

Propagazione Troposferica



by i5WHC
i5-whc@libero.it

Sono passati quasi 130 anni, era il 1895 quando il famoso colpo di fucile dette la conferma al giovane Guglielmo Marconi, chiuso nella soffitta di Villa Grifone, che le sue intuizioni circa la possibilità che un'onda elettromagnetica potesse superare un ostacolo naturale come una collina fossero giuste, anche se l'intera comunità accademica del tempo sosteneva il contrario e, in un certo senso, alla luce delle conoscenze del tempo, peraltro aveva ragione.

E' noto a tutti che un'onda elettromagnetica si propaga linearmente nello spazio libero e quindi in teoria un segnale radio non potrebbe propagarsi oltre l'orizzonte. Quello che al tempo non era noto infatti era il comportamento dell'atmosfera terrestre ed in particolare della presenza nella sua parte più alta di una zona con un livello di ionizzazione tale da permettere la riflessione a terra di un'onda elettromagnetica a grande distanza. Si dovranno però attendere almeno 25 anni prima che la comunità scientifica riesca a dare una spiegazione certa al fenomeno di cui gli esperimenti di Marconi avevano dato così chiara evidenza.

Vale la pena ricordare che i primi a formulare un'ipotesi scientifica circa il coinvolgimento della parte alta dell'atmosfera terrestre (Termosfera) nella propagazione delle onde radio sono stati gli scienziati Oliver Heaviside (UK) e Arthur Edwin Kennelly (USA) nel 1902 sulla base dell'esperienza del collegamento transoceanico effettuata da Guglielmo Marconi l'anno precedente.

Solo successivamente però, nel 1925, fu dimostrata da Edward Appleton la presenza di strati ionizzati riflettenti a cui fu per questo assegnato il Nobel per la fisica e solo nel 1929 fu introdotto da Robert Watson Watt, il concetto di "ionosfera" per la presenza di singole aree (strati) con differente livello di ionizzazione. (l'argomento è stato trattato in una serie di articoli pubblicati su RR 11-12/2021 e 1/2022)

La capacità della ionosfera terrestre di riflettere i segnali radio nello spettro di frequenza fino ad oltre 30Mhz è ormai ben nota, soprattutto nel nostro ambiente, così come è noto che i segnali radio a frequenza più elevata tendono ad attraversarla senza subire significative variazioni di percorso. Questo è il motivo per il quale, in ambito commerciale, lo spettro delle VHF e, a maggior ragione, delle UHF, SHF, EHF è stato utilizzato solo per collegamenti radio a breve distanza in cui le relative antenne sono in "visibilità" diretta.

Peraltro già negli ultimi decenni del secolo scorso, la necessità di disporre di sistemi di trasmissione digitale a "larga banda" (Telefonia, TV, Internet, ecc.) realizzabili solo impiegando frequenze elevate, ha portato all'utilizzo intensivo di queste gamme ma la copertura di grandi distanze è stata possibile solo attraverso l'uso dei satelliti.

Unica eccezione, peraltro limitata ad un arco temporale abbastanza limitato, i decenni a cavallo tra gli anni '60 e '70, è stato lo studio circa la possibilità di realizzare collegamenti radio a frequenza elevata "oltre l'orizzonte" indagando da un punto di vista teorico-scientifico il comportamento della propagazione delle onde elettromagnetiche in un mezzo non ionizzato come la parte bassa dell'atmosfera (Troposfera).

Questo ha permesso di verificare che anche nella parte bassa dell'atmosfera terrestre esistono fenomeni fisici che possono modificare il percorso di un'onda elettromagnetica e che, a differenza della ionosfera, questi meccanismi sono pressoché indipendenti dalla frequenza quantomeno nell'arco di frequenze comprese tra 100MHz e 10 GHz. Fenomeni che a certe condizioni possono permettere di realizzare un collegamento radio a distanze ben superiori alla "portata ottica" (LOS Line Of Sight), parliamo in questo caso di "Propagazione Troposferica" argomento di questo articolo.

Propagazione Troposferica:

Parliamo di propagazione troposferica quando la propagazione dei segnali radio si limita alla parte bassa dell'atmosfera terrestre, la Troposfera. E' la zona più bassa dell'atmosfera che si estende da terra fino ad un'altezza massima di 14-15Km, come indicato in figura 1, altezza che varia in funzione della latitudine e delle stagioni, l'altezza maggiore si raggiunge in estate nelle latitudini tropicali mentre alle latitudini polari l'altezza non supera gli 8-10 Km. La troposfera è la zona dell'atmosfera in cui avvengono tutti i fenomeni meteorologici.

Nella troposfera la temperatura decresce gradualmente con l'altezza fino a circa -50°C al limite superiore. La troposfera contiene circa il 90% della massa dei gas che compongono l'atmosfera terrestre e la quasi totalità del suo vapore acqueo mentre la presenza di elettroni liberi è pressoché nulla e questo ci permette di considerare la troposfera come un mezzo elettricamente neutro.

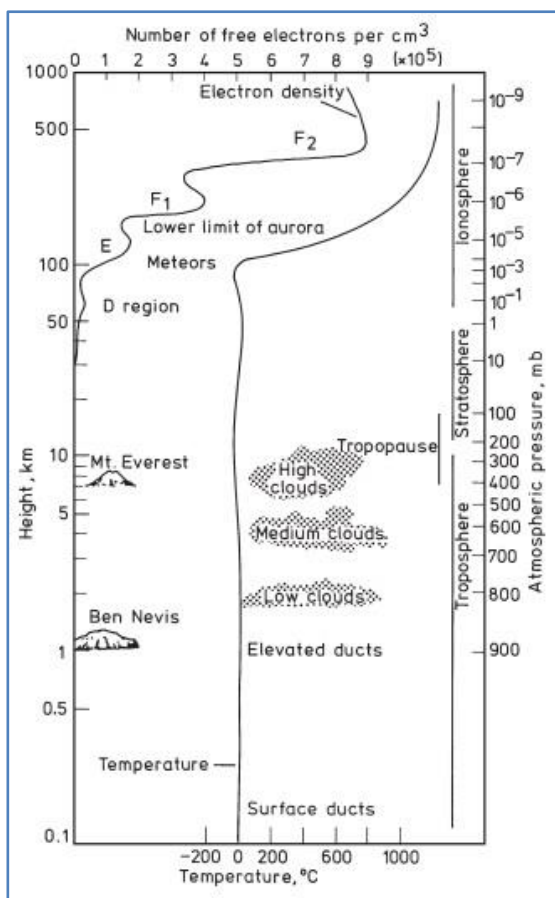


Fig. 1 – Struttura dell'atmosfera terrestre

La maggior parte della letteratura tecnico scientifica che riguarda il comportamento di un'onda elettromagnetica che si propaga all'interno della troposfera risale agli anni '60 e '70 periodo in cui hanno visto la luce i primi progetti per la realizzazione a livello commerciale e soprattutto militare di collegamenti "troposcatter" oltre l'orizzonte. Ricordo di aver fatto esperienza diretta, all'inizio della mia attività lavorativa, alla fine degli anni '70, su una tratta radio "troposcatter" UHF (460MHz) che collegava la Toscana (M.Vado la Lepre) con La Sardegna (M.Limbara) e che per garantire l'affidabilità del collegamento utilizzava una potenza di circa 100W e una coppia di parabole di ben 11m di diametro. Le difficoltà realizzative e manutentive di tali impianti ne hanno però reso molto limitata la loro diffusione e sono stati totalmente abbandonati a partire dagli anni '80. Da allora gli unici a indagare e sfruttare le caratteristiche della propagazione troposferica "oltre l'orizzonte" sono quelli di noi che si dedicano al DX in VHF UHF e SHF. Vediamo quindi di capire meglio quali siano i meccanismi e i fenomeni che regolano la propagazione troposferica e quali siano gli aspetti che possano determinare un miglior risultato per chi si dedica a questa attività.

Modi di propagazione delle onde radio nella troposfera

Come già detto parliamo di propagazione troposferica quando ci riferiamo al comportamento di un'onda elettromagnetica che si propaga nella fascia di 10-12Km di altezza da terra. In questa fascia i fenomeni fisici che interagiscono con il propagarsi di un fronte d'onda sono: **Rifrazione e Riflessione, Diffrazione, Dispersione (Scattering)** e, in funzione della posizione di TX e RX rispetto all'orizzonte, possiamo identificare tre diverse situazioni come indicato nella figura 2: **Tratta ottica (LOS)**, **Tratta per Diffrazione**, **Tratta Troposcatter**.

