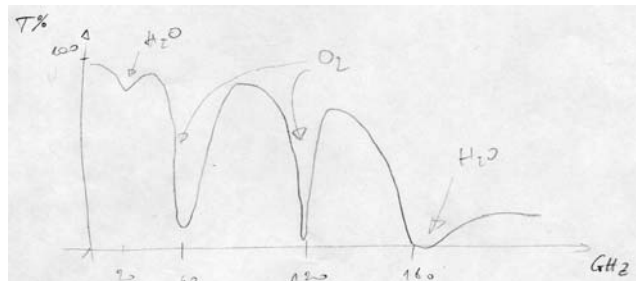


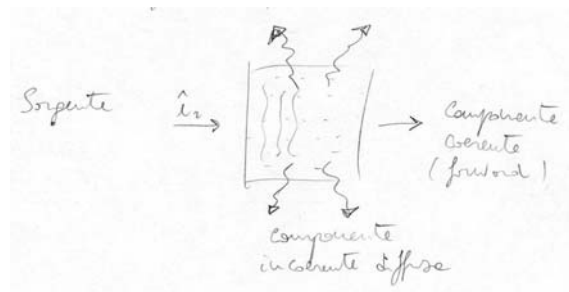
MECCANISMI DI INTERAZIONE DELLE ONDE E.M. CON L'ATMOSFERA

- **Assorbimento**
- **Diffusione** (spesso a seguito di assorbimento)

L'*assorbimento* avviene soprattutto a certe frequenze (righe di assorbimento), corrispondenti a frequenze di risonanza delle molecole corrispondenti (vedi figura).



La *diffusione* o *scattering* si riferisce alla proprietà di un mezzo di diffondere in tutte le direzioni la potenza di un'onda incidente, sottraendo così ulteriore potenza alla componente coerente (*forward*). Si può fare un grafico della potenza diffusa in funzione dell'angolo di diffusione che viene detto diagramma di scattering, analogamente al diagramma di radiazione di un'antenna.



è diversa a seconda delle particelle (molecole o particelle macroscopiche) che la provocano

- *Scattering di Mie*

- quando le particelle sono dello stesso ordine di grandezza delle λ
- la distribuzione angolare della potenza diffusa mostra un massimo nella direzione forward e un massimo secondario nella direzione opposta
-

- *scattering di Rayleigh*

- quando le dimensioni delle particelle sono molto inferiori alla λ
- la distribuzione angolare è concentrata nella direzione della radiazione incidente, con massimi simili nei due versi

- *Scattering di Raman*

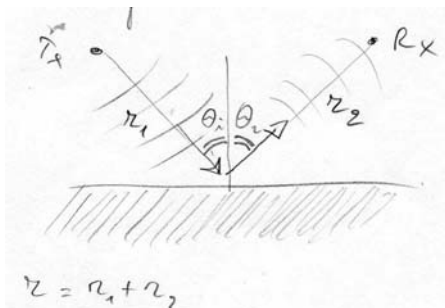
- quando c'è uno scostamento di frequenza, dovuto ad un assorbimento ed una riemissione

Interazione di un'onda E.M. con il suolo/mare o con ostacoli del tipo “parete di interfaccia”

- **riflessione speculare:** in caso di superficie patta e regolare.

Il coefficiente di riflessione dipende da ϵ , σ e varia con angolo di incidenza.

Vale la legge della riflessione (Snell): l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.



$$\theta_i = \theta_r$$

$$S(Rx) = S_0(r_1 + r_2) \cdot \Gamma$$

Γ : Coefficiente di riflettività

S : Densità di potenza

- **scattering diffuso:** in direzione non speculare per pareti irregolari (irregolarità di superficie o di volume)..

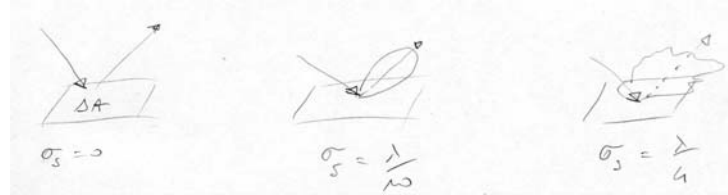
Si utilizza spesso il modello di Kirchhoff. Parte della potenza è sottratta da quella in direzione

speculare e diffusa in altre direzioni. Quindi la riflettività diminuisce ($\Gamma \rightarrow \Gamma e^{-\frac{\nu(\sigma_s)^2}{2}}$) in funzione di ν che è a sua volta funzione monotona crescente di σ_s (deviazione standard della rugosità). Questo

modello vale se $\left(\frac{\lambda}{10} \leq \sigma_s \leq \frac{\lambda}{4} \right)$.

