



Radar

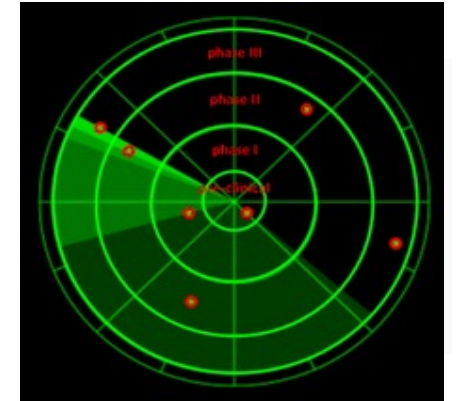
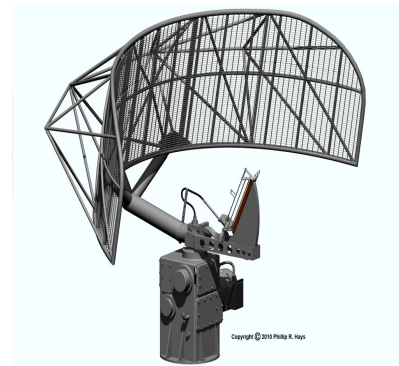
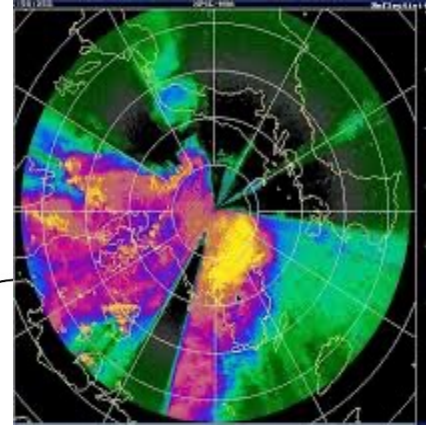
Corso di Laurea Magistrale:
Scienze e Tecnologie della Navigazione

Anno Accademico: 2022/2023

Crediti: 6 CFU

Docente: Giampaolo Ferraioli

Materiale Didattico Online – DM 752-2021

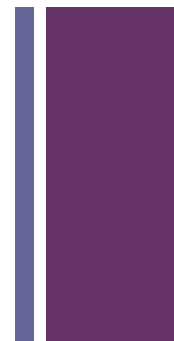


UNIVERSITÀ
PARTHENOPE

DiST

DIPARTIMENTO DI SCIENZE
E TECNOLOGIE





Sistemi Radar



+ Sommario

- Effetto Doppler
- Radar CW
- Radar FM-CW
- MTI
- Radar Secondario
- Radar Meteo
- Radar d'Immagine

+ Effetto Doppler

La variazione di frequenza tra il segnale trasmesso e il segnale ricevuto quando tx e rx sono in moto tra loro, prende il nome di **effetto Doppler**.

Nel caso di moto in avvicinamento, l'rx riceve un numero maggior di lunghezze d'onda per unità di tempo, percepito come un segnale a **frequenza maggiore**.

Nel caso di moto in allontanamento, l'rx riceve un numero minore di lunghezze d'onda per unità di tempo, percepito come un segnale a **frequenza minore**.



© 2009 Christian Wolff

+ Effetto Doppler

Tale effetto si ha anche nei sistemi radar.

Si trasmette un segnale con una frequenza f_0 . Il segnale retrodiffuso dal target, in movimento, presenta una variazione della frequenza rispetto alla frequenza di trasmissione. Tale frequenza prende il nome di **frequenza doppler** f_d .

Il numero di lunghezze d'onda contenuto nel percorso radar-target-radar è:

$$\frac{2R}{\lambda}$$

La lunghezza d'onda corrisponde ad un'escursione di 2π rad.

L'escursione di fase totale nel percorso radar-target-radar è:

$$\phi = \frac{4\pi R}{\lambda}$$

+ Effetto Doppler

Se il target è in moto rispetto al radar, la distanza R (e quindi ϕ) varia continuamente. La variazione della fase f rispetto al tempo è una frequenza angolare (pulsazione):

$$\omega_d = 2\pi f_d = \frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} v_r$$

La frequenza Doppler f_d è legata alla velocità radiale del target

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v \cos(\theta)}{\lambda}$$

v è la velocità dell'oggetto, θ è l'angolo tra la traiettoria del target e la linea radar-target.

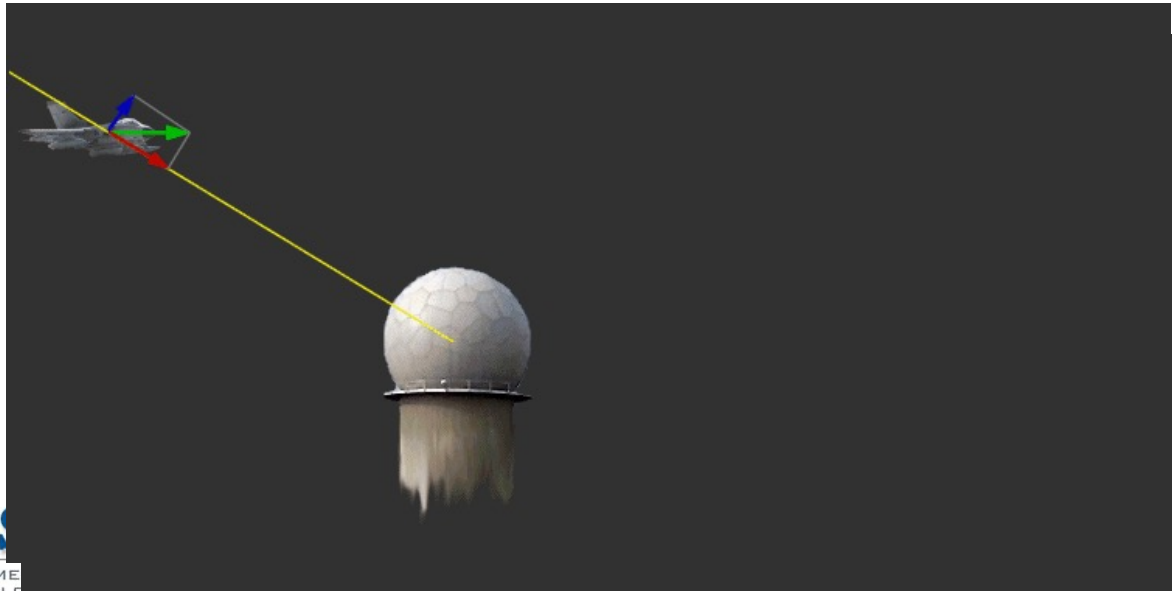
+ Effetto Doppler

La frequenza Doppler f_d

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v \cos(\theta)}{\lambda}$$

è 0 quando il target si muove lungo una traiettoria perpendicolare alla linea radar target ($\theta=90^\circ$)

è massima quando il target si muove lungo la linea radar target ($\theta=0^\circ$)



+ Radar CW

Un radar può operare trasmettendo **segnali continui** al posto di segnali impulsati.

Tali sistemi radar prendono il nome di radar ad **onda continua (Radar CW)**.

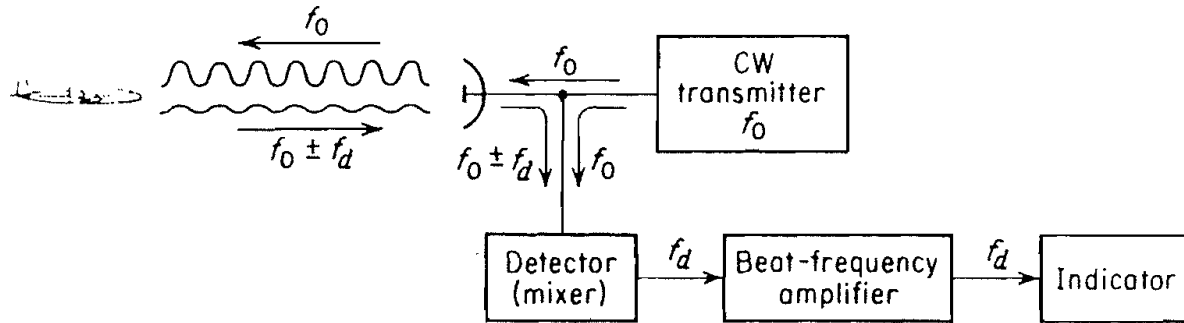
Il sistema trasmette con continuità un segnale e riceve con continuità il segnale di eco.

Nascono problemi di separazione tra il segnale Tx e il segnale RX.

Le applicazioni principali dei radar ad onda continua: stima della velocità del target (radar CW), stima della posizione (radar CW-FM)

+ Radar CW

I Radar CW sono utilizzati per la stima della **velocità dei target**.



Si confronta la frequenza del segnale tx con quello del segnale ricevuto e si determina f_d (e la velocità del target). Segno positivo bersaglio in avvicinamento. Segno negativo, bersaglio in allontanamento.

Problemi di accoppiamento tra tx e rx (parzialmente voluto)

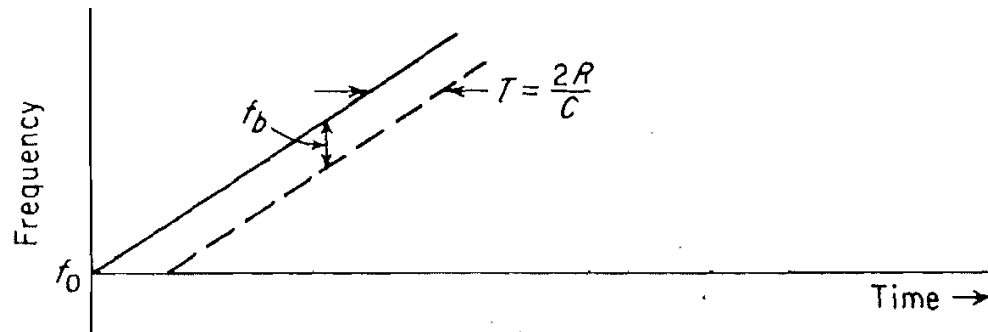
Apparato più semplice rispetto a radar impulsato.

Utilizzi: autovelox

+ Radar CW-FM

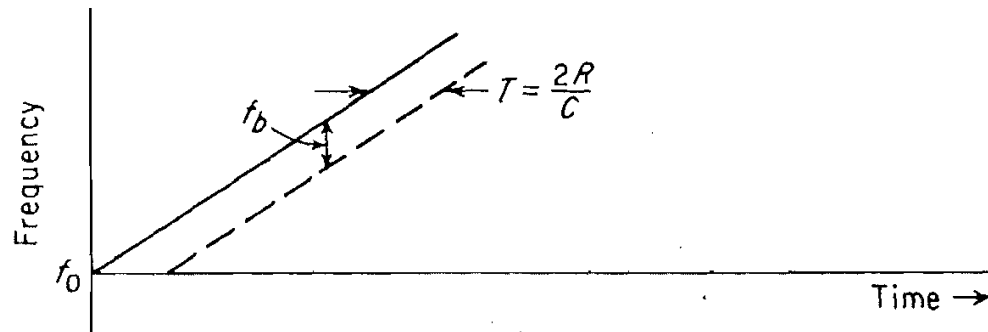
I Radar CW non sono in grado di calcolare la distanza tra il radar e il target. Manca un mark temporale per la determinazione del range.

Per risolvere il problema, viene utilizzata una modulazione in frequenza (FM). La frequenza del segnale trasmesso è cambiata linearmente con il tempo (**Radar CW-FM**).



Un **target stazionario** a distanza R , genera un'eco dopo un tempo T .

+ Radar CW-FM



Fissato un istante di tempo si calcola la frequenza di battimento f_b (differenza di frequenza tx e rx). Coincide con la frequenza f_r dovuta alla distanza.

