

Capitolo 7

*Calcolo del campo elettromagnetico:
metodi deterministici*

Impatto ambientale dei campi elettromagnetici

Predizione campo

- Nei sistemi di comunicazione il campo si propaga attraverso diversi cammini multipli
- il campo in un punto è dato dalla somma (complessa) di tutti i contributi provenienti dai diversi cammini multipli
- sarà pertanto estremamente variabile da punto a punto nello spazio.
- In generale si può pensare il campo risultante in un punto come costituito da un termine "lentamente" variabile che rappresenta l'attenuazione media tra sorgente e punto di osservazione, e un termine "rapidamente" variabile che rappresenta l'interferenza di tutti i cammini per riflessione, diffrazione etc. (small scale fast fading);
- inoltre, specie nei collegamenti indoor, il segnale varia nel tempo, al mutare delle caratteristiche del canale (persone presenti nell'ambiente, porte aperte o chiuse, etc...)
- nei problemi di copertura la predizione del campo viene fatta considerando sia l'attenuazione media del percorso che il fast fading;

Nei problemi di impatto ambientale quello che interessa è il valore massimo del campo in un punto, pertanto il fast fading non viene considerato.

Modelli propagazione campo

modelli deterministici

modelli empirici

- Ci sono due modi principali per determinare il campo:
 - modelli empirici (a volte detti statistici)
 - modelli deterministici (anche detti specifici di sito)
- I modelli empirici sono basati sulla caratterizzazione statistica del segnale ricevuto, effettuata tramite misure ed interpolata con semplici modelli matematici. Sono facili da implementare, richiedono scarse risorse computazionali e sono poco sensibili alla geometria dell'ambiente.
- I modelli deterministici hanno una base fisica, e richiedono una gran quantità di dati con riferimento alla geometria, profilo del terreno, posizione e caratteristiche degli edifici, etc... Richiedono maggiori risorse di calcolo, ma sono più accurati.

Path Loss

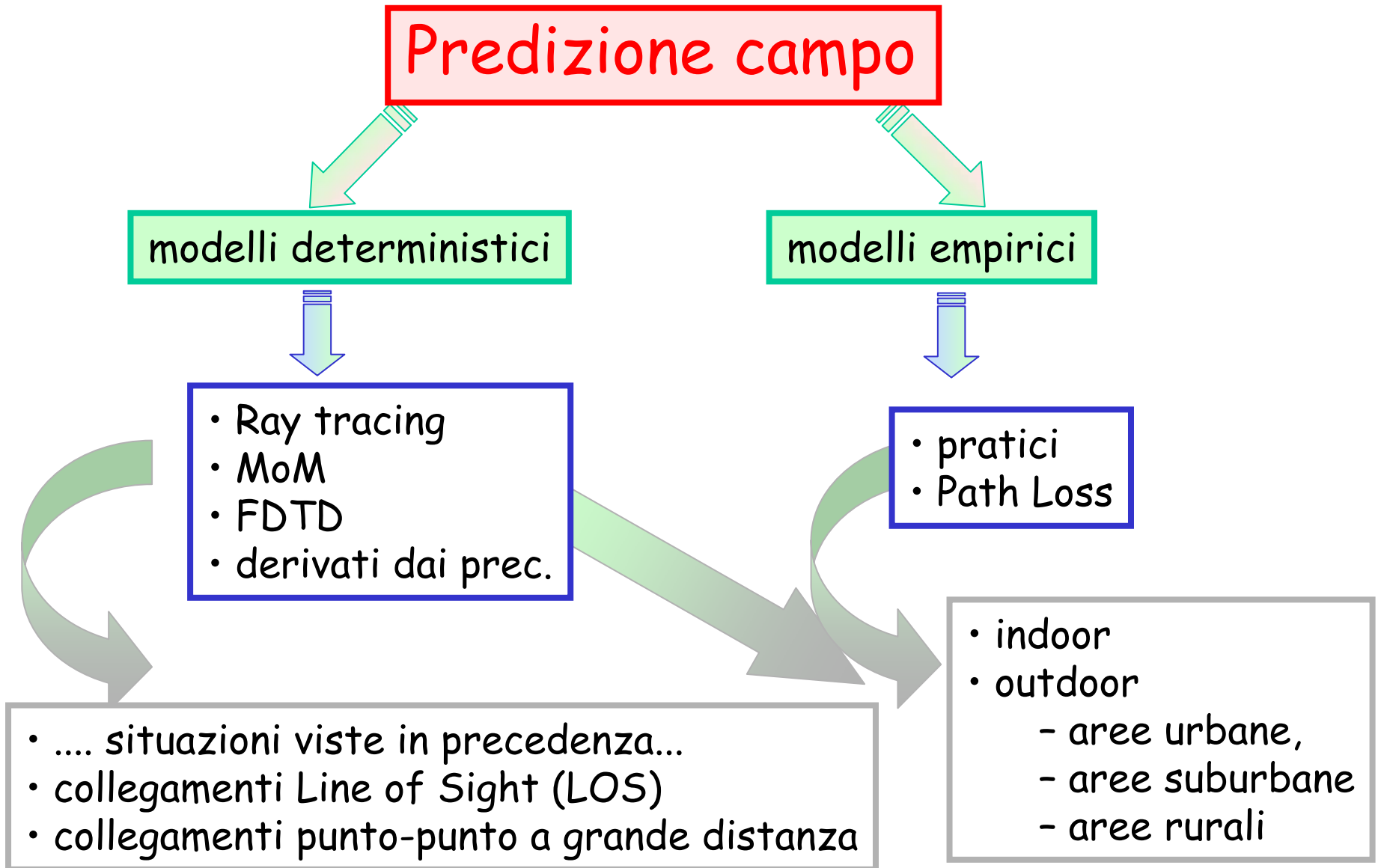
- Il path loss è definito, in dB, come la differenza tra la potenza trasmessa e quella ricevuta
(→ lineare è un rapporto...)

$$PL = \frac{P_T}{P_R}$$

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R} = 10 \log_{10} P_T - 10 \log_{10} P_R$$

- Il path loss in lineare è sempre una quantità maggiore di 1
(→ >0 dB)
- più è grande il path loss, minore è la potenza ricevuta

SCHEMA



Modelli deterministici

- Dei modelli deterministici fa parte il metodo di ray-tracing, così come il Metodo dei Momenti e le Differenze finite nel dominio del tempo.
- MoM ed FDTD vengono in genere usati per caratterizzare situazioni particolari e limitate nello spazio, come la distribuzione del campo in prossimità delle antenne (campo vicino) o in ambienti ristretti (stanze).
- Il ray-tracing è quello più usato sia in ambienti indoor che outdoor.

SCHEMA

Predizione campo

modelli deterministici

modelli empirici

- Ray tracing
- MoM
- FDTD
- derivati dai prec.

- pratici
- Path Loss

- ... situazioni viste in precedenza
- collegamenti Line of Sight (LOS)
- collegamenti punto punto a grande distanza

- indoor
- outdoor
 - aree urbane,
 - aree suburbane
 - aree rurali

Modelli deterministici

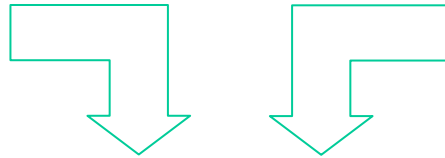
- Il ray-tracing è quello più usato sia in ambienti indoor che outdoor.
- Vi sono tuttavia molte situazioni in cui il ray-tracing può essere utilizzato in modo semplificato, come nell'analisi di collegamenti
 - in visibilità (LOS);
 - punto-punto in cui il maggior contributo è dato dal raggio LOS + raggio riflesso (modello a due raggi);
 - punto-punto in cui il collegamento può essere rappresentato tramite un unico, semplice meccanismo di diffrazione legato a colline o a singoli edifici (modello diffrazione a lama di coltello)

Collegamento LOS

- Il collegamento LOS (line of sight) rappresenta una idealizzazione che può essere effettivamente utilizzata solo nei sistemi di comunicazione satellitari, in collegamenti radio su brevi distanze o per collegamenti terrestri con propagazione troposferica o ionosferica.
- La formula che si usa è comunque la base di tutti i modelli empirici di predizione del campo (*formula di Friis*).
- La potenza ricevuta (P_R) in un collegamento LOS in spazio libero da un ricevitore con guadagno G_R posto a distanza R da un trasmettitore con guadagno G_T alimentato con una potenza P_T , è data da