Oltre alla diminuzione dell'intensità dell'onda riflessa si ha la diffusione di parte della potenza incidente in tutte le direzioni, cioè in un'onda diffusa incoerente. Se si considera il generico elemento

di superficie ΔA , esso diventa *sorgente secondaria* di un'onda diffusa secondo un *diagramma di scattering* che può essere definito analogamente ad un diagramma di radiazione di una sorgente primaria puntiforme

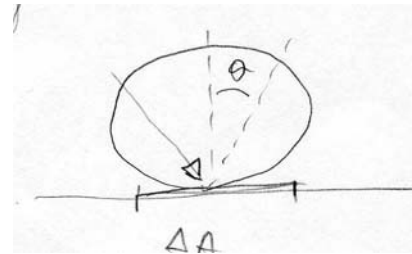


Se σ_s è grande, dell'ordine di λ o in generale l'irregolarità della parete è molto elevata allora praticamente tutta la potenza incidente viene diffusa e l'onda riflessa specularmente non è più identificabile. Si può allora adottare un *approccio statistico* e supporre che il diagramma di scattering sia *Lambertiano*, cioè l'intensità di radiazione secondaria $i_r^{(s)}(\theta) \propto \cos \theta$.

Oppure si può scrivere l'intensità di radiazione non normalizzata così:

$$I^{(s)}(\theta) = L \Delta A \cos \theta$$

dove L è la radianza (vedi oltre).



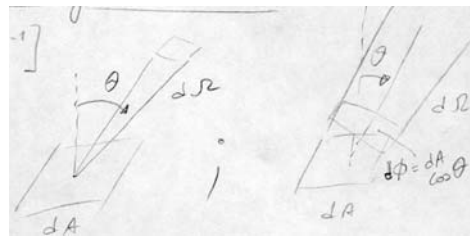
RICHIAMO GRANDEZZE FONDAMENTALI DEL REMOTE-SENSING

La principale differenza rispetto alla teoria assiomatica della radiazione che si è vista nella prima parte del corso è che qui sorgente e/o destinazione non possono essere sempre considerate puntiformi. Inoltre la sorgente può essere una sorgente secondaria, la cui potenza emessa cioè proviene originariamente da una sorgente primaria (il sole, una sorgente artificiale ecc.). Occorre allora definire alcune grandezze specificamente utili allo studio del remote sensing.

- **Radianza** (o anche brillantezza): $L \left[\text{W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1} \right]$

$$dP = L \underbrace{\cos \vartheta dA}_{d\Phi} d\Omega \quad [\text{W}]$$

(tiene conto anche della orientazione)



Si può definire sia in emissione sia in incidenza, cioè dP è la potenza incidente/emessa nell'angolo solido $d\Omega$ (e fin qui come l'intensità di radiazione) nell'unità di area. Vale la seg. relazione fra radianza e densità di potenza $S = L \cdot d\Omega \quad (= \frac{dP}{d\Phi})$.

- **Irradiance / Irradianza**

$$E = \iint_{\vartheta, \varphi} L_{\text{in}} \cos \vartheta d\Omega$$

- **Exitance**

$$M = \iint_{\vartheta, \varphi} L_{\text{out}} \cos \vartheta d\Omega$$

Nel caso di radiazione isotropa, uniforme L non dipende dalle coordinate angolari $\rightarrow M=L\pi$. Sia l'irradiance che l'exitance sono potenze per unità di area.

per un corpo nero: $M = \sigma T^4$, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left[\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \right]$ costante di Stefan-Boltzman.

- **Radianza (o brillantezza) Spettrale**

$$L_f = \frac{dL}{df} \Rightarrow \Delta L = L_f \Delta f \quad \text{o} \quad L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \Rightarrow \Delta L = L_\lambda \Delta \lambda$$

$$\left(L_{\lambda} = \frac{f^2}{c} L_f \right)$$

Radiazione termica di un corpo nero (ben approssima astri e terreno) (Emissione uniforme in tutte le direzioni)