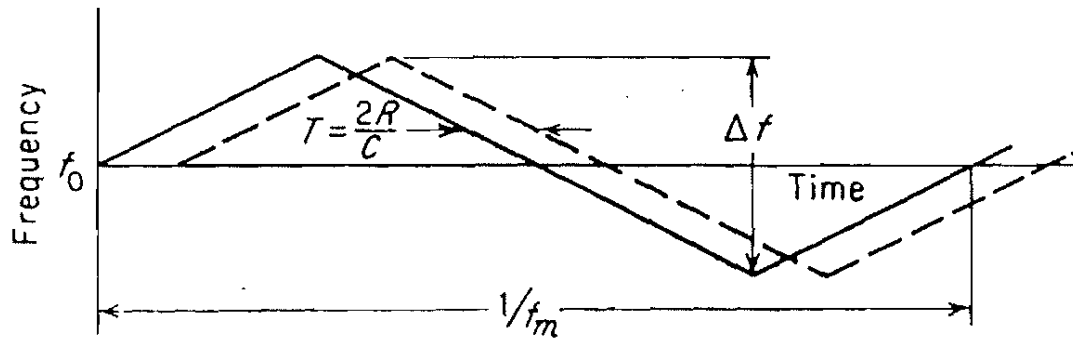
È possibile calcolare il tempo T e il range R a partire da f_b

$$f_b = T \frac{df_0}{dt} = \frac{2R}{c} \frac{df_0}{dt} \qquad R = \frac{cf_b}{2 \frac{df_0}{dt}}$$

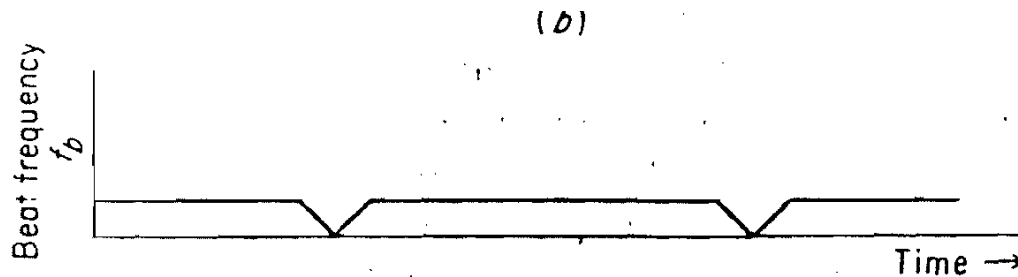
dove df_0/dt è la pendenza retta

+ Radar CW-FM

Nella pratica la frequenza del segnale non può essere aumentata con continuità in una sola direzione. Viene utilizzata una modulazione periodica



La frequenza di battimento misurata è:

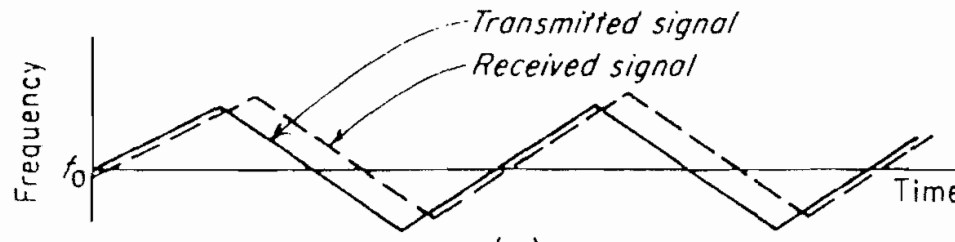


La frequenza di battimento è costante.

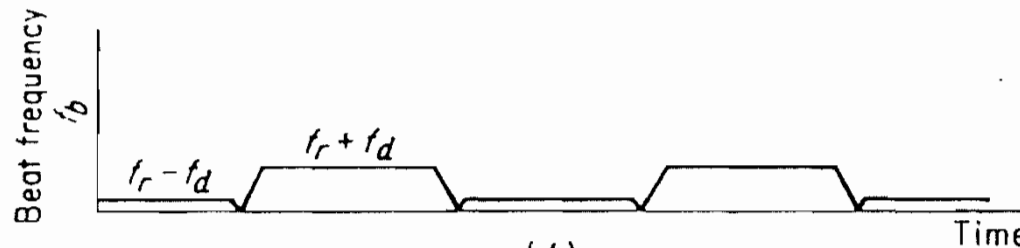
+ Radar CW-FM

Nel caso in cui il target è in **moto** rispetto al radar, una frequenza Doppler si sovrappone alla frequenza del segnale rx.

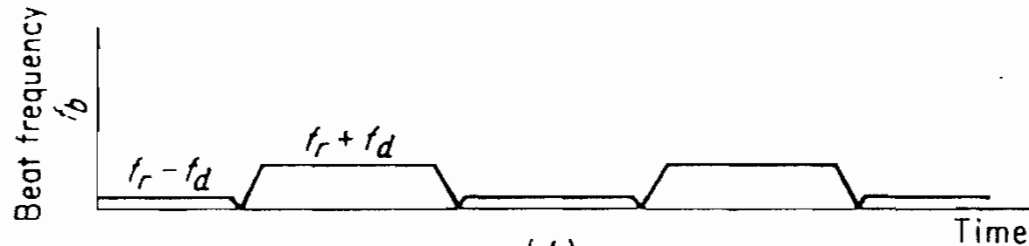
La frequenza Doppler causa uno shift verso l'alto o verso il basso della frequenza del segnale rx.



La frequenza di battimento diminuisce in un intervallo e aumenta in un altro.



+ Radar CW-FM



E' possibile calcolare sia la posizione del target (frequenza f_r) sia la velocità del target (frequenza f_d).

$$f_b(\text{up}) = f_r - f_d$$

$$f_b(\text{down}) = f_r + f_d$$

$$f_r = \frac{f_b(\text{up}) + f_b(\text{down})}{2}$$

$$f_d = \frac{f_b(\text{up}) - f_b(\text{down})}{2}$$

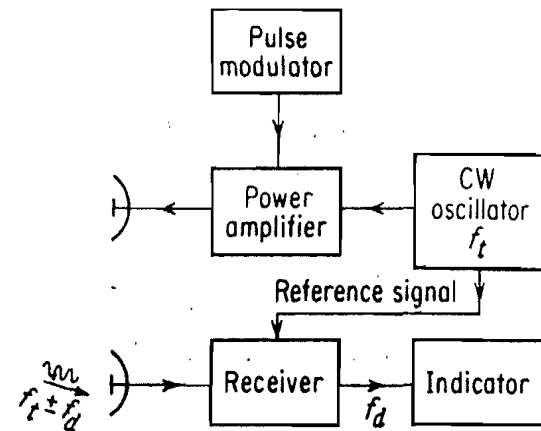
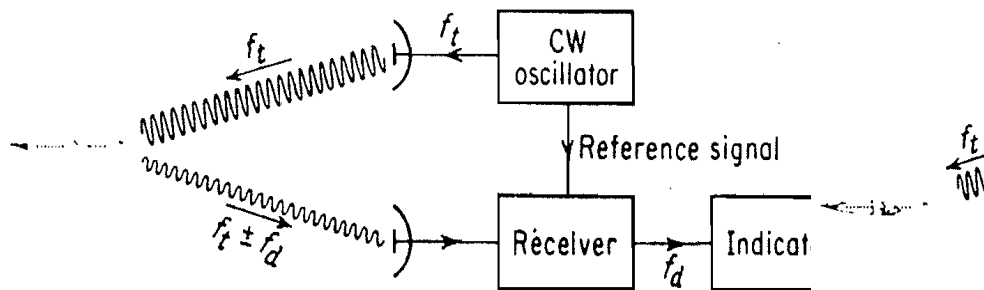
Nel caso di più target a diversa distanza, occorre calcolare le singole frequenze di battimento.

+ MTI

I sistemi **Moving Target Indicator (MTI)** sono utilizzati per discriminare i target in movimento rispetto ai target stazionari.

Gli MTI si basano sulla trasmissione di un segnale ad onda continua (CW) convertito in un segnale impulsato.

Parte del segnale CW utilizzato in trasmissione viene fornito al ricevitore.



+ MTI

Il segnale CW generato all'interno del trasmettitore e fornito come segnale di riferimento al ricevitore è:

$$V_{rif} = A \sin(2\pi f_t t)$$

dove f_t è la frequenza di trasmissione e A l'ampiezza. Il segnale ricevuto da un target a distanza R_0 è:

$$V_{eco} = A \sin\left(2\pi(f_t \pm f_d)t - \frac{4\pi f_t R_0}{c}\right)$$

Il segnale ricevuto e il segnale di riferimento sono "battuti". Il battimento consiste nel moltiplicare i due segnali (uno dei due sfasato di 90 gradi)

$$V_{diff} = A \sin\left(2\pi(f_t \pm f_d)t - \frac{4\pi f_t R_0}{c}\right) A \cos(2\pi f_t t)$$

$$\sin(\alpha)\cos(\beta) = \frac{1}{2}[\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)]$$

+ MTI

A valle del filtraggio passa-basso (mixer) il segnale di uscita è dato da (solo segnale differenza):

$$V_{diff} = \frac{A}{2} \sin \left(2\pi f_d t - \frac{4\pi f_t R_0}{c} \right)$$

Se il target è stazionario ($f_d = 0$), il segnale in ogni impulso assumerà un valore costante. Se il target è in movimento, il segnale in ogni impulso sarà una funzione del tempo.

$$V_{diff} = \frac{A}{2} \sin \left(-\frac{4\pi f_t R_0}{c} \right)$$

Costante

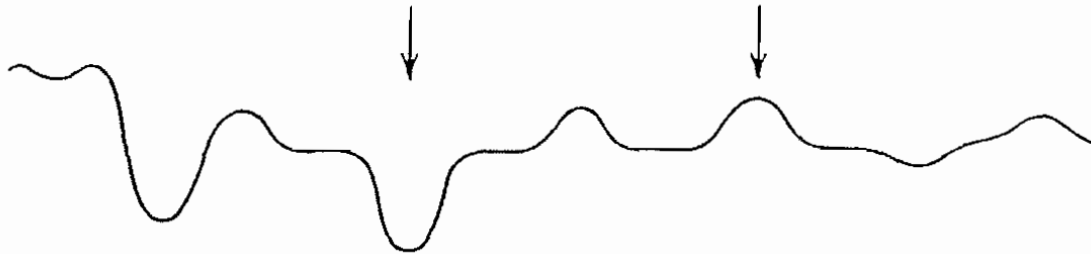
$$V_{diff} = \frac{A}{2} \sin \left(2\pi f_d t - \frac{4\pi f_t R_0}{c} \right)$$

NON Costante

+ MTI

I target in movimento possono essere distinti da quelli stazionari guardando un display A-Scope. Consideriamo il caso di 2 target in movimento.

L'uscita dell'A-scope nel caso di singolo sweep (un solo impulso trasmesso) è il seguente:



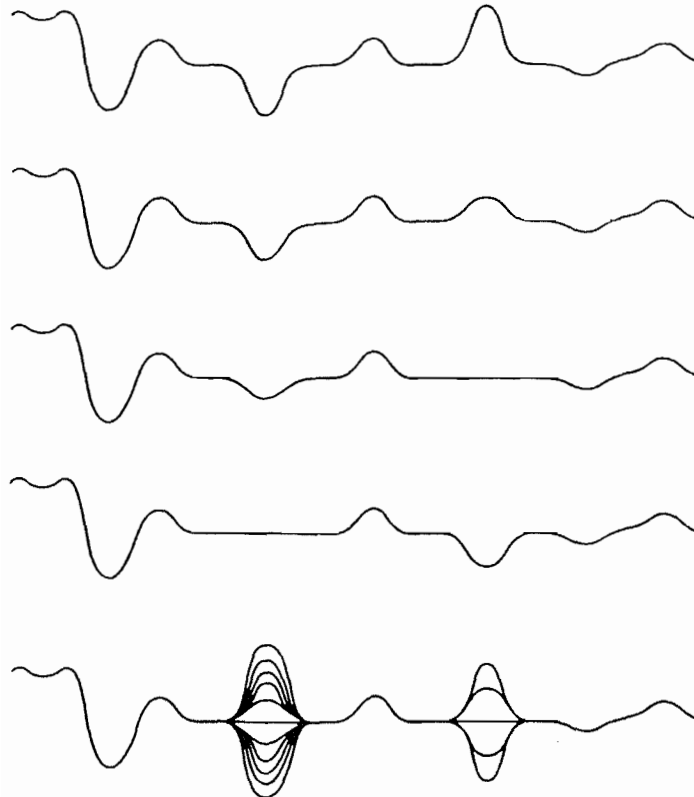
Non è possibile riconoscere target in movimento.