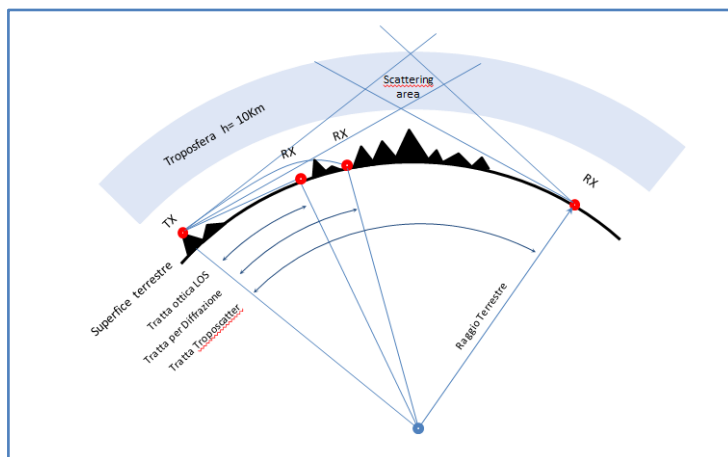


Fig. 2 – Tipologie di tratta

Vediamo adesso nel dettaglio come i fenomeni fisici sopraelencati interagiscono con il segnale radio nelle tre diverse tipologie di tratta:

Tratta Ottica (Line Of Sight)

Si può parlare di tratta ottica (LOS) quando la linea che congiunge le antenne ai due estremi del collegamento rimane ben al di sopra dell'orizzonte. Come è facile intuire questa situazione è condizionata in primo luogo dall'altezza da terra delle due antenne e dall'assenza di ostacoli lungo la tratta.

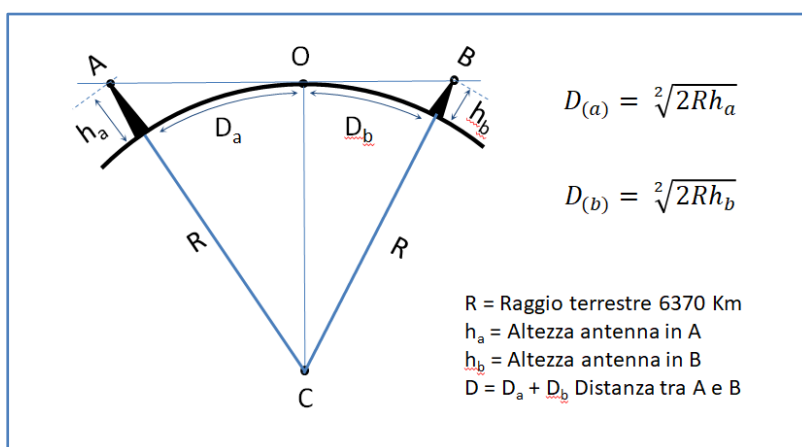


Fig.3 – Calcolo orizzonte Ottico

Come rappresentato in fig.3 la formula che ci permette di stabilire la distanza **D** dall'orizzonte di un punto posto ad altezza **h** da terra è la seguente:

[1]
$$D = \sqrt[2]{2Rh}$$

Esprimendo l'altezza da terra **h** in metri e con il raggio terrestre **R** pari a 6370 Km la formula diventa :

[2]
$$D_{(Km)} = 3,57 * \sqrt[2]{h_{(mt)}}$$

Rifrazione Troposferica

La distanza calcolata con la formula di cui sopra è relativa al caso in cui il percorso del fascio sia perfettamente rettilineo, nella realtà le cose sono diverse perché un fascio elettromagnetico che attraversa un mezzo con indice di rifrazione non omogeneo, come è nel caso dell'aria, subisce una deviazione (Rifrazione) proporzionale alla variazione dell'indice stesso secondo quanto definito dalla legge di Snell (fig.4) .

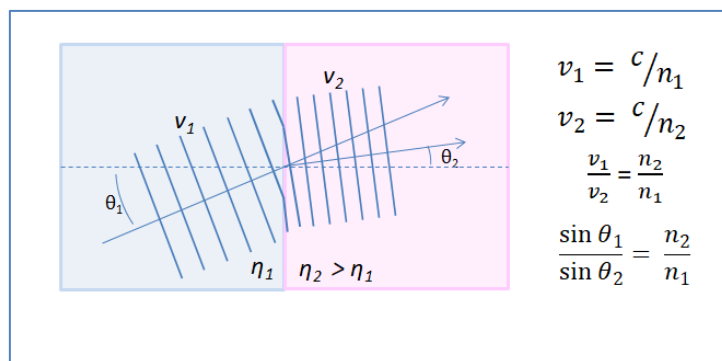


Fig. 4 – Rifrazione -Legge di Snell

Ciò avviene in conseguenza del fatto che la velocità di propagazione **v** del campo elettromagnetico nell'aria come in ogni altro mezzo dielettrico diminuisce all'aumentare nel indice di rifrazione **η** che nel vuoto, dove la velocità è uguale a **c** ($3 \cdot 10^8$ m/s), è pari a 1. Ciò determina che un fronte d'onda, che si propaga orizzontalmente in un mezzo con indice di rifrazione decrescente con l'altezza, come nel nostro caso, avrà velocità maggiore nella parte alta e minore in quella bassa questo determina un "incurvamento" verso il basso del fronte stesso (fig.5) tanto più marcato quanto maggiore è la variazione dell'indice in funzione dell'altezza :

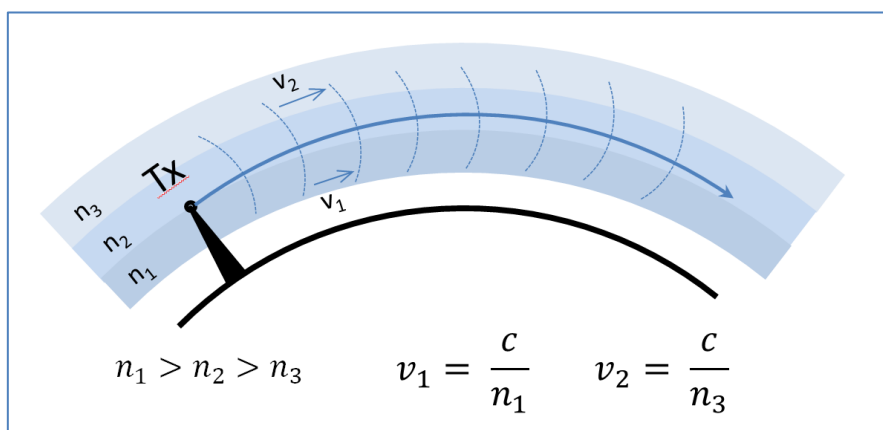


Fig. 5 – Rifrazione del fascio Radio

Poiché nella troposfera la temperatura, la pressione e la concentrazione di vapore acqueo variano con l'altezza, l'indice di rifrazione non è costante ma diminuisce in funzione dell'altezza in quanto η dipende da questi tre parametri secondo la seguente relazione:

$$[3] \quad \eta = 1 + \left\{ 77,6 * \frac{P}{T} + 3,73 * 10^5 * \frac{e}{T^2} \right\} * 10^{-6}$$

Dove : T = Temperatura dell'aria in gradi Kelvin

P = Pressione dell'aria in millibars

e = pressione parziale del vapore acqueo in millibars

A differenza di quanto avviene nella propagazione ionosferica dove l'indice di rifrazione è fortemente dipendente dalla frequenza, nella troposfera il valore di η può essere considerato costante quanto meno nel range 100MHz-10GHz. In condizioni normali (atmosfera standard) il valore è $\eta = 1,0003$ e poiché, in condizioni normali, questo valore decresce linearmente con l'altezza il fascio radio subisce una deviazione che gli permette di raggiungere una distanza maggiore (*orizzonte radio*) rispetto all'orizzonte ottico.

Poiché il valore dell'indice di rifrazione η nell'aria varia solo di pochi centomillesimi rispetto all'unità è più comodo usare il valore della "**Refrattività**" **N** definita come:

$$[4] \quad N = (\eta - 1) * 10^6$$

Nelle nostre zone in condizioni atmosfera standard il valore medio della *Refrattività* al suolo è **N = 300**.