densità potenza
trasmessa a distanza R

$$S[W/m^2] = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2}$$



potenza ricevuta

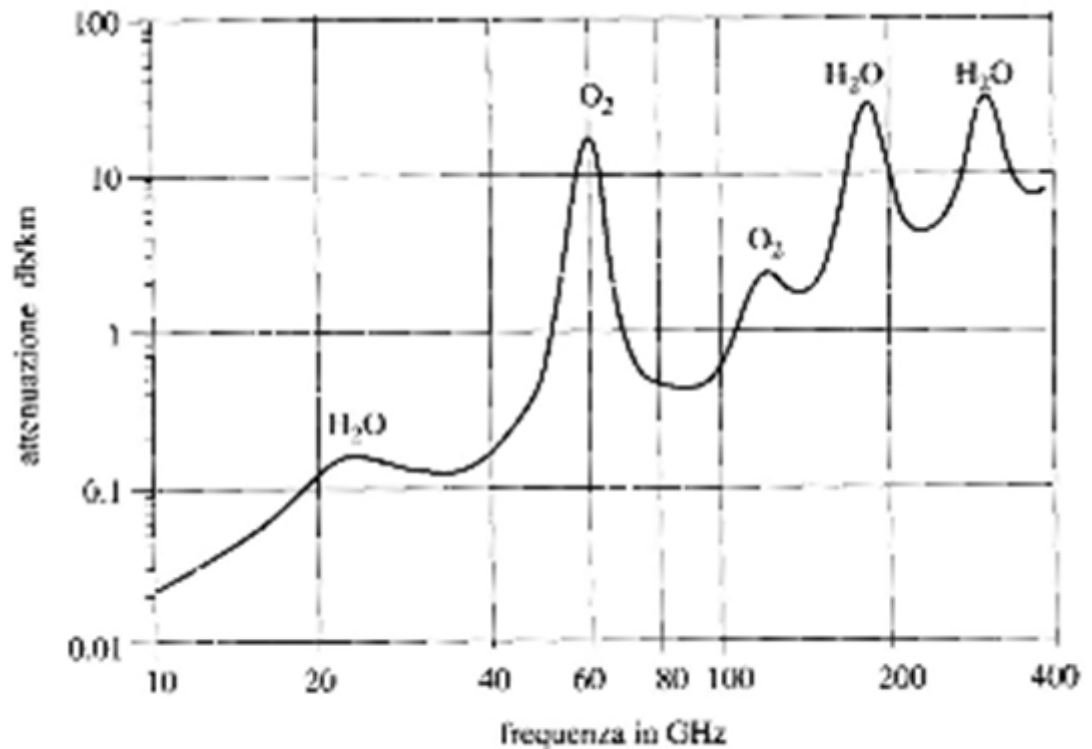
$$P_R[W] = S A_{eff} \eta = S \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R$$

$$P_R[W] = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2}$$

LOS: Attenuazione atmosferica

- Se si considerano anche le ulteriori possibili perdite nel collegamento quali l'attenuazione del campo per l'assorbimento atmosferico, si deve inserire un ulteriore termine L , ottenendo:

$$P_R [W] = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2 L}$$



Attenuazione atmosferica al livello del mare

LOS: Path Loss

- Il path loss è definito, in dB, come la differenza tra la potenza trasmessa e quella ricevuta
(→ lineare è un rapporto...)

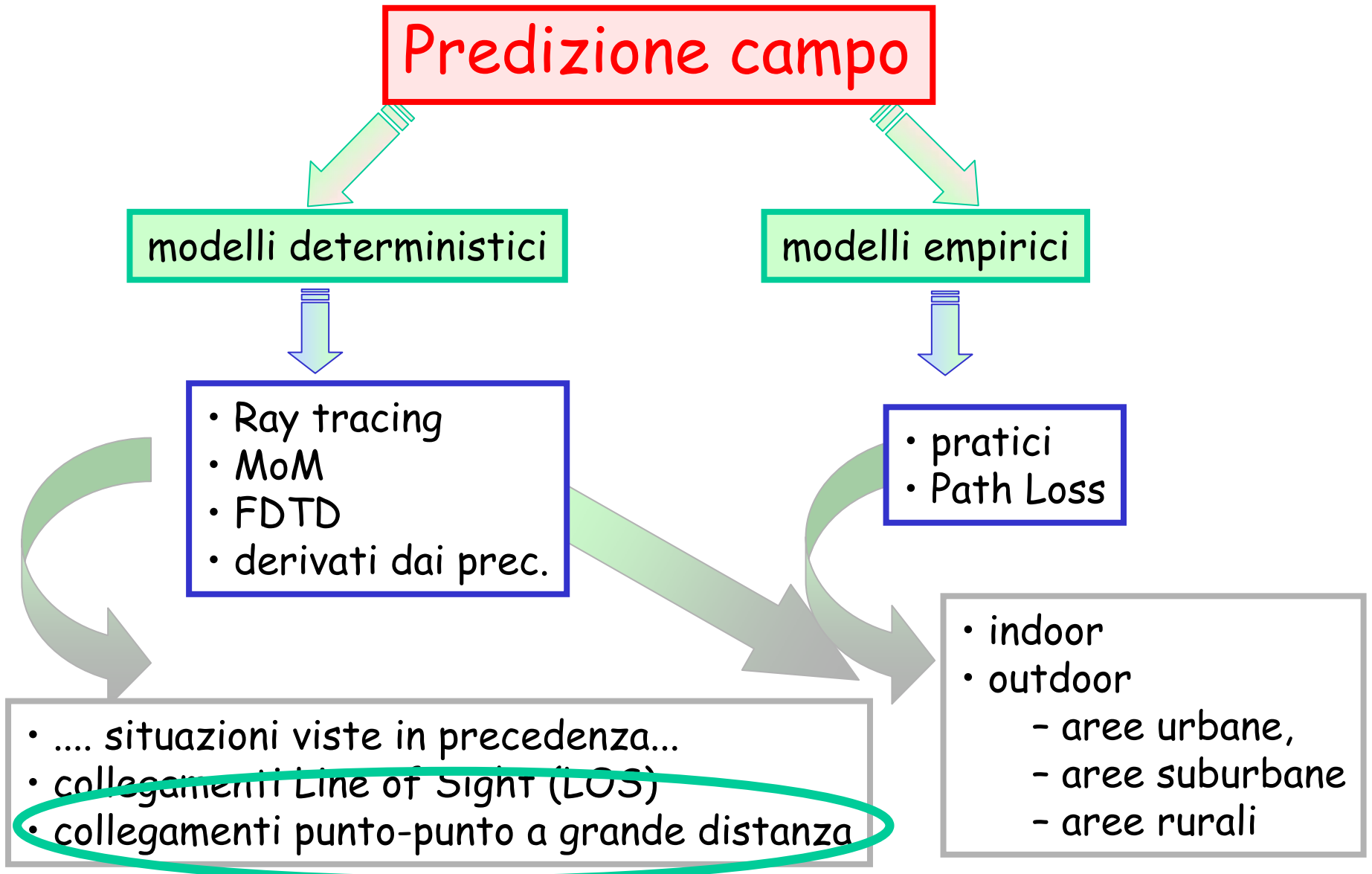
$$PL = \frac{P_T}{P_R} = \frac{(4\pi)^2}{G_T G_R \lambda^2} R^2 L$$

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R} = 10 \log_{10} \frac{(4\pi)^2 R^2 L}{G_T G_R \lambda^2}$$

Il path loss evidenzia come la potenza ricevuta decade con una legge logaritmica in funzione dalla distanza tra antenna trasmittente e ricevente.

La potenza ricevuta decade con andamento di 20 dB/decade con R

SCHEMA



Collegamento punto-punto grande distanza

- Si può sempre usare l'approccio a raggi, ma poiché questi collegamenti avvengono a freq dell'ordine del MHz (LF..) sono anche altri i fenomeni che intervengono e che devono essere considerati, quali la presenza dell'atmosfera, della curvatura terrestre...
- La propagazione avviene per onda "di terra", costituita sia dall'onda diretta, quella riflessa dal terreno e quella superficiale che si propaga lungo la superficie di separazione tra terra e aria.
- Se il collegamento è realizzato utilizzando solo l'onda diretta, questa può propagarsi negli strati alti dell'atmosfera al fine di superare il limite dell'orizzonte fisico. Si hanno i collegamenti in troposfera e in ionosfera;
- Se è realizzato in prossimità della superficie terrestre, si possono avere sia l'onda diretta che quella riflessa dal terreno (modello a due raggi)
- In tutti i casi l'onda superficiale se non si attenua sufficientemente può provocare interferenza...

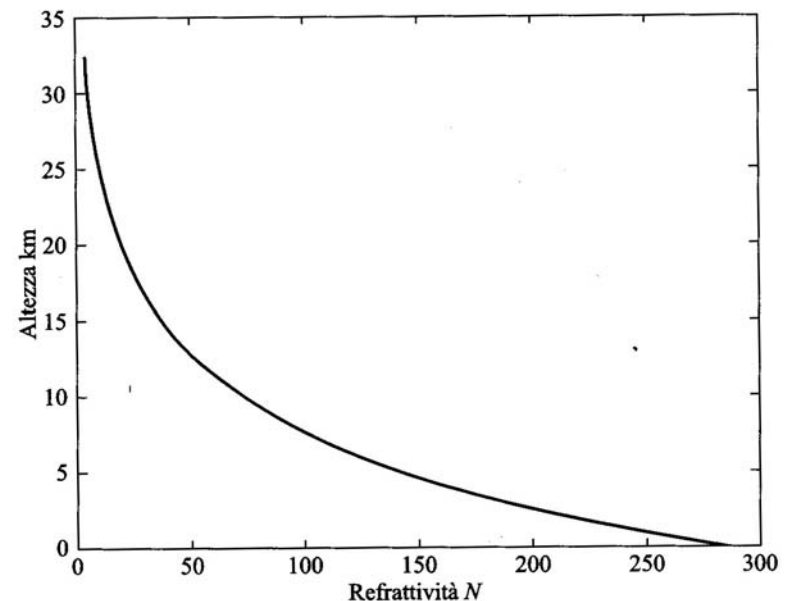
Collegamento diretto in troposfera

- TROPOSFERA: è per definizione quella parte dell'atmosfera in cui i gas non sono ionizzati dalla radiazione solare. Sono pertanto gli strati inferiori dell'atmosfera fino a circa 30 km.
- Collegamenti LOS in troposfera ($f > 30$ MHz) evitano l'onda di superficie, pertanto le antenne sono poste in alto e sono direttive.
- Le proprietà dielettriche della troposfera ($\rightarrow \epsilon$, costante dielettrica $\rightarrow n$, indice di rifrazione) dipendono dalla pressione e dalla temperatura. In particolare, n varia con l'altezza dal suolo, diminuendo per altezze maggiori. Ma si mantiene sempre maggiore di 1 (e prossimo ad 1). Pertanto, n viene espresso come:

$$n - 1 = (n_0 - 1)e^{-\frac{h}{h_1}}$$

al livello del mare $\quad$ costante, $= 7.3$ km

$N = (n - 1)10^6$ Refrattività

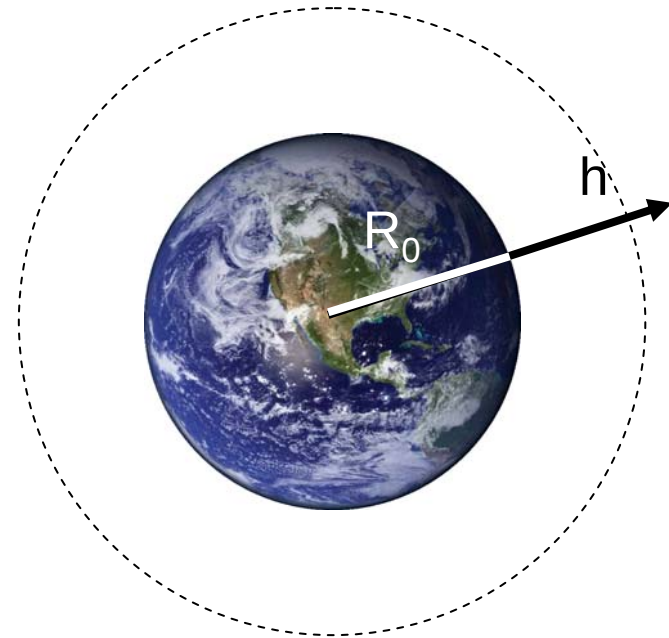


Collegamento diretto in troposfera

$$n - 1 = (n_0 - 1)e^{-\frac{h}{h_1}}$$

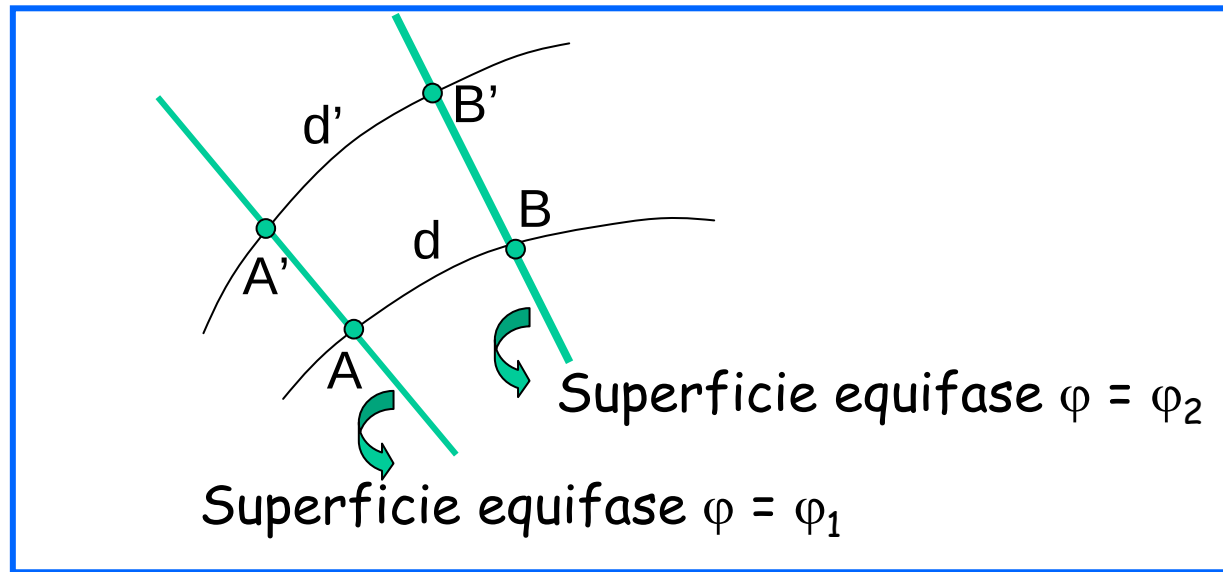
L'indice di rifrazione quindi (in condizioni medie) dipende solo dall'altezza dal suolo, con una legge di tipo decrescente (atmosfera standard)

L'insieme terra-primi strati dell'atmosfera si può quindi rappresentare come un mezzo a simmetria sferica (le proprietà dipendono solo dalla distanza dal centro della terra...)



Questo ovviamente influenza la legge di propagazione del campo....

Incurvamento raggio



Percorso lungo il raggio tra A e B: $\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi = \beta d$

Percorso lungo il raggio tra A' e B': $\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi = \beta' d'$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi = \beta d = \beta' d'$$



Incurvamento raggio

$$d = \rho \cdot \Delta\alpha$$



$$d' = (\rho + d\rho) \cdot \Delta\alpha$$



$$\Delta\varphi = \beta d = \beta' d'$$

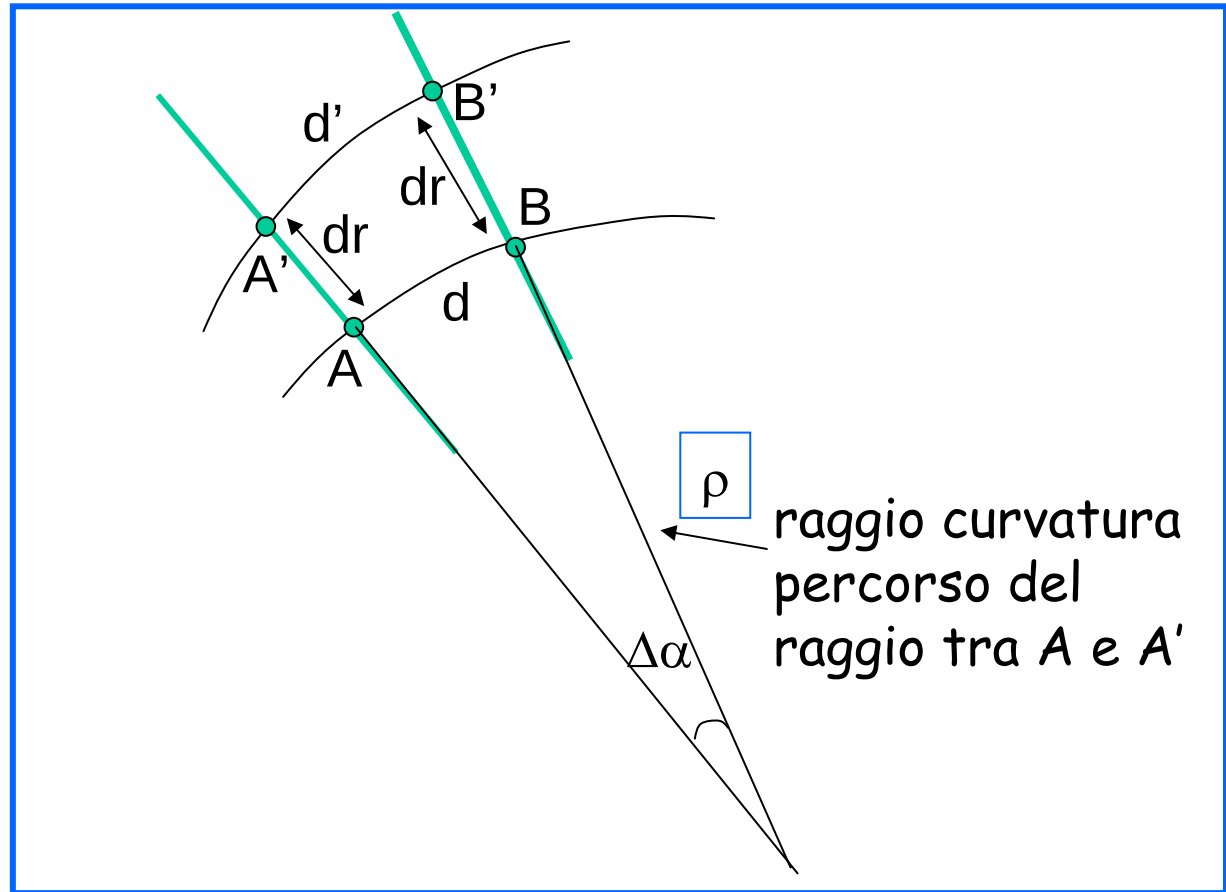


$$\beta \cdot \rho \cdot \Delta\alpha = \beta' \cdot (\rho + d\rho) \cdot \Delta\alpha$$



$$\beta_0 \cdot n \cdot \rho = \beta_0 \cdot n' \cdot (\rho + d\rho)$$

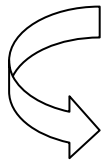
$$n' = n + dn$$



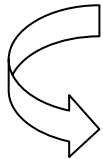
Legge incurvamento raggio

$$\beta_0 \cdot n \cdot \rho = \beta_0 \cdot n' \cdot (\rho + d\rho) \quad \text{con} \quad n' = n + dn$$