Utilizzando più impulsi, i target stazionari saranno rappresentati allo stesso modo. I target in movimento varieranno in ogni sweep.

+ MTI

Al variare dell'impulso trasmesso, i segnali in movimento varieranno la loro ampiezza (varia l'argomento del seno).

Si ha un **effetto butterfly** sull'A-scope. Maggiore è l'oscillazione, maggiore è la frequenza Doppler.

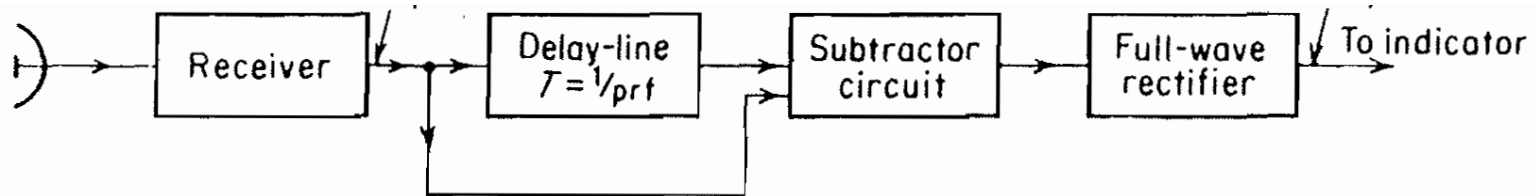


+ MTI

L'effetto farfalla permette di individuare i target in movimento nel caso di utilizzo dell'A-scope, ma non nel caso di un PPI.

Nel caso di PPI, si utilizza un **cancellatore a linea di ritardo**. Elimina i target stazionari e mostra solo i target in movimento.

Il segnale ricevuto viene inviato su due canali, uno dei quali è una linea di ritardo (ritardo pari al tempo di ripetizione dell'impulso T_p).



Segnali stazionari cancellati (ampiezze costanti al variare di t).
Segnali in movimento conservati (ampiezze variano con t)

+ MTI

Il segnale, ricevuto da un target a distanza R_0 , in uscita dal mixer è:

$$V_1 = k \sin(2\pi f_d t - \phi_0)$$

Dove il termine f_0 tiene conto della distanza R_0 .

Il segnale in uscita dalla linea di ritardo è dato da:

$$V_2 = k \sin(2\pi f_d (t - T_p) - \phi_0)$$

La differenza tra i due segnali è:

$$\sin(\alpha) - \sin(\beta) = 2\sin\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)\cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)$$

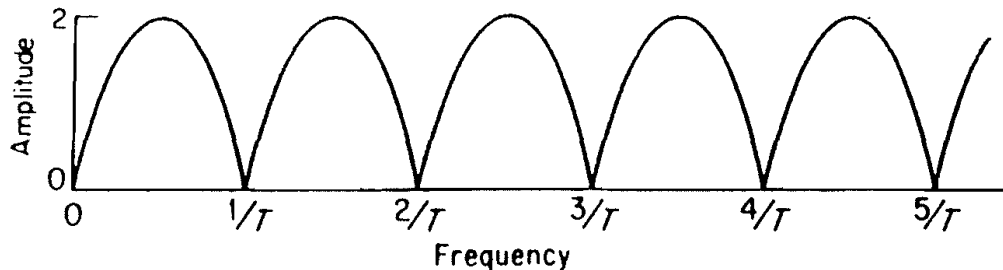
$$V = V_1 - V_2 = 2k \sin \pi f_d T_p \cos\left(2\pi f_d \left(t - \frac{T_p}{2}\right) - \phi_0\right)$$

Consiste in un segnale cosinusoidale a frequenza f_d e fase f_0 .

L'ampiezza del segnale differenza è:

$$V = V_1 - V_2 = 2k \sin \pi f_d T_p \cos \left(2\pi f_d \left(t - \frac{T_p}{2} \right) - \phi_0 \right)$$

Ciò determina che per alcune frequenze Doppler particolari, l'ampiezza del segnale differenza è nulla.



L'ampiezza del segnale differenza è nulla per le frequenze l'argomento del seno è nullo ($n=0,1,2,\dots$):

$$f_d = \frac{n}{T_p} = n f_p$$

+ MTI

L'ampiezza del segnale differenza è nulla non solo per i target stazionari ($n=0$), ma anche per i target la cui frequenza f_d è multipla della frequenza di ripetizione degli impulsi f_p

Le velocità di tali target prendono il nome di **velocità cieche**:

$$v_n = \frac{n\lambda}{2T_p} = \frac{n\lambda}{2} f_p$$

Le velocità cieche sono un limite dei radar MTI (a differenza dei radar CW).

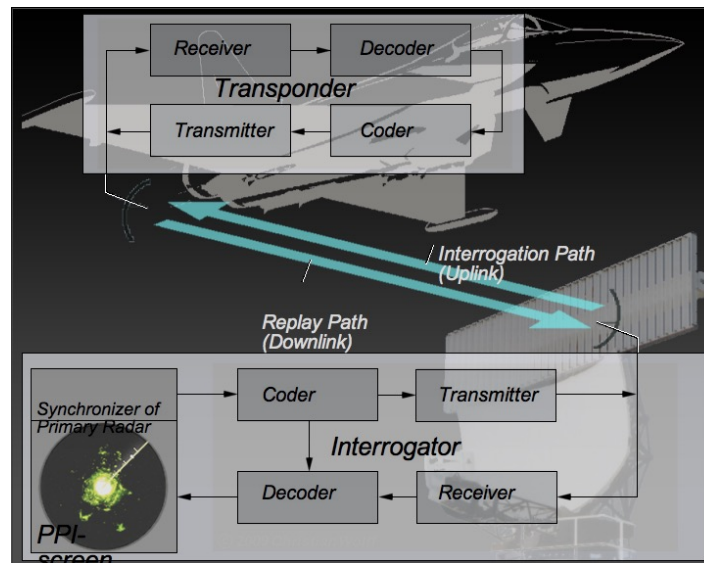
È possibile progettare il sistema in maniera da avere la prima velocità cieca più grande della massima velocità radiale attesa. In tal caso occorre λf_p grande.

λ è legato all'antenna e/o all'applicazione. Aumentare f_p , riduce la massima distanza non ambigua. **Trade-off** tra **velocità cieche** e **range non ambiguo**.

+ Radar Secondario

Radar Secondario è un sistema utilizzato per il controllo del traffico aereo. È un sistema basato sulla cooperazione del target. Non si basa sulla riflessione del target ma sulla risposta del target. Ha due segmenti: terra e bordo

Segmento a bordo



(Trasponder)

Segmento a terra

(Interrogator)

+ Radar Secondario

Differenze con Radar Primario

Principio di funzionamento non basato sulla riflessione della Potenza trasmessa ma sulla risposta del trasponder

Portata maggiore con minore potenza: necessario solo un percorso di andata del segnale

Eliminazione del clutter dovuto a bersagli fissi: diversa frequenza tra interrogator e trasponder (**1030MHz - Interrog.** e **1090 MHz - Risposta**)

Risposte non dipendono dalla **sezione radar** dell'oggetto

Determina la posizione dell'aereo in **azimuth**, in **range** e in **quota**

Non individua gli **aeromobili non dotati di trasponder**, e il **clutter meteo**

+ Radar Secondario

Interrogazione

Il radar secondario effettua due tipi di interrogazioni mediante l'utilizzo di codici: **Modo A** e **Modo C**

Modo A: richiede all'aeromobile il proprio identificativo. L'interrogator trasmette due impulsi P1 e P3 a distanza di 8 us

Modo C: richiede all'aeromobile informazioni relativi alla sua quota. L'interrogator trasmette due impulsi P1 e P3 a distanza di 21 us.



Le Interrogazioni di Modo A e C sono normalmente alternate con un determinato periodo di ripetizione.

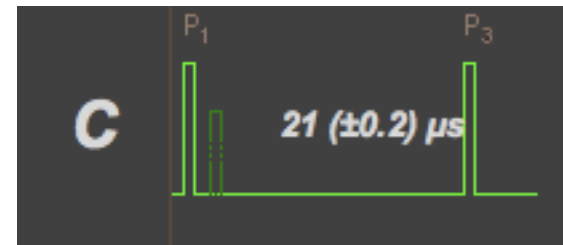
+ Radar Secondario

Interrogazione

Il radar secondario effettua due tipi di interrogazioni mediante l'utilizzo di codici: **Modo A** e **Modo C**

Modo A: richiede all'aeromobile il proprio identificativo. L'interrogator trasmette due impulsi P1 e P3 a distanza di 8 us

Modo C: richiede all'aeromobile informazioni relativi alla sua quota. L'interrogator trasmette due impulsi P1 e P3 a distanza di 21 us.



Le Interrogazioni di Modo A e C sono normalmente alternate con un determinato periodo di ripetizione.

+ Radar Secondario

Risposta

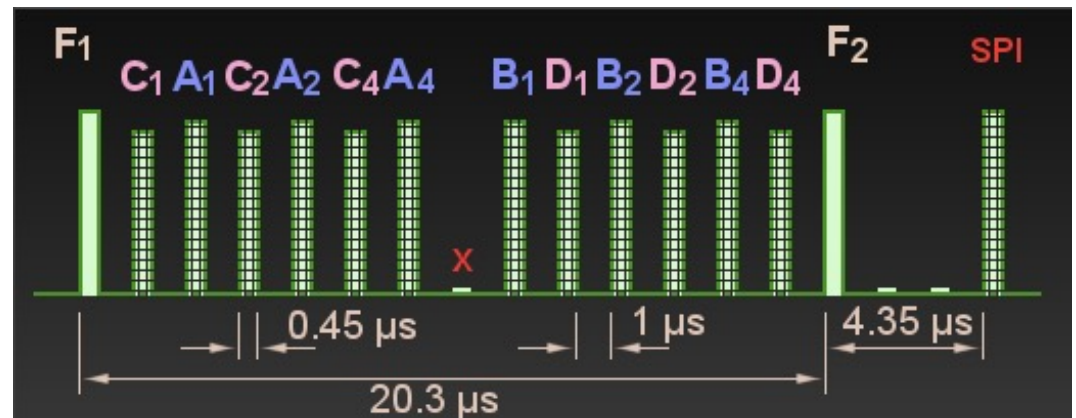
Il trasponder risponde trasmettendo un **treno di impulsi** compreso in un intervallo fisso di 20.3 us.

La sequenza di 12 impulsi binari è racchiusa da due impulsi F1 e F2. I 12 impulsi permettono $2^{12}=4096$ combinazioni.

Ad un'interrogazione di Modo A, il trasponder risponde fornendo il suo **identificativo**

Ad un'interrogazione di Modo C, il trasponder risponde fornendo la propria **quota di volo**.

Nella risposta il Trasponder non inserisce il Modo a cui sta rispondendo



+ Radar Secondario

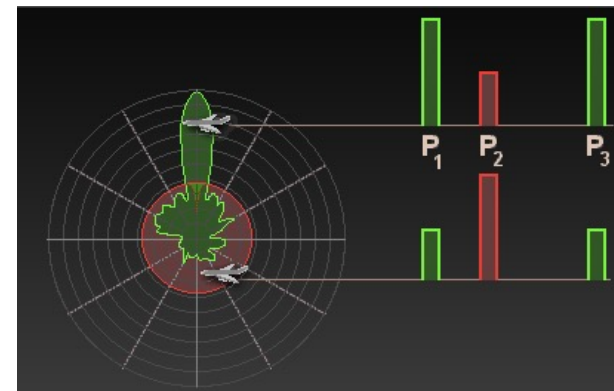
Problemi: Lobi Secondari

Nel radar secondario il transponder può essere attivato da interrogazioni provenienti dai **lobi secondari** producendo la rivelazione di aerei in posizioni errate.

La tecnica di **Soppressione dei Lobi Secondari (SLS)** consente al transponder di “riconoscere” se l’interrogazione proviene dal lobo principale (risponde) o dai lobi secondari (ignora).

Si trasmette oltre a P1 e P3, un altro impulso P2 (2 μ s dopo P1) mediante un’antenna quasi omnidirezionale. L’ampiezza di P2 è maggiore dei lobi secondari e minore almeno 9dB rispetto a P1.

