

La propagazione ionosferica

una risposta alle domande più frequenti

1. Introduzione

La finalità di questo articolo è quella di presentare in modo semplice le caratteristiche fisiche della ionosfera, facendo uso, ove necessario, di formule matematiche che consentano di comprendere meglio i meccanismi che condizionano la propagazione delle onde elettromagnetiche nelle nostre “tanto amate” HF.

Non si vuole assolutamente entrare in una trattazione fisico-matematica della ionosfera, che, oltre ad essere al di là delle mie competenze, non sarebbe di grande interesse per una buona parte di OM i quali, operando normalmente sulle bande HF, si imbattono giorno per giorno in una serie di fenomeni (frequenze utili variabili di ora in ora, attenuazioni eccessive a certe frequenze, aperture corte di certe frequenze in alcune parti della giornata, etc.) a cui vorrebbero dare una spiegazione che non sempre è immediato trovare sui sacri testi.

Avendo anche io avuto questa esigenza negli anni scorsi, ho deciso di impostare questo lavoro con il preciso scopo di trovare un comune denominatore alle “strane cose” che si verificano durante l’operatività nelle bande HF, sperando di fare cosa gradita a tanti OM.

2. Caratteristiche degli strati ionosferici

La ionosfera è una porzione dell’atmosfera terrestre dove la pressione dell’aria è così bassa che elettroni (di carica negativa) e ioni (di carica positiva) liberi possono muoversi per un certo tempo senza cadere in prossimità di altre particelle ricombinandosi in atomi neutri. La causa primaria della ionizzazione di questa porzione esterna dell’atmosfera è la radiazione ultravioletta generata dal Sole.

Il livello di ionizzazione prodotta non varia uniformemente con la distanza dalla superficie terrestre, bensì presenta un andamento regolare (ma non costante) all’interno di strati, di differente spessore e all’incirca paralleli alla superficie terrestre, ed è caratterizzato da sensibili differenze passando da uno strato all’altro.

Secondo la letteratura classica esistono 4 strati ionosferici, ovvero D, E, F1 e F2; un discorso a parte merita lo strato Es (E sporadico), discorso che però esula dal presente articolo.

2.1 Strato D

Lo strato D è lo strato più basso della ionosfera ed è collocato ad altezze comprese fra 60 e 90 Km sulla superficie terrestre. Il livello di ionizzazione è direttamente legato alla luce solare nel senso che comincia al sorgere del Sole, raggiunge un picco quando il Sole è allo zenit e si annulla al tramonto; quando gli elettroni vengono investiti da radiazione elettromagnetica acquistano energia cinetica in modo direttamente proporzionale alla lunghezza d’onda, e questo moto accentuato porta ad un aumento della probabilità di collisione con altre particelle di segno opposto e quindi alla ricombinazione in atomi neutri, con trasformazione dell’energia in calore.

Tutto ciò significa assorbimento della radiazione elettromagnetica investente, tanto maggiore quanto più bassa è la frequenza; in particolare sono penalizzate le bande 3.5 e 7 MHz, mentre l’effetto è lieve a 14 MHz per diventare praticamente trascurabile a frequenze superiori. A parità di frequenza l’assorbimento è maggiore per onde che penetrano questo strato con angolo Φ prossimo a 90° (fig. 1).

La densità di elettroni liberi, dell’ordine di $10^2 \div 10^3 \text{ cm}^{-3}$, non è sufficiente a produrre alcun incurvamento progressivo del fronte d’onda incidente in modo da indirizzarlo verso la superficie terrestre oltre la zona “oscura”, ragion per cui lo strato D non ha alcuna influenza sulla propagazione se non in termini di assorbimento (per le bande basse) nelle ore centrali della giornata.

2.2 Strato E

Lo strato E, localizzato ad altezze comprese fra 90 e 140 Km sulla superficie terrestre, presenta una densità N di elettroni fortemente dipendente dall' altezza del Sole sull' orizzonte, raggiungendo il massimo (dell'ordine di $1 \times 10^5 \div 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$) nelle ore centrali della giornata.