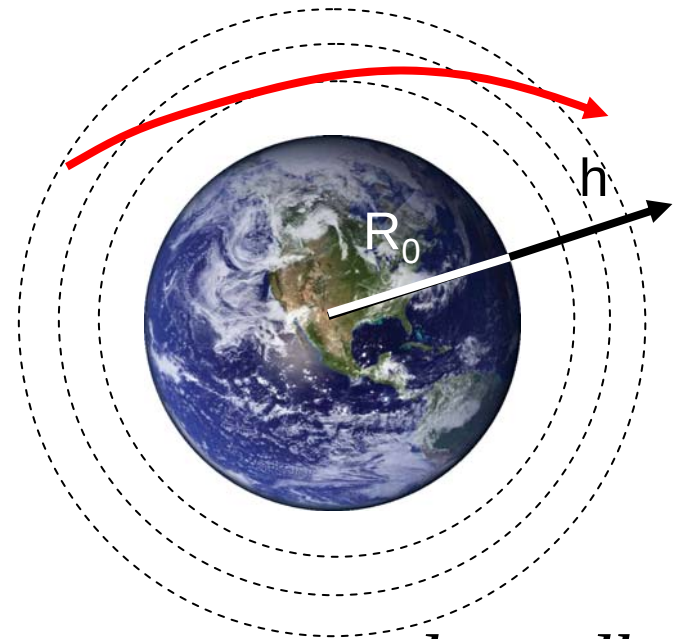
$$n \cdot \rho = (n + dn) \cdot (\rho + d\rho) \quad \text{trascurando gli infinitesimi del secondo ordine...}$$



$$0 = n \cdot d\rho + \rho \cdot dn$$



$$\rho = - \frac{n}{\left(\frac{dn}{d\rho} \right)}$$



referendo alla superficie terrestre il raggio di curvatura, $d\rho = dh$

inoltre $n \cong 1$

LOS in troposfera

$$\rho = \frac{1}{-\frac{dn}{dh}}$$

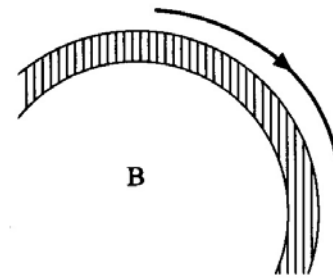
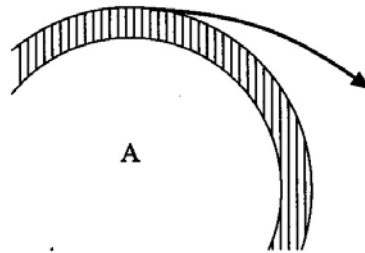
$$\frac{dn}{dh} =$$

$$= 0 \rightarrow \rho = \infty$$

$$> 0 \rightarrow \rho < 0$$

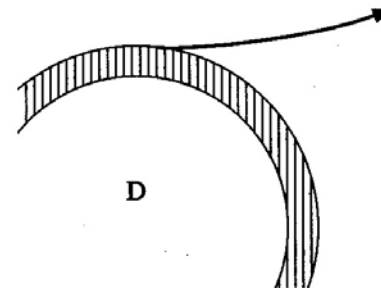
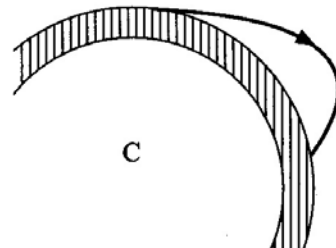
$$< 0 \rightarrow \rho > 0$$

Atmosfera
standard, il raggio
si incurva verso il
basso



$$\rho < R_{\text{terra}}$$

super-rifrazione

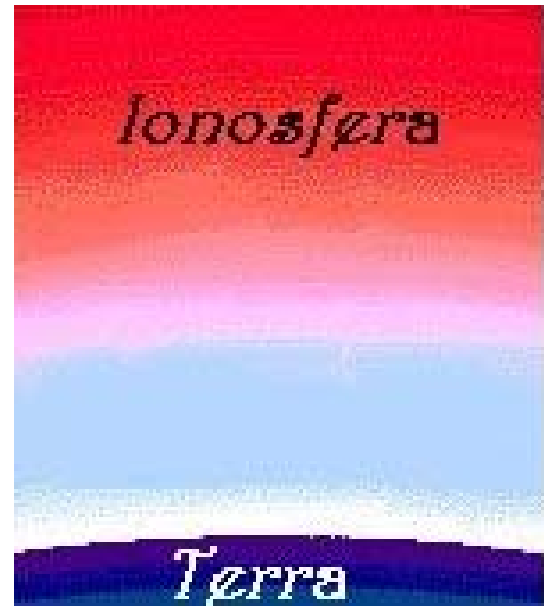


$$\rho > R_{\text{terra}}$$

sub-rifrazione

Collegamento diretto in ionosfera

- IONOSFERA: è l'alta atmosfera (60 - 400 km) in cui le radiazioni solari ionizzano i gas atmosferici. Pertanto ci sono ioni ed elettroni (i.e. cariche) liberi di muoversi. Spesso, pertanto, si parla di *plasma*.
- La conducibilità della ionosfera è prossima allo 0, mentre per la costante dielettrica si utilizza un modello a strati con la quota.



Plasma

Con il termine **plasma** si indica un gas parzialmente o totalmente ionizzato:

- all'equilibrio termico, elettroni e ioni positivi si neutralizzano reciprocamente così che la carica netta risultante è nulla;
- nella ionosfera, valori tipici della densità elettronica N_0 in condizioni di equilibrio sono 10^8 - 10^{12} m^{-3} , mentre la temperatura è intorno a 10^3 K ;
- se l'agente ionizzante (temperatura, radiazione solare..) non varia nel tempo, la densità elettronica N_0 è indipendente dal tempo e il mezzo si comporta come un mezzo stazionario...

Se nel mezzo è presente un campo elettromagnetico oscillante, elettroni e ioni si muovono sotto l'azione della forza elettromagnetica, della pressione e dell'attrito...; se la temperatura è sufficientemente bassa, la pressione ha un effetto trascurabile rispetto al campo elettromagnetico

 **Plasma freddo**

se la frequenza del campo è sufficientemente elevata (1 MHz ndr...), essendo la massa degli ioni 1800 volte maggiore di quella degli elettroni, si può assumere di avere solo il moto degli elettroni

 **Plasma ad un componente**

Proprietà dielettriche ionosfera

Velocità elettrone in un punto $\underline{r}$ $\underline{v} = \underline{v}(\underline{r}, t)$

Densità elettronica in un punto $\underline{r}$ $N = N(\underline{r}, t) = \underbrace{N_0}_{\text{equilibrio}} + \underbrace{n(\underline{r}, t)}_{\text{causa campo elettromagnetico}}$

In un volume ΔV intorno a $\underline{r}_0$ $\Delta q = -q_e N(\underline{r}_0, t) \Delta V$ carica

$\Delta m = m_e N(\underline{r}_0, t) \Delta V$ massa

Legge di Newton: $m \underline{a} = \underline{F}$


$$\Delta m \frac{d\underline{v}}{dt} = \Delta q (\underline{\mathcal{E}} + \underline{v} \times \underline{\mathcal{B}}) - \text{attrito}$$

Proprietà dielettriche ionosfera - v

$$\Delta m \frac{d\underline{v}}{dt} = \Delta q (\underline{\mathcal{E}} + \underline{v} \times \underline{\mathcal{B}}) - \text{attrito}$$

$$\nu \Delta m \underline{v}(r_0, t)$$

Nella ionosfera il campo si può considerare sufficientemente debole per cui spostamento e velocità degli elettroni sono tali da poter trascurare la variazione della posizione del volume con il tempo ($r_0(t)=r_0$) e i prodotti di $\underline{\mathcal{E}}$, $\underline{\mathcal{B}}$ e $\underline{v}$

$$\Delta m \frac{d\underline{v}}{dt} = \Delta q \underline{\mathcal{E}} - \nu \Delta m \underline{v}$$

$$\frac{d\underline{v}}{dt} = \frac{\Delta q}{\Delta m} \underline{\mathcal{E}} - \nu \underline{v}$$

$$\frac{d\underline{v}}{dt} = -\frac{q_e}{m_e} \underline{\mathcal{E}} - \nu \underline{v}$$

Proprietà dielettriche ionosfera - conduzione

$$\frac{d\underline{v}}{dt} = -\frac{q_e}{m_e} \underline{\mathcal{E}} - \nu \underline{v}$$

se multiplico per $-q_e N_0$

essendo la densità di corrente data da

$$\underline{J}_c = -q_e N \underline{v}$$

ho

$$\frac{d\underline{J}_c}{dt} = +\frac{q_e^2 N}{m_e} \underline{\mathcal{E}} - \nu \underline{J}_c$$

NB: si è portato $N(\underline{r}_0, t)$ sotto il segno di derivata.

OK nell'ipotesi che n non dipenda dal tempo ma solo dal punto...

$$\frac{d\underline{J}_c}{dt} + \nu \underline{J}_c = \omega_p^2 \varepsilon_0 \underline{\mathcal{E}}$$

con

$$\omega_p = q_e \sqrt{\frac{N}{m_e \varepsilon_0}}$$

Frequenza di plasma

trasformando con Fourier

$$(j\omega + \nu) \underline{J}_c = \omega_p^2 \varepsilon_0 \underline{E}$$

$$\underline{J}_c = \frac{\omega_p^2 \varepsilon_0}{(j\omega + \nu)} \underline{E}$$

Proprietà dielettriche ionosfera

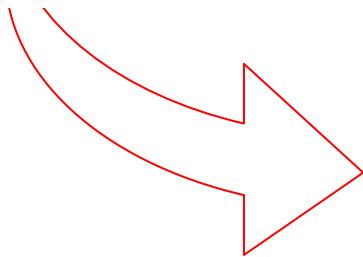
Per la parte dielettrica, le cariche sono libere, per cui non ci sono effetti di polarizzazione

$$\underline{\mathcal{D}} = \varepsilon_0 \underline{\mathcal{E}} \quad \xrightarrow{\mathcal{F}} \quad \underline{D} = \varepsilon_0 \underline{E}$$

Inserendo le due relazioni della seconda equazione di Maxwell,


$$\nabla \times \underline{H} = j\omega \underline{D} + \underline{J}$$

$$\nabla \times \underline{H} = j\omega \varepsilon_0 \underline{E} + \frac{\omega_p^2 \varepsilon_0}{\nu + j\omega} \underline{E} = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_c$$



$$\varepsilon_c = 1 + \frac{\omega_p^2}{j\omega(\nu + j\omega)} = 1 + \frac{\omega_p^2}{-\omega^2 + j\omega\nu}$$