Il transponder risponde ad un’interrogazione solo se P1 è maggiore di almeno 9dB rispetto a P2



+ Radar Secondario

Radar Secondario Modo S

E' in grado di **interrogare singolarmente** ogni aeromobile

Viene formato un **data link** tra interrogator e trasponder, che consente lo scambio continuo di informazioni.

Il Radar Secondario di Modo S è compatibile con il Radar Secondario classico. Prevede ulteriori impulsi oltre a P1, P2 e P3

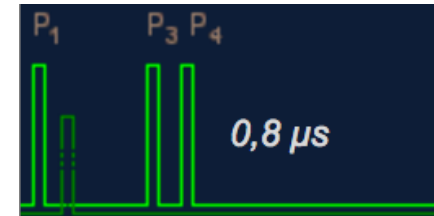
Ogni aeromobile ha un unico identificativo su 24 bit (più di 16 milioni). Appena ricevuta un'interrogazione cerca nel messaggio il proprio identificativo. Se lo riconosce risponde all'interrogazione.

Periodicamente gli interrogator effettuano una **chiamata generale** per aggiornare la lista degli aerei in vista. Il trasponder risponde comunicando il proprio indirizzo.

+ Radar Secondario

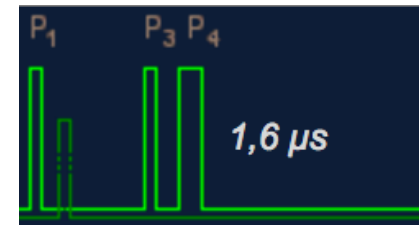
Interrogazione di Modo A /C/No Reply

La trasmissione di P4 breve inibisce il Modo S. Risposte di Modo A o Modo C.



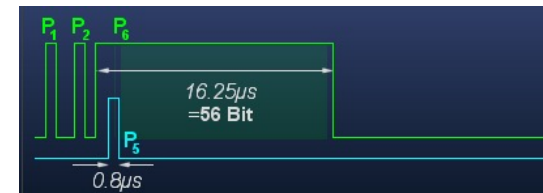
Interrogazione di Modo A /C/All Call

La trasmissione di P4 lungo indica al Modo S di trasmettere il proprio identificativo.



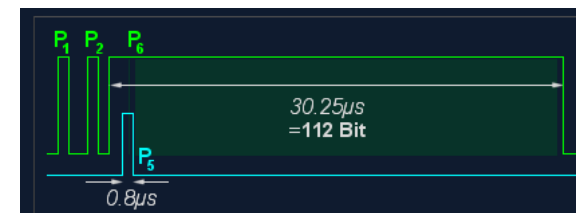
Interrogazione di Modo S - Short

La trasmissione di P2 inibisce il Modo A e Modo C. I Trasponder di Tipo S rispondono con uno Short



Interrogazione di Modo S - Long

La trasmissione di P2 inibisce il Modo A e Modo C. I Trasponder di Tipo S rispondono con un Long



+ Radar Secondario

Quattro impulsi iniziali, seguiti da Risposta Short [56bit (5+27+24)] o Risposta Long [122bit (5+27+56+24)]

Risposta Short



Risposta Long

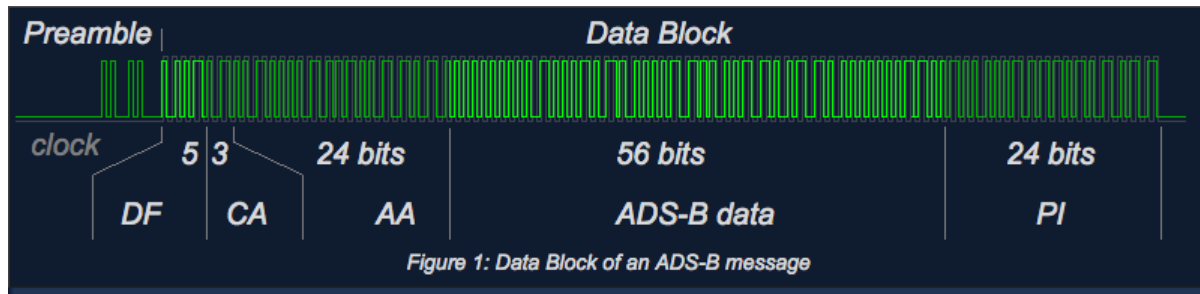


- **Format Number (5 bit):** tipo di interrogazione (UF) e tipo di Risposta (DF). Ogni DF è una risposta ad uno specifico UF. ES: UF4 richiede l'altezza ad uno specifico Aereo, che risponde con DF4
- **Surv. & Commun. Control (27 bit):** bit per la risposta
- **Address (24 bit):** indirizzo univoco dell'Aereo
- **Message (56 bit):** messaggi aggiuntivi (solo nelle risposte Long)

+ Radar Secondario

DF17

Il Data Format 17 (Risposta Long 112bit) è detto “1090 Extended Squitter”. Lo Squitter è la generazione di una risposta broadcast senza una specifica interrogazione.



- Capability (CA): riporta se l'aereo è airborne o su ground.
- Aircraft Address: identificativo dell'Aereo
- ADS-B Data: può includere
 - aircraft type
 - altitude,
 - latitude,
 - longitude
 - airborne velocity.
- Parity Information: controllo errore

+ Radar Secondario

Il DF17 è la parte fondamentale di un sistema Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B)

Automatic: non occorre alcuna interrogazione (DF17)

Dependent: si basa sui dati di navigazione “onboard”

Surveillance: fornisce informazioni di sorveglianza e coordinamento del traffico

Broadcast: trasmissione dei dati in Broadcast

- Aereo determina la propria posizione tramite GPS
- Trasmette le proprie informazioni tramite DF17 in broadcast
- Le informazioni ricevute vengono trasmesse alle Torri di controllo
- <https://www.flightradar24.com/>
- <https://it.flightaware.com>



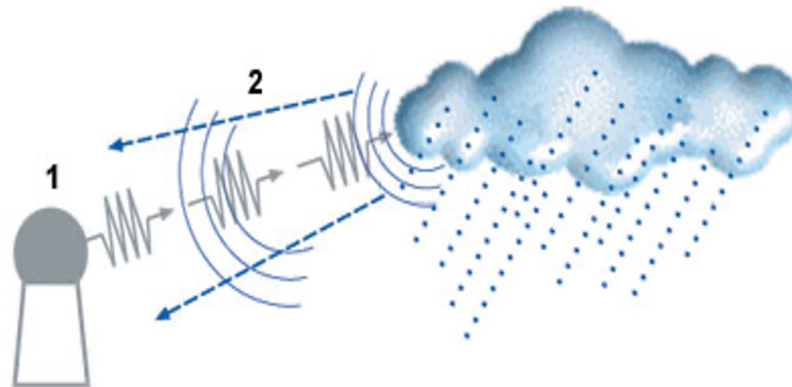
+ Radar Meteo

Nonostante il radar nasca con l'obiettivo di vedere attraverso le precipitazioni, esso è in grado, ad opportune frequenze, di vedere le **precipitazioni**.

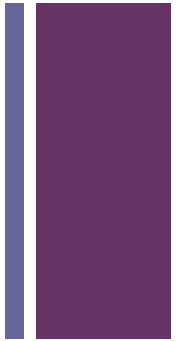
Per un radar di sorveglianza la detection di una precipitazione è un problema.

Per un **radar meteo**, la detection di una precipitazione è l'obiettivo.

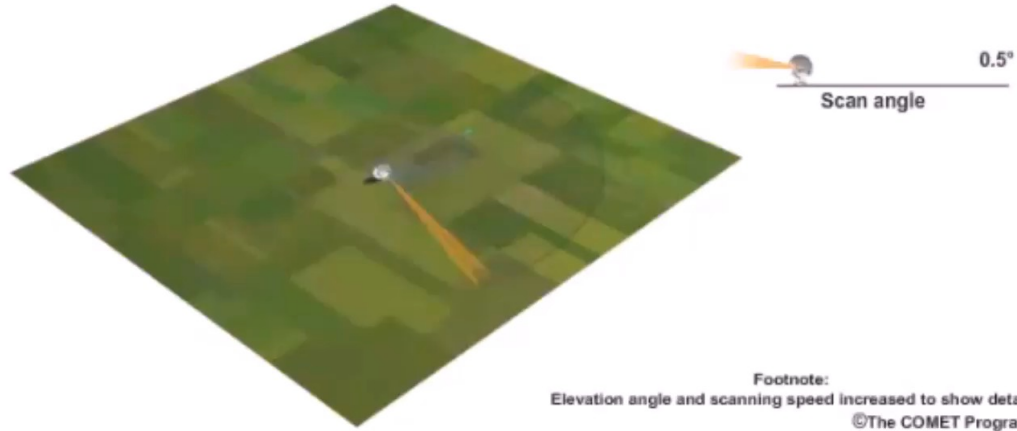
In particolare l'obiettivo del radar meteo non è soltanto quello di localizzare la **perturbazione**, ma valutarne l'entità.



+ Radar Meteo



Radar Scanning Pattern

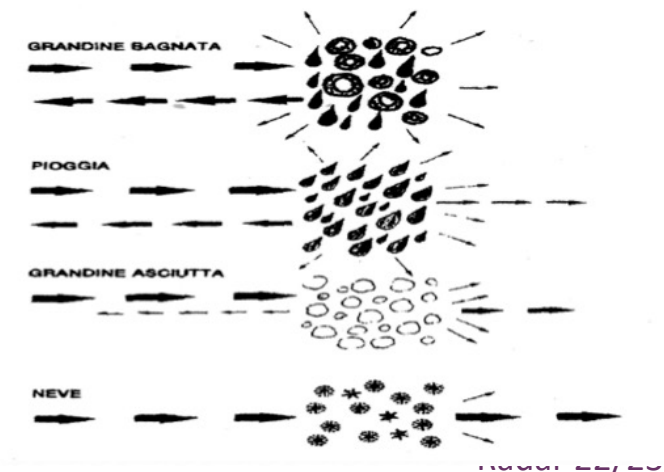
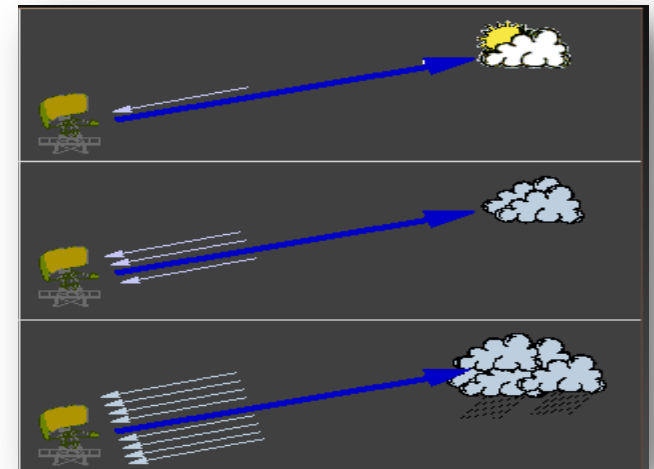


+ Radar Meteo

Il principio di funzionamento è basato sulla **retrodiffusione delle idrometeore**. I radar meteo sono in grado di rilevare all'interno delle formazioni nuvolose solo le aree in cui vi è presenza di acqua.

Nel caso di **particelle di acqua** i dipoli (simili a piccole antenne) sono liberi di muoversi e tendono ad allinearsi alle linee di campo: retrodiffrangono la potenza non assorbita nella direzione della potenza incidente.

Nel caso di **grandine asciutta** i dipoli sono meno liberi di muoversi e orientarsi e retrodiffrangono casualmente in tutte le direzioni.



+ Radar Meteo

Le frequenze utilizzate dai Radar Meteo sono quelle in **Banda S, C e X**.

A tali frequenze, la sezione radar delle particelle di acqua segue il **modello di Rayleigh**:

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D_i^6$$

dove:

i : i -esima particella di acqua

K : parametro legato alle caratteristiche dielettriche delle particelle (dipende da frequenza e temperatura)

D_i : diametro della particella

+ Radar Meteo

Considerando il volume di risoluzione, la sezione radar può essere scritta come:

$$\sigma = \eta V$$

V è il volume di risoluzione e η è la **RCS per unità di volume**

Sfruttando il modello di Rayleigh e considerando che in un Volume V sono presenti N gocce di acqua, la RCS per unità di volume può essere riscritta:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N D_i^6$$

Il termine

$$Z = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N D_i^6$$

prende il nome di **fattore di riflettività**

+ Radar Meteo

Nel caso del radar meteo, l'equazione radar viene modificata in maniera tale da tenere conto del fattore di riflettività.