h : costante di Planck = 6.626×10^{-34}

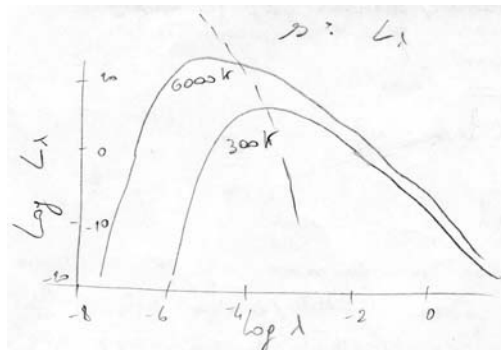
$$L_f = \frac{2 h f^3}{c^2 (e^{hf/wT} - 1)}$$

w : costante di Boltzmann $[J-s] = 1.38 \times 10^{-23} [J K^{-1}]$

$$T^{(w)} = t + 273.15$$

se vale l'approssimazione Rayleigh-Jeans: $\frac{h c}{\lambda k T} \ll 1$

$$\text{allora } L_f \approx \frac{2 k T f^2}{c^2} = \frac{2 k T}{\lambda^2} \quad \left(\text{per un corpo qualsiasi} = \frac{2 k T_b}{\lambda^2}, \text{ vedi oltre} \right)$$



Per la temperatura media terrestre $T = 280 K$ si ha: $f \ll 6000 GHz$; $\lambda \gg 50 \mu m$, quindi ciò è verificato a microonde e onde radio.

- **Emissività** (di un corpo o in una regione)

$$L_{\lambda} = \varepsilon(\lambda) L_{\lambda,p} \text{ di un corpo nero, } p \text{ sta per Planck.} \quad (0 \leq \varepsilon < 1)$$

- **Riflessività**: $1 - \varepsilon$ (ε è costante in λ nei “corpi grigi” es. Sole)
- **Brightness temperature** (Temperatura di brillantezza) [T_b tale che si ottenga L_f osservato].

E' la temperatura a cui dovrebbe essere tenuto un corpo nero affinché la radianza sia quella osservata. Sotto l'ipotesi di R.J. si ha:

$$T_b = \varepsilon T,$$

è in generale funzione della frequenza a causa di ε .

N.B. per un corpo qualsiasi L_f e T_b dipendono da ϑ , φ e frequenza! In particolare dipendono da ϑ , φ se la radiazione non è isotropa.

RADIOMETRO

Il radiometro è un sensore passivo che rileva la radiazione, perciò in questo paragrafo si fa riferimento alla ricezione.

In generale si ha, a una certa frequenza

$$dP_f = \frac{dP}{df} = L_f dA \cos \vartheta d\Omega$$

Si può definire il *flusso spettrale di potenza*

$$F_f = \frac{dP_f}{d\Phi} = L_f d\Omega \quad \left(= S_f ; \text{quindi } \Delta S = F_f \Delta f \Rightarrow S = \int F_f df \right)$$

La potenza P_f può anche essere calcolata come prodotto fra F_f e l'area efficace dell'antenna (se $d\Omega$ è nella direzione di massimo dell'antenna)

$$\Delta P_f = F_f \cdot A_e \quad (\text{perfetto matching di polarizzazione})$$

o

$$\Delta P_f = F_f \cdot \frac{A_e}{2} \quad (\text{se la polarizzazione è random})$$

Se la densità frequenziale di potenza assorbita dall'antenna vale (formula di Nyquist, cioè il segnale ha le proprietà di rumore termico in un resistore):

$$P_{Nf} = K T_A, \quad T_A \text{ temperatura d'antenna, } N : \text{Noise} \\ (P_N = W T_A \Delta f [W])$$

Sotto le hp che: la regione emittente è grande e T_b costante, in modo tale da includere tutto il lobo principale dell'antenna si ha: $T_A \approx T_b$ altrimenti se non valgono le ipotesi vedi oltre. C'è in sostanza una intercambiabilità fra potenza e temperatura, cosa che sta alla base del processo di telerilevamento.

Se vale l'ipotesi di Rayleigh-Jeans si ha:

$$L_f \cong \frac{2 W T_b}{\lambda^2}, \quad F_f = \frac{2 W T_b}{\lambda^2} \Delta\Omega$$

quindi nella direzione di massimo

$$\Delta P_f = \frac{2 W T_b}{\lambda^2} \Delta \Omega \frac{A_e}{2} = \frac{W A_e}{\lambda^2} T_b \Delta \Omega$$

al di fuori della direzione di massimo: $A'_e(\vartheta, \varphi) = A_e \cdot i_r(\vartheta, \varphi)$ perciò:

$$\Delta P_f = \frac{W A_e}{\lambda^2} T_b i_r(\vartheta, \varphi) \Delta \Omega$$