Per il calcolo dell'orizzonte radio, per comodità di calcolo e rappresentazione, si usa per convenzione considerare il fascio radio come se fosse rettilineo su una superficie terrestre di minor curvatura, utilizzando quindi, per determinare l'orizzonte radio, un raggio terrestre fittizio **R** di lunghezza maggiore del reale:

$$[5] \quad R = k * R_0$$

dove **R₀** è l'effettivo raggio terrestre (6370Km) e il coefficiente **k** è funzione dalla variazione della refrattività (Gradiente di refrattività) che, come abbiamo appena visto, a sua volta dipende dalle condizioni di pressione temperatura e umidità dell'aria. Il valore di k è espresso dalla formula:

$$[6] \quad k = \frac{1}{1 + 6,3 * \Delta N * 10^{-3}}$$

In cui **ΔN** è il "Gradiente di Refrattività" (variazione di N rispetto all'altezza) relativo alla zona di troposfera percorsa dal fascio radio.

E quindi la formula [2] per il calcolo dell'orizzonte radio diventa:

$$[7] \quad D_{(Km)} = 3,57 * \sqrt{k * h_{(mt)}}$$

Come abbiamo visto il valore della Refrattività **N** in condizioni normali varia (si riduce) quasi linearmente con l'altezza (fig.6), l'entità di tale variazione è espressa dal valore di ΔN (Gradiente di refrattività) che assume generalmente valori negativi in quanto N diminuisce con l'altezza:

[8]

$$\Delta N = \frac{dN}{dh}$$

Il valore di ΔN per un'altezza compresa tra 0 e 1000 metri da terra è, in condizioni normali, di circa -40 e varia in funzione delle condizioni atmosferiche tra circa 0 e -80. Considerando un valore di $\Delta N = -40$ abbiamo che $k=1,33$ (4/3) che ci restituisce un valore di $R = 8493\text{Km}$, valore del raggio terrestre fittizio utilizzato per il calcolo del "orizzonte radio" in condizioni di atmosfera standard. Come è facile intuire quindi il limite dell'orizzonte radio può variare significativamente in funzione delle condizioni atmosferiche in quanto il valore di k può variare da 1 (sub-rifrazione) a 2,2 (super-rifrazione).

Particolari condizioni di stratificazione di pressione, temperatura e concentrazione di vapore acqueo nell'atmosfera possono poi determinare variazioni non lineari di N in funzione dell'altezza (fig. 7). La presenza di marcate discontinuità nel valore della rifrattività può portare anche alla formazione di "condotti" (duct) in cui il segnale radio si propaga come all'interno di una guida d'onda, condotti che permettono al segnale radio di raggiungere, con attenuazioni molto basse, distanze molto maggiori dell'orizzonte radio. Si sono registrati casi in cui condotti marini sull'oceano hanno permesso QRB di 4000Km anche se si tratta di casi eccezionali, valori più normali sono comunque nell'ordine di 1000-1500Km come capita di registrare, con maggior frequenza nel periodo estivo, sul Mediterraneo o sulle grandi pianure del nord e est Europa.

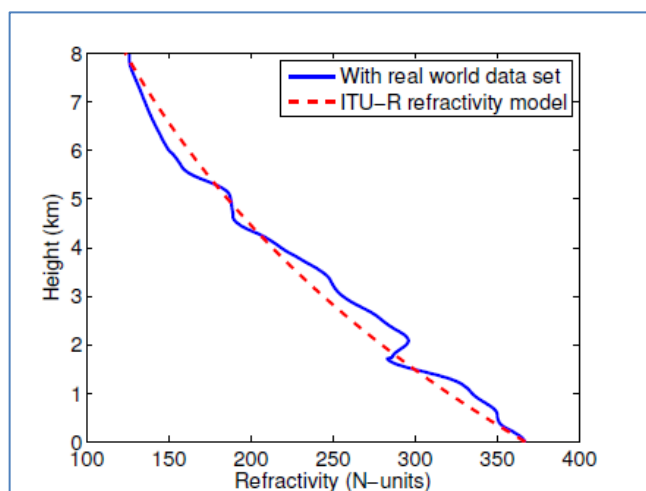


Fig. 6 – Refrattività in atmosfera standard

La formazione di questi condotti può avvenire sia a livello suolo sia ad altezze superiori. I condotti a livello suolo si formano prevalentemente sul mare in quanto il coefficiente di riflessione dell'acqua salata è molto maggiore rispetto alla terra dove le maggiori perdite di riflessione a terra causano una maggiore attenuazione. I condotti a livello suolo hanno generalmente una altezza (spessore) che varia tra alcune decine di metri fino ad un massimo di 100-200 mt e raramente si protraggono per più di alcuni chilometri nell'interno delle zone costiere. Questo spiega il fatto che a volte, nelle aree costiere, si possano ricevere segnali più forti a livello mare piuttosto che salendo in quota. I condotti elevati si generano fino a circa 1000-1500 mt di altezza in aree prevalentemente pianeggianti dove le condizioni atmosferiche idonee alla formazione sono uniformi, questo spiega il motivo della maggiore frequenza sulle pianure del nord Europa mentre la presenza di ampie catene montuose non ne favorisce la formazione.

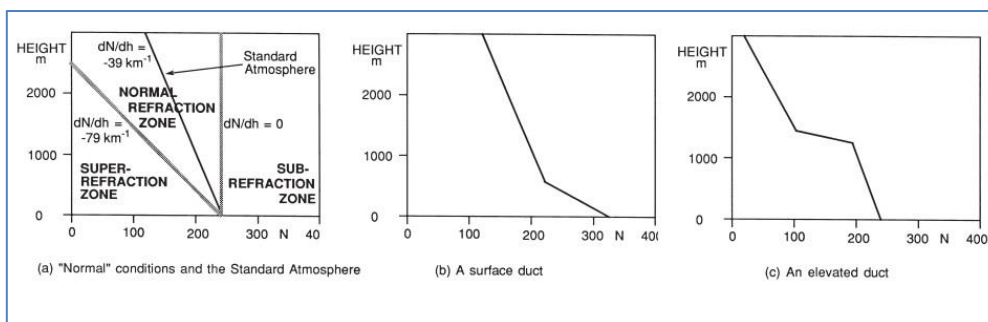


Fig. 7 – Variazione della Refrattività

La formazione di condotti è generalmente conseguenza del fenomeno del “inversione termica” dove sono presenti variazioni repentine del valore del gradiente di refrattività ΔN . Condizioni che si presentano più facilmente sul mare e nel periodo estivo ma non è infrequente la formazione di condotti anche su percorsi terrestri prevalentemente pianeggianti in tutte le stagioni, in quest’ultimo caso, per la particolare orografia del territorio, sono molto più favorite le grandi pianure del nord e est Europa dove queste condizioni si creano con maggiore frequenza mentre da noi è più comune la formazione di condotti marini soprattutto nei periodi estivi in presenza di vaste aree di alta pressione e con bassi gradienti barici.

Effetto del terreno

Fino a quando la tratta radio rimane in piena visibilità e il fascio radio rimane sufficientemente elevato sull’orizzonte, quella che in letteratura tecnica si chiama “path clearance”, l’intensità del segnale ricevuto è molto elevata e pressochè indipendente dalle condizioni di propagazione. In questo caso il valore dell’attenuazione di tratta in dB coincide sostanzialmente con quella che si ottiene applicando la formula relativa allo “spazio libero”:

$$[9] \quad A_{(dB)} = 32,4 + 20 \log_{10} f_{(MHz)} + 20 \log_{10} D_{(Km)}$$

Dove l’attenuazione dipende esclusivamente dalla frequenza f e dalla distanza D tra le due stazioni (fig.8).

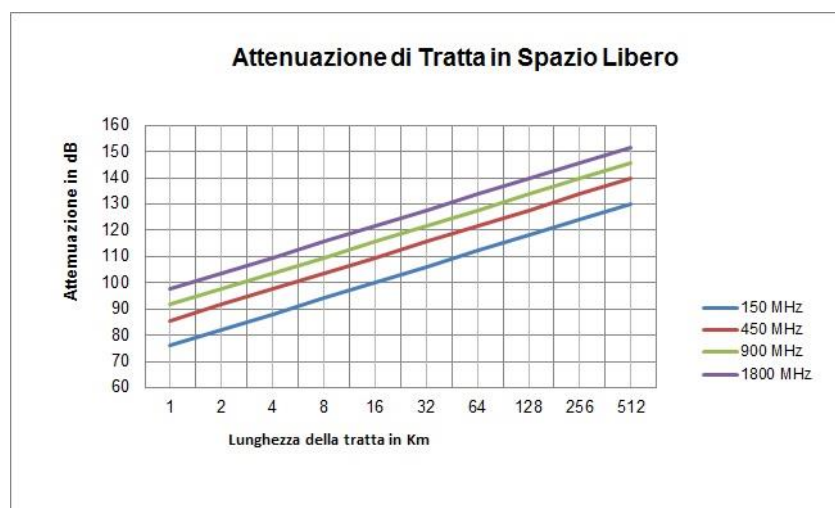


Fig. 8 – Attenuazione nello spazio libero

Quando il fascio radio si avvicina a terra le cose cambiano rapidamente e dobbiamo tenere conto dell’effetto dovuto alla componente riflessa da terra che può causare interferenze “costruttive” o “distruttive” sul segnale ricevuto in funzione della differenza di fase tra il segnale diretto e le componenti riflesse che arrivano all’antenna ricevente (fig.9). Nel caso in cui le componenti siano “in fase” con il segnale

diretto si può arrivare ad un incremento dell'intensità del segnale ricevuto fino a 6dB mentre nel caso opposto in cui le componenti riflesse risultino in opposizione di fase con il segnale diretto si può arrivare ad una riduzione del segnale ricevuto fino a -20dB.

