

A.R.I. - Sezione di Parma

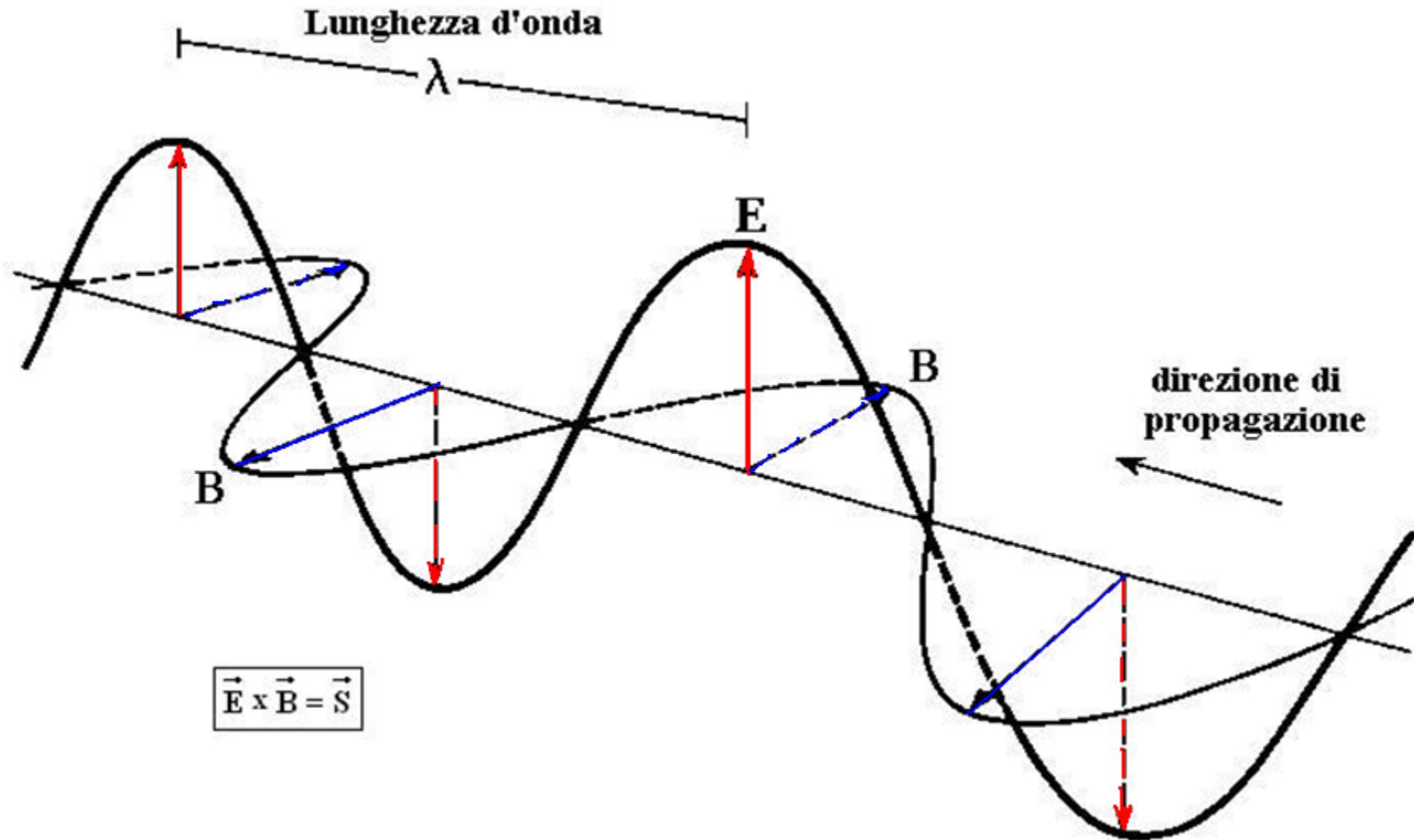
Corso di preparazione esame
patente radioamatore 2016

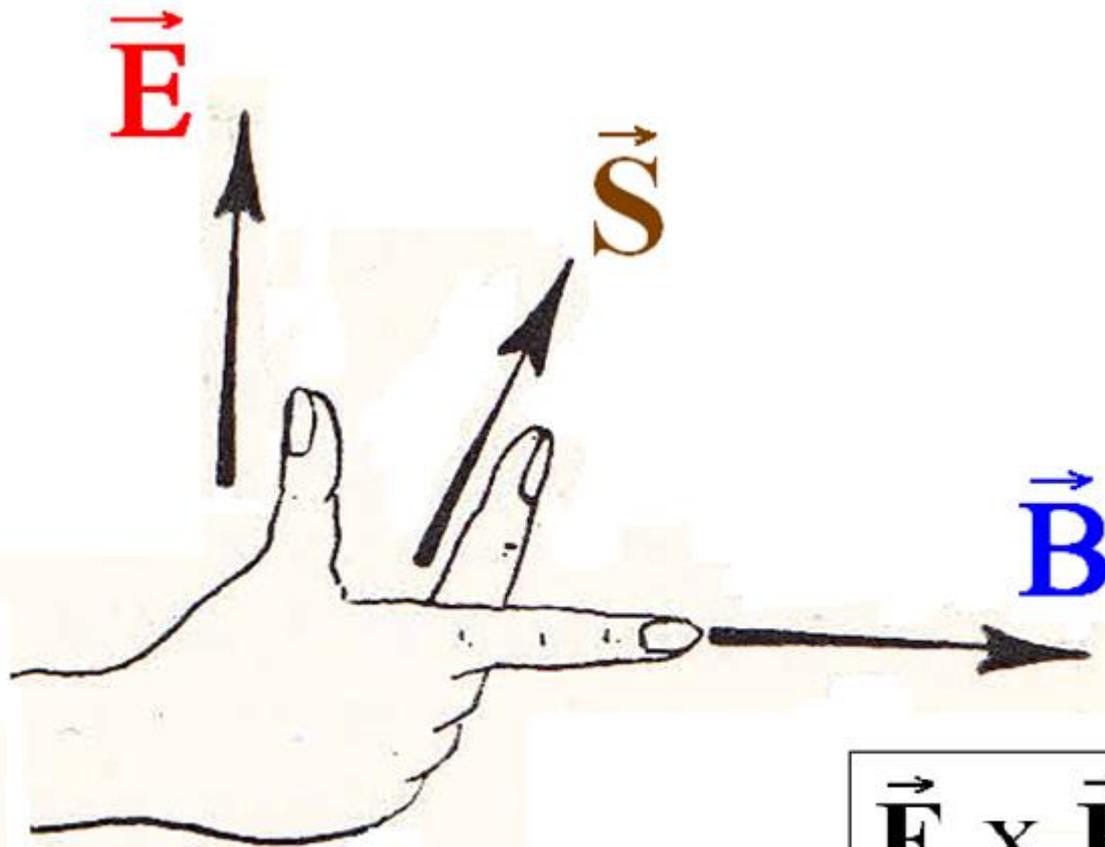
PROPAGAZIONE ONDE ELETTROMAGNETICHE

Carlo Vignali, I4VIL

Onde elettromagnetiche sono generate da movimenti di cariche elettriche **accelerate**. Possono esserlo per motivi naturali (scariche elettriche, fulmini, ecc..) oppure alimentando conduttori (antenne) con correnti alternate (la velocità e la direzione delle cariche **cambiano** continuamente in un periodo). L'onda emessa è un'onda sferica che, ad una conveniente distanza dalla sorgente, può essere considerata onda piana.

PROPAGAZIONE DI ONDA ELETTROMAGNETICA





$$\vec{E} \times \vec{B} = \vec{S}$$

I campi di un'onda che si propaga nello spazio libero sono sempre ortogonali e la terna costruita con la mano destra individua la direzione di propagazione.