cioè la densità di potenza totale vale

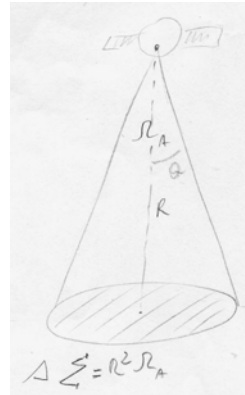
$$P_f = \frac{W A_e}{\lambda^2} \int_{4\pi} T_b(\vartheta, \varphi) i_r(\vartheta, \varphi) d\Omega$$

ma giacchè $P_F = P_{Nf} = K T_A$ si ha:

$$\frac{K A_e}{\lambda^2} \int_{4\pi} T_b(\vartheta, \varphi) i_r(\vartheta, \varphi) d\Omega = K T_A \quad \Rightarrow \quad T_a = \frac{A_e}{\lambda^2} \int_{4\pi} T_b(\vartheta, \varphi) i_r(\vartheta, \varphi) d\Omega.$$

da cui:

$$T_a = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi T_b(\vartheta, \varphi) \hat{i}_r(\vartheta, \varphi) \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi}{\Omega_A}$$



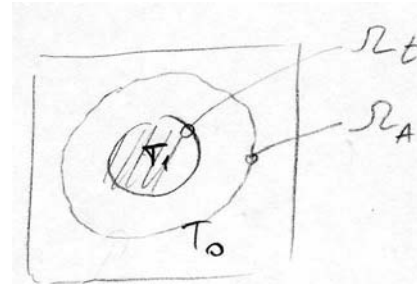
Ω_a è l'ampiezza del lobo principale dell'antenna. $\Delta \Sigma$ è anche detto Footprint o Instantaneous Field of View (IFOV).

Se T_b è costante per le direzioni per cui i_r è diverso da zero, allora si ha:

$$T_a = \frac{\int_{4\pi} T_b(\vartheta, \varphi) i_r(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\Omega_a} = \frac{T_b \int_{4\pi} i_r(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\Omega_a} = \frac{T_b \Omega_a}{\Omega_a} = T_b$$

Quindi in questo caso la temperatura d'antenna, che si ricava dalla potenza ricevuta, dà effettivamente una stima fedele della temperatura di brillantezza dell'oggetto.

Si supponga per esempio che la regione da osservare sia quella rappresentata dalla figura a lato, e di avere un'antenna con diagramma a step, 1 all'interno di un certo valore massimo di ϑ , zero altrove.



Quindi l'antenna risponde uniformemente in un cono di angolo solido Ω_A e non risponde altrove.

Nel caso che Ω_A è troppo grande si ha (come in figura 1)

$$T_A = \begin{cases} \left(1 - \frac{\Omega_t}{\Omega_A}\right) T_0 + \frac{\Omega_t}{\Omega_A} T_1 & \text{per } \Omega_A > \Omega_t \\ T_1 & \text{per } \Omega_A \leq \Omega_t \end{cases}$$

Sensibilità del sistema

L'espressione della potenza rivelata in termini di temperatura è utile perché anche il rumore degli apparati di ricezione è spesso espresso tramite la temperatura di rumore.

Se la rilevazione viene mediata su un intervallo di frequenza Δf e un intervallo di tempo Δt si migliorano le cose. Data T_{sys} temperatura di rumore del ricevitore, si può calcolare approssimativamente la sensibilità tramite la seguente formula

$$\Delta T = C \frac{T_{sys}}{\sqrt{\Delta t \Delta f}}$$

con Δt minimo cambiamento di temperatura che viene rilevato. Di solito $C \approx 5 \div 20$ e $\Delta t, \Delta f$ sono scelti in modo da avere $\Delta T \cong 1K$

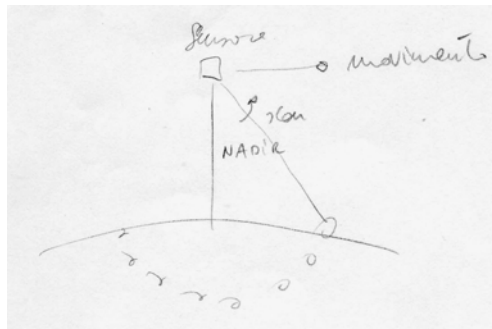
Radiometri a scansione

Per ampliare la regione di osservazione si usano i radiometri a scansione.