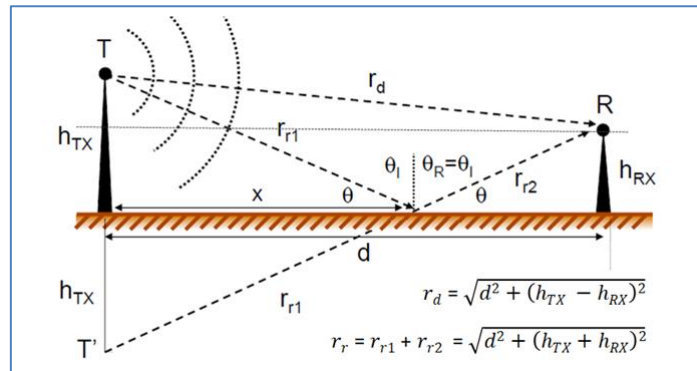


Fig. 9 – Effetto del terreno – Ground Gain

Questo effetto, noto come “Ground Gain”, è più evidente quando la riflessione avviene su una superficie piana e con un buon coefficiente di riflessione (mare, laghi, terreni pianeggianti, ecc.) mentre è meno evidente se la riflessione avviene su terreno con elevata “rugosità” e scarso coefficiente di riflessione (terreni rocciosi, aree urbane, ecc.). Di questo aspetto, spesso trascurato, dovremmo sempre tenere di conto come vedremo meglio più avanti.

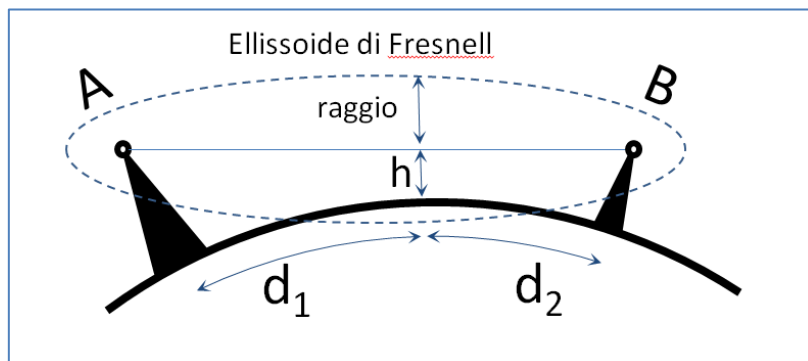


Fig. 10 – Ellissoide di Fresnell

Per l'esatta definizione del valore della “path clearance” (h) si dovrebbe far riferimento alla teoria relativa al “ellissoide di Fresnell” rappresentato in fig.10 la cui trattazione però esula dallo scopo di questo articolo. E' comunque interessante osservare il grafico di fig.11, tratto da uno studio di Kenneth Bullington e pubblicato da IEEE nel 1977, che riporta il valore dell'incremento/attenuazione in dB che può subire il segnale in funzione della “path clearance” (altezza del fascio sul suolo/ostacolo) sia nel caso in cui l'asse della tratta si avvicini all'orizzonte (*smooth sphere diffraction*) sia nel caso in cui l'asse della tratta sia interferito da un ostacolo a spigolo vivo come ad esempio la cima di una montagna (*knife edge diffraction*).

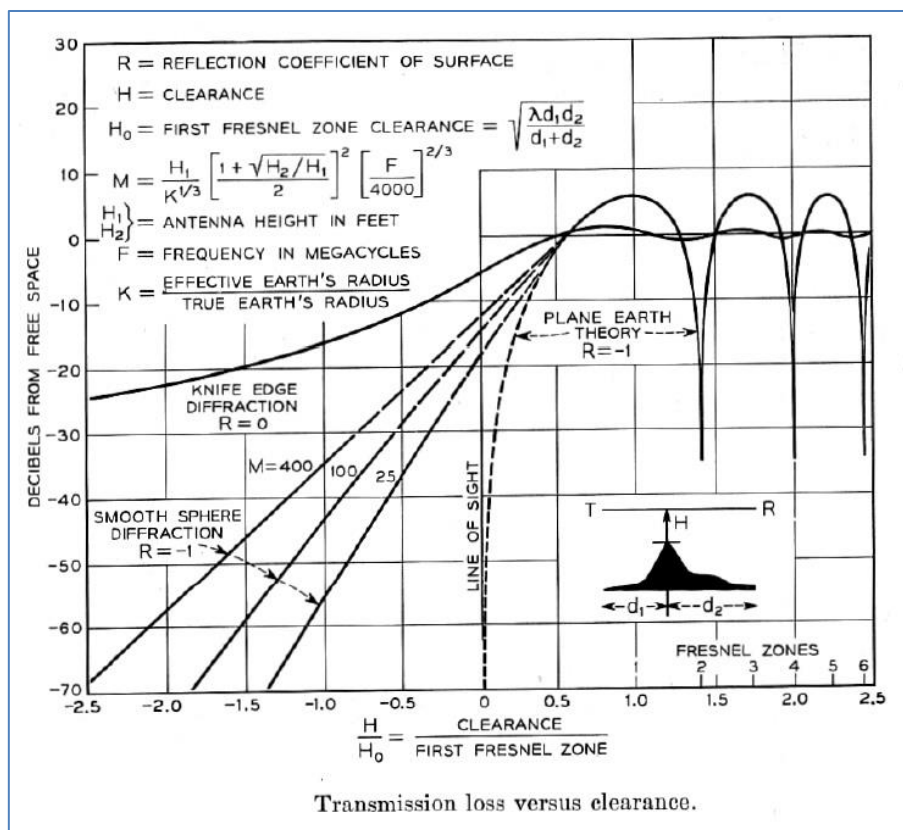


Fig. 11 – Attenuazione di tratta in funzione della path-clearance

Osservando il grafico possiamo notare che fintanto che l'asse della tratta ha una distanza da terra o dall'ostacolo superiore a circa 1/3 del raggio dell'ellissoide (parametro v del grafico $> 0,5$) il campo ricevuto fluttua intorno al valore calcolato con la formula dello "spazio libero". La fluttuazione è dovuta all'effetto del ground gain visto prima in cui le componenti riflesse possono sommarsi o sottrarsi alla componente diretta. L'entità di tale fluttuazione dipende dal valore del coefficiente R di riflessione del suolo. Quando l'asse della tratta si avvicina a terra ($0 < v < 0,5$) il campo inizia a scendere rapidamente e quando l'asse della tratta è tangente all'orizzonte o alla sommità dell'ostacolo ($v=0$) il segnale si riduce di circa 10-20dB in funzione delle caratteristiche del terreno (indice R) e/o del profilo dell'ostacolo. Nel grafico la "path clearance" è indicata con v ed è definita come:

$$[10] \quad v = \frac{h}{387,3} * \sqrt{\frac{f * D}{d_1 * d_2}}$$

Dove: h =distanza del suolo dall'asse della tratta (negativa se l'asse è al di sotto)

f =frequenza

d_1 =distanza di A dal vertice dell'ostacolo

d_2 =distanza di B dal vertice dell'ostacolo

D =lunghezza totale della tratta (d_1+d_2)

Il parametro M invece tiene conto della frequenza e dell'altezza da terra delle antenne. Come è facile intuire quando il valore di v diventa negativo, ovvero l'asse della tratta scende sotto l'orizzonte o intercetta l'ostacolo, il livello del segnale cala drasticamente anche se tale diminuzione, come vediamo dal grafico, è influenzata dalla forma e dalle caratteristiche del terreno, questo perché in tali situazioni entrano in gioco

altri fattori come il valore del coefficiente di riflessione **R** che come abbiamo già detto dipende dalla conducibilità e dalle caratteristiche dielettriche del suolo ma soprattutto il fenomeno della “**Diffrazione**”. Si possono, a questo punto, già fare alcune interessanti considerazioni prima fra tutte l’importanza che la nostra antenna abbia una buona visibilità sull’orizzonte per poter sfruttare al meglio il “ground gain”, nonché su eventuali ostacoli a breve distanza il cui contributo negativo, come abbiamo visto, inizia a farsi sentire anche per altezze inferiori all’altezza della nostra antenna.

