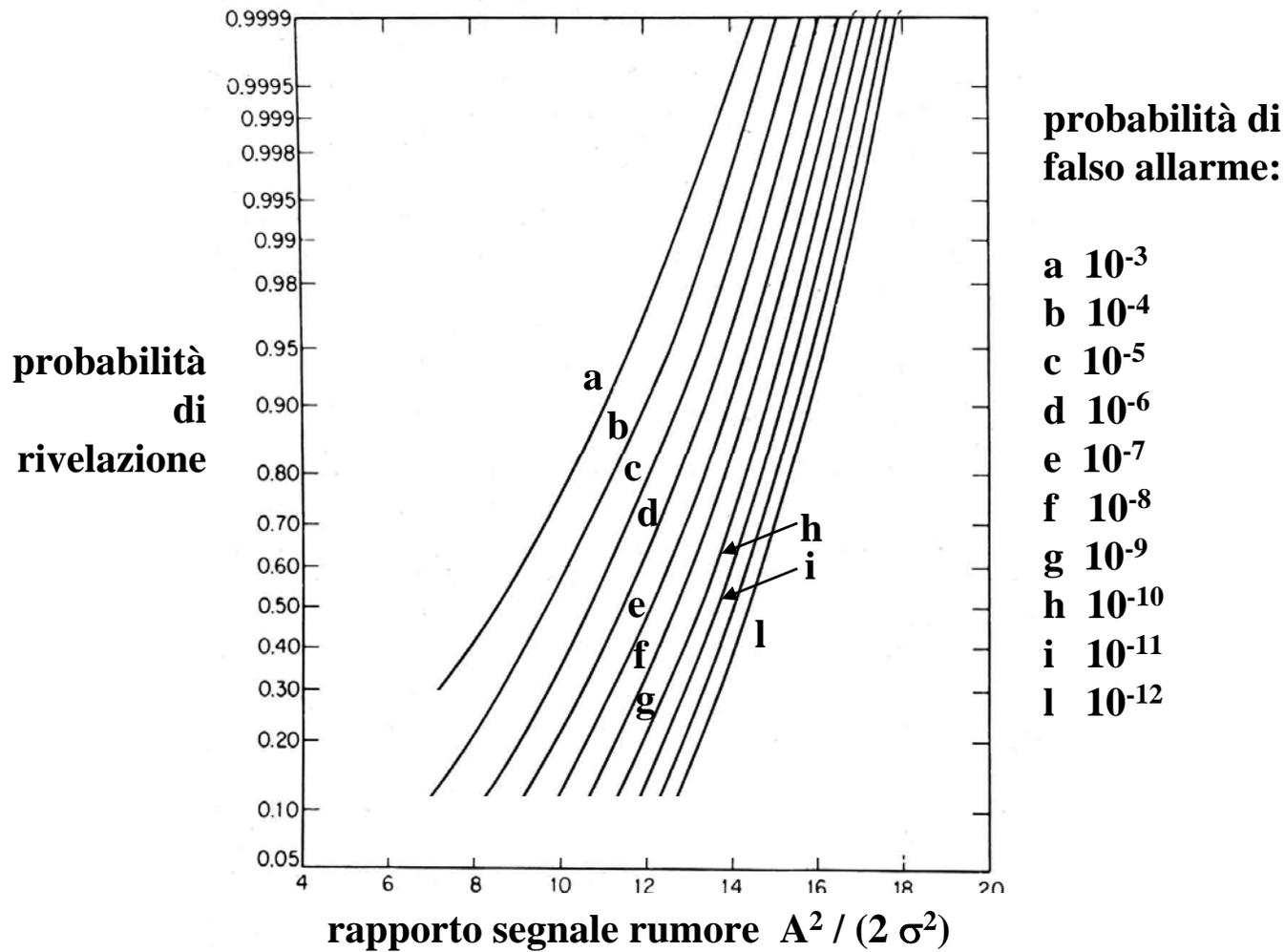
## rivelazione di un singolo impulso

$$V = A + N$$



$A = 0$  solo rumore (Rayleigh)  
 $A \neq 0$  segnale d'eco + rumore (Rice)

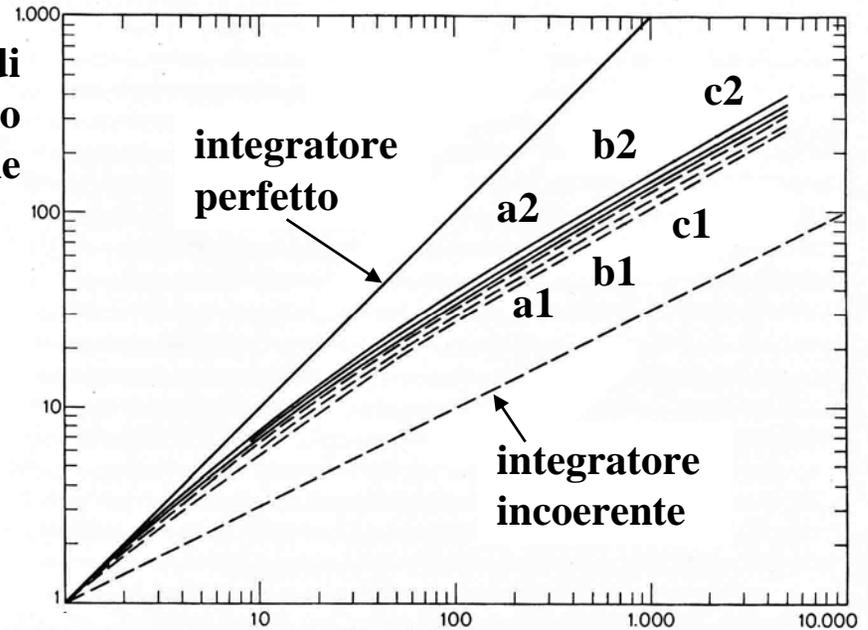
$V_t$  tensione di soglia  
 $\sigma$  deviazione standard della tensione di rumore  
 $A^2 / (2\sigma^2)$  rapporto segnale rumore