Proprietà dielettriche ionosfera

$$\varepsilon_c = 1 + \frac{\omega_p^2}{j\omega(\nu + j\omega)} = 1 + \frac{\omega_p^2}{-\omega^2 + j\omega\nu}$$

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - j\omega\nu} = 1 - \frac{\omega_p^2(\omega^2 + j\omega\nu)}{(\omega^2 - j\omega\nu)(\omega^2 + j\omega\nu)} =$$

$$= 1 - \frac{\omega_p^2\omega^2}{\omega^4 + \omega^2\nu^2} + j\omega \frac{\omega_p^2\nu}{\omega^4 + \omega^2\nu^2}$$

$$= \varepsilon' - j\varepsilon''$$

$$\varepsilon' = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}$$

$$\varepsilon'' = \omega \frac{\omega_p^2\nu}{\omega^4 + \omega^2\nu^2}$$

Proprietà dielettriche ionosfera

$$\varepsilon' = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}$$

Generalmente ν è molto piccolo (plasma senza collisioni), pertanto

$$\varepsilon'' = \omega \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^4 + \omega^2 \nu^2}$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega^3 + \omega \nu^2} \cong 0$$

Allora la costante dielettrica del plasma diventa reale e

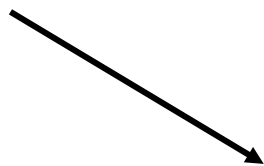
$$\varepsilon' \cong 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$



$$\omega < \omega_p \Rightarrow \varepsilon' < 0$$



$$\omega = \omega_p \Rightarrow \varepsilon' = 0$$



$$\omega > \omega_p \Rightarrow \varepsilon' > 0$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow \varepsilon' \rightarrow 1$$

in questo caso non si è in presenza di ionizzazione



Propagazione di un'onda piana nel plasma

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon}$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)}$$

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)}$$

$$\omega < \omega_p \Rightarrow$$

$$k = j\alpha; \zeta = j\zeta_R$$

$$\omega = \omega_p \Rightarrow$$

$$k = 0; \zeta \rightarrow \infty$$

$$\omega > \omega_p \Rightarrow$$

$$k = \beta; \zeta = \zeta_R$$

Frequenza campo minore frequenza di plasma

$$\omega < \omega_p \Rightarrow k = j\alpha; \zeta = j\zeta_R$$

Il campo oscilla ovunque con la stessa fase.

L'ampiezza decresce esponenzialmente.

Campo elettrico e campo magnetico sono sfasati di $\pi/2$ (ζ è immaginaria):
quando il campo E è massimo, H è nullo, e viceversa

$$\underline{S} = \frac{1}{2} \underline{E} \times \underline{H} = \frac{1}{2\zeta} |\underline{E}|^2$$

$$\text{Re}\{\underline{S} \cdot \underline{k}_0\} = 0$$

quindi non c'è trasmissione di energia

L'onda è stazionaria ed evanescente

Frequenza campo uguale frequenza di plasma

$$\omega = \omega_p \Rightarrow k = 0; \zeta \rightarrow \infty$$

L'onda degenera in un campo $\underline{E}$ ovunque uguale ma oscillante nel tempo, e campo $\underline{H}$ nullo: quindi il campo $\underline{E}$ variabile non genera $\underline{H}$

$$\nabla \times \underline{E} = j\omega\mu\underline{H}$$

nullo

$$\nabla \times \underline{H} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon'\underline{E}$$

nullo ← nullo diverso da 0

Questo può succedere perché è nullo il secondo membro della seconda equazione di Maxwell

$$\varepsilon_0\varepsilon'\underline{E}$$

che rappresenta la somma delle correnti di conduzione e di spostamento. Pertanto, la corrente di conduzione è uguale e opposta a quella di spostamento

Frequenza campo maggiore frequenza di plasma

$$\omega > \omega_p \Rightarrow$$

$$k = \beta; \zeta = \zeta_R$$

L'onda si propaga senza attenuazione...

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)}$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)}}$$

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)}} = \frac{c}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)}} > c$$

Ionosfera, plasma freddo

....nella ionosfera, valori tipici della densità elettronica N_0 in condizioni di equilibrio sono 10^8 - 10^{12}m^{-3} , mentre la temperatura è intorno a 10^3 K.....

Frequenza
di plasma

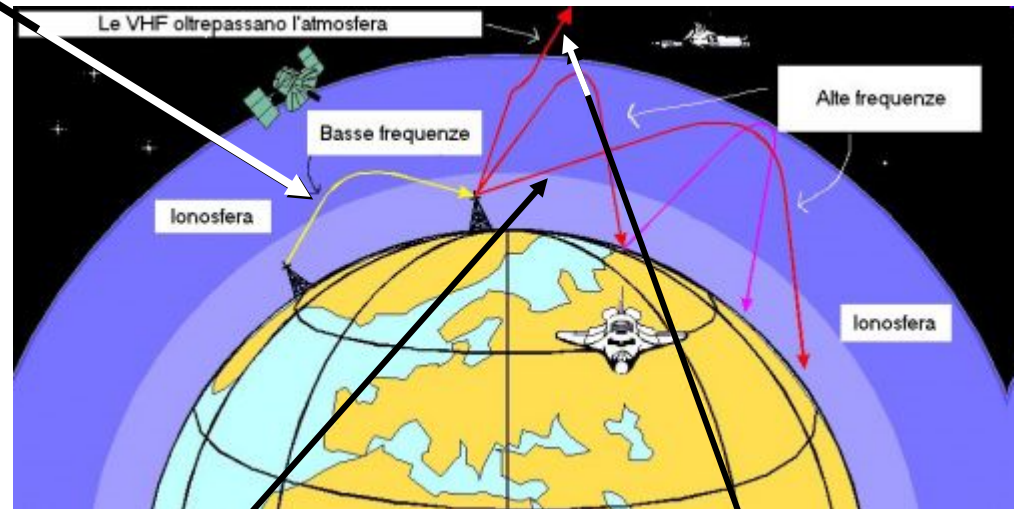
$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{q_e}{2\pi} \sqrt{\frac{N}{m_e \epsilon_0}}$$

$$f_p = \frac{1.6 \cdot 10^{-19}}{2\pi} \sqrt{\frac{10^{12}}{0.911 \cdot 10^{-30} \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}}} \approx 8 \cdot 10^6$$

Collegamenti in ionosfera

$$f < 10\text{MHz} \Rightarrow$$

....la propagazione viene impedita, si hanno onde riflesse verso terra, e quindi propagazione oltre l'orizzonte



$$f > 10\text{MHz} \Rightarrow$$

....propagazione in un mezzo con

$$\varepsilon' \cong 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

$$f \approx \text{microonde}$$

....effetto ionosfera non si sente e quindi si può fare un collegamento radio con lo spazio...

Collegamento diretto in ionosfera

$f > 10\text{MHz} \Rightarrow$ propagazione in un mezzo con $\varepsilon'' \cong 0$ $\varepsilon' \cong 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$ $\leftarrow$ dipende dalla densità elettronica che varia con la quota

- La conducibilità della ionosfera è prossima allo 0, mentre per la costante dielettrica si utilizza un modello a strati con la quota.
- Pertanto, tra uno strato e l'altro non c'è quasi riflessione, ma c'è un incurvamento del raggio secondo la legge di Snell della rifrazione:

tra strato 0 e 1...

$$\sqrt{\varepsilon_0} \sin \theta_0 = \sqrt{\varepsilon_1} \sin \theta_1$$

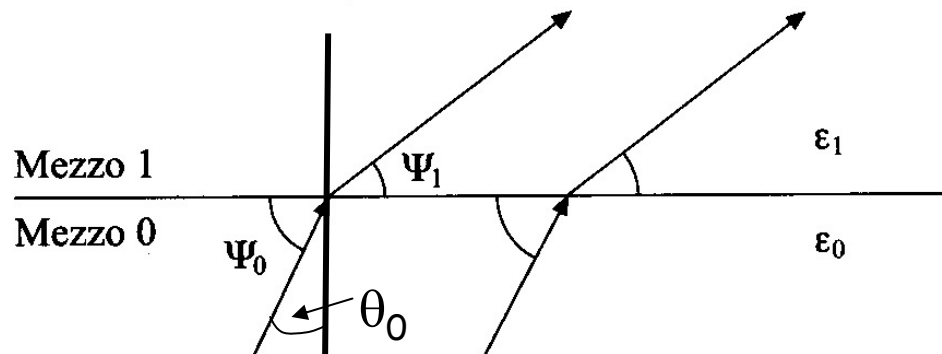
$$\sqrt{\varepsilon_0} \cos \psi_0 = \sqrt{\varepsilon_1} \cos \psi_1$$

allo strato successivo....

tra strato 1 e 2...