Come per lo strato D, lo strato E si presenta come uno strato assorbente per le frequenze basse ($< 7 \text{ MHz}$) nelle ore centrali della giornata. A differenza dello strato D, lo strato E ha una densità di elettroni tale da consentire, mediante incurvamento progressivo delle onde fino a rifletterle sulla superficie terrestre, collegamenti in HF fino a 2500 Km, come dimostrato più avanti.

2.3 Strato F

Lo strato F è quello che più di tutti influenza in modo positivo la propagazione delle HF, nel senso che produce un incurvamento progressivo dei fronti d' onda che lo investono fino a rifletterli sulla superficie terrestre a distanze di migliaia di chilometri dal punto di trasmissione, anche durante le ore notturne.

A causa della bassa densità di questa porzione dell' atmosfera, gli elettroni e gli ioni positivi si ricombinano molto lentamente così che gli effetti dell' angolo di elevazione del Sole si manifestano con un certo ritardo, al punto che la MUF si mantiene alta (per es. 14 MHz) lungo la direttrice Est-Ovest (ovvero verso la parte illuminata della superficie terrestre) anche durante le ore notturne, soprattutto in Estate.

Lo strato F presenta a sua volta due strati, detti F1 e F2, di cui il primo scompare durante le ore notturne.

2.3.1 Strato F1

Lo strato F1 è presente soltanto durante le ore diurne, è localizzato ad altezze comprese fra 160 e 240 Km sulla superficie terrestre ed è caratterizzato da una densità N di elettroni dell' ordine $2 \times 10^5 \div 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$.

2.3.2 Strato F2

Lo strato F2 è presente sia nelle ore diurne che nelle ore notturne, è localizzato ad altezze comprese fra 230 e 450 Km sulla superficie terrestre ed è caratterizzato da una densità N di elettroni dell' ordine $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ di inverno ore diurne (che scende a $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ nelle ore notturne) e dell' ordine di $2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ d' estate ore diurne.

Il fatto che la densità N di elettroni relativa alle ore diurne sia un ordine di grandezza più bassa durante l' estate rispetto all' inverno è chiamata "anomalia d' inverno"; c'è poi la cosiddetta "anomalia diurna" consistente nel fatto che la densità N raggiunge il picco un' ora dopo il mezzogiorno locale, ovvero fra le 13 e le 15 locali.

Lo strato F2, a causa delle densità di elettroni molto alta, presenta un coefficiente di assorbimento delle onde elettromagnetiche molto più basso rispetto a quello introdotto dagli strati D ed E, per cui le onde riflesse da questo strato conservano ancora sufficiente energia per essere riflesse dalla superficie terrestre di nuovo verso la ionosfera e da questa ancora a terra ed ancora verso la ionosfera, arrivando a coprire distanze dell' ordine di $15.000 \div 20.000 \text{ Km}$ (per es. Australia e Nuova Zelanda).

2.4 Strato Es

Lo strato E Sporadico si forma in modo abbastanza casuale ad una altezza di 110-120 Km ed è caratterizzato da una densità N di elettroni molto maggiore di quella che normalmente caratterizza lo strato E. Questa ionizzazione sporadica si manifesta sotto forma di "nubi" che possono estendersi da qualche chilometro a qualche migliaio di chilometri. Lo strato Es si può formare a qualsiasi ora del giorno ed in qualsiasi stagione : a latitudini temperate si verifica con maggiore occorrenza durante l' estate e nelle ore diurne.

La caratteristica peculiare di queste aree ad alta ionizzazione è la loro vita limitata a non più di qualche ora : in tale intervallo di tempo è possibile comunque effettuare collegamenti altrimenti non possibili a quelle frequenze e a quell' ora del giorno.