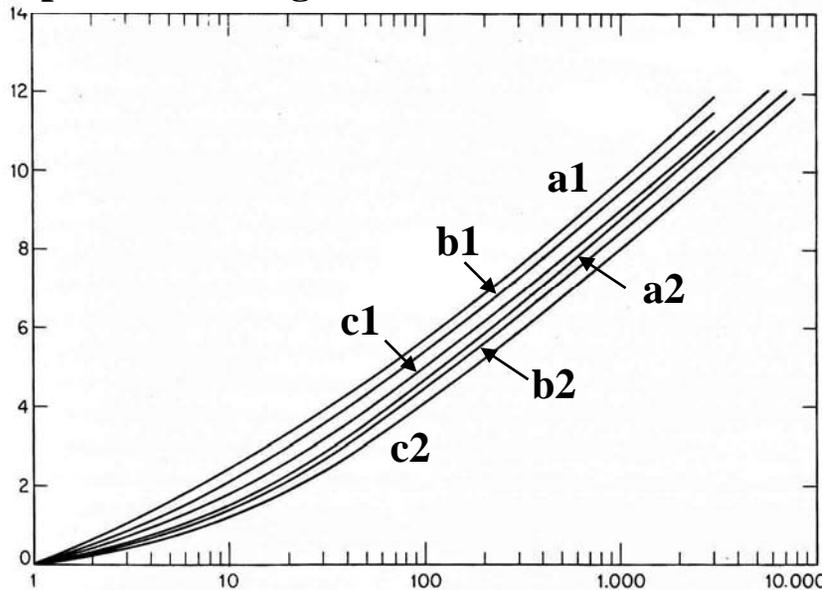
**Fattore di  
miglioramento  
dell'integrazione**

**probabilità di falsi allarmi**

**1 :  $10^{-4}$   
2 :  $10^{-12}$**



**perdita d'integrazione**



**numero di impulsi**

**numero di impulsi**

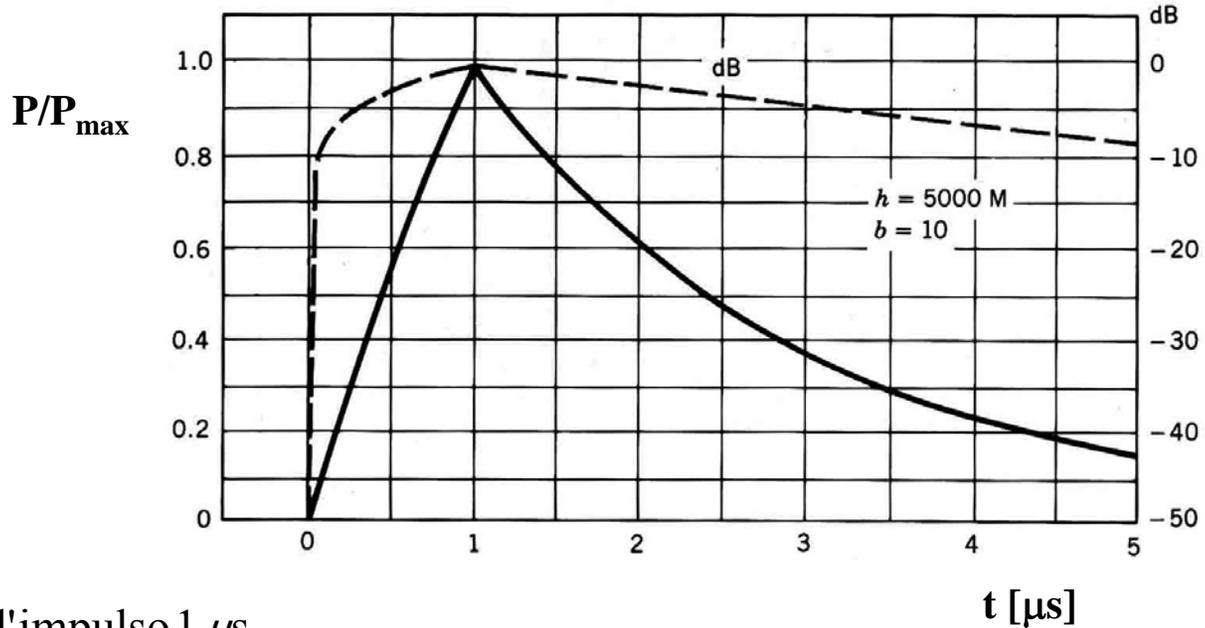
**Probabilità di rivelazione:**

**a : 0.50**

**b : 0.90**

**c : 0.99**

# radar altimetro – forma d'onda dell'impulso ricevuto



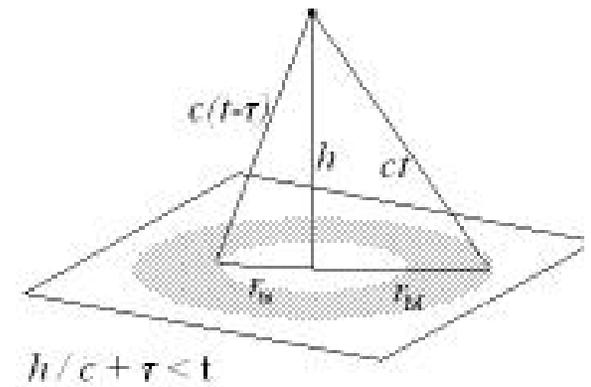
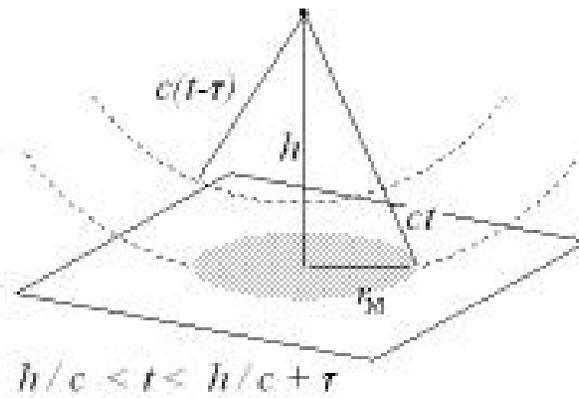
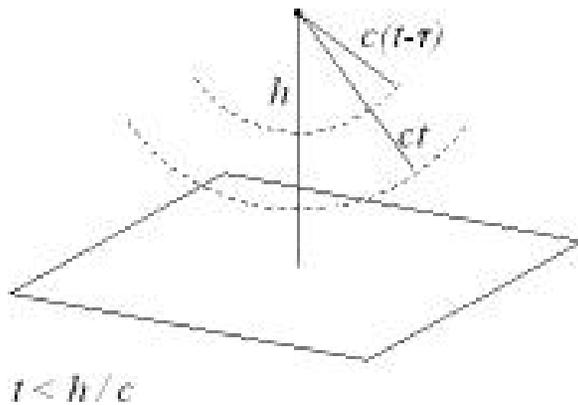
durata dell'impulso 1  $\mu s$