Un’altra interessante valutazione che è possibile fare è che, contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare, in condizioni normali, l’attenuazione oltre l’orizzonte su tratte marine ($R=1$) può risultare maggiore rispetto ad un’analogia tratta su terreno pianeggiante con scarso coefficiente di riflessione ($R<1$) anche se in questo caso è determinante la conformazione del profilo del terreno. Una rigorosa trattazione di questo argomento è fatta nel documento ITU-R Rec. P.526-13 citato in bibliografia. Il grafico di fig.11 ci mostra infatti che nel caso in cui l’orizzonte radio sia ostruito da un ostacolo a “spigolo” (knife-edge), come la cima di una montagna, l’attenuazione a parità di valori negativi di v (*path clearance*) è decisamente inferiore rispetto al caso in cui la tratta intercetti una superficie piana con elevato coefficiente di riflessione (*smooth sphere diffraction*), questa differenza è dovuta all’effetto della “diffrazione” il cui comportamento è diverso nei due casi.

Diffrazione

Vediamo cosa accade quando un fronte d’onda incontra un ostacolo a “spigolo vivo”. Per fare questo dobbiamo far riferimento al principio di Huygens secondo il quale ogni punto di un fronte d’onda piano si comporta come una sorgente secondaria che genera un’onda sferica con le stesse caratteristiche del fronte principale, la combinazione dei fronti sferici secondari da origine ad un nuovo fronte piano e il ripetersi di questo fenomeno da origine all’avanzamento del fronte. Questo spiega quanto avviene quando il fronte incontra un ostacolo a spigolo vivo (fig.12), il fronte secondario generato sul vertice dell’ostacolo (punto rosso) interagisce con i fronti secondari superiori per generare l’avanzamento del fronte piano (fronte diretto) ma venendo meno il contributo dei fronti secondari inferiori, bloccati dall’ostacolo, verso il basso il fronte secondario si propaga in forma sferica (fronte diffratto) attenuandosi via via che, allontanandosi dall’ostacolo, la superficie sferica del fronte aumenta.

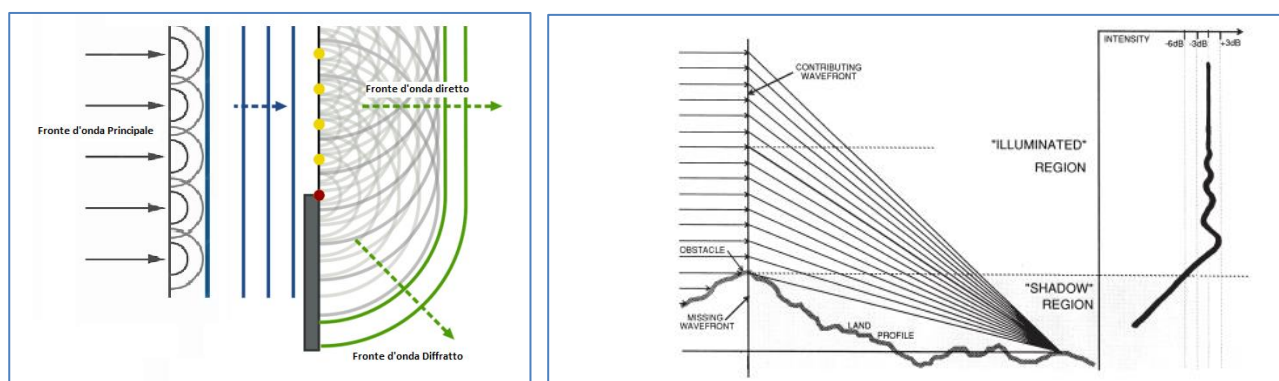


Fig. 12 – Diffrazione su ostacolo a “spigolo vivo”

Il fenomeno della diffrazione spiega quindi il motivo per il quale un segnale può raggiungere un’antenna ricevente posta oltre un ostacolo e per quale motivo l’attenuazione risulta minore nel caso di un ostacolo a “spigolo vivo” rispetto ad un profilo arrotondato dove la dinamica della diffrazione è decisamente più complessa.

Gli studi effettuati negli anni hanno quantificato il livello medio di attenuazione per una tratta a grande distanza oltre l'orizzonte e hanno evidenziato come la componente di campo dovuta alla propagazione per diffrazione sia inizialmente quella prevalente ma, a causa dell'elevata attenuazione, a distanze maggiori oltre l'orizzonte tende a prevalere la componente dovuta al "troposcatter" modalità di propagazione che, come andremo a vedere, ha caratteristiche diverse.

Il grafico di fig.13 tratto da un documento degli anni '60 del Iowa Academy of Science (*Scattering of Electromagnetic Waves in the Troposphere and the Use of This Technique For Communications*) riepiloga quanto fino a qui esposto e anticipa quello che andremo a vedere più avanti ovvero che per distanze superiori ai 200-300Km (attenzione nel grafico le distanze sono espresse in miglia terrestri quindi per convertirle in Km si deve moltiplicare per 1,6) al netto della eventuale formazione di un "condotto" (duct) la modalità prevalente di propagazione è il "Troposcatter" modalità per la quale valgono regole in parte diverse rispetto a quanto visto fino a qui, modalità che può permettere di raggiungere distanze di oltre 1000Km. Ovviamente è inutile sottolineare che il dato di attenuazione riportato nel grafico non è assoluto ma è da ritenersi un dato medio di riferimento a causa della molteplicità di fattori e di variabili che, come abbiamo visto, intervengono nel processo di propagazione del segnale radio.

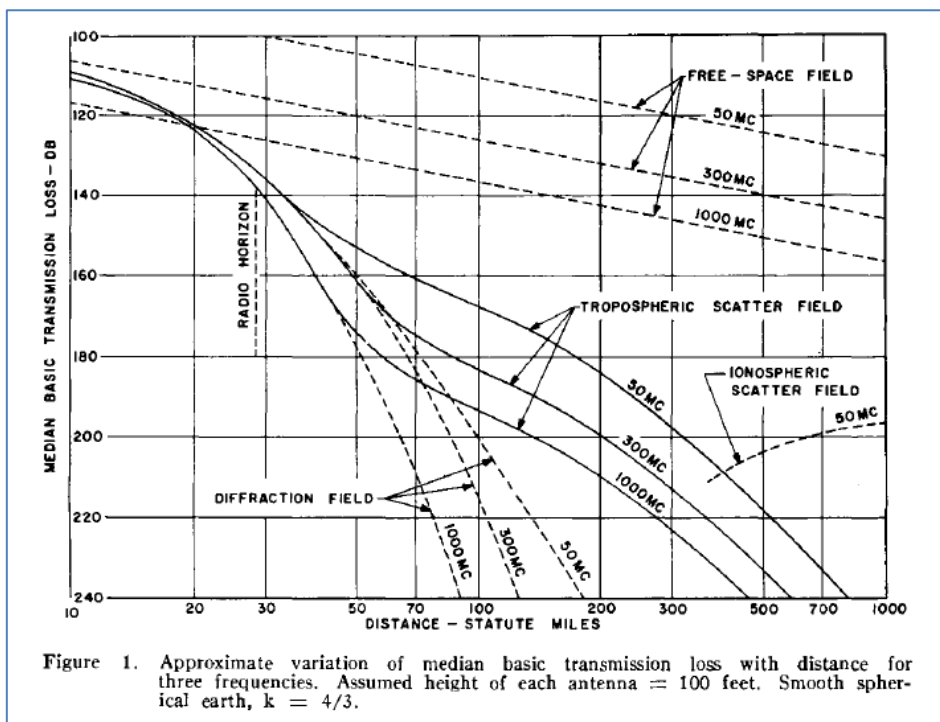


Fig. 13 – Attenuazione di tratta a grande distanza oltre l'orizzonte

Dispersione Troposferica (scattering)

Oltre ai fenomeni di Rifrazione e di Diffrazione che abbiamo appena analizzato, un fronte d'onda che si propaga nella troposfera è soggetto anche ad un altro fenomeno che è quello della "Dispersione" o "Scattering".