Consideriamo l'equazione radar ottenuta considerando $G = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2}$

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Sostituiamo alla RCS il prodotto tra il volume e la RCS per unità di volume

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \eta V$$

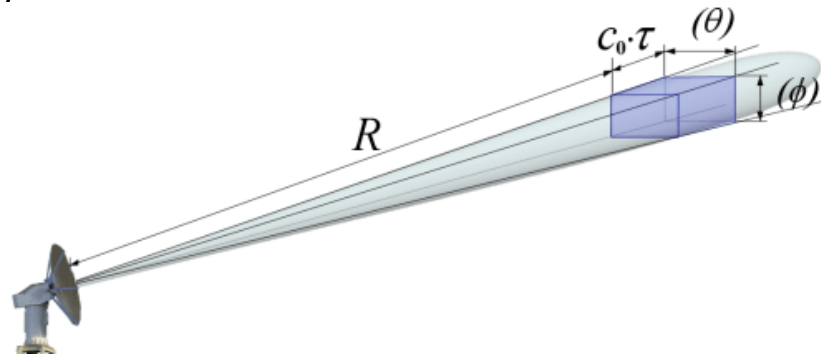
Scrivendo η in funzione del fattore di riflettività si ottiene:

$$P_R = \frac{P_T G^2}{64 R^4} \frac{\pi^2}{\lambda^2} |K|^2 ZV$$

+ Radar Meteo

Nell'ipotesi che il bersaglio occupi completamente la cella di risoluzione il Volume V si può approssimare come un cilindro di sezione ellittica con assi $R\phi$ e $R\theta$ ed altezza $c\tau/2$. Il volume dipende dalla distanza.

$$V = \frac{c\tau}{2} \frac{\pi}{4} R^2 \phi \theta$$



L'espressione finale dell'equazione radar meteo è:

$$P_R = \frac{P_T G^2 c \tau \phi \theta}{512 R^2} \frac{\pi^3}{\lambda^2} |K|^2 Z = \frac{C_R Z}{R^2}$$

Per semplicità si inglobano tutti i parametri del radar e i coefficienti nella **Costante Radar C_R** (dipendente dal radar utilizzato). Si è ipotizzato che K sia noto.

+ Radar Meteo

L'equazione radar meteo mette in relazione la potenza ricevuta con il fattore di riflettività

Tale equazione vale nelle ipotesi:

- bersaglio occupa tutto il volume di risoluzione
- bersaglio costituito da particelle sferiche di dimensioni inferiori alla lunghezza d'onda (modello Rayleigh)
- proprietà dielettriche omogenee nel volume considerato

La conoscenza di Z consente di stimare **l'entità della precipitazione** e **l'intensità della precipitazione**.

A seconda del valore di Z esistono sei livelli di classificazione (da debole ad estrema)

Z è legato al **tasso di precipitazione** r tramite la relazione empirica $Z=ar^b$ (a e b dipendono dal tipo di precipitazione)

+ Radar d'Immagine

L'obiettivo di un **radar di immagine** è fornire mappe radar 2D di zone (o bersagli) di interesse.

La formazione delle immagini è legata al principio di funzionamento del radar classico.

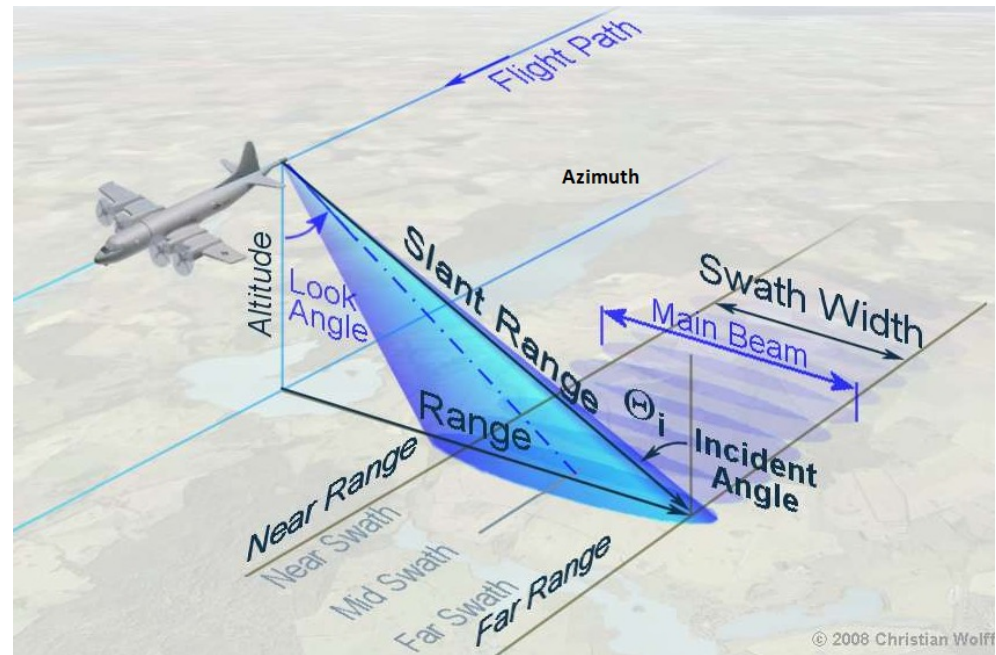
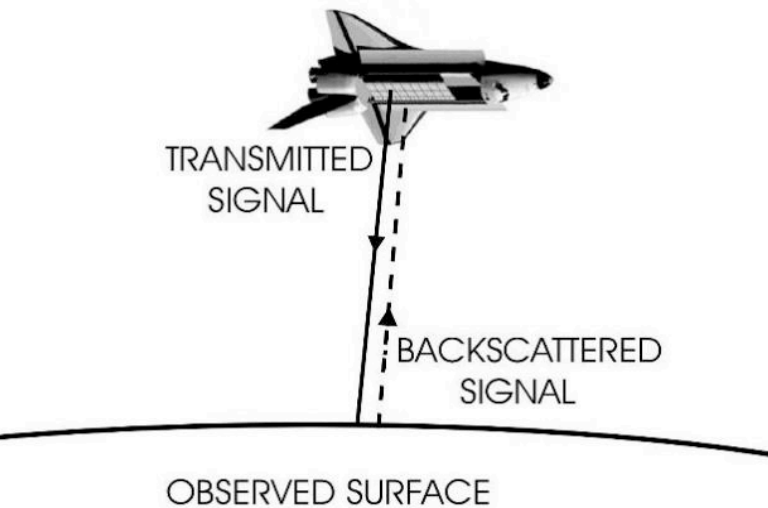
L'immagine radar è una mappa bidimensionale (**range-azimuth**) in scala di grigi. Ogni pixel dell'immagine radar (cella di risoluzione) ha un'intensità (livello di grigio) legata alla **sezione radar** degli scatteratori contenuti all'interno della cella di risoluzione

La dimensione della cella di risoluzione dipende dalle caratteristiche del sensore (risoluzione in range e in azimuth)

Esistono diversi sistemi di radar da immagine (RAR, **SAR**).

+ Radar d'Immagine

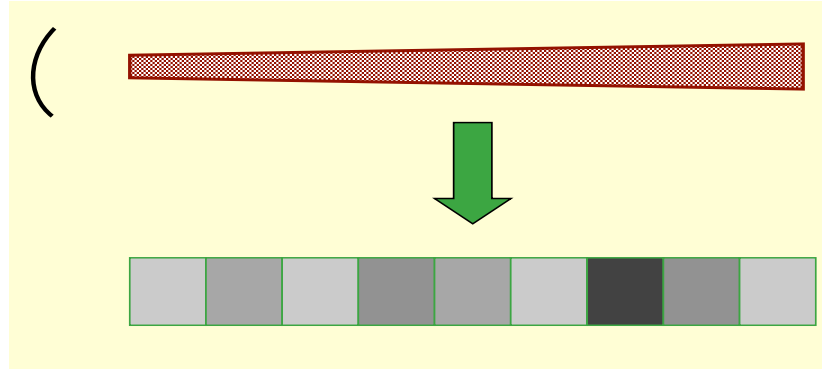
Un tipico radar d'immagine è costituito da un trasmettitore e da un ricevitore che operano su una piattaforma in movimento, come un aereo o un satellite.



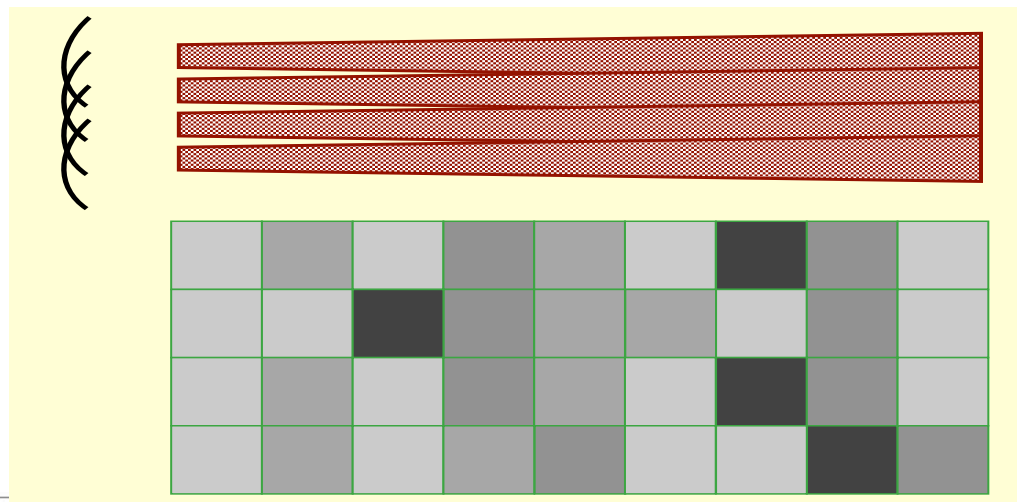
Geometria di acquisizione
Azimuth, Range and Ground Range
Swath

+ Radar d'Immagine

La prima dimensione dell'immagine Radar (**range**) è data dalla distanza

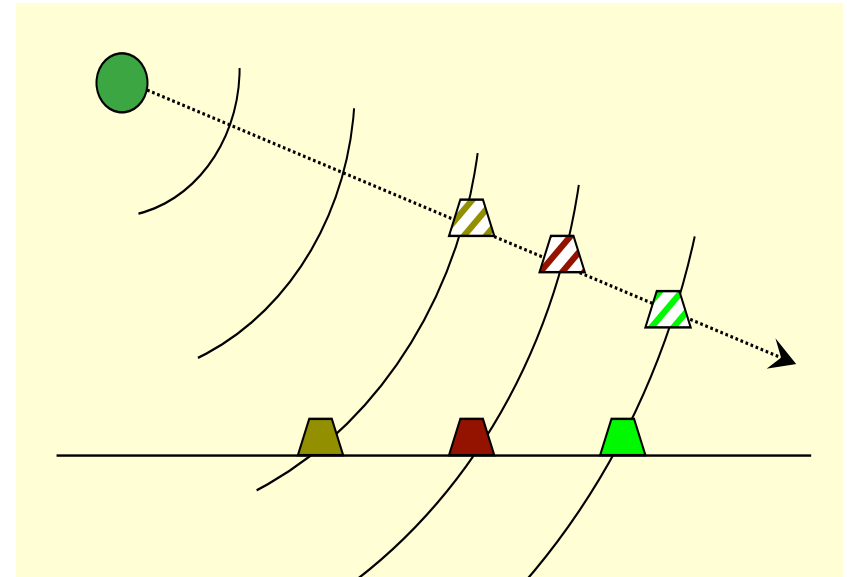
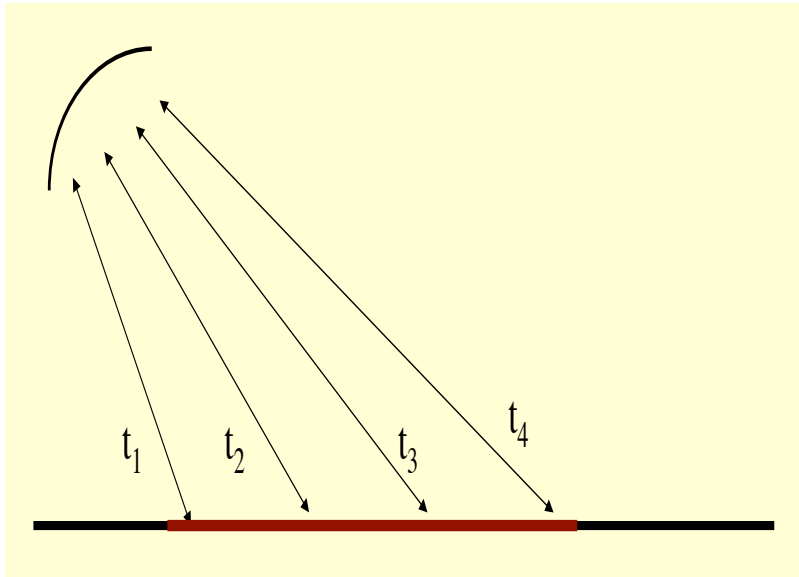


La seconda dimensione (**azimuth**) è data dal movimento della piattaforma, sincronizzato con l'emissione degli impulsi



+ Radar d'Immagine

I punti al suolo vengono mappati sulla base della distanza che hanno dal sensore (tempo che intercorre tra trasmissione segnale e ricezione eco).