terreno rugoso

$$g(\mathcal{G}) = g_{max} \cos^2 \mathcal{G}$$

$$\sigma_n(\psi) = \sigma_{n0} \sin^b(\psi)$$

**radar altimetro:** progressione dell'illuminazione del terreno dovuta a un impulso ( $\tau$  è la durata dell'impulso)



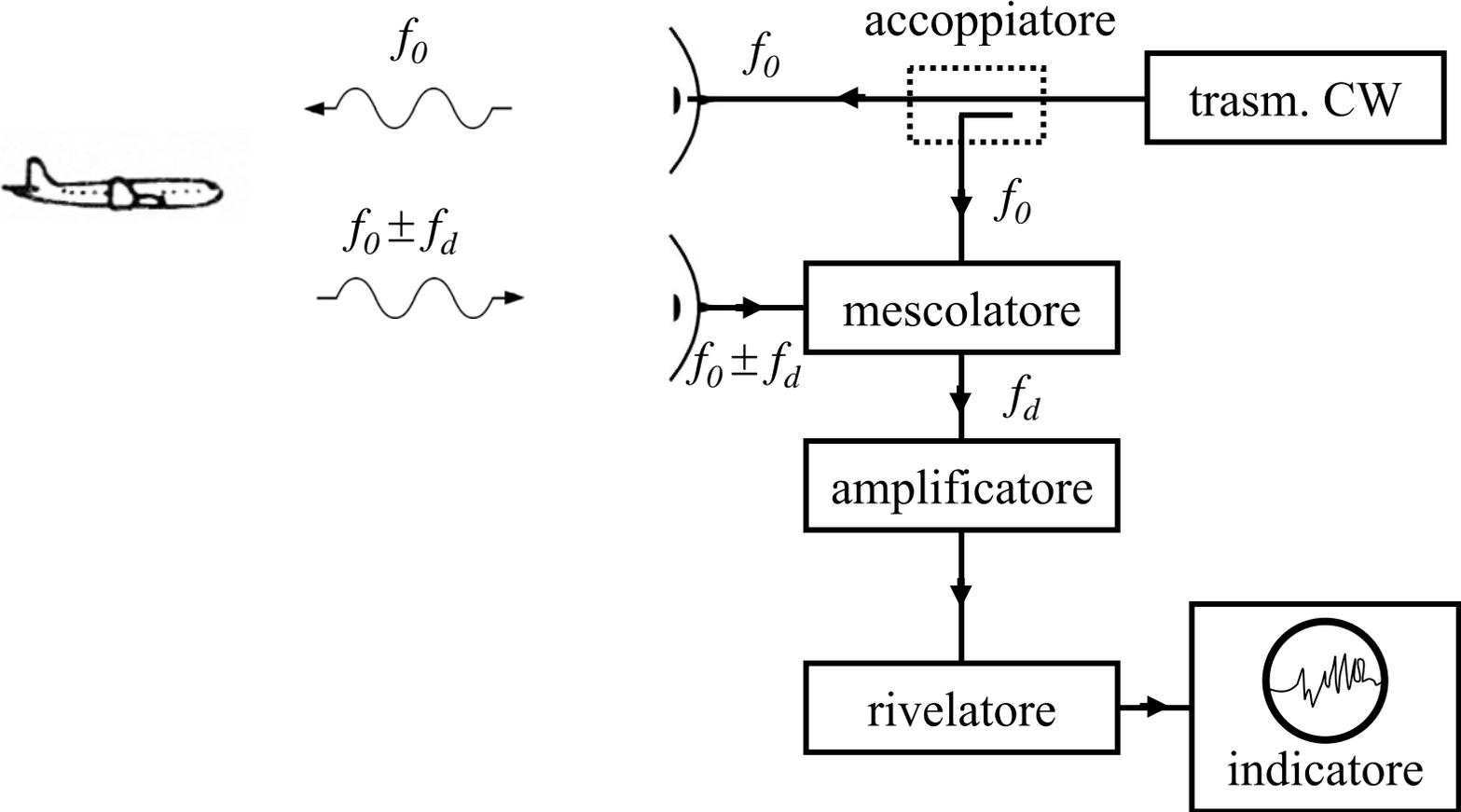
$$r_M = \sqrt{(ct)^2 - h^2}$$

$$t > h/c$$

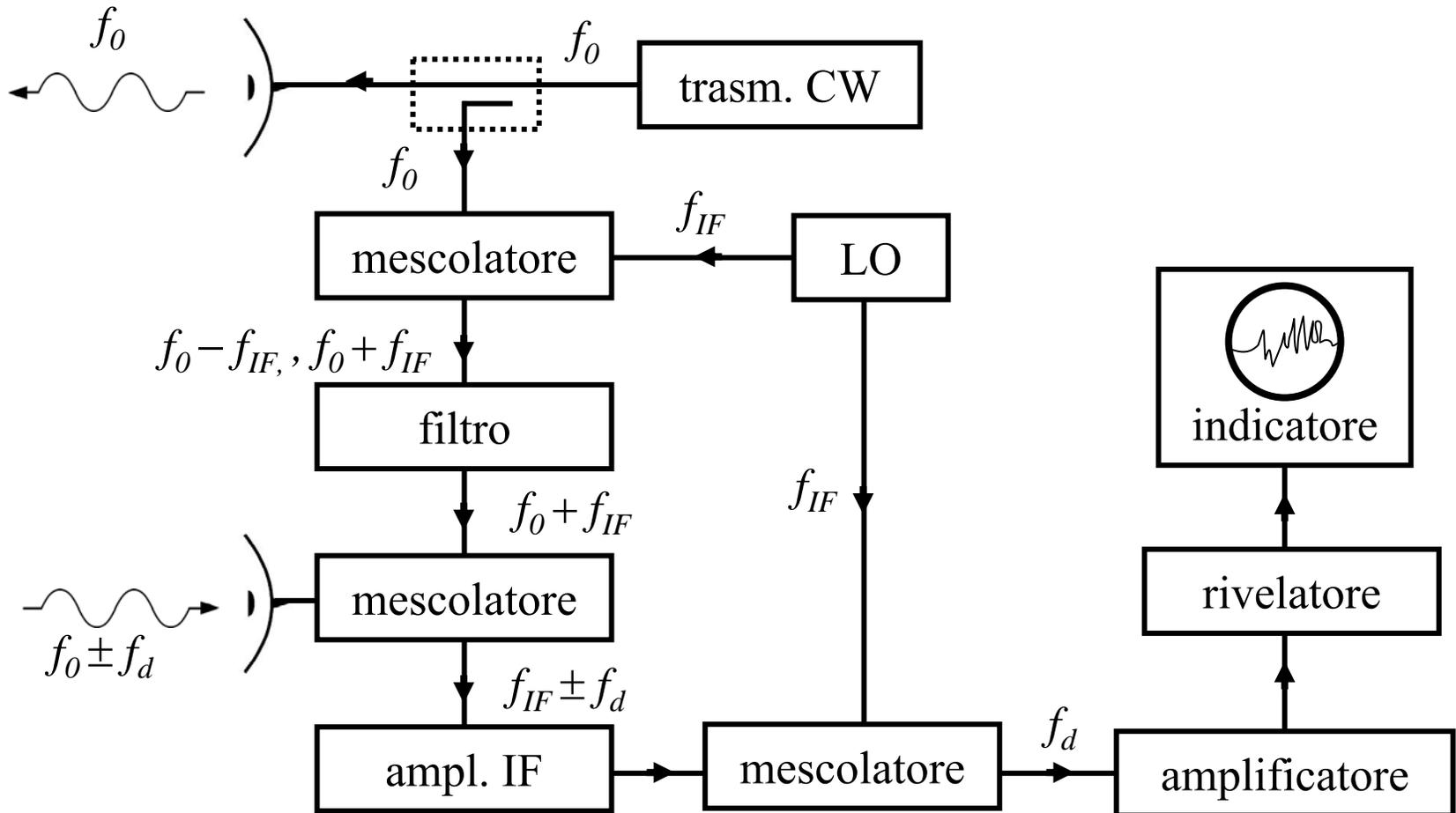
$$r_m = \sqrt{c^2(t - \tau)^2 - h^2}$$

$$t > h/c + \tau$$

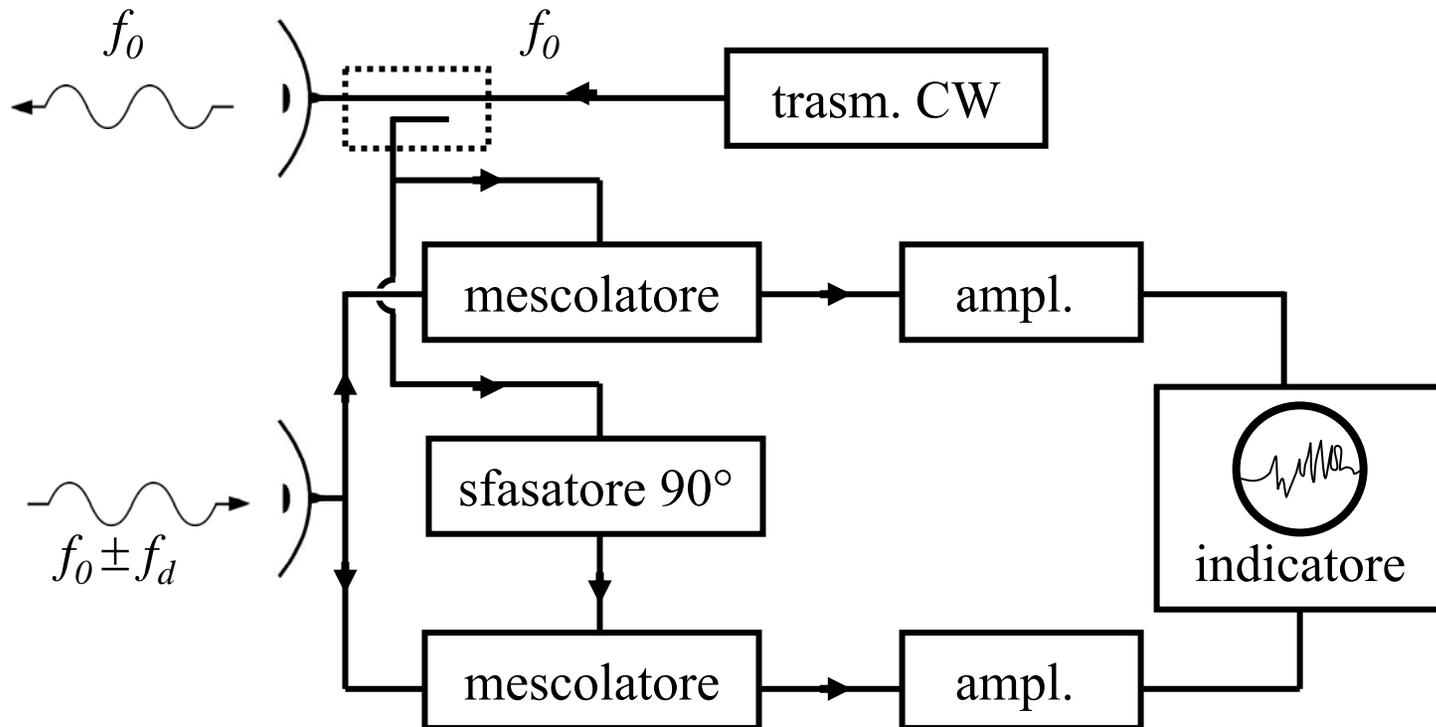
# schema a blocchi di un semplice radar ad onda continua



# schema a blocchi di un radar ad onda continua con ricevitore IF



# schema a blocchi di un radar ad onda continua con recupero del segno della frequenza doppler



## radar ad onda continua

$$v_{Tx} \propto \cos \omega t \quad \text{segnale trasmesso}$$

$$v_{Rx} \propto \cos \omega(t - 2R/c) \quad \text{segnale ricevuto}$$

se il bersaglio ha una velocità radiale non nulla:  $R = R_0 + v_r t$

$$v_{Rx} \propto \cos [(\omega \mp \omega_d)t - \psi]$$

$$\omega_d = \frac{2\omega |v|}{c} \quad f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} \quad \text{frequenza Doppler}$$

$$\psi = 2\omega R_0/c$$

distanza all'istante  $t = 0$

### demodulazione

$$\begin{aligned} v_{Tx} v_{Rx} &\propto \cos \omega t \cos [(\omega \mp \omega_d)t - \psi] \\ &= \frac{1}{2} \cos [(2\omega \mp \omega_d)t - \psi] + \frac{1}{2} \underbrace{\cos(\omega_d t \pm \psi)}_{\text{componente a bassa frequenza}} \end{aligned}$$

