

3. 5. La propagazione ionosferica

Un segnale radio irradiato da un'antenna sulla terra (nello spazio è differente), si scinde in due componenti: l'onda di terra, base dei sistemi di trasmissione in onde lunghe e medie a corta distanza e l'onda spaziale, base dei sistemi in onde corte e in onde medie a lunga distanza.

L'intensità di campo dell'onda di terra in onde lunghe, medie e corte è direttamente proporzionale alla conduttività del terreno e inversamente proporzionale alla frequenza di trasmissione.

La propagazione in onde lunghe si avvale quasi unicamente dell'onda di terra. In onde corte, in ragione della minor lunghezza d'onda, sulle frequenze attorno a 3 MHz l'onda di terra sparisce dopo qualche chilometro. Dopo qualche decina di metri sulle frequenze prossime a 30 MHz. Si conclude pertanto che in onde corte le comunicazioni avvengono esclusivamente per onda spaziale.

Il fenomeno dell'onda di terra si lascia spiegare richiamandosi alla teoria della propagazione di un'onda elettromagnetica lungo un conduttore cilindrico, supposto nello spazio libero senza sospensioni di sorta (perdite dielettriche). Si consideri un'onda elettromagnetica che percorre un conduttore. Una parte di essa genererà una corrente di spostamento nello spazio circostante al conduttore. Una parte invece penetrerà nel conduttore dando luogo a una corrente di conduzione. Motore delle due differenti correnti sono le due differenti componenti vettoriali del campo elettrico. Quella esterna al conduttore e quella interna. Volendo definire il limite fra lo spazio, sede della corrente di spostamento e il conduttore, sede della corrente di conduzione si può introdurre il concetto della superficie di discontinuità che separa i due medi di propagazione.

Evitando d'entrare in un dedalo di formule matematiche si intuisce che:

- a) sopra la superficie di discontinuità, nello spazio libero esterno al conduttore (filo), deve scorrere una corrente di spostamento. Dovendo soddisfare la: "conditio sine qua non", che prevede che l'onda si propaghi lungo il conduttore senza abbandonarlo, il vettore della densità di corrente di spostamento \underline{J}_s deve almeno essere parallelo all'asse di simmetria del conduttore o essere leggermente inclinato verso la superficie di discontinuità. Attingendo alle formule dei capitoli precedenti, per il caso alta frequenza, si definisce il vettore della corrente di spostamento:

$$\underline{J}_s = j \omega \epsilon \underline{E}_{ext}$$

con j operatore dei numeri complessi pari alla radice quadrata di meno uno, ω uguale a $(2\pi f)$, f frequenza dell'onda e \underline{E}_{ext} componente del vettore del campo elettrico esterna al conduttore

- b) sotto la superficie di discontinuità, all'interno del conduttore (filo), deve esistere una corrente di conduzione. Dovendo soddisfare la: "conditio sine qua non", che prevede che l'onda deve penetrare nel conduttore senza abbandonarlo, il vettore della densità di corrente di spostamento \underline{J}_c deve almeno essere perpendicolare all'asse di simmetria del conduttore o leggermente inclinato verso la superficie di discontinuità. Dai capitoli precedenti si definisce il vettore della corrente di conduzione:

$$\underline{J}_c = \sigma \underline{E}_{int}$$

con σ uguale alla conduttività del conduttore e \underline{E}_{int} componente del vettore del campo elettrico interna al conduttore

- c) lungo la superficie di discontinuità corrente di spostamento e di conduzione devono eguagliarsi:

$$\underline{J}_s = \underline{J}_c$$

Stante questa situazione non resta che concludere che la corrente di spostamento funge da traino dell'onda lungo il conduttore (propagazione). Mentre la corrente di conduzione la tiene saldamente agganciata al conduttore. Dimostrato che esiste una corrente di conduzione all'interno del conduttore, proporzionale alla conduttività (reciproco della resistenza), non rimane che concludere che essa, penetrando nel conduttore per effetto Joule deve dissipare parte della sua energia in calore proporzionalmente all'impedenza del conduttore e alla frequenza dell'onda (skineffect), attenuandosi.

Si consideri ora un radiocollegamento fra due stazioni in onde lunghe. Il terreno fra le due stazioni rappresenta il conduttore entro cui scorre e penetra la corrente di conduzione che la tiene "agganciata" e l'attenua. La crosta terrestre è la superficie di discontinuità. Nello spazio oltre la crosta, la corrente di spostamento trainerà l'onda tangenzialmente lungo la curvatura terrestre.