La propagazione delle onde radio può avvenire in diversi modi:

- onda di superficie (*ground wave*);
- onda ionosferica (*sky wave*);
- onda troposferica (*space wave*);
- diffusione troposferica (*scattering*);
- spazio libero (*free space*)

in dipendenza da tanti fattori:

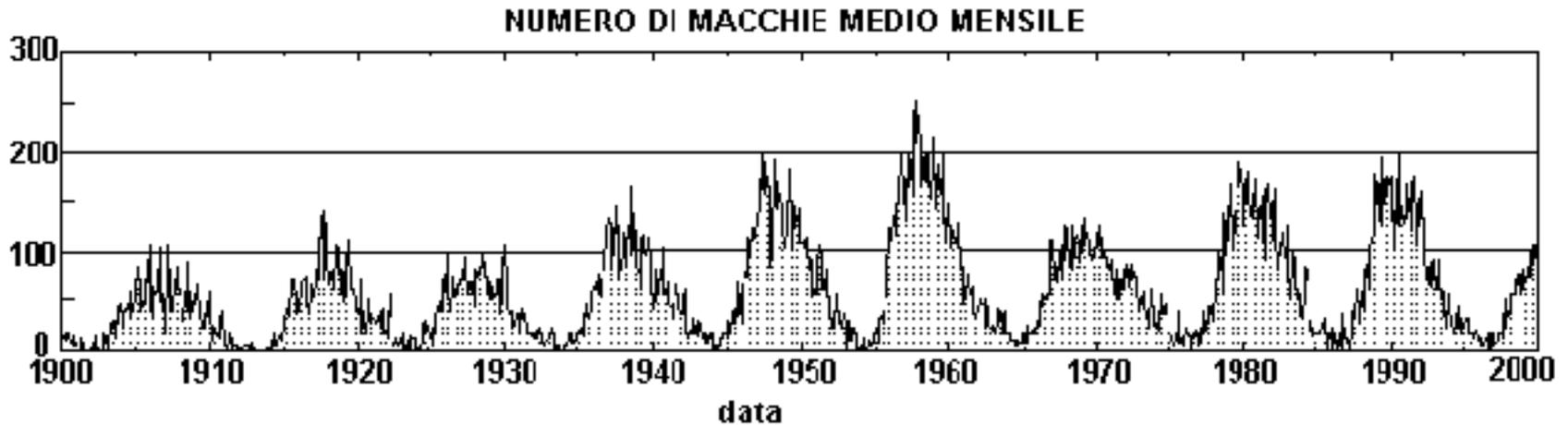
- frequenza,
- attività solare,
- ora del giorno,
- stagione,
- latitudine, ecc....

Frequenza

DESIGNAZIONE BANDE RADIO

Abbreviazione	Frequenze	Lunghezze d'onda	Descrizione	
ELF (Extremely Low Frequency)	300 ...3000 Hz	1000...100 km		
VLF (Very Low Frequency)	3...30 kHz	100 ... 10 km	Onde lunghissime	
LF (Low Frequency)	30...300 kHz	10 ... 1 km	Onde lunghe	
MF (Medium Frequency)	300...3000 kHz	1000...100 m	Onde medie	
HF (High Frequency)	330 MHz	100....10 m	Onde corte	
VHF (Very High Frequency)	30...300 MHz	101 m	Onde metriche	Onde ultracorte
UHF (Ultra High Frequency)	300...3000 MHz	100 ...10 cm	Onde decimetriche	
SHF (Super High Frequency)	3...30 GHz	10 ... 1 cm	Onde centimetriche	Microonde
EHF (Extremely High Frequency)	30...300 GHz	10 ... 1 mm	Onde millimetriche	

Attività solare



L'attività del Sole ha notevole influenza sulla propagazione delle onde elettromagnetiche che subiscono una variabilità di comportamento che segue l'andamento undecennale dell'attività solare. Questa può essere caratterizzata, per esempio, con il numero di macchie solari o con il flusso solare.

Ora del giorno e stagione

La propagazione delle onde è influenzata anche dall'insolazione.

La propagazione diurna e notturna sono, in genere, molto diverse.

Visto che le ore di insolazione sono molto diverse in estate ed inverno, la propagazione dipenderà, quindi anche dalla stagione.

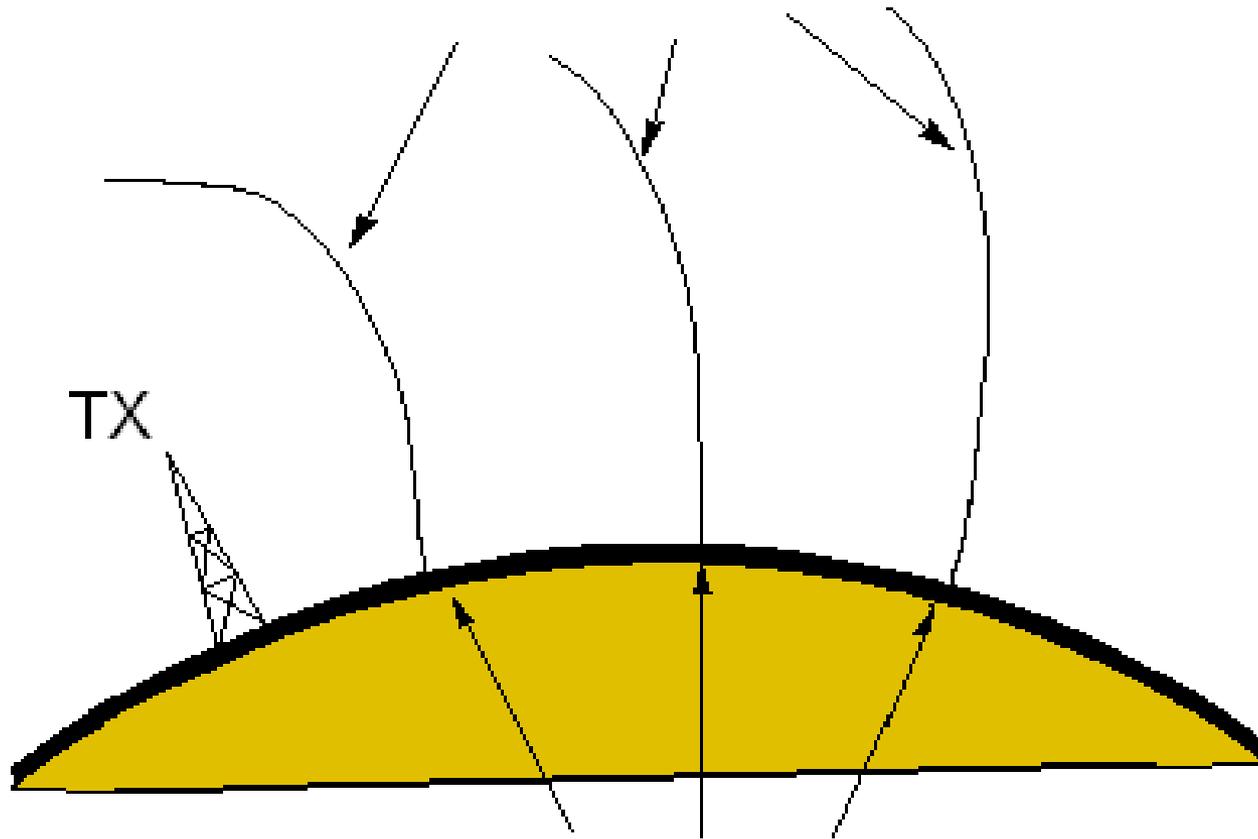
Inoltre, solo per VHF e superiori, la propagazione è influenzata anche dal tempo atmosferico, dalla situazione barometrica e dalla distribuzione di temperature sul percorso dell'onda.

Onde di superficie

E' il modo prevalente di propagazione per onde lunghe e medie (nelle ore di luce). La propagazione sulla superficie terrestre avviene con attenuazione crescente con la frequenza.

La polarizzazione verticale è avvantaggiata, dato che la componente orizzontale viene 'cortocircuitata' dalla superficie terrestre e viene assorbita.

Allontanandosi dal trasmettitore l'onda diviene "piana"



Il rallentamento che subisce la base dell'onda a contatto con il terreno fa piegare in avanti il fronte d'onda che consente all'onda di seguire , per un po', la curvatura terrestre.

Il fronte d'onda si piega in avanti mentre si propaga sulla superficie terrestre a causa della limitata conducibilità; ciò porta, in generale, ad un forte assorbimento dell'onda stessa.

A frequenze basse (onde lunghissime) l'angolo di tilt θ può essere tanto piccolo che il fronte d'onda può rimanere sempre normale alla superficie sferica mentre si propaga. Ciò porta ad una bassissima attenuazione nella propagazione a lunga distanza delle onde lunghissime.