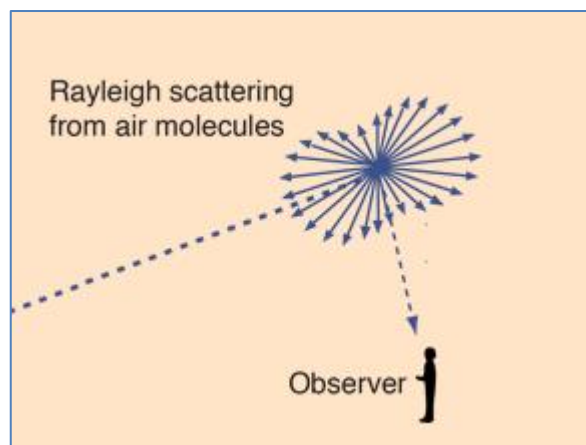


Fig. 14 – Scattering

Si parla di scattering quando un fascio elettromagnetico raggiunge particelle, sospese in un mezzo elettricamente neutro, che abbiano dimensioni molto più piccole della lunghezza d'onda λ della radiazione incidente (teoria di Rayleigh) in questo caso la particella diventa a sua volta sorgente di un campo elettromagnetico che si irradia in tutte le direzioni (fig.14). E' il fenomeno per il quale in una giornata serena e senza nubi, dalla terra, il cielo appare celeste e luminoso mentre in assenza di questo fenomeno apparirebbe completamente nero come appare a chi lo osservi al di fuori dell'atmosfera.

Analogamente a quanto avviene per la luce lo stesso fenomeno, sebbene con minore intensità, si determina anche per un fascio radio. Senza entrare nei dettagli della teoria appare però intuitivo come l'energia reirradiata da ciascuna particella sia minima, ma se il volume interessato è sufficientemente ampio e se i livelli di potenza che lo raggiungono sono adeguati, la parte di energia che torna a terra può essere sufficiente per stabilire un collegamento radio.

Se consideriamo la geometria di una tratta troposcatter come quella riportata in fig.15 possiamo osservare come la possibilità di stabilire il collegamento sia subordinata all'esistenza di una "area di scattering" comune ai due estremi del collegamento e di conseguenza il limite massimo di distanza sia dovuto esclusivamente dall'altezza dell'area di scattering e dall'angolo di take-off del fascio radio, angolo che per raggiungere la massima distanza deve essere il più basso possibile. Come evidenzia la figura 15 la presenza di ostacoli a terra nella zona intermedia, anche se di altezza elevata, come catene montuose, non influenza la geometria del collegamento che è modificata solo dalla presenza di eventuali ostacoli sull'orizzonte che possano limitare l'angolo di take-off. La perdita anche di un solo grado nell'angolo di take-off è stato calcolato che porti alla perdita di circa 8-9 dB a causa della drastica riduzione del volume dell'area di scattering illuminata dal fascio radio.

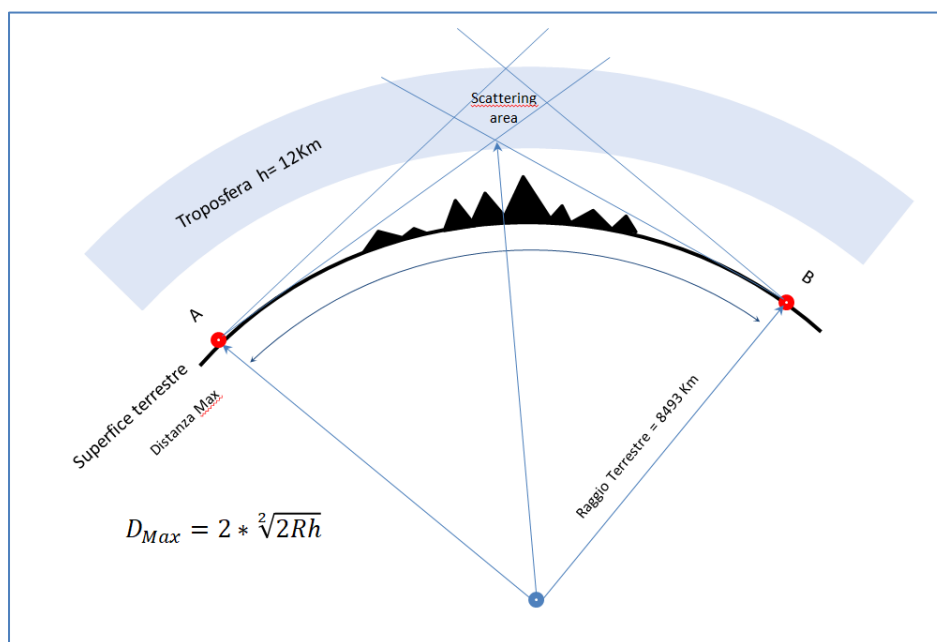


Fig. 15 – Geometria della tratta troposcatter

In atmosfera standard ($\Delta N = -40$) la massima distanza raggiungibile via troposcatter per un'altezza della troposfera di 12Km è pari a circa 800 Km, valore che non risente molto delle variazioni di N legate alle condizioni atmosferiche perché anche ipotizzando la peggiore condizione ($\Delta N = 0$) il limite scende solo a 700Km. La variazione maggiore si ha in funzione dell'altezza della troposfera che come visto all'inizio tende a essere maggiore in estate e alle basse latitudini. Questo significa che QSO con QRB di 700-800Km via troposcatter sono teoricamente sempre possibili a patto che siano rispettate le condizioni indicate nella "geometria" della tratta (angolo di take-off=0) e che si disponga di un setup adeguato al power-budget della tratta.

Da questo punto di vista un grosso aiuto arriva dai sistemi digitali in quanto permettono di recuperare parecchi dB rispetto alla fonia e rendono possibili QSO con QRB elevato anche a chi dispone di set-up minori.

E' comunque necessario ricordare che parliamo di attenuazioni complessive di tratta che, alla massima distanza, possono arrivare a 240 dB e che richiedono da entrambi i lati del collegamento potenze al limite del "legal power" e antenne con guadagno elevato (non meno di 15-20dBi) oltre che una buona NF in RX. In considerazione che l'efficienza dello scattering non dipende in modo significativo dalla frequenza, e considerato il fatto che in UHF e SHF è mediamente più semplice disporre di sistemi di antenna ad alto guadagno e anche in considerazione che su queste bande il rumore è generalmente inferiore, si può affermare che potenzialmente non ci sono grandi differenze dovute alla banda utilizzata.

A questo punto è necessario fare alcune considerazioni sui sistemi di antenna. Appare evidente, sulla base di quanto abbiamo fino a qui visto, che nel traffico via propagazione troposferica l'angolo di take-off è elemento determinante, angolo che è determinato dalla "visibilità" che l'antenna ha dell'orizzonte e dal lobo di radiazione dell'antenna stessa (fig.16).