$$\sqrt{\varepsilon_1} \cos \psi_1 = \sqrt{\varepsilon_2} \cos \psi_2$$

$$\sqrt{\varepsilon_0} \cos \psi_0 = \sqrt{\varepsilon_2} \cos \psi_2$$



LOS in ionosfera

All' i-esimo strato,

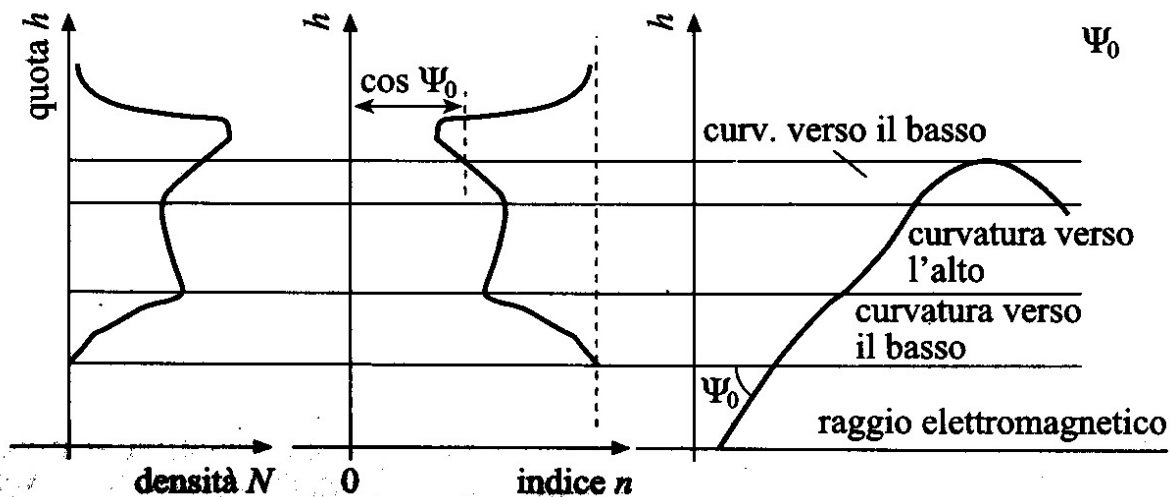
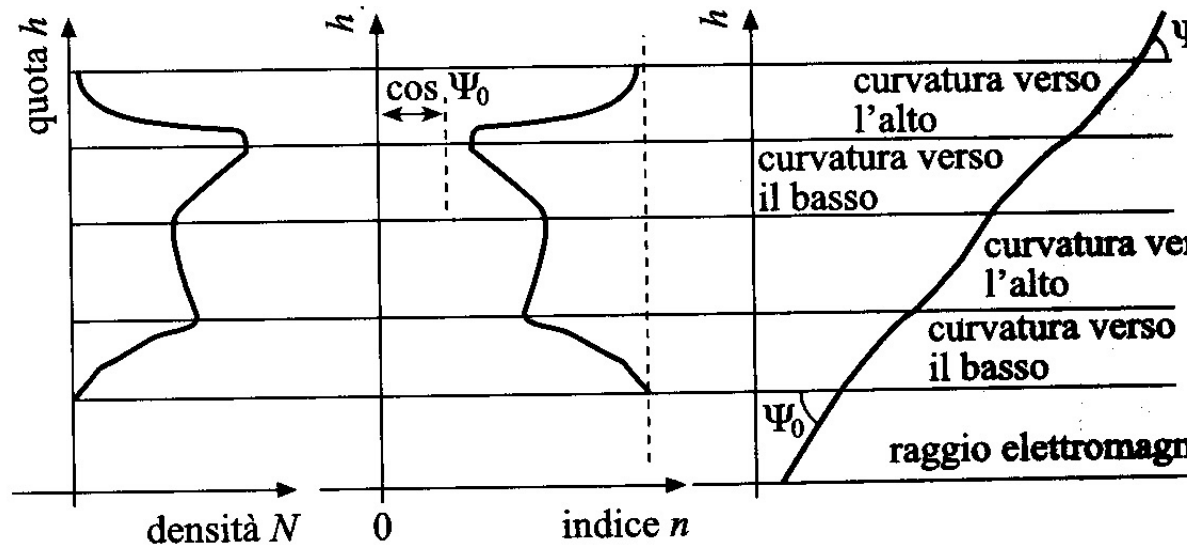
$$\sqrt{\varepsilon_0} \cos \psi_0 = \sqrt{\varepsilon_i} \cos \psi_i$$

$$\cos \psi_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0}} \cos \psi_i = n_i \cos \psi_i$$

- Allora l'angolo di inclinazione dell'onda dipende esclusivamente dall'indice di rifrazione finale (n_i) e da Ψ_0 (angolo di elevazione), angolo con cui il raggio entra nella ionosfera.
- Per un raggio che penetra nella ionosfera con angolo di elevazione Ψ_0 , se lo strato successivo ha un indice di rifrazione maggiore di 1, allora il raggio si incurva verso l'alto, altrimenti verso la terra (si incurva verso la regione con indice di rifrazione maggiore).
- In alcuni casi, l'incurvamento del raggio verso la terra è tale da rimandare il raggio verso la terra.

$$\boxed{\psi_i = 0} \longrightarrow \boxed{\cos \psi_i = 1} \longrightarrow \boxed{\cos \psi_0 = n_i}$$

LOS in ionosfera, condizioni di ritorno



Collegamenti LOS in ionosfera

- Con una "riflessione" si possono coprire distanze fino a 3500 km
- Collegamenti LOS in ionosfera si usano:
 - per LF ($f < 300$ kHz - onde lunghe):
 - penetrano poco nella ionosfera,
 - si attenuano proporzionalmente alla frequenza
 - la propagazione avviene per riflessioni multiple tra la ionosfera e la terra
 - per MF (300 kHz e 3 MHz - onde medie):
 - l'intervallo di frequenze realmente utile è sopra i 2 MHz, sotto ci sono grosse interferenze con l'onda di terra
 - per HF (3 MHz - 30 MHz - onde corte):
 - per collegamenti su grandi distanze, sfruttando più riflessioni tra ionosfera e terra;
 - impiegate in ambiti militari e per la radio-trasmissione a grande distanza (transnazionale).

Servizi LF, MF, HF

Nome	tipologia servizi civili o militari
VLF	Rete Omega dei sottomarini USA. Da sotto i 9 kHz finiscono le bande assegnate alle radio comunicazioni A 19,5 kHz prima stazione civile campione
LF	Radiofari; stazioni radio civili
MF	Stazioni aeronautiche e navigazione, stazioni internazionali di emergenza aeronautica, numerose stazioni radio civili internazionali (AM radio). Agenzie di stampa, radioamatori, stazioni Fax meteo, stazioni di tempo campione e tanto altro
HF	Numerose stazioni internazionali, utility (navigazione, aeronautica, bollettini meteo, stazioni campione, radioamatori, capitanerie di porto ecc...)
VHF	Trasmissioni forze dell'ordine, canali TV, ponti ripetitori, radioamatori, bollettini del mare

Collegamenti in ionosfera - radio OM

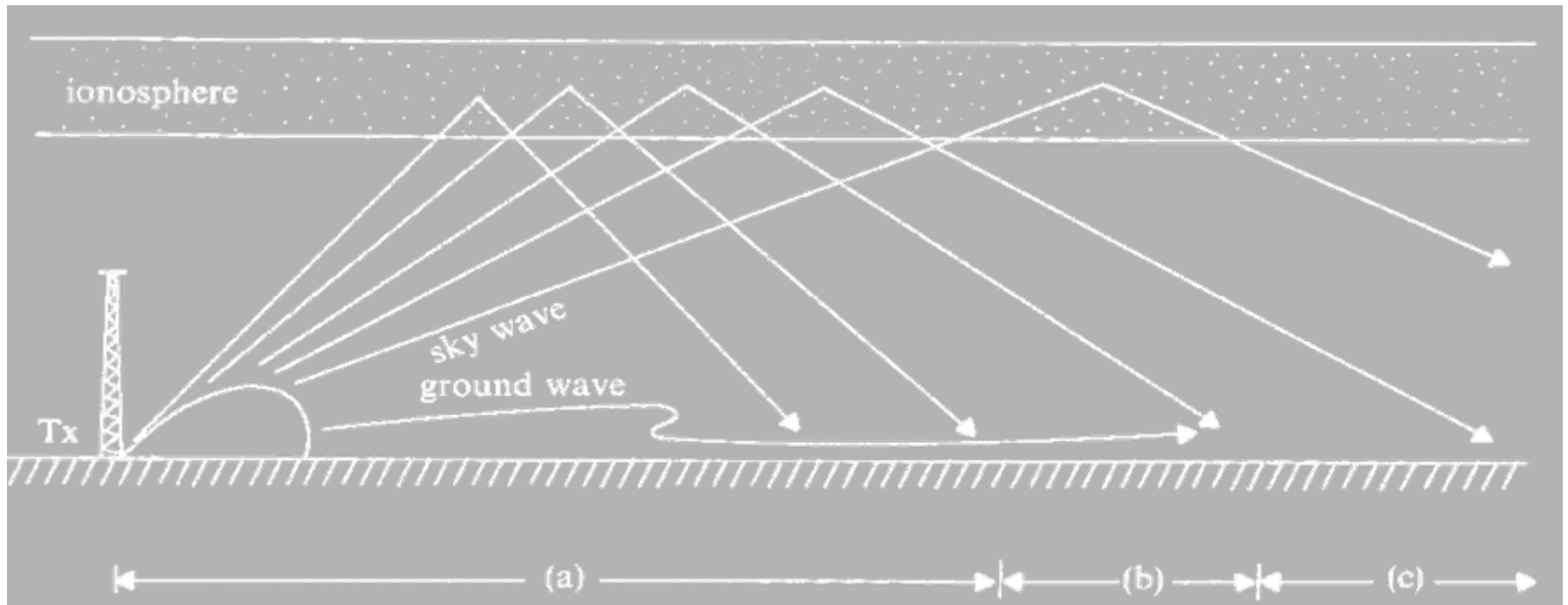
- la prima rete di radiodiffusione è stata realizzata **in onda media** tra gli anni 20 e 30
- l'intervallo di frequenza coperto dalla radiodiffusione in OM è: **0.5 -1.6 MHz**
- la rete OM impiega potenza da alcuni kW a centinaia di kW
- la rete OM per le sue caratteristiche di propagazione è adatta per servire capillarmente il territorio italiano