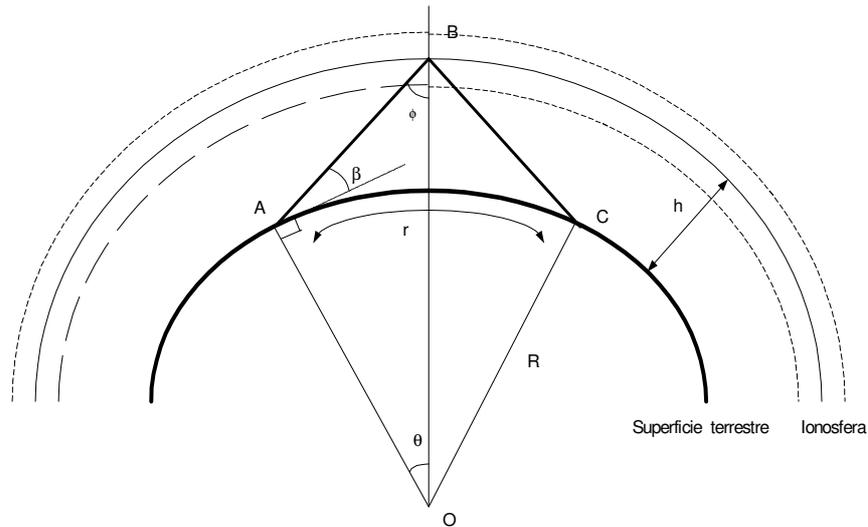


FIGURA 1 – RAPPRESENTAZIONE SEMPLIFICATA DI UN COLLEGAMENTO IONOSFERICO

3. Relazioni matematiche fra i vari parametri fisici

Sono di seguito presentate relazioni di tipo geometrico e relazioni di tipo fisico :

3.1 Relazioni di tipo geometrico

Con riferimento alla fig. 1 si hanno le seguenti relazioni :

$$\phi + \beta + \theta + 90^{\circ} = 180^{\circ}$$

$$\text{sen } \phi = \frac{\cos \beta}{1 + h/R}$$

$$\tan \phi = \frac{R \cdot \text{sen } \theta}{h + R \cdot (1 - \cos \theta)}$$

$$\theta^{\circ} = \frac{r_{km}}{222.4}$$

dove :

R = raggio terrestre = 6370 Km

h = altezza dello strato ionosferico riflettente

r = distanza fra i 2 estremi del collegamento (misurata in Km lungo la superficie terrestre)

β = angolo di elevazione del segnale trasmesso (rispetto all' orizzonte locale)

ϕ = angolo di incidenza nello strato ionosferico riflettente

θ = angolo al centro sotteso da metà del percorso fra i due estremi del collegamento

3.2 Relazioni di tipo fisico

Le relazioni che tornano utili nella presente analisi sono le seguenti :

densità N di elettroni per lo strato F2

$$N = 1.24 \cdot 10^4 \cdot f_{c(MHz)} cm^{-3}$$

$$f = \sqrt{\frac{80.8 \cdot N \cdot (1 + 2 \cdot h/R)}{\sin^2 \beta + 2 \cdot h/R}} Hz$$

$$MUF = f_{MAX}$$

$$OTF = 0.85 \cdot MUF$$

dove :

N = densità di elettroni liberi

f_c = frequenza critica, ovvero la massima frequenza che viene riflessa per incidenza verticale nella ionosfera

f = massima frequenza che viene riflessa da uno strato ionosferico di altezza h e densità elettronica N, per un angolo di elevazione β

R = raggio terrestre = 6370 Km

h = altezza dello strato ionosferico riflettente

MUF = Maximum Usable Frequency

OTF = Optimum Traffic Frequency

La formula che fornisce la massima frequenza f riflessa dalla ionosfera mostra che :

- 1) a parità di angolo β di elevazione e di altezza h dello strato ionosferico, maggiore è la densità di elettroni liberi (ovvero il grado di ionizzazione) e maggiore sarà la massima frequenza riflessa (vedi fig. 2)
- 2) a parità di condizioni ionosferiche (altezza h e densità N), la massima frequenza utilizzabile è ottenuta quando l'angolo di elevazione β è prossimo a zero, ovvero quando si trasmette verso l'orizzonte (vedi fig. 2)
- 3) per angolo di elevazione β uguale a 90° la massima frequenza diventa uguale alla frequenza critica f_c
- 4) la massima frequenza f per angoli β minori di 90° è maggiore di f_c ed aumenta fino al valore massimo per angolo β uguale a 0°

Le relazioni geometriche del para. 3.1 mostrano invece che, per una data altezza di riferimento dello strato ionosferico riflettente, l'ampiezza massima dello skip si ottiene con angolo di elevazione prossimo a zero (vedi fig. 3 per lo strato F2 e la fig. 4 per lo strato E).