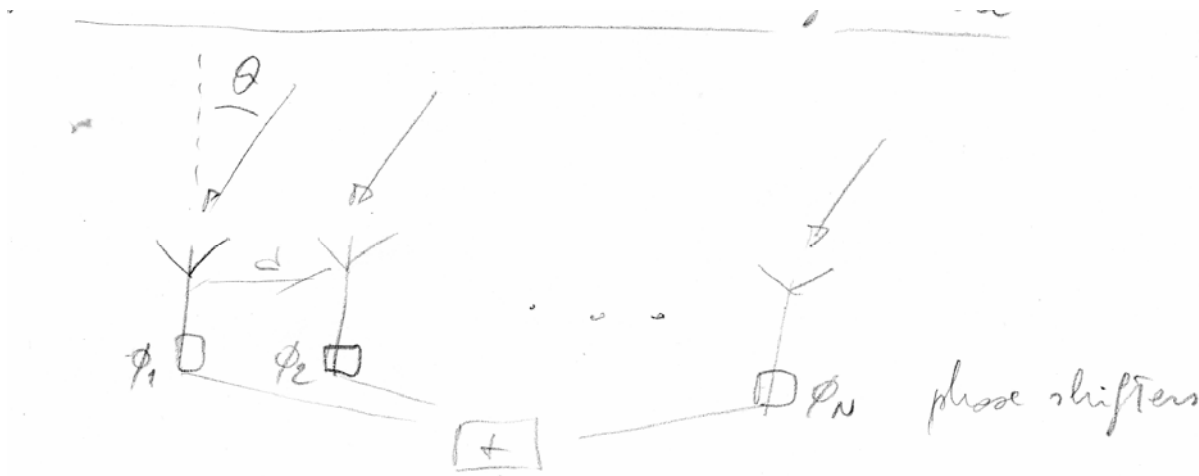
- scansione meccanica (scomodi sia per aerei sia per satelliti)
- scansione elettronica (phased arrays – matrice di Butler)

-mista

es. scansione conica:



Oppure si può avere scansione elettronica con array lineare:



l'antenna 2 avrà un segnale in anticipo di $\beta d \sin \theta$ rispetto alle 1, la 3 $2\beta d \sin \theta$ ecc...

Bandwidth di circa $\frac{\lambda}{Nd}$ radianti ($\theta = 0$).

Occorre quindi utilizzare degli phase shifters. Quando θ è grande il lobo si amplia!

Sennò si può avere un array circolare o bidimensionale ecc.

Principali applicazioni

La radiometria e μ onde ha il vantaggio di operare anche in assenza di visibilità (l'atmosfera e le nuvole sono quasi del tutto trasparenti) e di notte.

Osservazioni oceanografiche

Ben si addice la scarsa definizione all'oceano.

La T_b non dipende solo dalla temperatura fisica ma anche da:

- frequenza
- polarizzazione
- salinità
- rugosità superficiale

Occorre quindi fare osservazioni multifrequenza per isolare un fenomeno o l'altro

Es. sotto i 5 GHz la salinità aumenta molto la riflessività e decresce l'emissione (T_b), o l'emissività (ϵ). Tuttavia sotto i 5 GHz la risoluzione è molto limitata, perché l'IFOV è molto grande.

Il vento aumenta molto la rugosità e la schiuma, che fa da isolante e quindi decresce l'emissione. Sembra che la polarizzazione verticale sia insensibile a ciò, a differenza di quella orizzontale, allora sono necessarie osservazioni in doppia polarizzazione

Osservazioni su ghiaccio (30 GHz ϵ è molto alto).

Osservazioni della superficie terrestre

Il radiometro non è molto adatto per la scarsa definizione. Tuttavia si può usare per determinare la percentuale di umidità nel terreno o la presenza di ghiaccio o neve.

Correzione atmosferica: T_b dipende da: 1) componente emessa ϵT , 2) radiazioni atmosferiche verso il basso; 3) emissioni atmosferiche verso l'alto. Allora occorre correggere 2) e 3); si utilizza l'equazione del trasferimento radiativi.

Sondaggi dell'atmosfera

La regione delle onde contiene numerose linee di assorbimento nello spettro. Quindi facendo scansioni multifrequenze si possono notare le linee corrispondenti per es. al vapore acqueo o all'ossigeno. Sopra i 300 GHz ci sono le linee del CO, NO₂ ecc. Si riesce in qualche modo a determinare l'inquinamento.