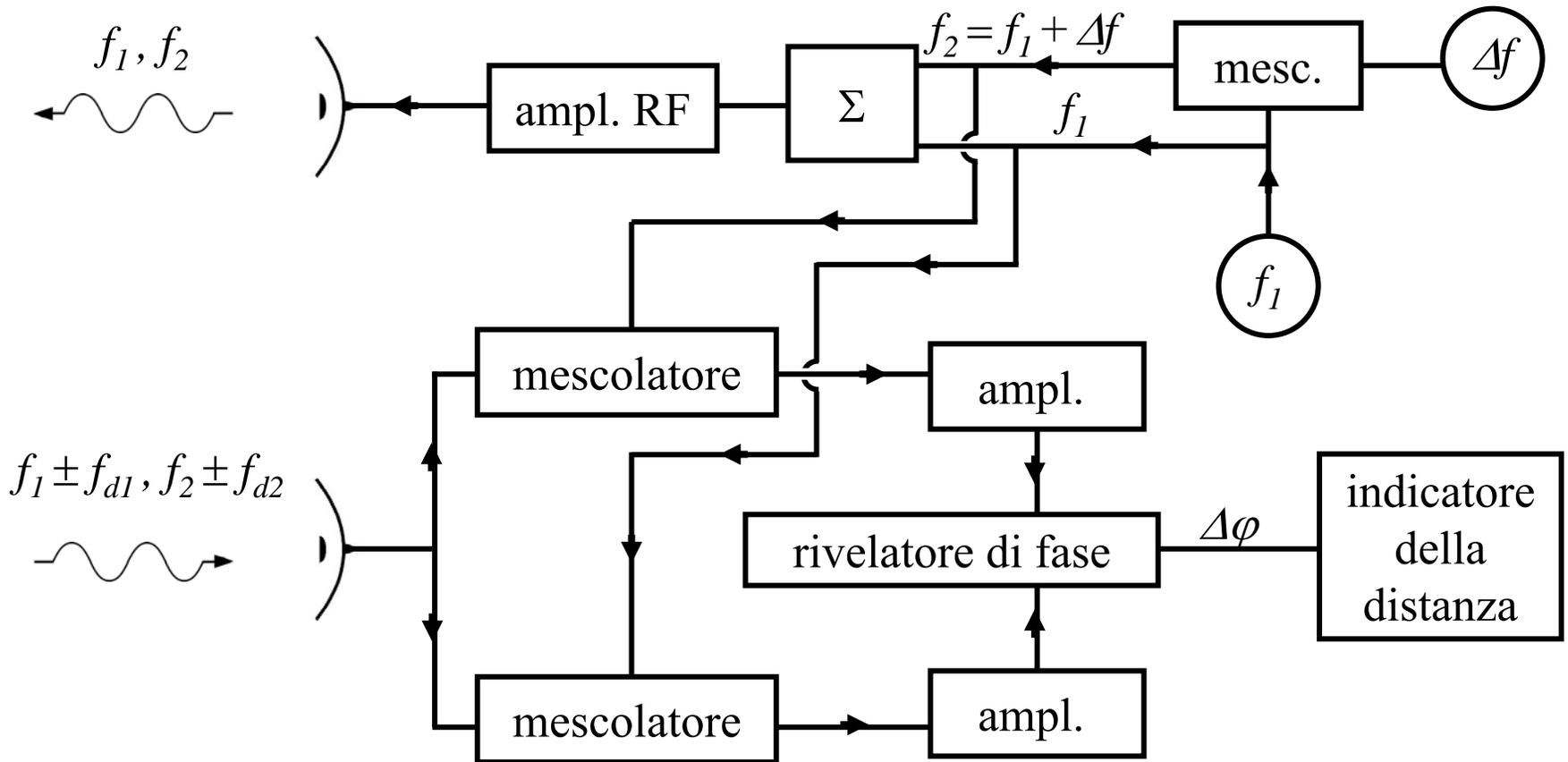
demodulazione sincrona per il recupero  
del segno della velocità radiale

$$\begin{aligned} v'_{Tx} &\propto \cos(\omega t - \pi/4) \quad \text{riferimento in ritardo di 1/4 di periodo} \\ v'_{Tx} v_{Rx} &\propto \cos(\omega t - \pi/4) \cos [(\omega \mp \omega_d)t - \psi] \\ &= \frac{1}{2} \cos [(2\omega \mp \omega_d)t - \psi - \pi/4] + \frac{1}{2} \underbrace{\cos [\omega_d t \pm \psi \mp \pi/4]}_{\text{componente a bassa frequenza}} \end{aligned}$$

ritardo  $v_r > 0$

anticipo  $v_r < 0$

# schema a blocchi di un radar CW a due frequenze



## radar CW a due frequenze

$$v_{Tx} \propto \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (\omega_1 > \omega_2) \quad \text{segnale trasmesso}$$

$$v_{Rx} \propto \cos[(\omega_1 \mp \omega_{d1})t + \varphi_1 - \psi_1] + \cos[(\omega_2 \mp \omega_{d2})t + \varphi_2 - \psi_2] \quad \text{segnale ricevuto}$$

$$f_{d1} = \frac{\omega_1 v}{\pi c} \quad f_{d2} = \frac{\omega_2 v}{\pi c} \quad \text{frequenze Doppler}$$

$$\psi_1 = 2\omega_1 R_0/c \quad \psi_2 = 2\omega_2 R_0/c$$

$$v_{Tx_1} v_{Rx} \propto \frac{1}{2} \cos[(2\omega_1 \mp \omega_{d1})t + 2\varphi_1 - \psi_1] + \frac{1}{2} \cos[\omega_{d1}t \pm \psi_1]$$