Per un dato strato ionosferico, per stabilire un collegamento fra due punti, non è sufficiente che la frequenza scelta sia inferiore alla MUF : è necessario che essa sia anche maggiore della LUF (Least Usable Frequency), nel senso che la frequenza deve essere "sufficientemente" alta da non subire un'attenuazione eccessiva da parte degli strati bassi.

Pertanto la frequenza ideale, spesso coincidente con la OTF, deve soddisfare la relazione :

$$LUF \leq f \leq MUF$$

Infine, per date condizioni ionosferiche (densità N ed altezza h), e per una data frequenza maggiore della frequenza critica f_c , l'angolo di radiazione (o elevazione) β non superare un valore limite, detto angolo critico, nel qual caso la ionosfera non produce riflessione ed il segnale va perso nell'atmosfera.

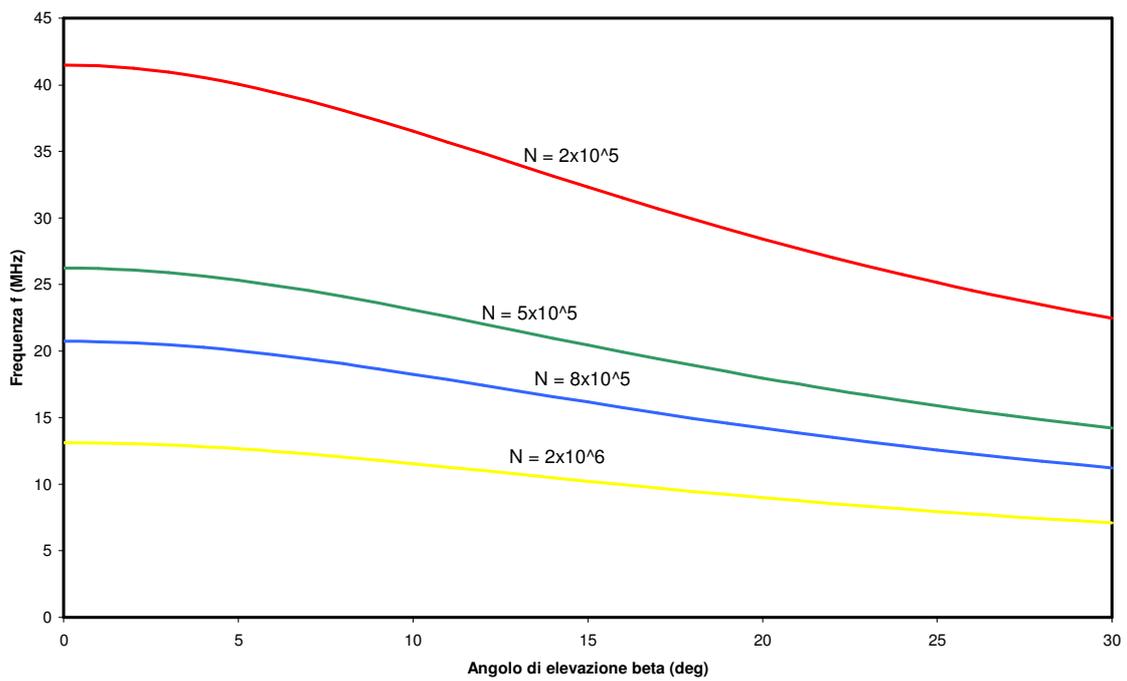


FIGURA 2 – DIPENDENZA DELLA MASSIMA FREQUENZA DALL'ANGOLO DI ELEVAZIONE β

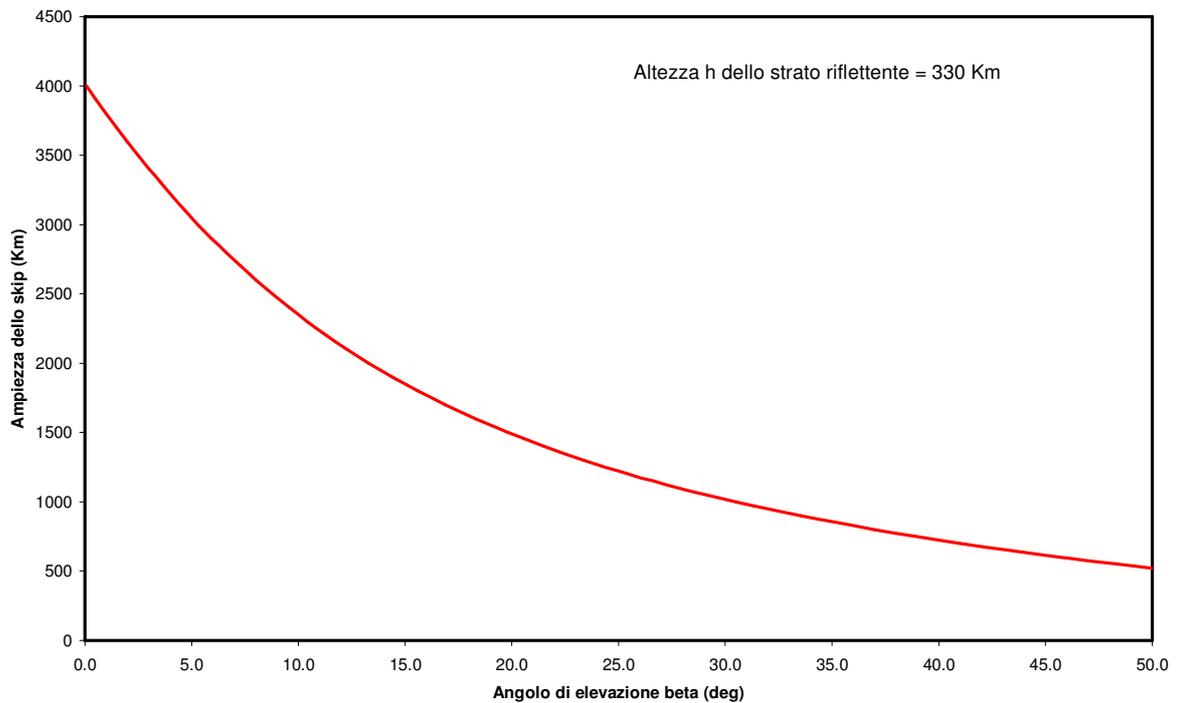


FIGURA 3 – AMPIEZZA DELLO SKIP IN FUNZIONE DELL'ANGOLO DI ELEVAZIONE β (STRATO F2)