Esempio SSM/I Special Sensor Microwave Imager (US-Air force)

-19.4, 22.2, 37, 85.5 GHz

-scansione conca

-D = 1 m blowwidth di circa 0.03 rad e 18.4 GHz

-1 rivoluzione in ~ 2 secondi

- $\Delta T = 0.8 \text{ K}$

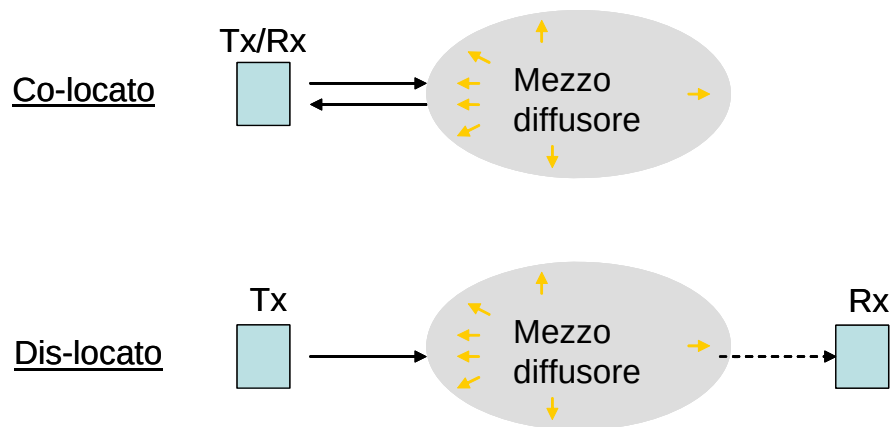
c'è anche il SMMR (scanning multichannel microwave radiometer) con bande 6.6, 10.7, 18, 21, 37 GHz

SENSORI ATTIVI -----

LIDAR (Light Detection and Ranging)

Si usano laser a infrarossi con ricevitore (fotodiodo) co-locato o dis-locato. Si basano sul back-scattering.

Il DIAL (Differential Absorption Lidar) usa un laser sintonizzabile per misurare le variazioni della ampiezza del segnale retrodiffuso (o ricevuto al Rx) ad una frequenza rispetto ad una altra (frequenza di riferimento). In questo modo si mettono in evidenza le righe di assorbimento dei vari componenti chimici. Esiste anche il Doppler LIDAR che rileva gli scostamenti Doppler del segnale retrodiffuso.



In emissione: si usa un LASER o un LED

In ricezione: si usa un fotodiodo.

RADAR (Radio Detection and Ranging)

Definizioni di base

Sezione Bistatica di Scattering σ_s (dell'elemento o pixel ΔA)

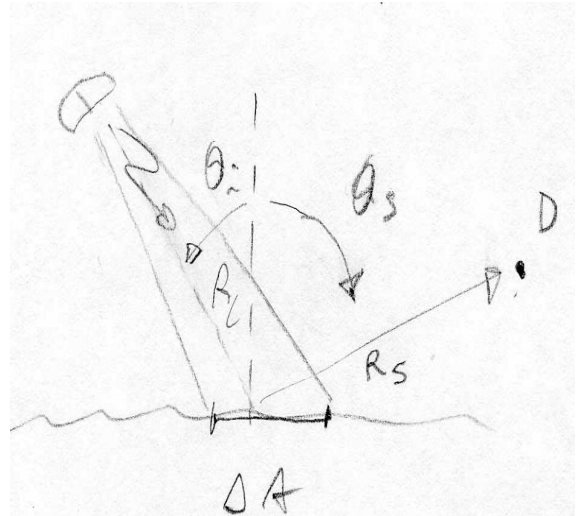
$$\sigma_s \triangleq \frac{P'_s}{S_i} = \frac{S_s(\vartheta, \varphi, r) \cdot 4\pi R_s^2}{S_i(\vartheta_i, \varphi_i, R_i)} [m^2]$$

Coefficiente Bistatico di Scattering σ_0 (adatto ad aree)

$$\sigma_0(\vartheta_i, \varphi_i, \vartheta_s, \varphi_s) \triangleq \frac{\sigma_s(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_s, \varphi_s)}{\Delta A}$$

[adimensionale]

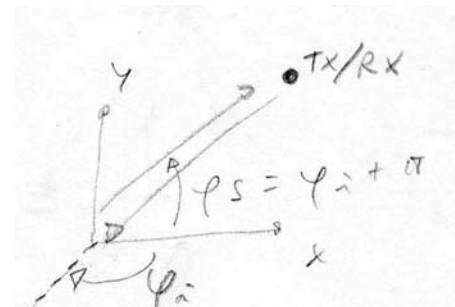
Corrisponde in sostanza al diagramma di scattering.