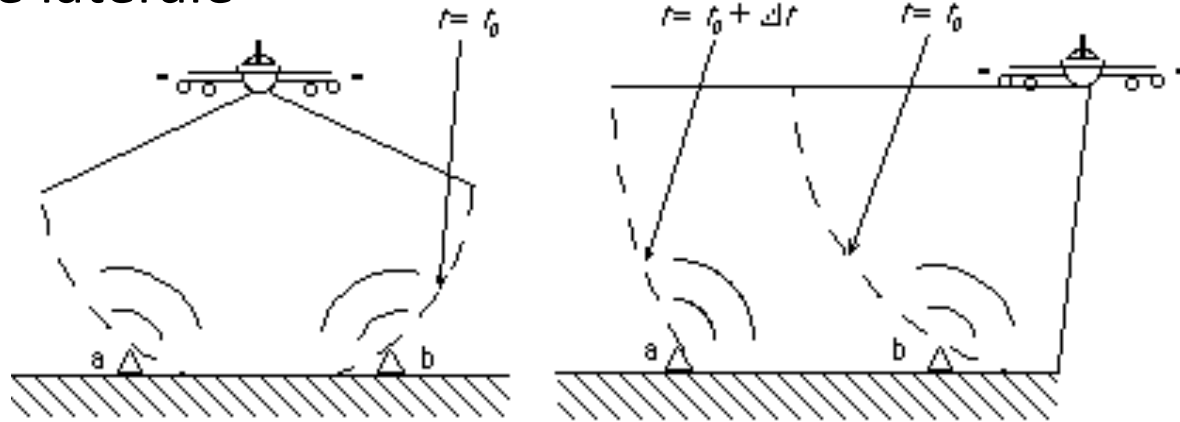


Due conseguenze:

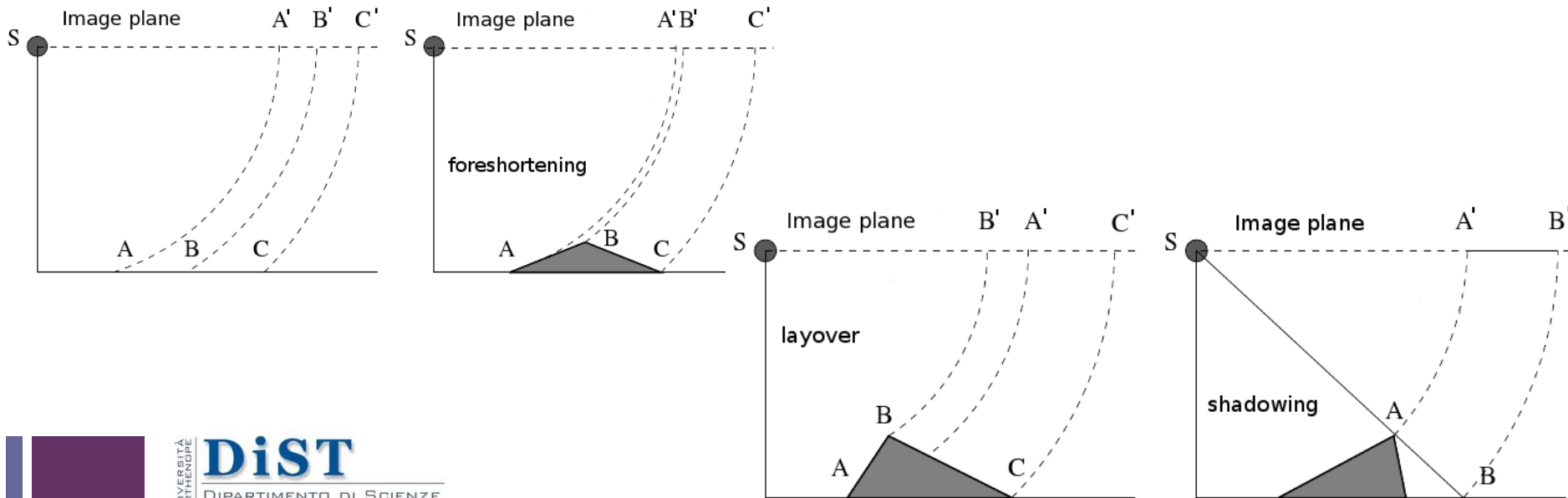
- Distorsioni nell'immagine
- Illuminazione laterale (evitare ambiguità)