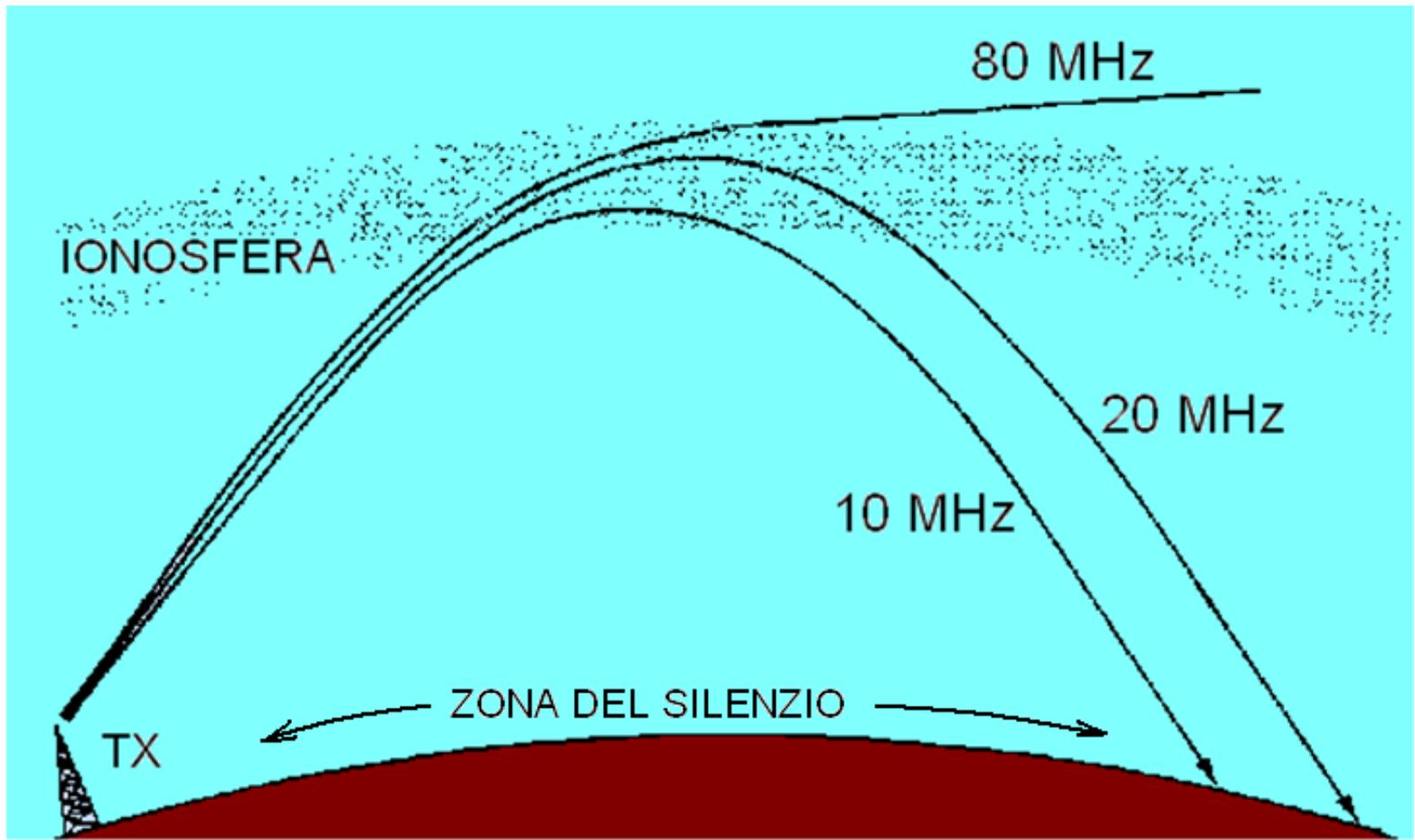
Per onde lunghe e lunghissime la propagazione per onda di superficie è molto importante e viene comunemente utilizzata. Occorre polarizzazione verticale che si ottiene con antenne “Marconi”. Rimane, comunque, la difficoltà di ottenere antenne di buon rendimento a queste basse frequenze (l’antenna ha dimensioni tipiche di $\lambda/4$) e la necessità di operare con potenze molto grandi in modo da superare in ricezione il notevole rumore naturale ed artificiale presente su queste bande.

Onda ionosferica

La propagazione per onde ionosferiche utilizza la riflessione di strati ionizzati posti ad altezze dell'ordine di un centinaio di chilometri. E' caratteristica delle onde corte. Mostra una sostanziale indipendenza dal tipo di polarizzazione, e presenta attenuazione decrescente con la frequenza - **ma sino ad una frequenza critica oltre la quale la propagazione cessa completamente.**

Presenta una caratteristica 'zona del silenzio'.

E' utile per onde corte (diurno e notturno) e per onde medie durante la notte, mancando lo strato D fortemente assorbente durante il giorno.



La corona che circonda la cromosfera solare ha interessanti riflessi sulla radio-propagazione. Dalla corona parte verso lo spazio un flusso di particelle cariche che ha una velocità compresa tra 500 + 1500 km/s chiamato vento solare. Questo flusso, solitamente costante, subisce una violenta variazione con aumento anche di velocità media, quando sul disco appaiono delle macchie o facole.

Quando la materia esplosa e la radiazione solare raggiungono la Terra, si osserva che

-) i raggi ultravioletti ed i raggi X urtando le molecole dell'atmosfera terrestre, le ionizzano formando e modificando gli strati ionosferici favorendo, ma ,anche perturbando la propagazione delle onde radio. nella gamma delle onde corte.
-) i getti di particelle solari producono aurore polari che si osservano, alle volte, anche alle basse latitudini ($45^{\circ} \div 50^{\circ}$). Hanno interesse nella propagazione per riflessione di frequenze radio anche molto elevate (VHF)

L'altezza media delle formazioni ionizzate è circa 70÷250 km dalla superficie terrestre.

Con un numero di macchie inferiore a 50 il Sole è definito 'tranquillo'; l'attività è definita 'media' se il numero di macchie è compreso tra 50 e 90 mentre se è superiore a 90 l'attività del Sole è 'forte'.

Al diminuire delle macchie solari corrisponde una contrazione dello spettro delle onde radio utilizzabili per riflessione ionosferica, a spese particolarmente delle frequenze più elevate della gamma HF.

A causa, però, del minore assorbimento dei bassi strati quando il sole è tranquillo sono utilizzabili frequenze HF molto basse (3 ÷ 6 MHz) per collegamenti a grande distanza in ore notturne.

Perché più strati ionizzati?

Al di sopra di qualche decina di km di altezza i vari gas che compongono l'atmosfera tendono a diffondere separandosi in strati secondo il loro peso molecolare.

Per ogni gas la densità varia con l'altezza con una legge del tipo: $\rho = \rho_0 \exp[-h/H]$ dove H è una altezza caratteristica (dove si produce una riduzione di un fattore $1/e$ della densità del gas) che dipende dal tipo di gas.

Quando su questa massa gassosa incide una radiazione (es. ultravioletta) si determina la ionizzazione (uno o più elettroni vengono strappati dall'atomo e si rendono 'liberi' lasciando l'atomo allo stato di ione) con contemporaneo assorbimento di energia dalla radiazione.

Ma dal sole arriva un po' di tutto... protoni, raggi X, radiazione ultravioletta, ecc..

A grande altezza la radiazione è intensa, ma a causa della debole densità ρ del gas il numero di elettroni liberi per unità di volume, N , è piccolo.

Col diminuire della quota la densità del gas cresce con legge esponenziale e si produrranno un numero di elettroni liberi sempre maggiore, ma diminuisce l'intensità della radiazione perché parzialmente già assorbita dagli strati più alti.

Alle basse quote, dove ρ è maggiore, quasi tutta la radiazione è già stata assorbita e non vi sarà, quindi, ionizzazione apprezzabile.

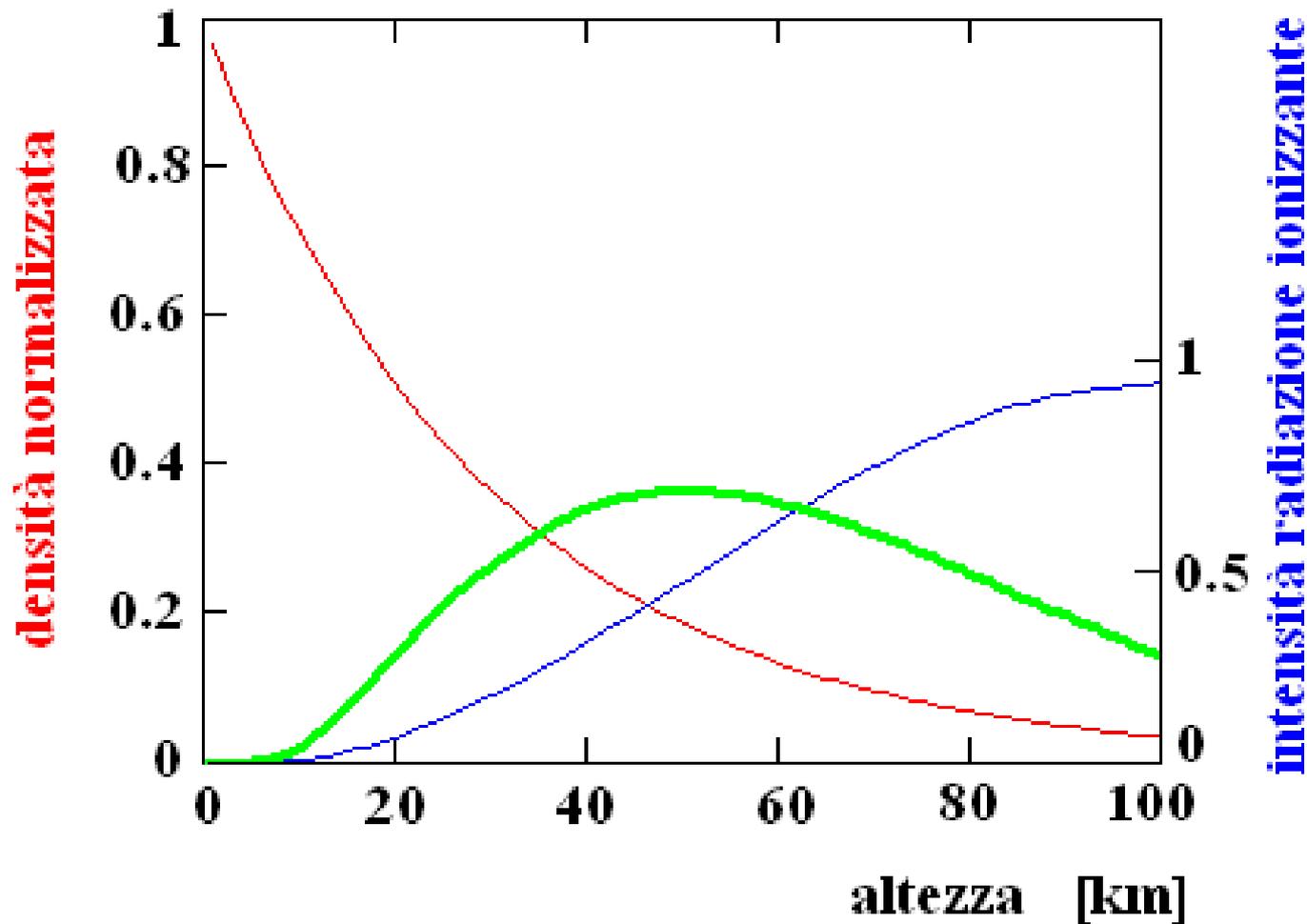
Gli elettroni liberi tendono a ricombinarsi con gli ioni positivi e riformare la molecola neutra; poiché alle alte quote la densità ρ è piccola, gli ioni sono abbastanza lontani tra loro e gli elettroni avranno vita relativamente lunga.