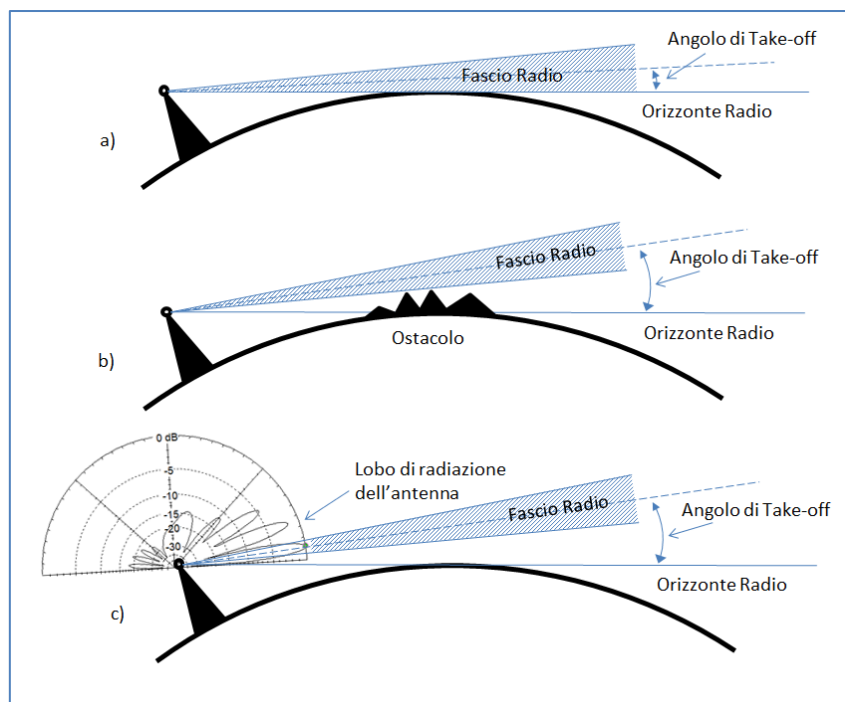


Fig. 16 – Angolo di Take-off

Come abbiamo visto l'ideale sarebbe avere un angolo di take-off pari a zero o addirittura negativo (fig.16a), cosa possibile solo abitando sulla sommità di una collina che ha solo pianura intorno. Purtroppo nella quasi totalità dei casi, tranne forse qualche fortunatissima eccezione, l'angolo di take-off della nostra antenna è maggiore di zero a causa dell'orografia del territorio (colline, montagne, boschi, ecc.) o di ostacoli (fabbricati, alberi, ecc.) che ne limitano la visibilità dell'orizzonte (fig.16b). Giusto per fare un esempio numerico una collina alta 500mt. posta a 15Km di distanza limita l'angolo di take-off a 2°, lo stesso effetto è causato da un ostacolo posto a 200mt. di distanza che sovrasti la nostra antenna di 7mt. condizioni abbastanza frequenti ma che come abbiamo visto possono introdurre oltre 15dB di attenuazione sul collegamento troposcatter. C'è poi una seconda considerazione da fare riguardo al lobo di radiazione dell'antenna.

Una cosa che viene spesso sottovalutata è che, a causa dell'effetto del terreno, il lobo di radiazione dell'antenna, indipendentemente dal guadagno, si modifica in funzione dell'altezza da terra a cui è posta l'antenna stessa. Per avere un angolo di radiazione molto basso, come è richiesto in questo caso, è necessario che l'antenna sia posta a non meno di $10-15\lambda$ sopra il livello medio del terreno circostante (fig.16c). La formula che ci dà il valore dell'angolo di radiazione α di un'antenna in polarizzazione orizzontale è:

$$[11] \quad \alpha = \sin^{-1} \frac{\lambda}{4h}$$

Nella tabella di fig.17 possiamo vedere i valori dell'angolo di radiazione α di una antenna per i 144Mhz ($\lambda=2m$) in funzione dell'altezza sul livello medio del terreno circostante. Dobbiamo tenere conto che se ci troviamo in aperta campagna l'altezza coincide con quella sul suolo circostante, mentre in area urbana le cose sono un po' più complicate (*multi-path propagation*), dobbiamo considerare che l'altezza dei fabbricati circostanti anche se più bassi della nostra antenna interferisce negativamente quindi, cautelativamente, l'altezza dovrebbe essere ancora maggiore.

Altezza h (m)	Angolo α (deg)
10	2,9
12	2,4
14	2,0
16	1,8
18	1,6
20	1,4
22	1,3
24	1,2
26	1,1
28	1,0
30	1,0

Fig. 17 – Angolo di radiazione di un'antenna per i 144MHz in funzione dell'altezza

Se andiamo a confrontare le caratteristiche del lobo di radiazione reale di un'antenna posta a diverse altezze ci rendiamo facilmente conto di come in certi casi sia più conveniente, in termini di guadagno, installare l'antenna più in alto piuttosto che sostituirla con una di maggior guadagno per quanto detto sopra a proposito dell'angolo di take-off. A titolo di esempio in fig.18 sono riportati i lobi di radiazione di una 6 el. DK7ZB per i 2m posta a 8 mt. e a 15 mt. di altezza, è però facile dimostrare, con l'uso di un simulatore, che il problema si presenta esattamente nelle stesse proporzioni indipendentemente dal guadagno (e quindi dalle dimensioni) dell'antenna.:

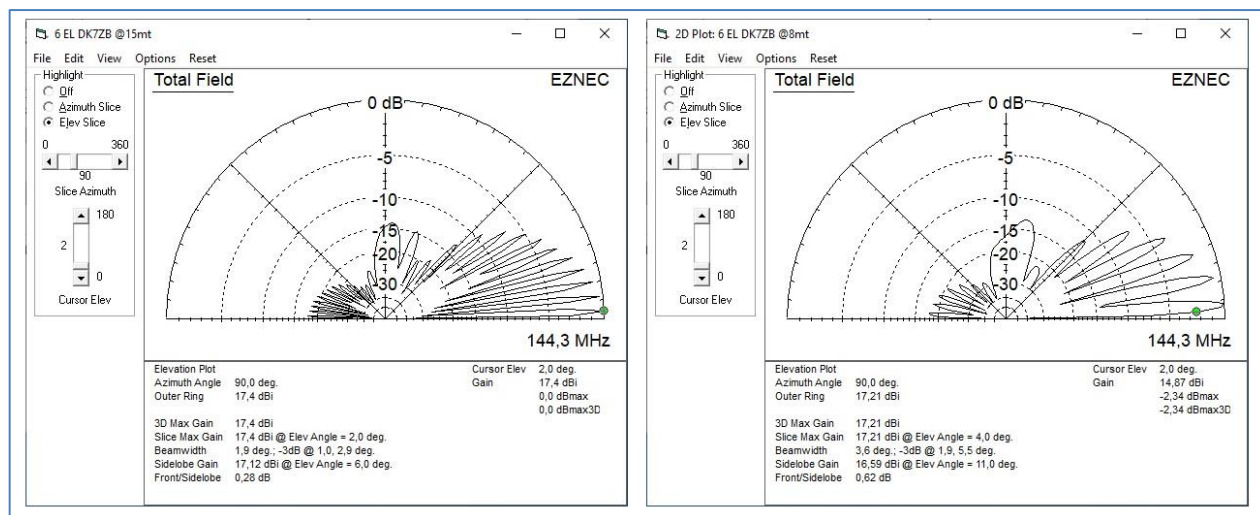


Fig. 18 – Confronto tra i lobi di radiazione di una antenna posta ad altezze diverse

Come si può notare la stessa antenna a 15mt di altezza presenta il massimo del lobo a 2° con un guadagno di 17,4dBi, quasi 6 dB in più rispetto allo spazio libero dovuti al "ground gain", a 8mt di altezza la stessa antenna ha il lobo massimo a 3° e il guadagno a 2° scende a 14,8dBi ben 2,6dB in meno rispetto al caso precedente, senza considerare che 2° di take-off, come detto sopra, sono già fin troppi per il troposcatter in quanto come abbiamo visto possono penalizzare fino a ben 15 dB rispetto al caso di orizzonte totalmente libero. Questo comporterebbe quindi che passando da 8mt a 15mt si potrebbero guadagnare in teoria oltre 3dB per il vantaggio combinato di diminuzione dell'angolo di radiazione e di aumento del guadagno senza considerare che il guadagno potrebbe essere ben maggiore qualora vi fossero nelle vicinanze ostacoli di altezza tale da essere superati con l'innalzamento.

Peraltro è opportuno ricordare che nel caso che si usi un array di più antenne, l'angolo di radiazione del sistema è sempre maggiore di quello che avrebbe singolarmente l'antenna più alta anche se il guadagno complessivo è ovviamente maggiore. A questo proposito poi si deve tenere di conto di un ulteriore aspetto che in letteratura è indicato come *"aperture-to-medium coupling loss"* ovvero il fatto che aumentando molto il guadagno dell'antenna, cosa che però nella pratica potrebbe verificarsi solo sulle bande più alte, il fascio irradiato potrebbe diventare così stretto da non illuminare completamente tutta l'area di scattering vanificando di fatto l'aumento di guadagno, problema che si potrebbe presentare però solo con guadagni di antenna superiori ai 30dB.

Conclusioni

Dopo aver visto quali sono i meccanismi e i fenomeni coinvolti nel processo di propagazione troposferica possiamo provare a trarne qualche indicazione utile per sfruttare meglio l'opportunità di realizzare qualche buon DX su queste bande.

Aspetti Geografici

La prima considerazione da fare è che le condizioni fisiche della troposfera, come abbiamo visto sono determinanti soprattutto per QSO entro i 300Km dove gli effetti dovuti all'indice di rifrazione sono più marcati, così come sono determinanti per la possibile formazione dei "condotti" che possono permetterci di raggiungere facilmente distanze molto superiori, mentre su distanze maggiori via troposcatter l'incidenza come abbiamo visto è minore. Per questi motivi è comunque utile monitorare le condizioni meteo su ampia scala per poter identificare quelle condizioni che possono offrire le maggiori opportunità di poter effettuare qualche buon DX. Fortunatamente un valido supporto ci è fornito da alcuni siti che elaborano previsioni di propagazione troposferica per l'area del Mediterraneo e dell'Europa continentale i link dei più noti sono riportati in bibliografia.