+ Radar d'Immagine

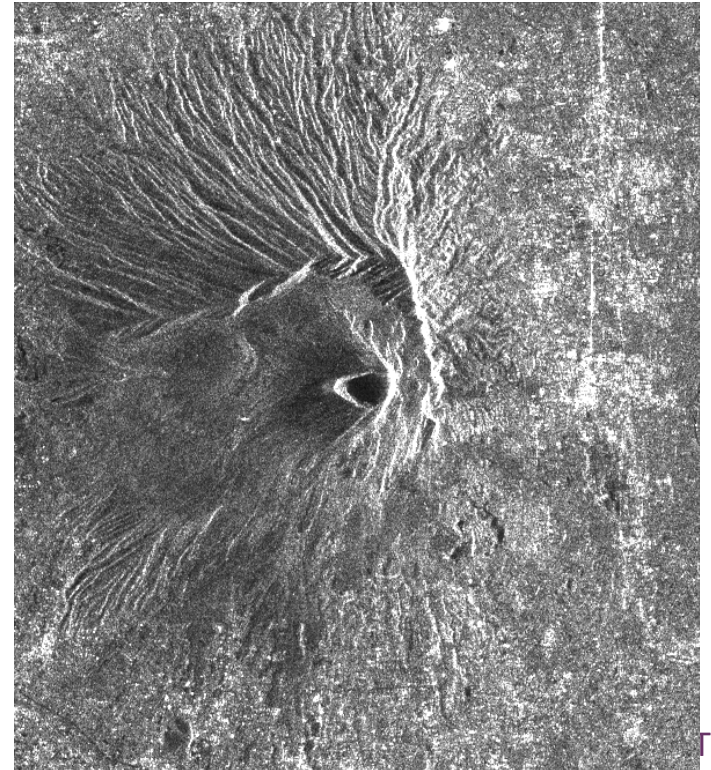
Illuminazione laterale



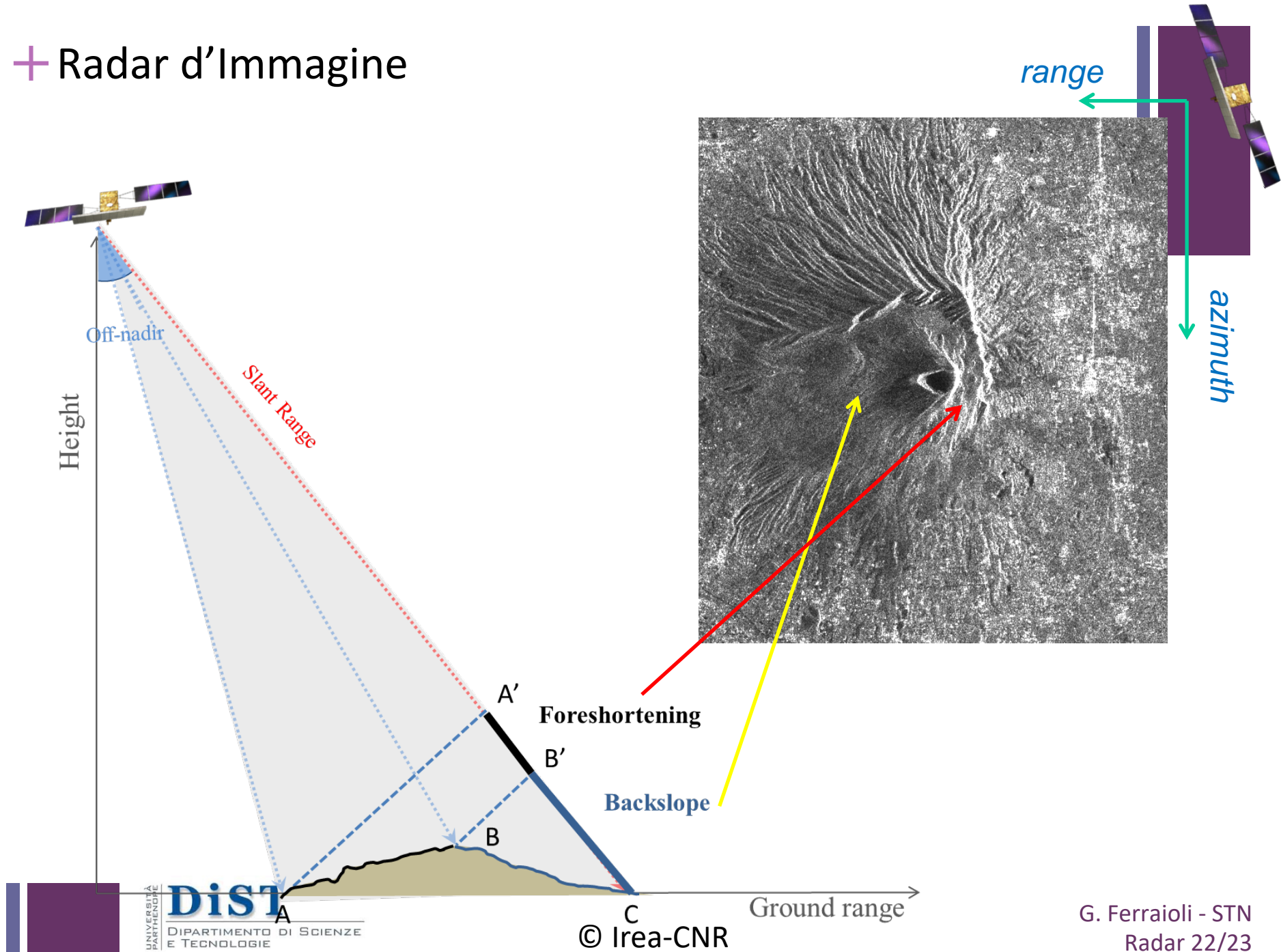
Distorsioni nell'immagine



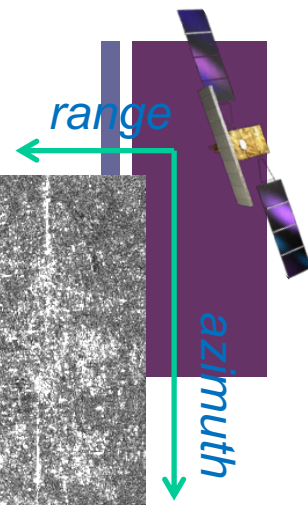
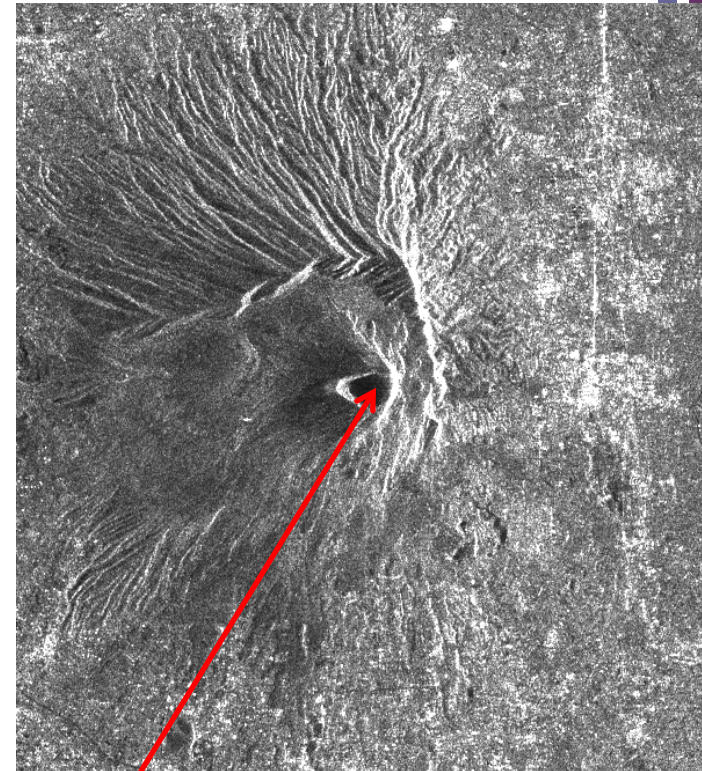
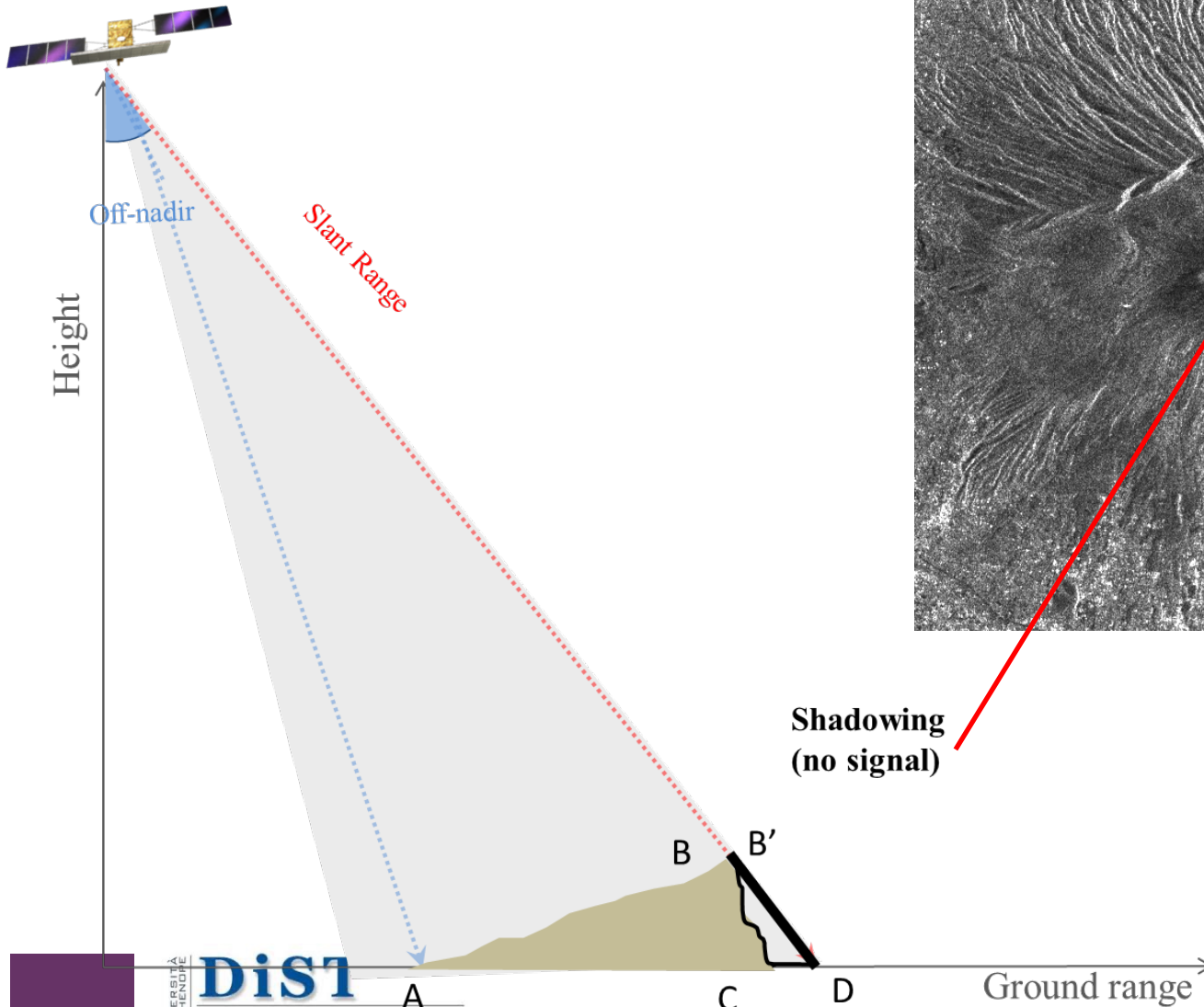
+ Radar d'Immagine



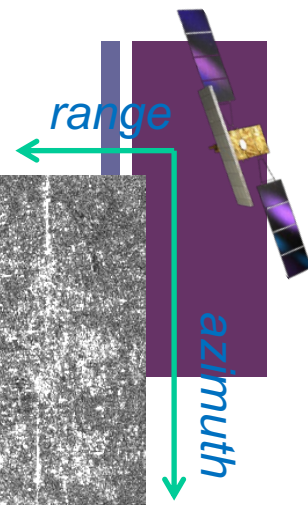
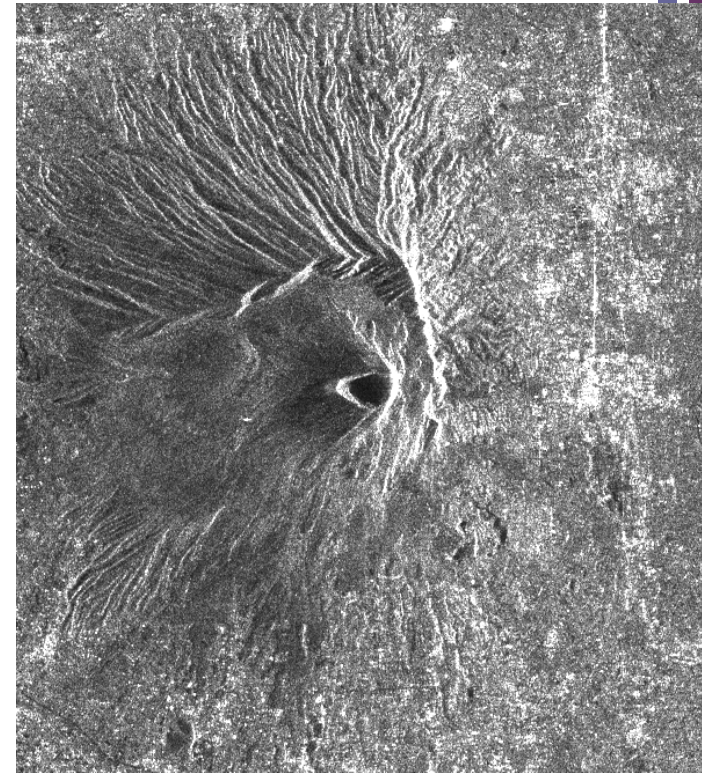
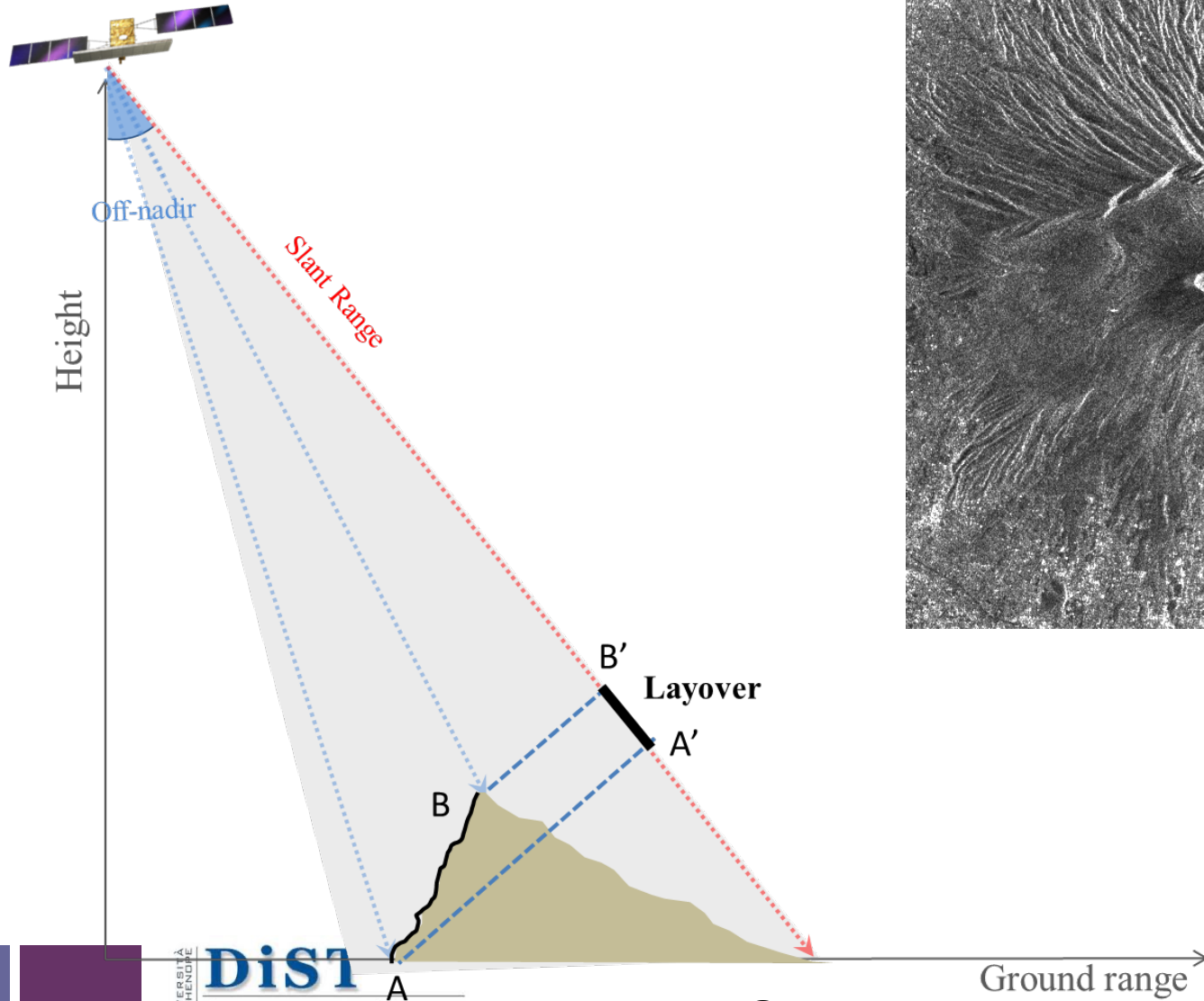
+ Radar d'Immagine