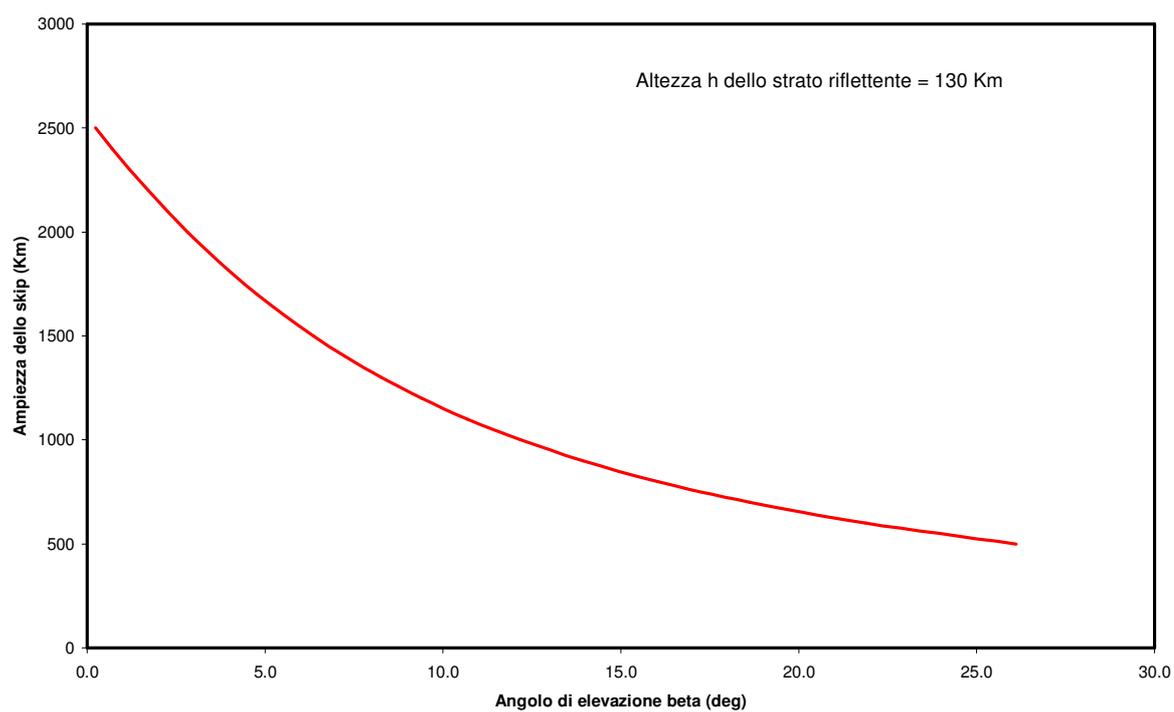


FIGURA 4 – AMPIEZZA DELLO SKIP IN FUNZIONE DELL' ANGOLO DI ELEVAZIONE β (STRATO E)

4. Fenomenologia dei collegamenti HF

Domanda

Perchè nelle ore diurne i collegamenti sulle bande basse (1.8, 3.5 e 7 MHz) sono limitati in genere a distanze molto modeste ?

Risposta

Come spiegato in 2.1, per le bande basse l'assorbimento prodotto dallo strato D e dallo strato E nelle ore diurne è considerevole, al punto da limitare pesantemente le possibilità di collegamento a livello amatoriale.

Domanda

Perchè le frequenze usate generalmente di giorno sono molto più alte di quelle usate di notte, ovvero perchè di notte è praticamente impossibile fare attività su bande come 24 e 28 MHz ?

Risposta

La ragione è che la densità N di elettroni nello strato F2 durante le ore diurne è sufficientemente alta (fig. 2) per produrre la riflessione delle onde incidenti a frequenze alte (> 21 MHz), ovvero la MUF è dell'ordine di 30 MHz; allo stesso tempo queste frequenze, come detto in 2.1, subiscono un'attenuazione da parte degli strati D e E praticamente trascurabile.

Viceversa, nelle ore notturne, la densità N di elettroni nello strato F2 si riduce notevolmente e così pure la MUF, mentre l'attenuazione introdotta dagli strati D e E sulle frequenze medio-basse (≤ 14 MHz) diventa sufficientemente bassa da non precludere più i collegamenti.

Domanda

Perchè, volendo fare attività DX, è opportuno avere un'antenna a basso angolo di radiazione β ?

Risposta

Minore è l'angolo di radiazione β e maggiore sarà la massima frequenza utilizzabile a parità di strato ionosferico riflettente (parametri N e h) e quindi minore l'attenuazione che si incontrerà.

Fissata una frequenza inferiore alla MUF, minore è l'angolo di elevazione β e minore sarà la ionizzazione N necessaria a garantire la riflessione del segnale trasmesso.

In ogni caso un angolo di radiazione basso garantisce uno skip più lungo.

Domanda

Cosa si intende per frequenza critica f_c ? quale è la sua relazione con la massima frequenza utilizzabile MUF ?

Risposta

La frequenza critica f_c rappresenta la massima frequenza che può essere riflessa dalla ionosfera in caso di incidenza verticale, ovvero angolo β uguale a 90° .

La MUF è sempre maggiore della f_c , ed il suo valore massimo (ovvero quello per $\beta=0^\circ$) è pari a :

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{R + 2 \cdot h}{2 \cdot h}} \cdot f_c \approx 4 \cdot f_c$$

ovvero la MUF è circa 4 volte più grande della frequenza critica f_c .

Domanda

Cosa succede se si tenta di operare con una frequenza superiore alla MUF, per es. si tenta di operare sui 28 MHz di notte ?