Negli strati più bassi, con ρ più elevata, la velocità di ricombinazione aumenta ovvero gli elettroni liberi hanno vita più breve.

E' evidente che esisterà una altezza dove l'equilibrio tra questi tre fattori (densità del gas, intensità della radiazione, tempo di vita) renderà massima la densità media N di elettroni liberi caratterizzando uno 'strato' ionizzato.

Ma la atmosfera è costituita da più gas e d'altronde il Sole irraggia non solo luce ultravioletta (su ampio spettro) ma anche radiazione X ('dura' e 'molle').

Si formano, così, degli strati ionizzati, nei quali N varia entro ampi limiti ma nei quali si identificano 4 strati ionizzati principali chiamati strato D, strato E, strato F_1 e strato F_2 (il più elevato).



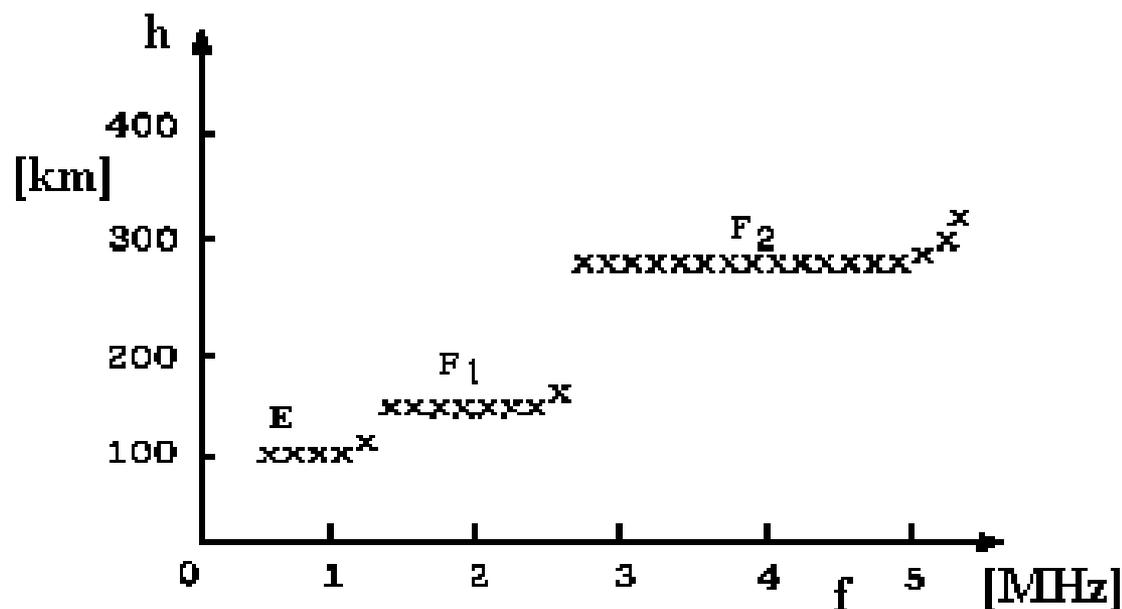
Formazione dello strato ionizzato - Modello semplificato.

Per ogni gas atmosferico la sua densità decresce con l'altezza, mentre l'intensità dell'agente ionizzante decresce avvicinandosi alla superficie. La probabilità delle molecole del gas di essere ionizzate (e di avere elettroni liberi) è data dal prodotto di questi due fattori (curva verde).

L'esistenza e le caratteristiche degli strati ionizzati riflettenti per le onde elettromagnetiche sono facilmente osservabili mediante la tecnica radar; un breve impulso è irraggiato verso lo zenit e l'eco (o più di una) di ritorno viene registrata con il tempo impiegato.

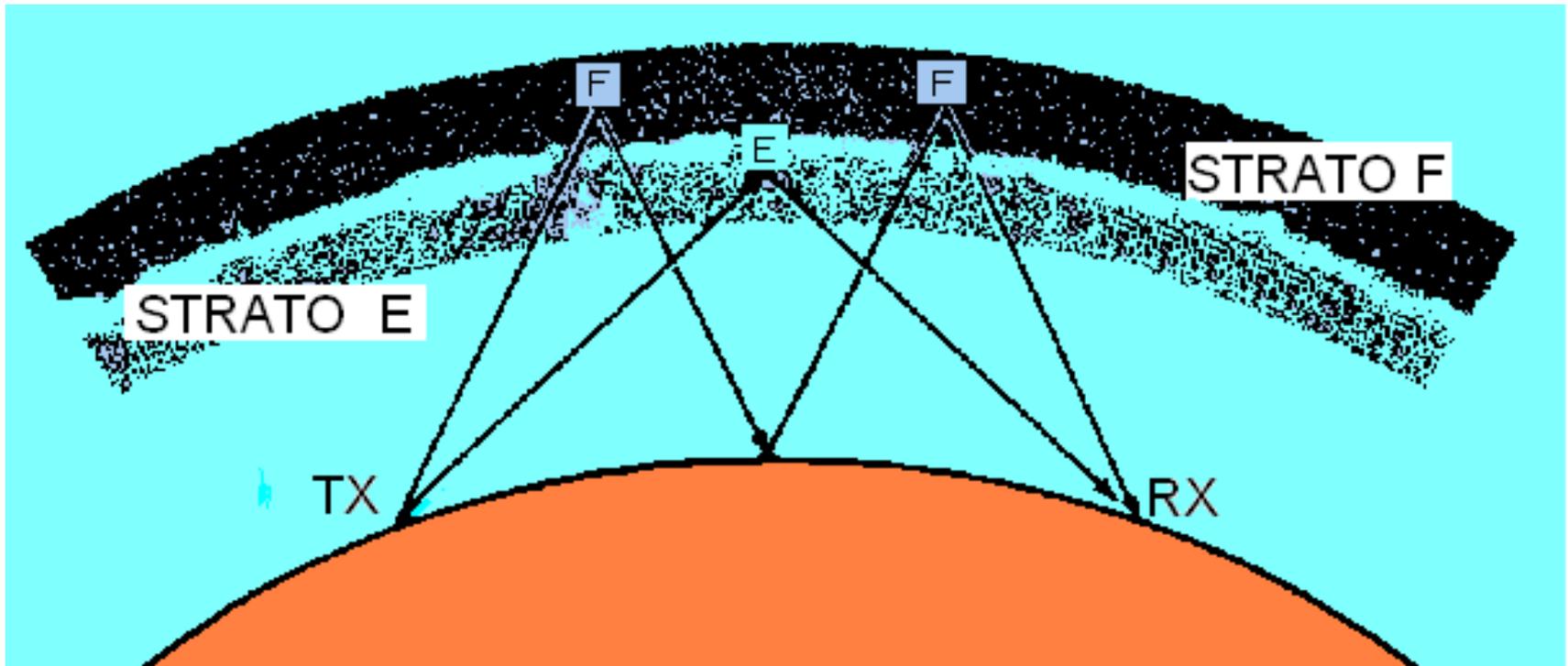
Essendo nota la velocità di propagazione e ben facile stabilire a quale altezza è avvenuta la riflessione.