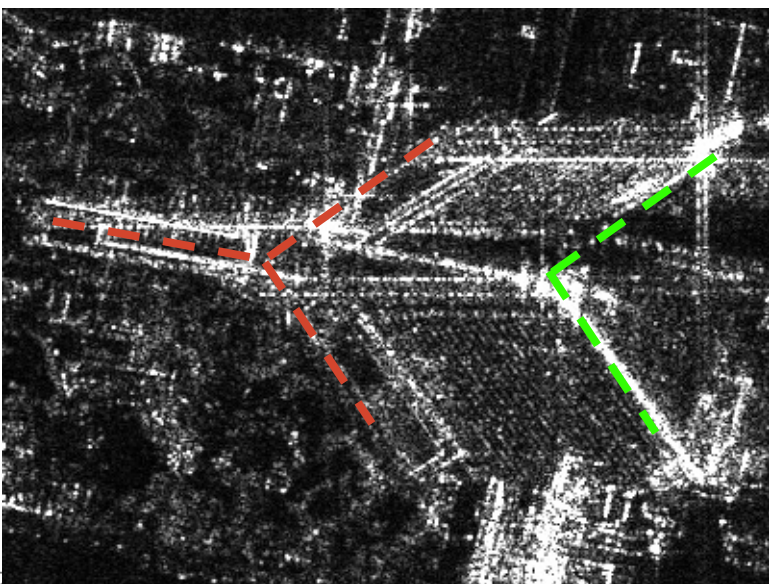
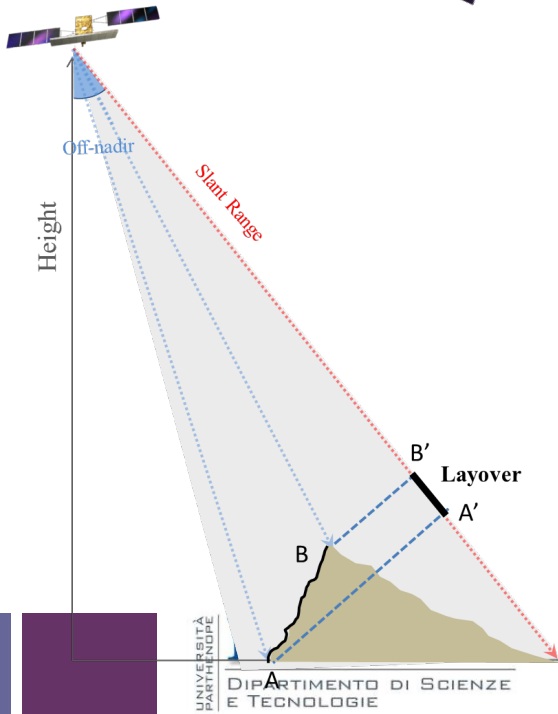
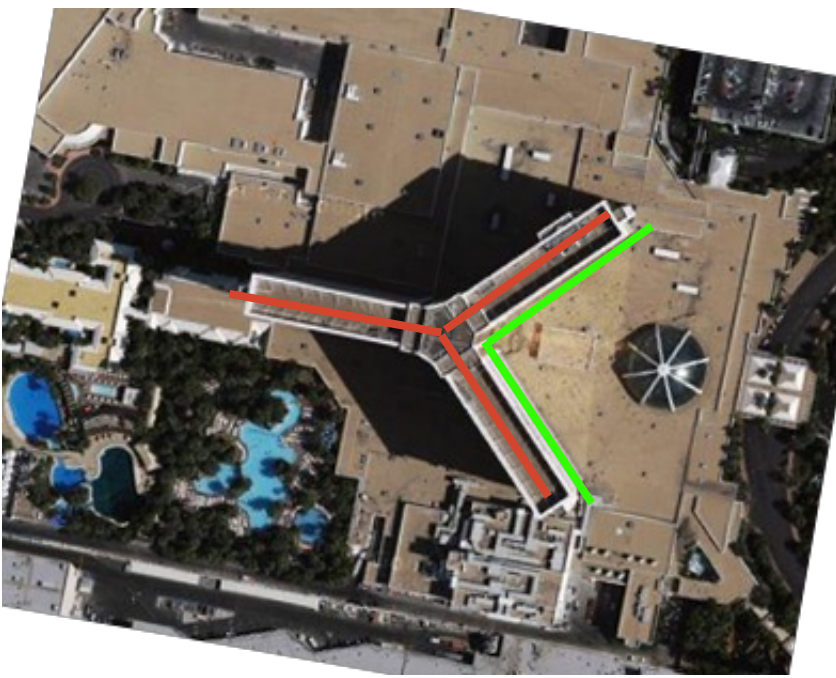
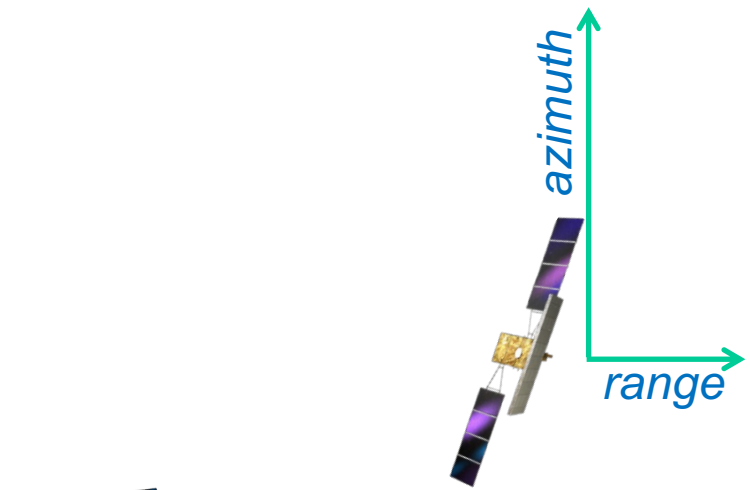
+ Radar d'Immagine



+ Radar d'Immagine



+ Radar d'Immagine

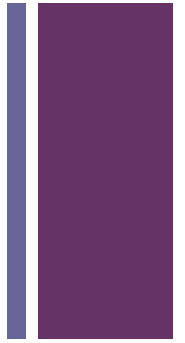


+ Radar d'Immagine



E-SAR (© DLR)

Dresda, Germania



Immagini Ottiche: elevata
risoluzione, facile interpretazione

Immagini Radar: acquisizioni
anche di notte e in presenza di
nuvole. Interpretazione più
difficile



+ Radar d'Immagine



E-SAR (© DLR)

Dresda, Germania



+ Radar d'Immagine

La risoluzione è il parametro che determina la qualità dell'immagine e rappresenta la minima distanza alla quale devono trovarsi due bersagli per essere distinguibili

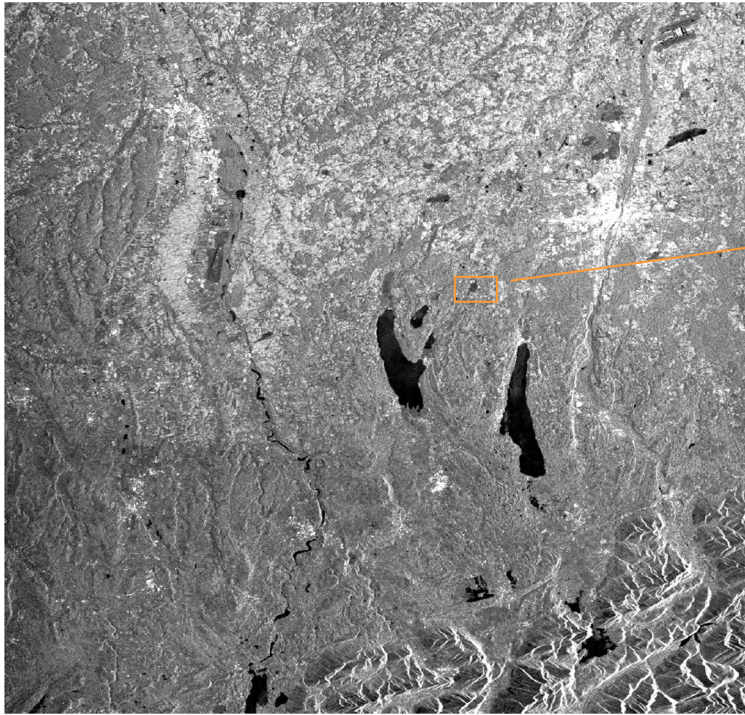
La risoluzione in range è legata alla durata dell'impulso (come per il radar classico).

Normalmente si usano segnali chiamati chirp (modulazione FM – banda larga)

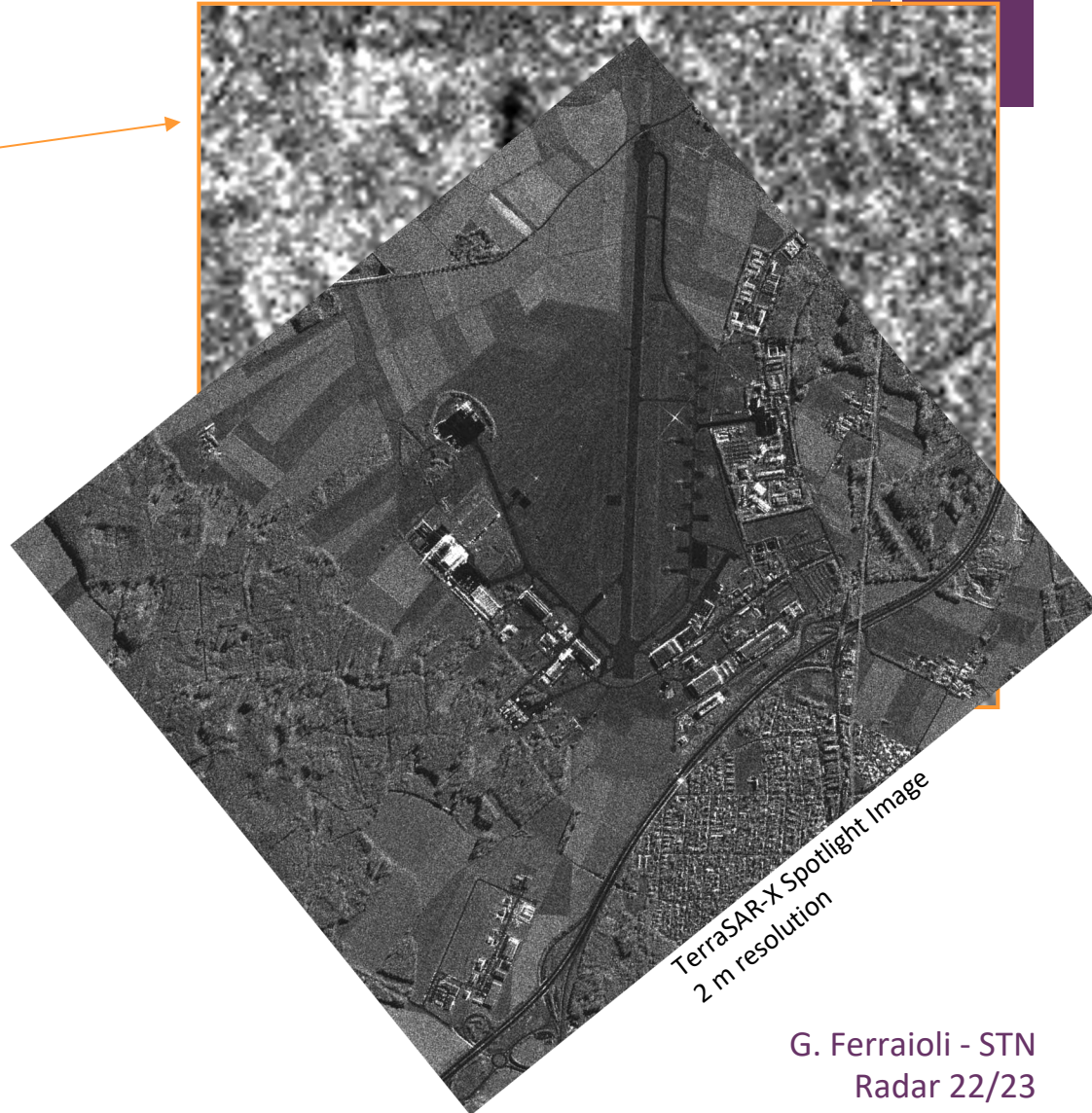
Consentono di migliorare la risoluzione senza dover ricorrere a Potenza e di picco estremamente alte (brevi durate)

$$\rho_{ra} = \frac{c\tau}{2}$$

+ Radar d'Immagine



ENVISAT / ASAR IM 2 Oberpfaffenhofen 100 km x 100 km;
25 m resolution (© ESA)



TerraSAR-X Spotlight Image
2 m resolution

Courtesy of SAR-EDU