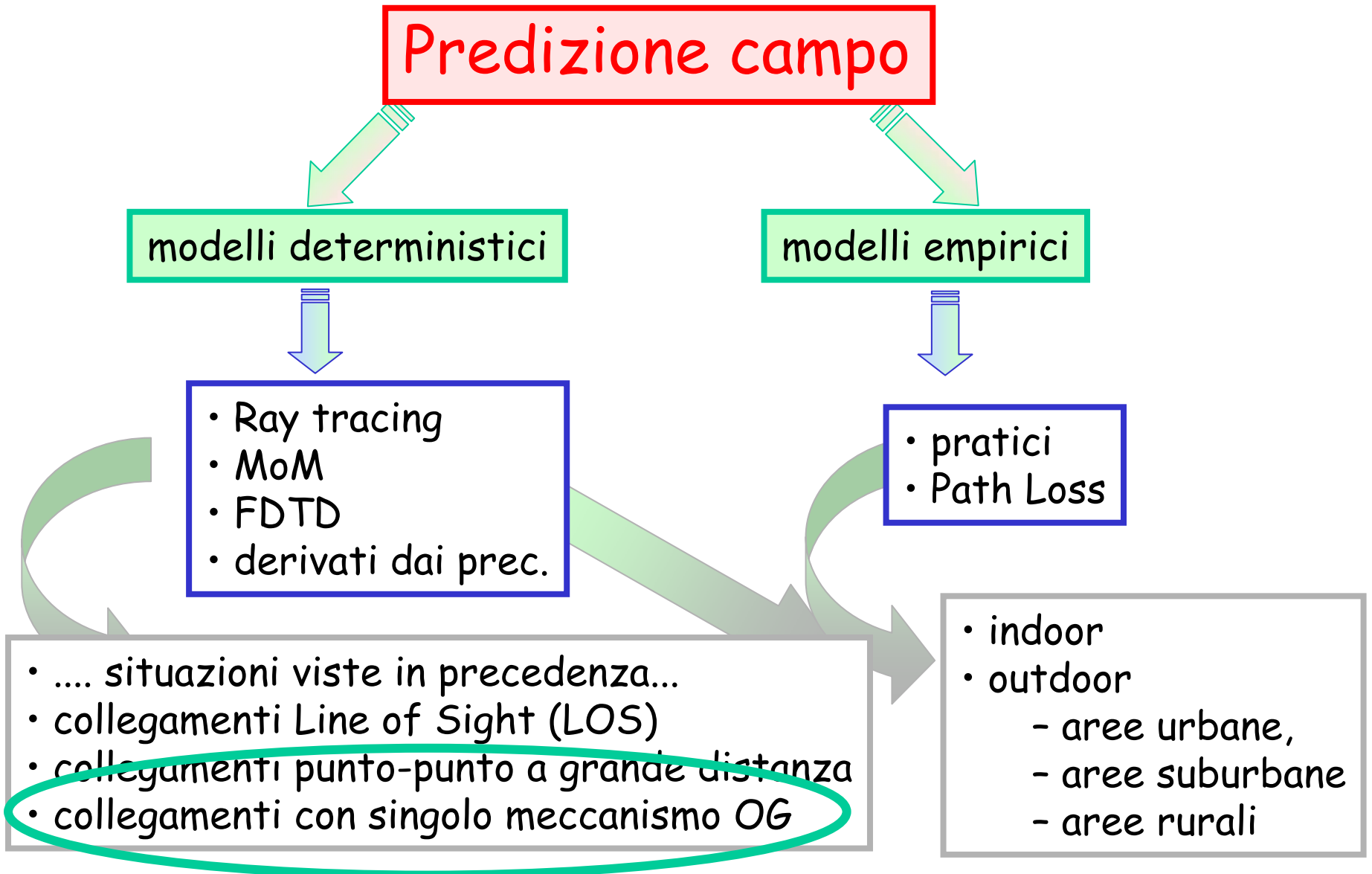
Antenna
trasmittente tipica
di un impianto OM

Collegamenti in ionosfera - radio OM

- La propagazione in OM avviene per onda di superficie o di terra
- nelle ore pomeridiane, serali e notturne l'OM si propaga anche per via ionosferica, raggiungendo distanze elevate (livello continentale)

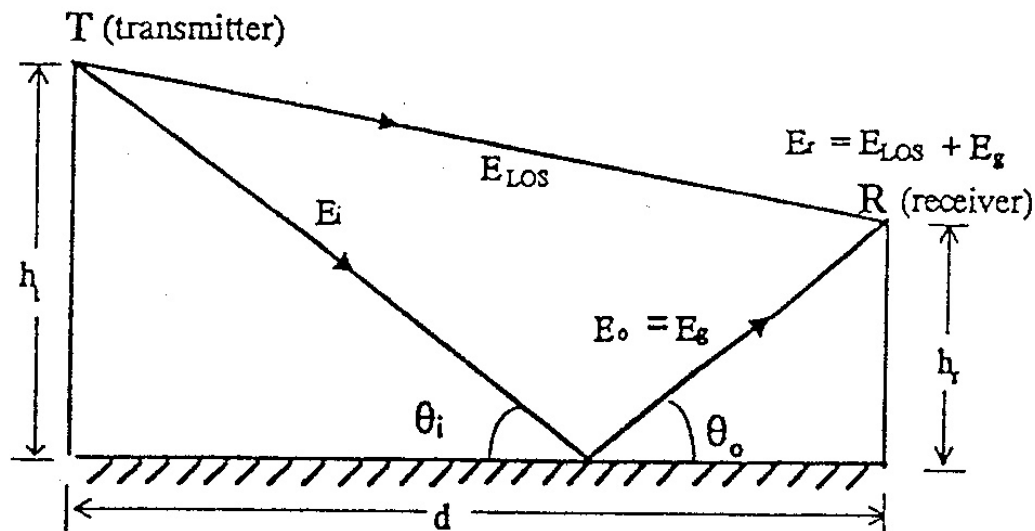


SCHEMA



Modello a due raggi

- Si basa sull'ottica geometrica, è valido se la lunghezza d'onda del campo è molto più piccola di ogni altra lunghezza presente
- considera solo il raggio diretto e quello riflesso
- se la distanza tra trasmettitore e ricevitore è dell'ordine della decina di km, la terra si può considerare piatta

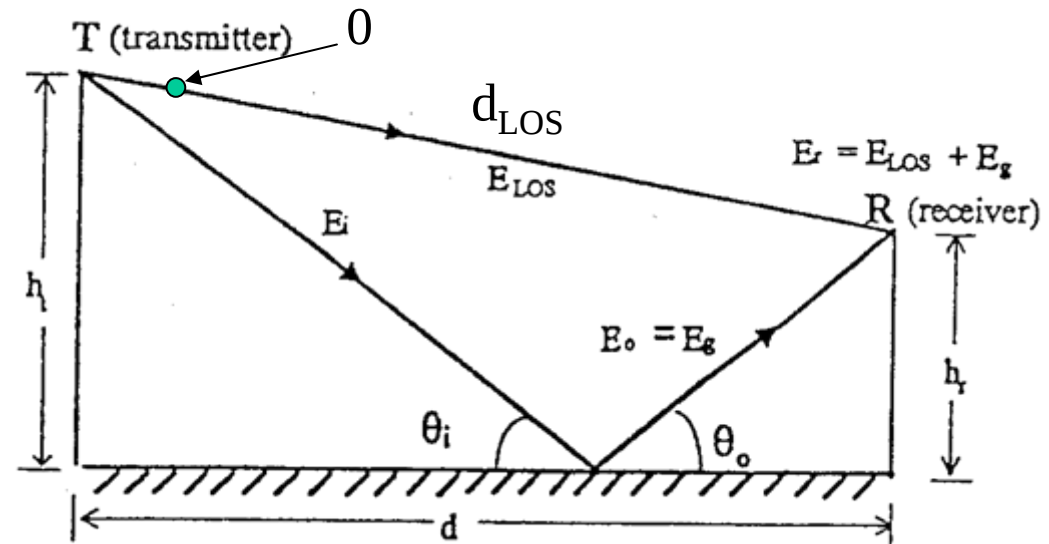


2 raggi: campo ricevuto

$$E_{LOS}(R) = E_0(0) \frac{d_0}{d_{LOS}} e^{-j\beta d_{LOS}}$$

$$E_g(R) = E_0(0) \Gamma \frac{d_0}{d_g} e^{-j\beta d_g}$$

$$E_{ric} = E_{LOS} + E_g$$



$$E_{ric}(R) = E_0(0) \frac{d_0}{d_{LOS}} e^{-j\beta d_{LOS}} \left[1 + \Gamma \frac{d_{LOS}}{d_g} e^{-j\beta(d_g - d_{LOS})} \right]$$