Sezione Traversa di Assorbimento σ_a

$$\sigma_a \triangleq \frac{P_a}{S_i}$$

Se $\vartheta_i = \vartheta_s$ e $\varphi_i = \varphi_s + \pi$ si hanno *Sezione e Coefficienti Monostatici* (o di backscatter) che sono parametri importanti per radar monostatici (i più comuni)



Radar Monostatico: TX e RX sono nella stessa posizione (si usa la stessa antenna).

Radar Bistatico: TX e RX sono in posizioni diverse.

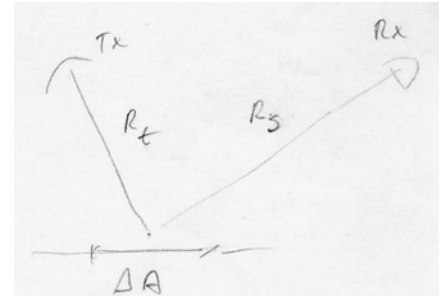
Equazione del Radar

Si ha:

$$\sigma_0 = \frac{P'_s}{S_i \Delta A} \Rightarrow P'_s = \sigma_0 \Delta A \frac{G_t(\vartheta_i, \varphi_i) P_t}{4\pi R_t^2}$$

La densità di potenza al ricevitore sarà:

$$S_r \triangleq \frac{P'_s}{4\pi R_s^2} = \sigma_0 \Delta A \frac{G_t(\vartheta_i, \varphi_i) P_t}{(4\pi R_t R_s)^2}$$



Quindi la potenza ricevuta:

$$1) P_r = S_r A'_{eff} = S_r \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{G_r(\vartheta_r, \varphi_r) G_t(\vartheta_i, \varphi_i) P_t}{(R_t R_s)^2} \sigma_0 \Delta A$$

Se TX illumina una regione di territorio ampia si ha:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} P_t \iint_A \frac{G_r(\vartheta_r, \varphi_r) G_t(\vartheta_i, \varphi_i) \sigma_0(P)}{(R_t(P) R_s(P))^2} dA$$

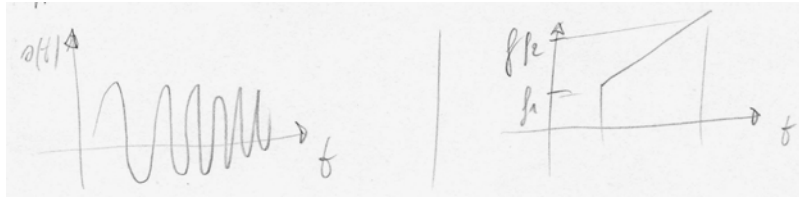
Tuttavi si fa generalmente in modo che A sia relativamente piccola per cui vale la 1)

Per quanto detto precedentemente nel caso monostatico la 1) diviene:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{G^2 P_t}{R^4} \sigma_0 \Delta A$$

Due parole sui Radar

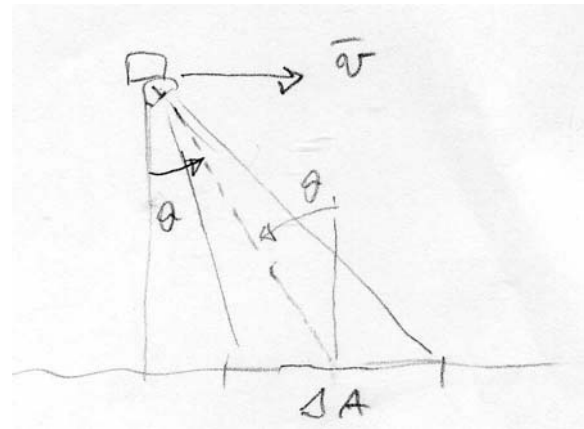
- Si può trasmettere una portante (per cui vale la teoria dei fasori tradizionale)
- Oppure un treno d'onda sinusoidale, questo per poter determinare il tempo di propagazione con maggiore accuratezza
- Oppure un'onda "Chirp", che migliora ulteriormente l'accuratezza sul tempo di propagazione:



Scatterometria a microonde

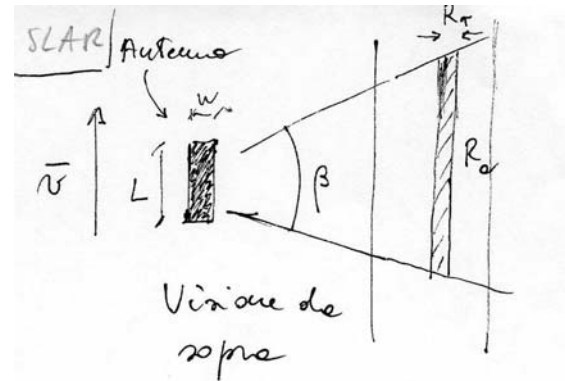
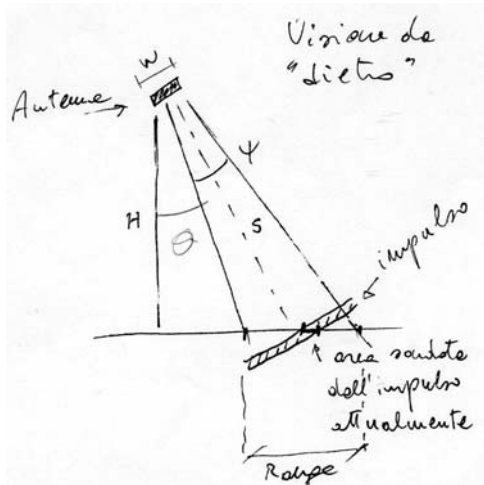
Mentre la piattaforma si muove il fascio viene fatto ruotare in modo da insistere sempre sulla stessa area. In questo modo, sfruttando l'equazione radar monostatica si ottiene l'andamento di σ_0 monostatica funzione di ϑ .

Un corpo senza irregolarità di superficie e volume mostrerà un andamento ad impulso stretto, in teoria una $\delta(\vartheta)$. Al contrario una superficie perfettamente rugosa avrà: $\sigma_0(\vartheta) \propto \cos \vartheta$.



Si utilizza ad esempio la scatterometria per determinare l'orientazione delle onde e la loro altezza e quindi risalire alla intensità di vento sul mare.

SLR (Side Looking Radar) – SLAR (Side-Looking Airborne RADAR)



Si utilizza un'antenna larga W e lunga L con L maggiore possibile. La risoluzione nella direzione "azimutale" (cioè la direzione // allo spostamento della piattaforma) è determinata dall'angolo β

$$\text{Con } \beta \cong \frac{\lambda}{L}$$

In particolare, dato che $S = H/\cos \theta$, la risoluzione azimutale, R_A , vale

$$R_A \cong S\beta = \frac{H\lambda}{L \cos \theta} \quad (\text{purtroppo dipende dall'altezza della piattaforma, } H)$$

La risoluzione nella direzione "range" è determinata dal fatto che viene trasmesso un corto impulso, la cui durata spaziale, se l'inter-arrivo temporale è t_p , vale $ct_p/2$. Siccome ci deve essere un intervallo tra gli impulsi almeno lungo anch'essa t_p , tenendo conto dell'inclinazione del cammino, si può calcolare la "range resolution"

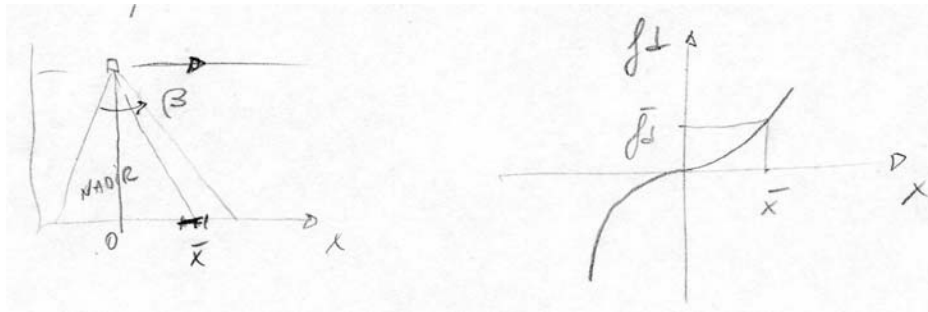
$$R_r = \frac{c \cdot t_p}{2 \cdot \sin \theta}$$

SAR (Synthetic Aperture Radar)

Il SAR risolve il problema della dipendenza della risoluzione azimutale dall'altezza della piattaforma. Nel senso del "range" il sistema funziona praticamente come un SLR.

Nel senso azimutale il segnale (ampiezza, fase, frequenze doppler) viene registrato per un tempo T , in cui la piattaforma si muove di vT .

Non importa che l'antenna abbia un lobo stretto nell'azimuth, le varie componenti vengono risolte nello spostamento Doppler.



Si possono ottenere delle risoluzioni $R_A \approx 10m$ anche con piattaforme spaziali (space-born systems).