Risposta

La MUF è strettamente legata alla densità N di elettroni : durante la notte la densità elettronica N dello strato F2 scende a valori tali che la frequenza critica f_c diventa inferiore alle frequenze medio-alte dello spettro HF per cui tali frequenze "forano" la ionosfera e non vengono riflesse sulla superficie terrestre.

Domanda

Perchè la frequenza ottima di traffico (OTF) è scelta il 15% più bassa della MUF ?

Risposta

Assodato che non bisogna superare la MUF per stabilire un collegamento HF, il fatto di scegliere la frequenza operativa il 15% più bassa della MUF serve ad avere un certo margine nella stabilità del collegamento, ovvero è necessaria per compensare l'inevitabile fading che, lavorando alla MUF, sarebbe distruttivo e potrebbe precludere la conduzione a termine del collegamento.

Domanda

Da cosa deriva la assunzione diffusa che il massimo skip compiuto in HF è pari a 4000 Km ?

Risposta

Sulla base di quanto detto prima la propagazione estrema in HF, ovvero il cosiddetto DX, avviene tipicamente per mezzo della riflessione da parte dello strato F2. Assumendo per questo un'altezza di riferimento pari a 330 Km, ed assumendo di irradiare con angolo di elevazione β prossimo a zero, la formula :

$$\text{sen}\phi = \frac{\cos\beta}{1 + h/R}$$

ci restituisce un valore dell'angolo ϕ pari a 72° . Sostituendo i suddetti valori di ϕ e β nella relazione :

$$\phi + \beta + \theta + 90^\circ = 180^\circ$$

si ottiene che l'angolo al centro θ_0 vale 18° . Sostituendo infine tale valore nella formula :

$$\theta^\circ = \frac{r_{km}}{222.4}$$

si ottiene che r_{km} vale 4000 Km.

Domanda

Perchè quando la propagazione avviene tramite riflessione nello strato E il massimo skip è uguale a 2500 Km ?

Risposta

Assumendo per lo strato E un'altezza di riferimento pari a 130 Km, ed assumendo di irradiare con angolo di elevazione β prossimo a zero, la formula :

$$\text{sen}\phi = \frac{\cos\beta}{1 + h/R}$$

ci restituisce un valore dell'angolo ϕ pari a 79° . Sostituendo i suddetti valori di ϕ e β nella relazione :

$$\phi + \beta + \theta + 90^\circ = 180^\circ$$

si ottiene che l'angolo al centro θ_0 vale 11° . Sostituendo infine tale valore nella formula :

$$\theta^\circ = \frac{r_{km}}{222.4}$$

si ottiene che r_{km} vale 2500 Km.

Domanda

Come si può spiegare la presenza, a volte, di solo traffico “continentale”, ovvero limitato a un migliaio di Km, su una banda tipicamente DX come i 14 MHz ?

Risposta

La risposta è che una alta ionizzazione degli strati D ed E, per es. nelle ore diurne, produce ancora una non trascurabile attenuazione sulla banda dei 14 MHz, e la riflessione avviene tramite lo strato E per cui lo skip è dell' ordine di 1000-2000 Km.

5. Conclusioni

Come detto all' inizio, questo articolo non ha alcuna velleità di trattazione esauriente della fisica ionosferica : ho approssciato i problemi in modo semplicistico, schematizzando il più possibile i vari fenomeni, e questo rappresenta forse il limite maggiore del lavoro svolto ma anche la chiave di lettura per molti OM che non vogliono entrare nel dettaglio dei processi fisici alla base della propagazione ionosferica..

Io credo infatti che la maggioranza degli OM sia interessata all' aspetto operativo della ionosfera più che alle sue caratteristiche fisiche descritte da complesse equazioni differenziali o integrali.

Resto a disposizione per chiarimenti all' indirizzo e-mail: aprotopapa@selex-si.com.

Bibliografia

[1] The ARRL Antenna Handbook Ed. 1991 – cap. 23

[2] Elementi di Radiopropagazione Ionosferica – M. Martinucci – C&C Edizioni Radioelettroniche

[3] Propagation of Radio Waves – M. Dolukhanov – MIR Publishers Moscow 1971

[4] Ionospheric Radio – K. Davies – IEE Electromagnetic Series 1990