$$+ \frac{1}{2} \cos[(\omega_1 + \omega_2 \mp \omega_{d1})t + \varphi_1 + \varphi_2 - \psi_1] + \frac{1}{2} \cos[(\omega_1 - \omega_2 \mp \omega_{d1})t + \varphi_1 - \varphi_2 - \psi_1]$$

$$v_{Tx_2} v_{Rx} \propto \frac{1}{2} \cos[(\omega_1 + \omega_2 \mp \omega_{d2})t + \varphi_1 + \varphi_2 - \psi_2] + \frac{1}{2} \cos[(\omega_1 - \omega_2 \pm \omega_{d2})t + \varphi_1 - \varphi_2 + \psi_2]$$

$$+ \frac{1}{2} \cos[(2\omega_2 \mp \omega_{d2})t + 2\varphi_2 - \psi_2] + \frac{1}{2} \cos[\omega_{d2}t \pm \psi_2]$$

componenti a bassa  
frequenza

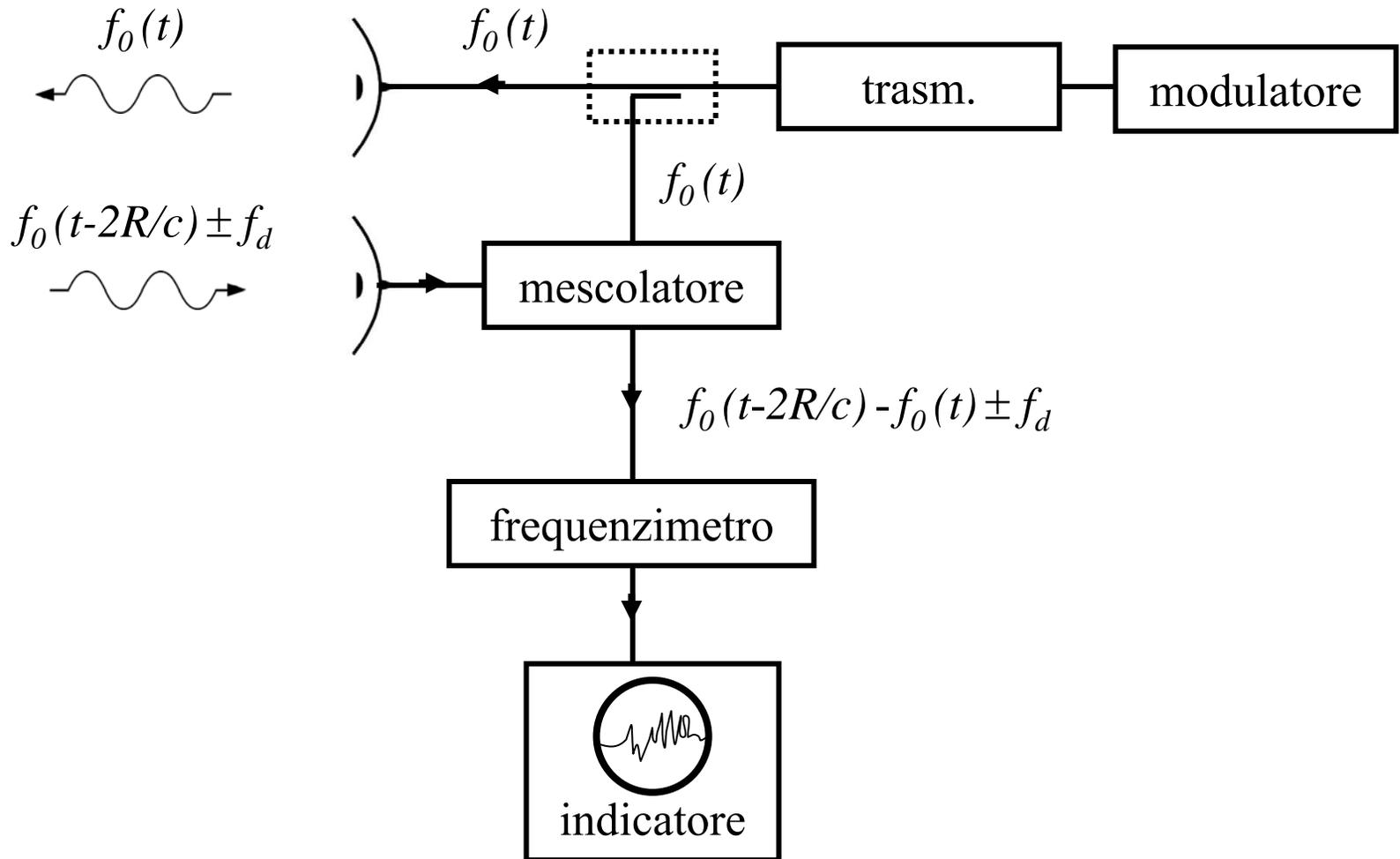
la differenza di fase delle componenti a bassa frequenza per  $t \approx 0$  è

$$|\Delta\phi|_{t \approx 0} \approx (\psi_1 - \psi_2) = \frac{2(\omega_1 - \omega_2) R_0}{c} \quad \text{non ambigua se inferiore a } 2\pi$$

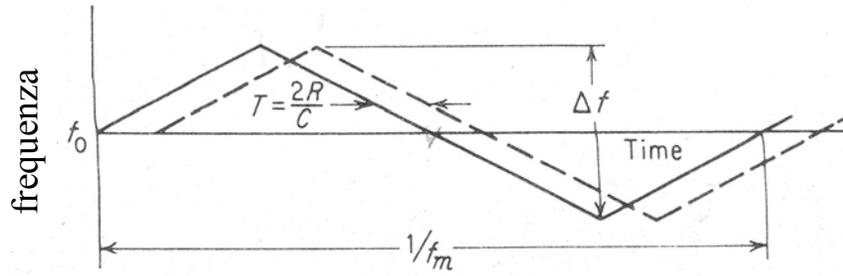
ponendo  $\omega_1 = \omega_2 + 2\pi\Delta f$

$$\frac{2(\omega_1 - \omega_2) R_0}{c} < 2\pi \quad \Rightarrow \quad R_0 < \frac{\lambda_\Delta}{2} \quad \lambda_\Delta = \frac{c}{\Delta f}$$