In pratica si registrano automaticamente le altezze dei punti di riflessione in funzione della frequenza: si ottiene così uno ionogramma dove sono nettamente definite le frequenze critiche per i vari strati ionizzati presenti.

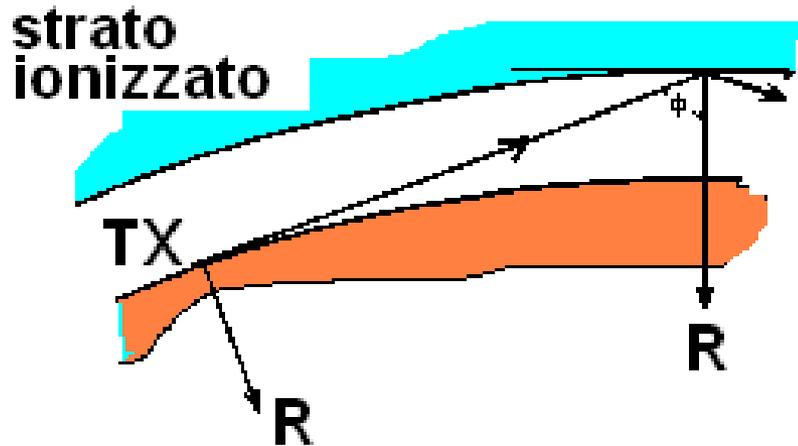


Ionogramma (esempio).

Sono facilmente identificabili le fcv dei vari strati (1.4, 2.7, 5.5 MHz) e le loro altezze:



Riflessioni semplici e multiple da strati ionizzati ionosferici. Ogni strato presenta una frequenza critica oltre la quale l'onda non è più riflessa verso la superficie terrestre. Questa frequenza critica dipende fortemente dall'angolo di incidenza. E' utile, perciò, caratterizzare ogni strato con la frequenza critica verticale.



$$h = \frac{R}{\cos \phi} - R$$

$$\phi = \arccos \frac{R}{R+h}$$

Geometria della riflessione da uno strato ionizzato per un'onda irradiata parallelamente alla superficie terrestre

Data la curvatura della superficie terrestre e degli strati ionizzati, l'angolo di incidenza non è mai superiore a 60÷70 gradi.

Con questi angoli di incidenza (quasi tangenti la superficie inferiore dello strato) la frequenza critica è parecchie volte più alta della frequenza critica verticale secondo la legge della secante: $f_c = f_{cv} \sec(\phi)$.

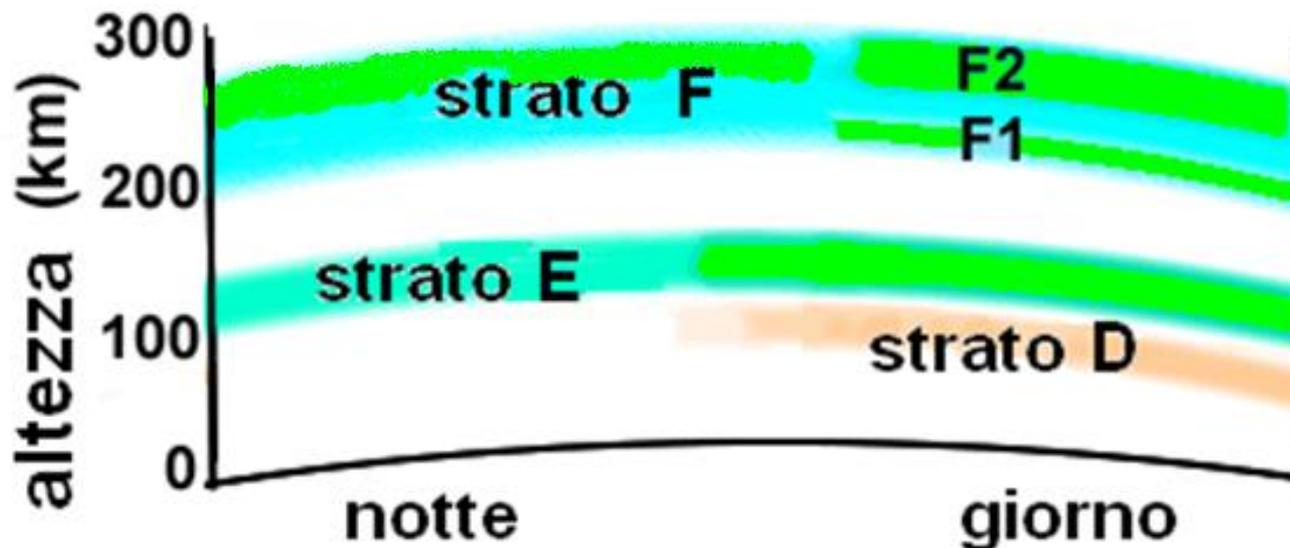
Strato D - Gli elettroni liberi si originano probabilmente per ionizzazione dell'ossido di azoto NO da parte della riga a di Lyman (L_a) – riga di emissione dell'idrogeno, molto intensa con $\lambda = 1215 \text{ \AA}$, e anche per ionizzazione dell'ossigeno molecolare da parte dei raggi X 'duri' ($\lambda = 10 \text{ \AA}$ circa). E' lo strato più basso (40-80 km).

Strato E - L'ossigeno molecolare viene ionizzato dalla radiazione UV del Sole ($\lambda = 1000 \text{ \AA}$ circa) e da raggi X 'mollini' ($\lambda = 10 \text{ \AA}$ circa).

Si trova ad una altezza variabile tra 90 e 140 km.

Strato F - L'ossigeno atomico viene ionizzato dalla radiazione UV del Sole ($\lambda = 300 \div 1000 \text{ \AA}$) con un massimo attorno a 250÷300 km

Pure le molecole di N₂ sono ionizzate dalle radiazioni UV con un massimo attorno a 200 km circa. Di giorno si suddivide in F1 e F2.



Propagazione troposferica

La troposfera è parte inferiore della atmosfera terrestre, dal suolo all'inizio della tropopausa, caratterizzata da temperatura che diminuisce con la quota.

Altezza tipica 10÷15 km.

Nella troposfera i campi elettromagnetici subiscono alterazioni rispetto alla propagazione libera, a causa di:

- rifrazioni causate dalla troposfera
- diffrazioni per irregolarità della superficie terrestre
- riflessioni della superficie terrestre (montagne, etc.)
- diffusione da irregolarità nella densità
- fenomeni meteorici : pioggia, gas, nebbia, neve, etc

La propagazione troposferica (SPACE WAVE) è utilizzata nelle VHF, UHF e microonde. Tali frequenze presentano forte attenuazione come onda di superficie, e non sono riflesse come onde ionosferiche

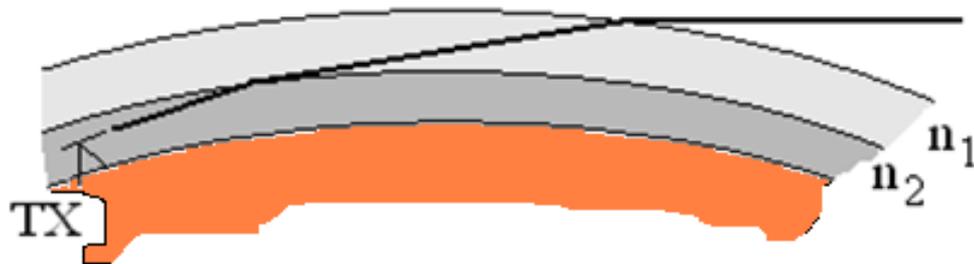
Si propagano in linea retta e si realizzano normalmente collegamenti a portata ottica.

Si cerca di evitare gli effetti dovuti alla presenza del suolo, elevando le antenne ed usando antenne direttive ad alto guadagno.

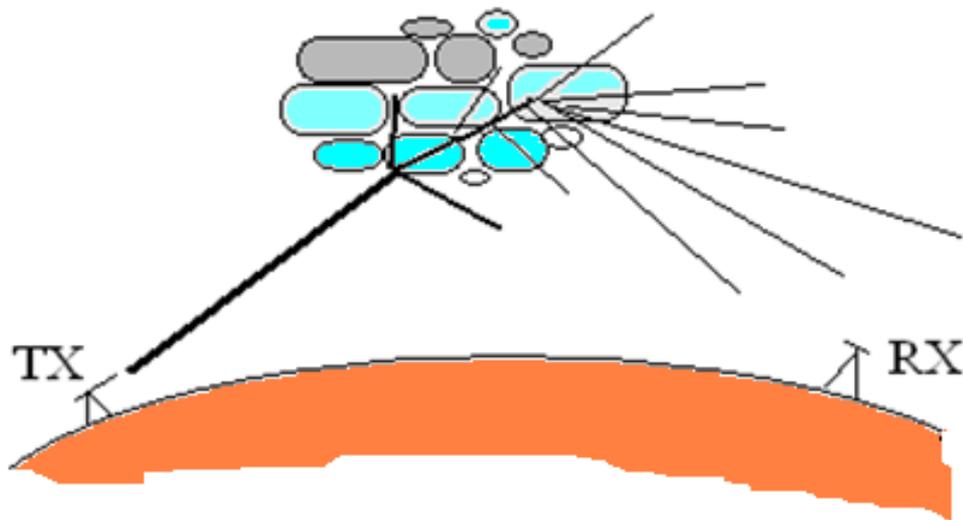
La presenza di atmosfera con tutti i fenomeni meteorici modifica il comportamento dell'onda che non si propaga come se fosse nello spazio libero, ma risente delle variazioni di densità, di temperatura, ecc

E' essenziale studiare le condizioni fisiche della troposfera come l'andamento dell'indice di rifrazione dei bassi strati.