Sfortunatamente come già detto l'orografia del territorio nazionale non facilita la formazione di condotti terrestri mentre quelli marini sono un'opportunità che può essere sfruttata al meglio solo da chi vive sulle zone costiere. Da questo punto di vista le migliori opportunità sono offerte a chi vive lungo le coste Adriatiche per la maggiore presenza di potenziali corrispondenti nelle aree a nord e ad est dotati di adeguati set-up. La costa Tirrenica sebbene potenzialmente offra un ampio arco geografico di apertura via mare (da NW a S) offre minori opportunità in quanto i potenziali corrispondenti lungo le coste contrapposte sono numericamente inferiori, se non addirittura assenti lungo le coste sud del Mediterraneo che potrebbero offrire invece le opportunità migliori in termini di DX.

Ma a prescindere dalle condizioni meteo, l'orografia del territorio unitamente alla distribuzione del potenziale bacino di corrispondenti penalizza anche le opportunità via "Troposcatter" soprattutto per chi vive a sud e dell'Appennino in quanto la catena montuosa che divide in due il paese è un limite importante in termini di angolo di take-off verso il nord e est Europa, principale bacino di attività, come peraltro lo sono le Alpi per chi abita nella fascia nord della pianura padana. Una valutazione di massima di quelle che sono le condizioni offerte dalla propria posizione si può ottenere verificando graficamente il profilo del proprio orizzonte.

Sono disponibili in rete varie opzioni che possono aiutare in questa valutazione, personalmente ho trovato molto utile il sito https://www.udeuschle.de/panoramas/makepanoramas_it.htm dove inserendo i dati della propria posizione si ottiene una rappresentazione grafica molto dettagliata del profilo sui 360° dell'orizzonte con indicazione di altezza e distanza degli ostacoli naturali e che permette di fare una valutazione puntuale del proprio angolo di take-off nelle varie direzioni al netto di eventuali ostacoli locali

Si può ben notare come a partire da 330° il potenziale angolo di take-off sale intorno ai 3° valore che può essere facilmente calcolato andando a verificare l'altezza ***h*** e la distanza ***d*** degli ostacoli che si visualizzano cliccando sull'etichetta che ne riporta il nome e applicando la semplice formula trigonometrica:

Per un calcolo esatto dell'angolo dovremmo però tenere conto anche della curvatura terrestre che, a distanze elevate, riduce l'effettiva altezza dell'ostacolo, in questo caso la formula esatta diventa:

Allo stesso modo è possibile verificare il profilo di una tratta verso un potenziale corrispondente utilizzando una delle tante funzioni di google-earth o, meglio ancora, con una delle varie applicazioni disponibili in rete come airscout.

Esaminando i profili si ha la conferma di quanto già poteva essere prevedibile con l'osservazione del profilo dell'orizzonte visto prima, si evidenzia in fatti che il profilo della tratta con DK5EW (JN48MB) il cui QTF=348° presenta una area di scattering relativamente piccola in considerazione del QRB di soli 492Km, e decentrata rispetto al punto mediano della tratta. Questa è la conseguenza del fatto che in questa direzione, il mio angolo di take-off è intorno ai 3° a causa degli ostacoli presenti.

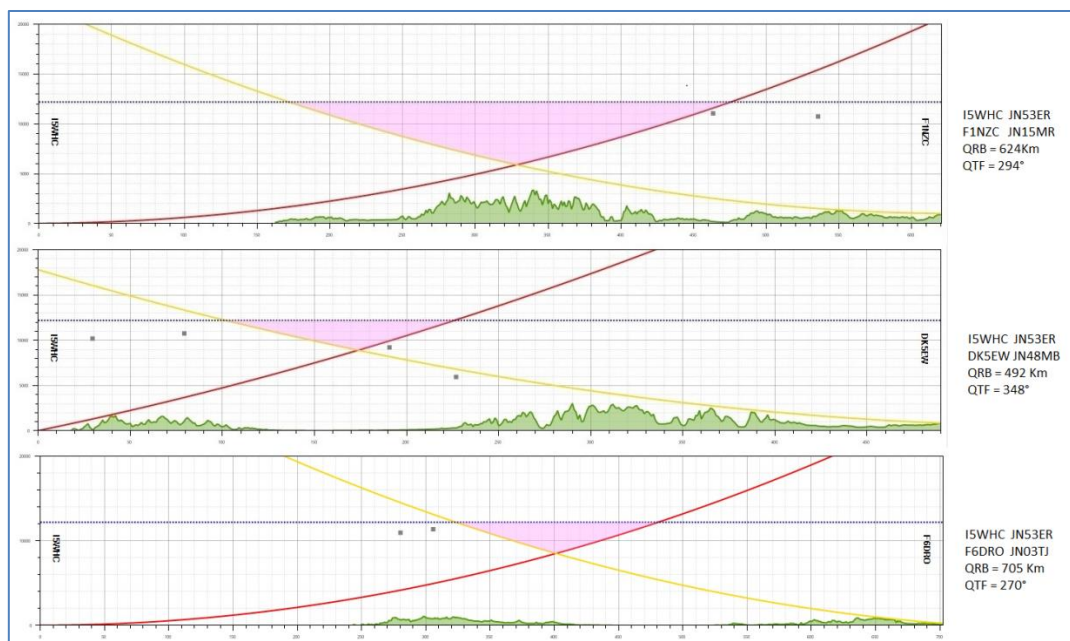


Fig. 20 – Profili di tratta

Osservando invece il profilo di tratta con F1NZC (JN15MR) con QTF=294° si può notare come l'area di scattering sia molto più ampia e centrale nonostante che il QRB di 624Km sia ben superiore al caso precedente questo a conferma che il mio angolo di take-off in questa direzione è nettamente migliore. La conferma arriva dal profilo di tratta con F6DRO (JN03TJ) con QTF=270° che con un QRB di ben 705Km presenta un'area di scattering paragonabile per dimensione a quella della tratta con DK5EW di ben 213Km più corta.

E' un'ulteriore conferma di quanto già detto circa l'importanza di un basso angolo di take-off, ovviamente non è possibile spostare le montagne e quindi rimane solo la possibilità di intervenire sul sistema d'antenna laddove questo possa portare qualche beneficio, maggiore altezza da terra e dagli edifici circostanti e buona visibilità dell'orizzonte possono quindi aiutare molto.

Link utili:

https://www.dxinfocentre.com/tropo_eur.html

<https://www.mmmonvhf.de/trmap.php>

<https://tropo.f5len.org/>

https://www.dxmaps.com/index_i.html

<https://vhf.dxview.org/>

https://www.udeuschle.de/panoramas/makepanoramas_it.htm

Referenze:

OZ1RH - Palle Preben-Hansen, "Everyday VHF, UHF, and SHF propagation 700 km DX anytime using troposcatter"

KA1GT - Bob Atkins, *"Radio Propagation by Tropospheric Scattering"*

W3SZ - Roger Rehr, *"Tropospheric Scatter Propagation for VHF, UHF, and Microwave Frequencies"*

LA0BY - Stefan Heck, *"Extreme Tropo Propagationon 144 MHz and up"*

G3SEK - Ian White, *"THE VHF/UHF DX BOOK"* ©1995 by DIR PUBLISHING LTD

Ergin Dinç, *"Beyond-Line-of-Sight Communications and Networks with Troposcatter and Atmospheric Ducts"*
©2016 Koç University Graduate School of Sciences and Engineering

Kenneth Bullington, *"Radio Propagation for Vehicular Communications"* © IEEE NOVEMBER 1977

Irvin H. Gerks, *"Scattering of Electromagnetic Waves in the Troposphere and the Use of This Technique For Communications"* © 1960 Iowa Academy of Science

William E. Frazier, *"Handbook of radio wave propagation loss, Part II (100 - 20,000 MHz)"* aprile 1989 U.S.
DEPARTMENT OF COMMERCE

Albert D. Wheelon, *"Radio -Wave Scattering by Tropospheric Irregularities"* ©1959 Journal of Research of
the National Bureau of Standards

ITU-R P.526-13 *"Propagation by diffraction"* Ginevra 2013

ITU-R Vol. 5 *"Propagation in non-ionized media"* Ginevra 1990