# schema a blocchi di un radar CW modulato in frequenza

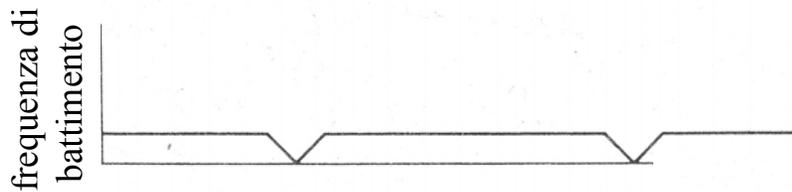


# radar CW modulato in frequenza



bersaglio fisso

$$\langle f_b \rangle = \frac{2R}{c} 2 f_m \Delta f$$

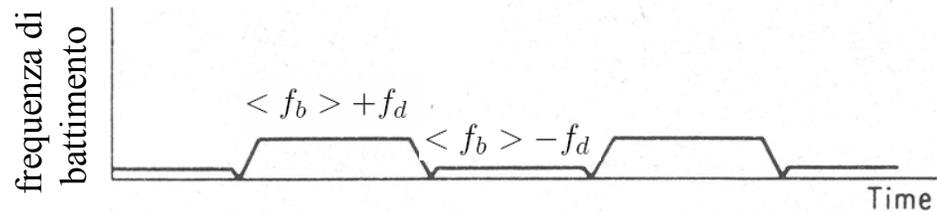
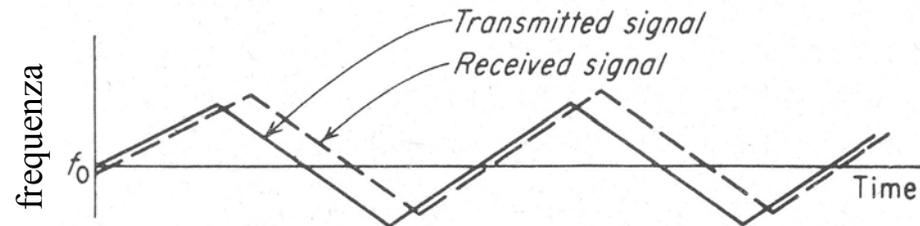