Tipici fenomeni nella propagazione troposferica

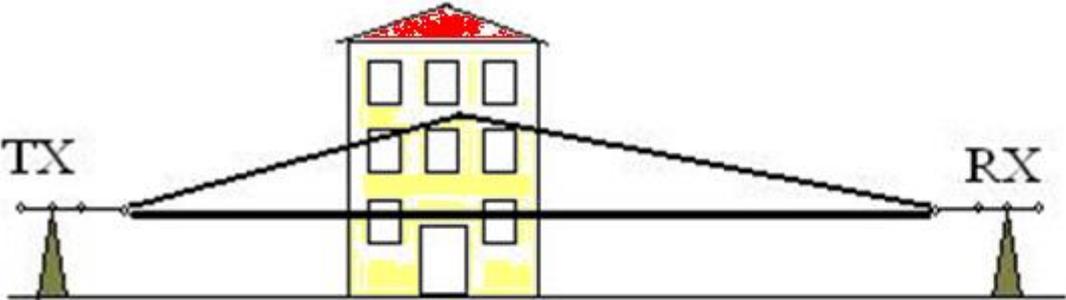


RIFRAZIONE



DIFFUSIONE

Tipici fenomeni nella propagazione troposferica



INTERFERENZA



almeno due differenti percorsi

Rifrazione

La velocità di propagazione v dell'onda che attraversa la troposfera si discosta dalla velocità c (spazio libero) perché risente del valore dell'indice di rifrazione relativo n che è funzione delle grandezze che caratterizzano l'atmosfera: temperatura, pressione e contenuto di vapore d'acqua.

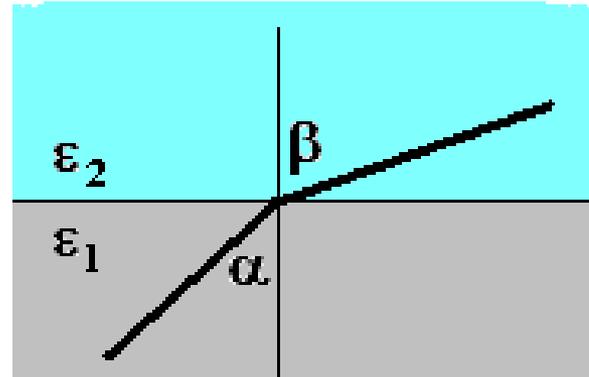
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$$

$$n = \frac{c}{v}$$

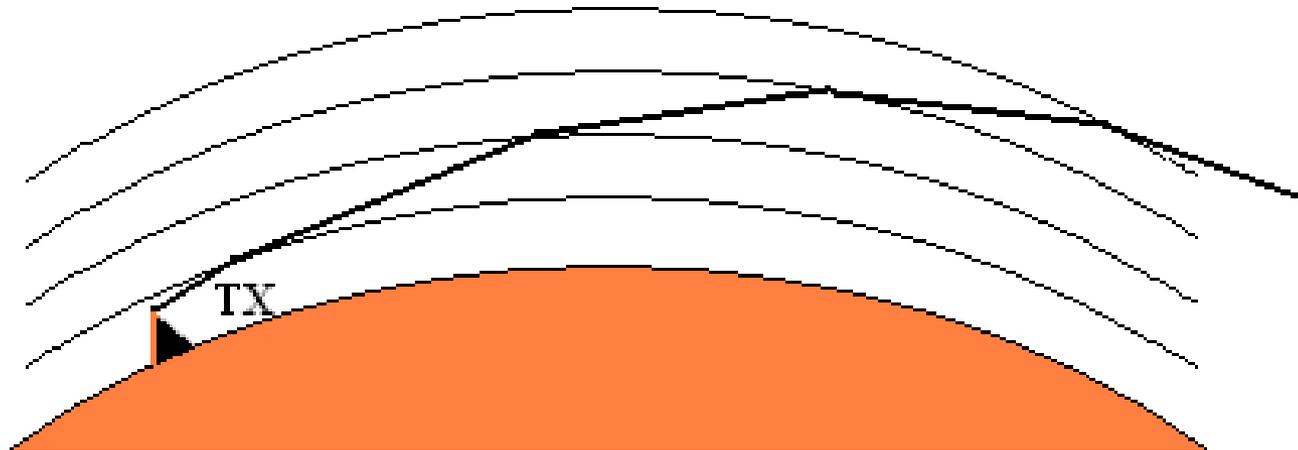
RIFRAZIONE TROPOSFERICA

$$n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$$

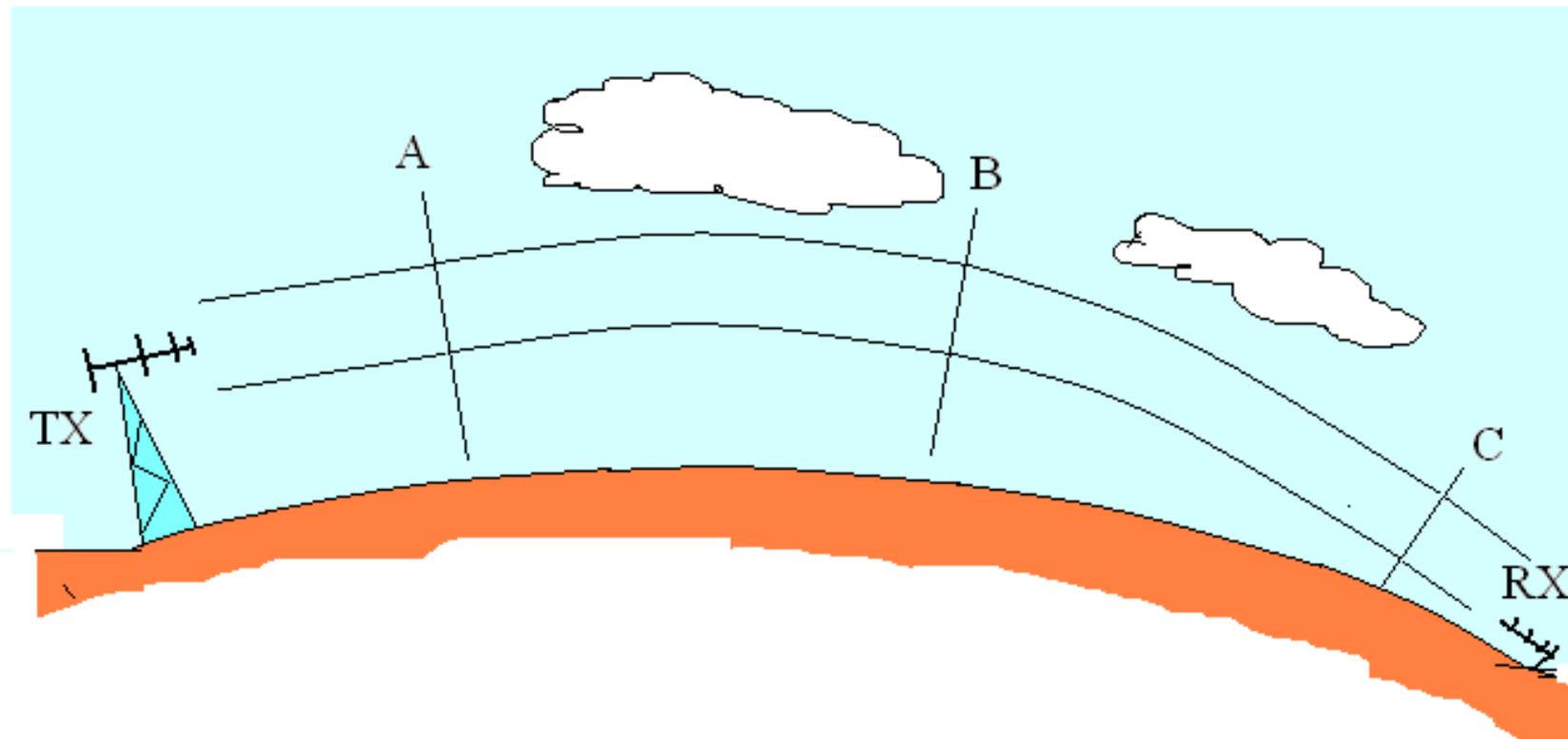
$$n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$$