differenza percorso dei due raggi

2 raggi: campo ricevuto

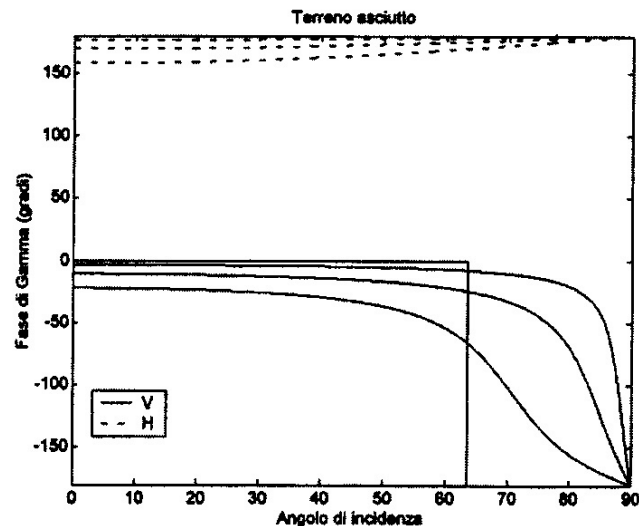
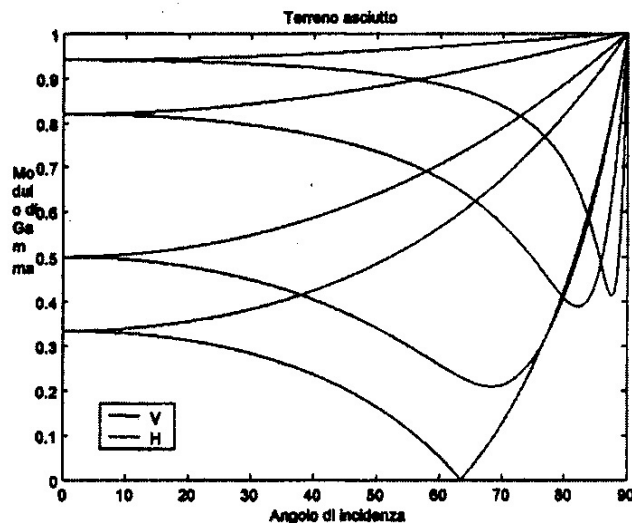
- se l'angolo di incidenza tende a 90° ($\theta_i \rightarrow 0$), e il campo elettrico è polarizzato linearmente (sia parallelo che ortogonale) allora il coefficiente di riflessione tende a -1

$$E_{ric} = E_{LOS}(d) \left[1 + \Gamma e^{-j\beta\Delta} \right] = E_{LOS}(d) \left[1 - e^{-j\beta\Delta} \right]$$

distanza antenne

non si considera differenza in ampiezza.....

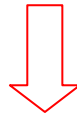
differenza percorso dei due raggi



2 raggi: campo ricevuto - 2

- il campo dipende dalla distanza come $1/d$, pertanto, prendendo a riferimento il valore del campo LOS ad una distanza d_0 dalla sorgente,

$$E_{ric} = E_{LOS}(d_0) \frac{d_0}{d} [1 - e^{-j\beta\Delta}]$$



$$|E_{ric}| = \sqrt{E_{LOS}^2(d_0) \frac{d_0^2}{d^2} |1 - \cos(\beta\Delta) + j\sin(\beta\Delta)|^2}$$

2 raggi: campo risultante

- sviluppando i termini sotto radice...

$$\begin{aligned} |1 - \cos(\beta\Delta) + j\sin(\beta\Delta)|^2 &= (1 - \cos(\beta\Delta))^2 + \sin^2(\beta\Delta) = \\ &= 1 + \cos^2(\beta\Delta) - 2\cos(\beta\Delta) + \sin^2(\beta\Delta) = 2(1 - \cos(\beta\Delta)) = \\ &= 4\sin^2\left(\frac{\beta\Delta}{2}\right) \end{aligned}$$

- per cui si ottiene:

$$|E_{ric}| = 2E_{LOS}(d_0) \frac{d_0}{d} \sin\left(\frac{\beta\Delta}{2}\right)$$

- e per grandi valori di d

$$|E_{ric}| \cong 2E_{LOS}(d_0) \frac{d_0}{d} \left(\frac{\beta\Delta}{2}\right)$$

2 raggi: campo risultante - 2

- manca da esplicitare Δ (differenza percorso).
- Il raggio diretto segue un percorso pari a

$$\sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} = d \sqrt{1 + \frac{(h_t - h_r)^2}{d^2}} \cong d \left[1 + \frac{1}{2} \frac{(h_t - h_r)^2}{d^2} \right]$$

- quello riflesso:

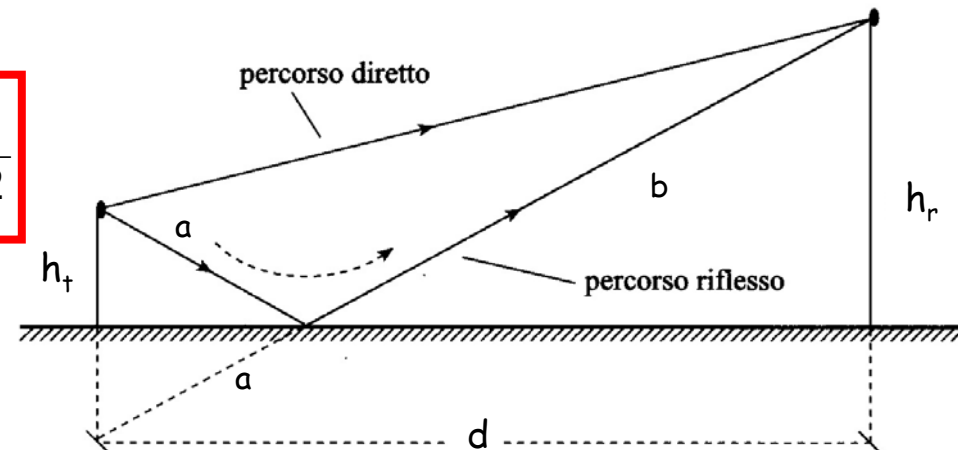
$$a + b = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} = d \sqrt{1 + \frac{(h_t + h_r)^2}{d^2}} \cong d \left[1 + \frac{1}{2} \frac{(h_t + h_r)^2}{d^2} \right]$$

- la differenza sarà

$$\Delta = d + \frac{1}{2} \frac{h_t^2 + 2h_t h_r + h_r^2}{d} - d - \frac{1}{2} \frac{h_t^2 - 2h_t h_r + h_r^2}{d} = \frac{2h_t h_r}{d}$$

- per il campo, allora

$$|E_{ric}| \cong 2E_{LOS}(d_0) \frac{d_0}{d} \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \propto \frac{1}{d^2}$$



2 raggi: path loss

- il campo ricevuto è legato al campo LOS con l'ulteriore fattore

$$\propto \frac{h_t h_r}{d^2}$$

- La potenza ricevuta varia come il quadrato del campo elettrico;
- seguirà, allora, una legge proporzionale a $1/d^4$ con la distanza, ovvero, considerando il path loss

$$P_R = P_T G_T G_R \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}$$

- in dB:

$$PL = -10 \log_{10} G_T - 10 \log_{10} G_R - 20 \log_{10} h_t - 20 \log_{10} h_r + 40 \log_{10} d$$

2 raggi: considerazioni

- il campo ricevuto è legato al campo LOS con l'ulteriore fattore

$$\propto \frac{h_t h_r}{d^2}$$

- Basta allora che una delle due antenne sia posta a terra che la differenza di percorso si annulla e si abbia un annullamento del campo. Questo spiega come mai le antenne per la ricezione della TV terrestre che funzionano in VHF o UHF debbano essere poste elevate dal suolo
- Nei collegamenti in ponte radio, sempre nelle gamme UHF o superiori, al variare dell'altezza dell'antenna ricevente si può osservare una fluttuazione del campo ricevuto dovuta alla presenza di una forte riflessione dal terreno che accompagna l'onda principale.

Modello diffrazione a lama di coltello

- Se il collegamento LOS è interrotto da un solo ostacolo, questo può essere trattato con il modello della diffrazione a lama di coltello:
 - il campo diffratto (che è quello che realizza il collegamento) viene calcolato considerando l'ostacolo un semipiano.
 - il campo risulta:

$$E_d = E_{LOS} F(\nu) = E_{LOS} \frac{1+j}{2} \int_{\nu}^{\infty} e^{-j\pi t^2/2} dt$$

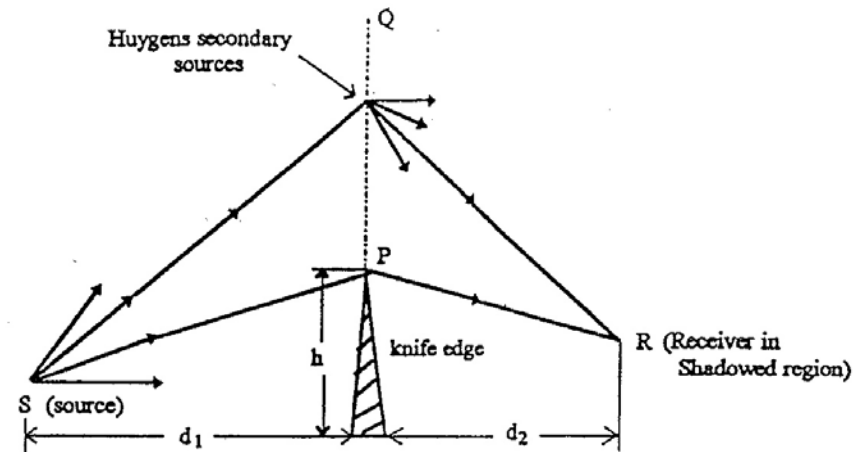
Integrale complesso di Fresnel.
I suoi valori in dB sono tabulati
in funzione della variabile ν

$$\nu = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

$$\begin{aligned} G_d &= 0 && \rightarrow 1 \leq \nu \\ G_d &= 20 \log_{10}(0.5 + 0.62\nu) && \rightarrow 0 \leq \nu \leq 1 \\ G_d &= 20 \log_{10}(0.5 \exp(0.95\nu)) && \rightarrow -1 \leq \nu \leq 0 \end{aligned}$$

.....
[Lee, 1985]

per $\nu = 0$ $G_d = -6$ dB



Metodo di Deygout

- Il modello a lama di coltello è stato applicato anche in presenza di più ostacoli.
- Il metodo proposto da Deygout consiste nell'identificare la cima dominante (quella che ha il maggior valore del parametro di Fresnel). Si valuta per le due sottotratte risultanti l'attenuazione per diffrazione identificando per ognuna la cima dominante.... Ad esaurimento delle tratte, l'attenuazione totale sarà data dalla somma in dB di tutte le attenuazioni ottenute.