bersaglio in movimento

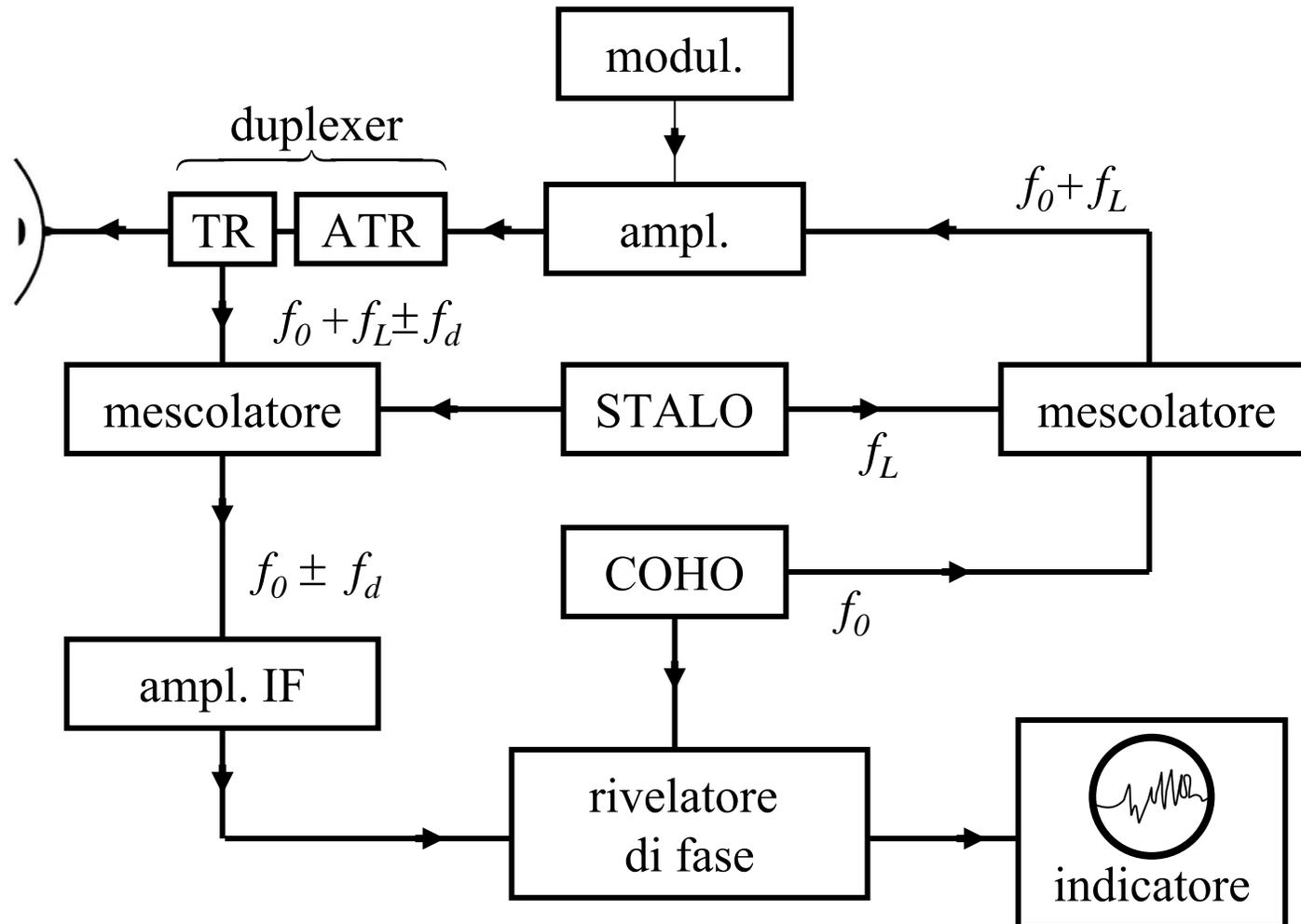
$f_d$  = frequenza Doppler

$$\max(f_b) = \langle f_b \rangle + f_d$$

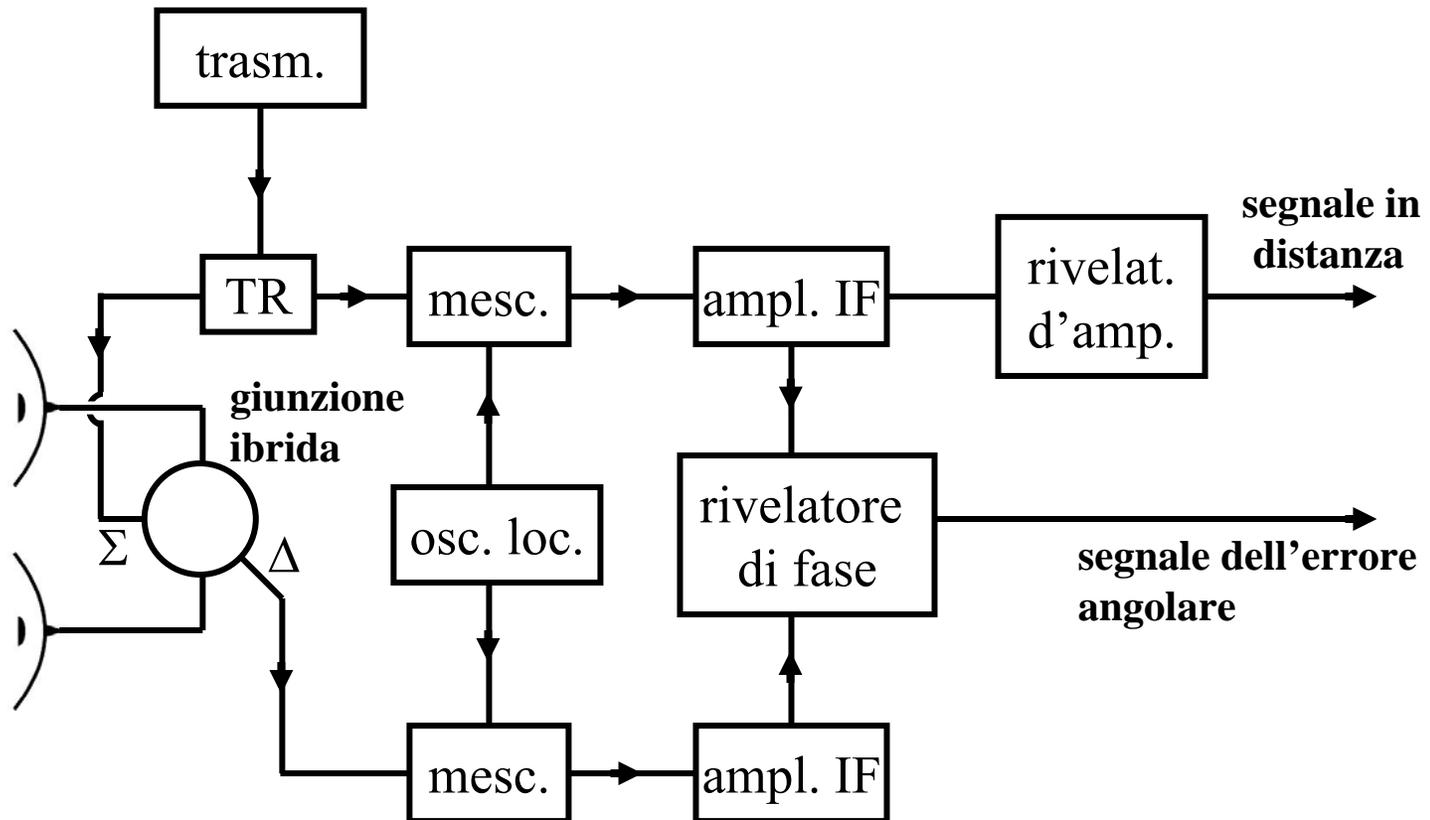
$$\min(f_b) = \langle f_b \rangle - f_d$$

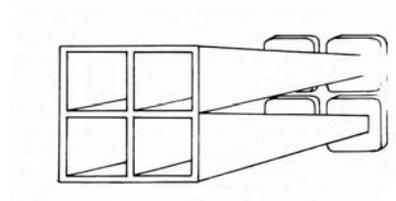
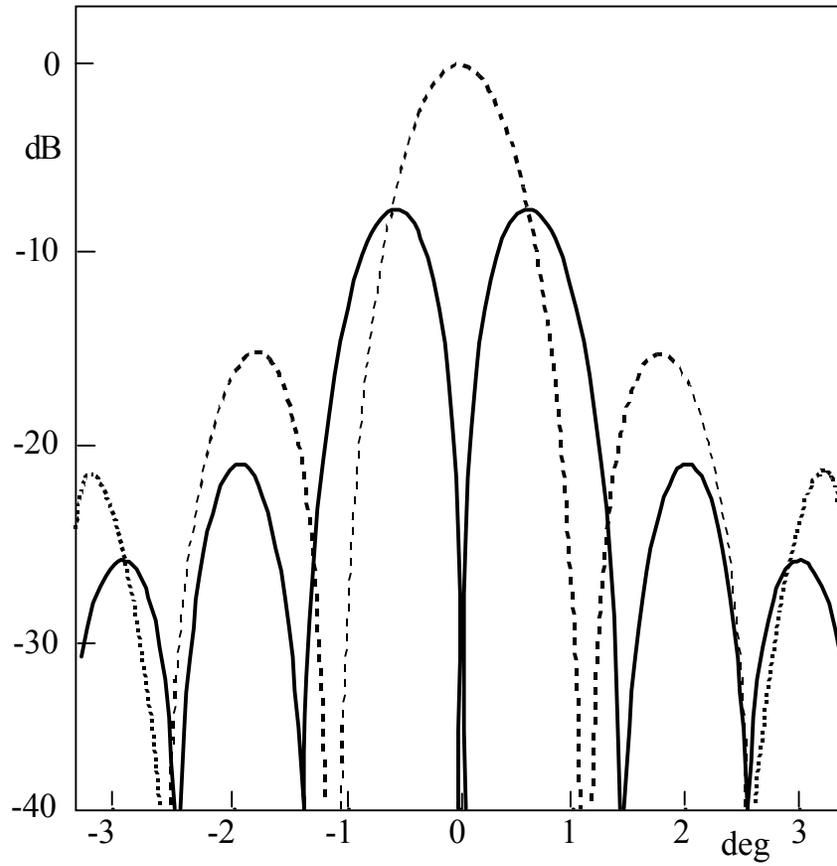


# schema a blocchi di radar MTI



## schema a blocchi di radar monopulse (una dimensione)





# schema a blocchi di radar monopulse (elevazione - azimuth)