$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}$$



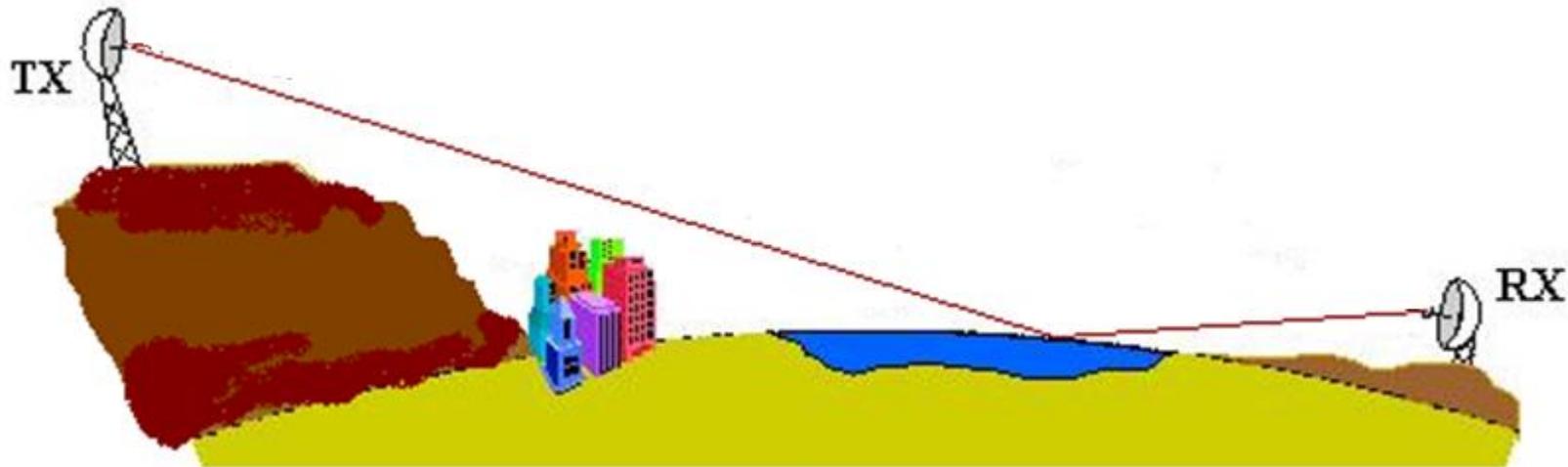
Rifrazione



Un'onda piana che si propaga orizzontalmente al terreno subisce rifrazione: viene deviata verso il terreno e permette comunicazioni VHF e superiori anche oltre l'orizzonte.

La fase dei vari raggi è uguale nei vari fronti d'onda indicati: A, B e C. Le variazioni di fase nei percorsi dei vari raggi da A a B, per esempio, sono uguali.

Riflessione



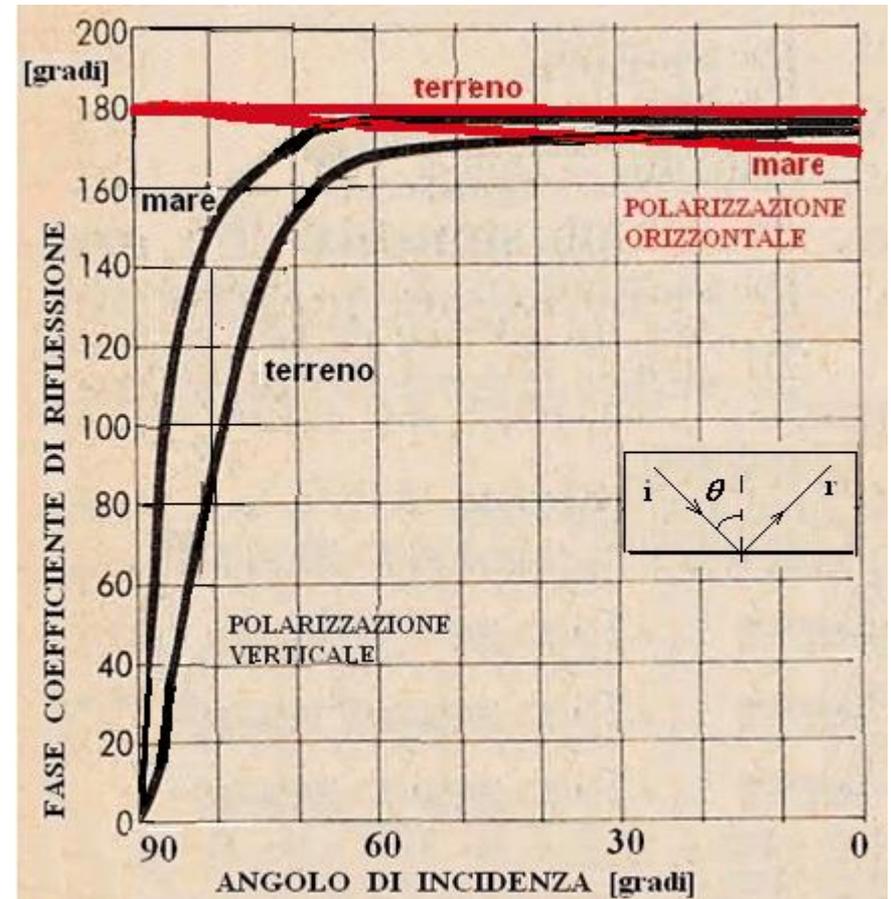
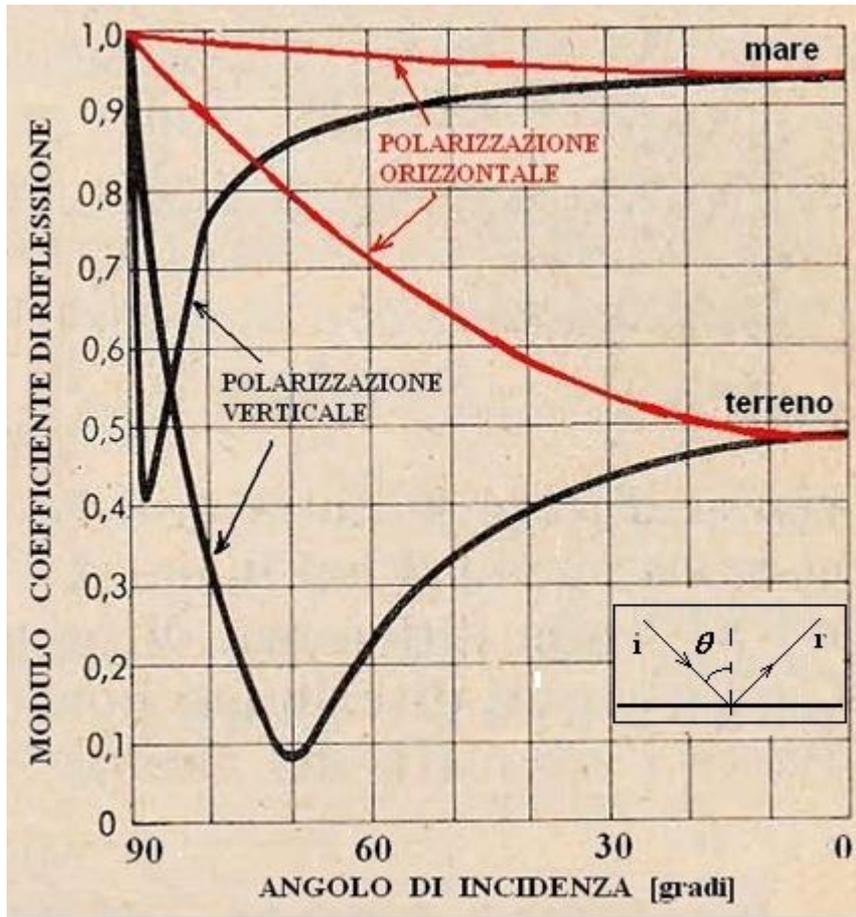
La presenza della superficie terrestre è ineludibile.

Può capitare, quindi, che l'onda elettromagnetica ricevuta abbia subito una riflessione durante il percorso.

Nella riflessione si ha sempre un'attenuazione che dipende dalle caratteristiche del punto di riflessione, dalla frequenza e dalla polarizzazione dell'onda.

La riflessione viene caratterizzata con il coefficiente di riflessione.

Riflessione



Il coefficiente di riflessione (modulo e fase) dipende dalle caratteristiche fisiche del punto di riflessione (costante dielettrica, conducibilità), dalla polarizzazione dell'onda e dalla frequenza. E' riportato un esempio.

Riflessione

Il coefficiente di riflessione cambia con l'angolo di incidenza e, soprattutto, con la polarizzazione dell'onda.

Con polarizzazione orizzontale è sempre molto grande (prossimo a 1) con spostamento di fase prossimo a 180 gradi.

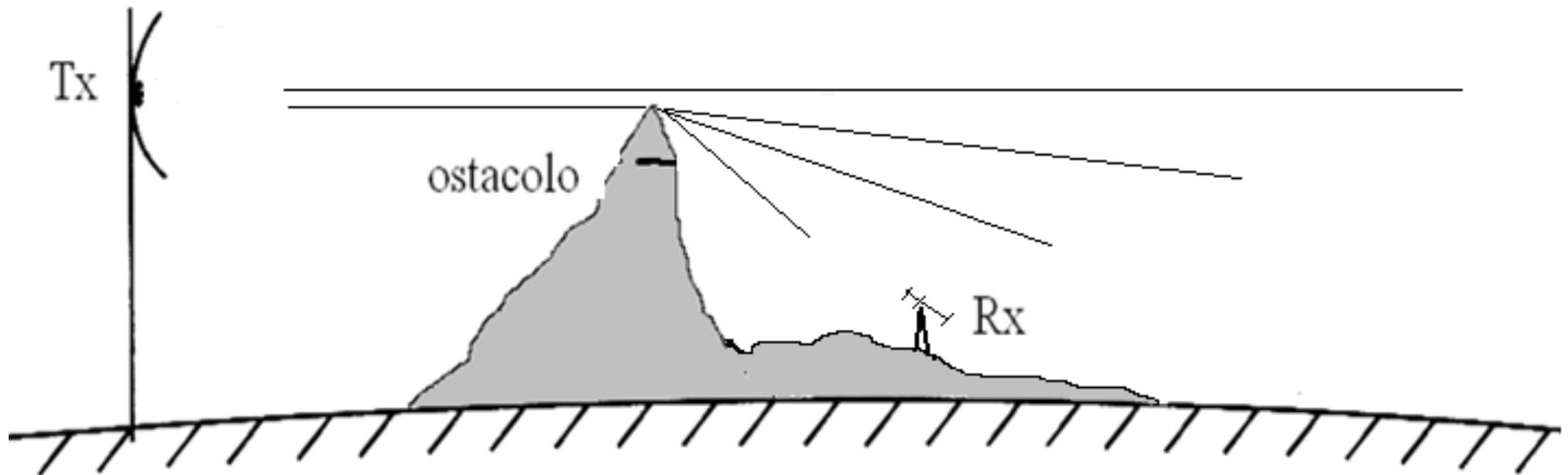
Con polarizzazione verticale, invece, è presente un minimo molto pronunciato a bassi angoli di incidenza (onda quasi radente la superficie).

I valori del coefficiente di riflessione dipendono dalle caratteristiche della superficie di riflessione.

Diffrazione

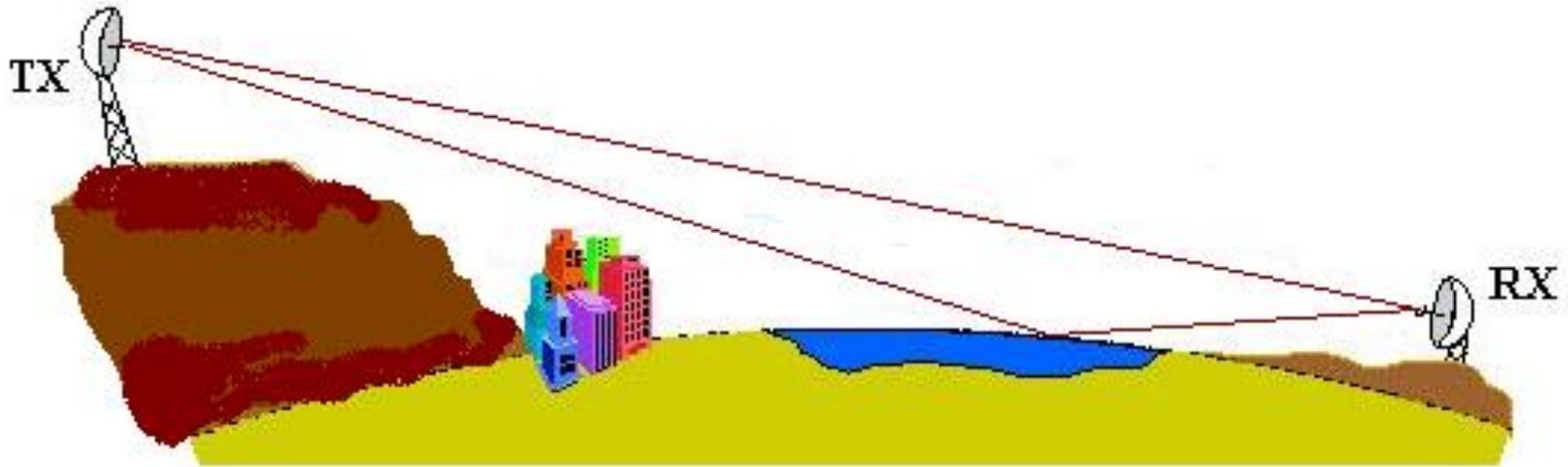
La diffrazione è un fenomeno associato alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde quando queste incontrano un ostacolo sul loro cammino; gli effetti sono rilevanti quando lo spessore dell'ostacolo è confrontabile con la lunghezza d'onda. La diffrazione da un ostacolo a lama di coltello può essere facilmente compresa col principio di Huygens-Fresnel, che stabilisce che un ostacolo netto per un'onda elettromagnetica si comporta come una nuova sorgente creando un nuovo fronte d'onda.

Diffrazione



La diffrazione permette la ricezione di segnali UHF e microonde anche se in presenza di ostacoli, con il ricevitore che non “vede” il trasmettitore.

Interferenza



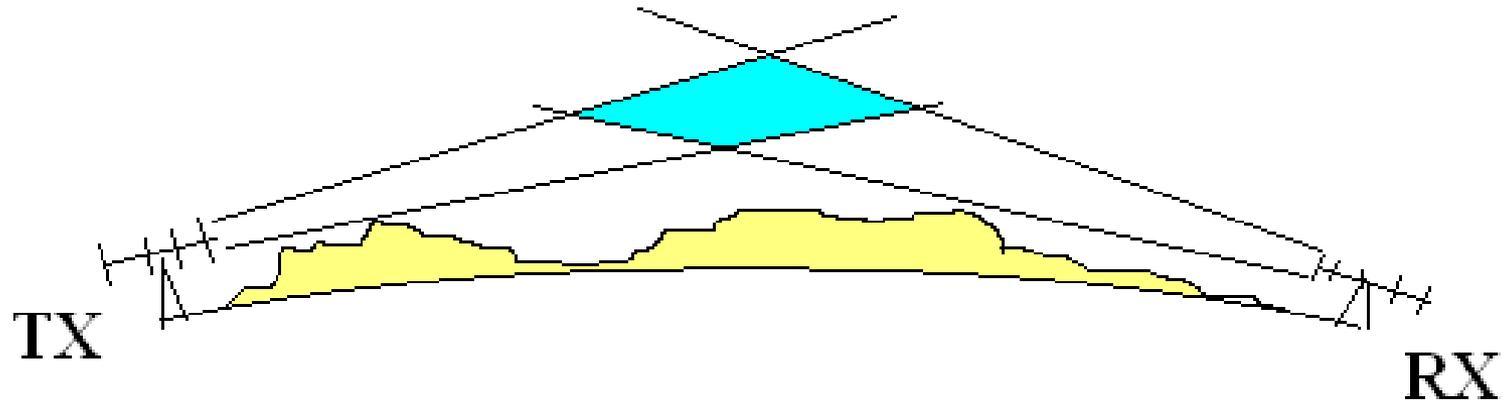
Le due onde, diretta e riflessa, possono avere ampiezza abbastanza simile, ma fase differente. → **Interferenza costruttiva e distruttiva.** Sul mare, per la presenza delle maree, l'interferenza può cambiare nel tempo (il percorso "riflesso" cambia di lunghezza e, quindi di fase) e diviene riconoscibile il periodo "lungo" di circa 12 ore sull'ampiezza ricevuta.

diffusione (scattering)

L'indice di rifrazione dell'atmosfera "normale" è leggermente superiore a 1 vicino al suolo e decresce verso il valore 1 a grandi altezze.

La turbolenza dell'aria porta a variazioni locali di densità dell'aria stessa con il suo contenuto di vapore acqueo e, di conseguenza, a variazioni locali dell'indice di rifrazione. Se queste irregolarità locali sono numerose, di dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda, e distribuite in modo che il gradiente dell'indice di rifrazione sia sufficientemente grande, allora, in modo analogo alla diffusione della luce che dà luogo all'azzurro del cielo, la troposfera diffonde in tutte le direzioni le onde radio rendendo così possibili trasmissioni VHF-UHF a distanze ben oltre l'orizzonte.

diffusione (scattering)



Geometria di collegamento per tropo-scatter.

Solo il volume comune ai fasci delle due antenne è utile per il collegamento.

Occorrono grandi potenze in trasmissione ed antenne non eccessivamente direttive.