La comunicazione in onde lunghe si avvale quindi prevalentemente dell'onda di terra. Per la verità esiste una piccola componente di onda spaziale, ma di poca utilità pratica. Gli inizi della radiotelegrafia sono

contrassegnati dall'uso delle onde lunghe. Senza volere entrare nel merito si ricorda la grande impresa della prima radiocomunicazione transatlantica di Marconi in onde lunghe. Per molti anni Marconi e la sua ditta, la Marconi Corporation, in regime di quasi monopolio, proposero alle amministrazioni telegrafiche nazionali e su loro ordine realizzarono potentissime stazioni in onda lunga per il traffico radiotelegrafico commerciale, fin tanto che un piccolo manipolo di radioamatori americani, inglesi e francesi si accorsero che in onde corte l'onda di terra spariva a breve distanza mentre la componente spaziale ricompariva sulla terra a grande distanza. Con entusiasmo e caparbietà si accordarono per tentare di riattraversare l'Atlantico usando stazioni in onde corte di debole potenza. Fu così che la famosa notte del **8 dicembre 1921**, quando in Inghilterra e Francia alle ore **0142 gmt** i radioamatori in ascolto ricevettero i primi segnali emessi dalla stazione dei radioamatori americani, iniziò il declino delle grandi stazioni radio a onda lunga. Oggi alle nostre latitudini, in banda radiodiffusione onde lunghe, si sentono ancora un paio di stazioni francesi, una inglese, una germanica e qualche altra. Per il resto, scomparsi i sistemi di navigazione Loran, Omega, ecc. non rimane che qualche radiofaro e qualche orologio come la DCF 77 che regola sveglie e orologi madre di mezza Europa.

I modi di propagazione della componente spaziale in onde corte sono due:

- a) verticale (zenitale), con angolo d'incidenza nella ionosfera $\Phi = 0^\circ$.
- b) obliqua con angolo d'incidenza nella ionosfera $0^\circ < \Phi < 90^\circ$

Si ricorda che l'angolo d'incidenza Φ è misurato rispetto all'asse di simmetria passante per il punto di riflessione della ionosfera e il centro della terra.

Si ipotizzi d'irradiare verticalmente (modo zenitale) verso una ionosfera supposta **piana** (riflessione speculare) un segnale calibrato. Comparando il valore calcolato della potenza del segnale riflesso dalla ionosfera: **P**, per definizione inversamente proporzionale alla distanza e alla penetrazione nello strato riflettente, con la potenza del segnale irradiato ERP (Effective Radiated Power): **P₀**, si otterrà una attenuazione teorica **A_{teorica}** uguale a:

$$A_{teorica} = 10 \log (P/P_0)$$

con A espressa in dB.

Si irradia ora veramente il segnale precedentemente ipotizzato. Si misuri la potenza del segnale di ritorno: **P** e lo si rapporti alla ERP: **P₀**. Sorprendentemente l'attenuazione misurata: **A_{misurata}**, risulterà inferiore:

$$A_{misurata} < A_{teorica}$$

La disuguaglianza lascia supporre che ci si trovi davanti a un'amplificazione naturale. Senza volere entrare nel merito, il fenomeno si lascia spiegare applicando le leggi dell'ottica e in particolare degli specchi concavi. Proiettando geometricamente l'immagine virtuale della **superficie equivalente dell'antenna** sullo strato ionosferico supposto concavo, si otterrà un'immagine maggiorata, quindi amplificata. Rapportando l'area equivalente alla virtuale espresse in funzione del raggio terrestre **r** e dell'altezza fra terra, ionosfera **h**, si otterrà il **guadagno ionosferico zenitale: G_z**, prodotto dalla focalizzazione del fascio riflesso dalla ionosfera verso l'antenna ricevente:

$$G_z = 10 \log (Area_{virt} / Area_{eq}) = 20 \log [1+(2h/r)]$$

Ad esempio il guadagno zenitale dello strato F2 supposto a un'altezza di 350 km dalla terra è di 0,6 dB. Partendo da queste premesse è possibile calcolare il guadagno ionosferico per collegamenti pretangenziali a media distanza. Ad esempio lungo una tratta di 600 km via strato F2 il guadagno è di 0,4 dB. Su tratte intercontinentali: America, Australia, Oceania, ecc, esso può raggiungere valori altissimi: **60...80 dB**.

La scoperta dell'esistenza del guadagno ionosferico permise la soluzione del paradosso dei segnali. Si considerino ad esempio due radiosegnali. L'uno proveniente da 500 km in banda 7 MHz. L'altro proveniente da 20000 km in banda 28 MHz. Di uguale ERP. Ricevuti contemporaneamente in periodo di propagazione ideale su ricevitori identici, con antenna accordata e identico guadagno d'antenna. Ipotizzando una riflessione speculare (ionosfera piana), si calcoli l'intensità del segnale da breve distanza, che risulterà appena sufficiente a garantire la comunicazione, mentre quella del segnale transcontinentale risulterà nulla.

Ma la natura per fortuna disobbedisce volentieri alle aride elucubrazioni matematiche. Tant'è che misurando si trova che il segnale transcontinentale, paradossalmente, ha la stessa intensità, se non superiore, a quello da 500 km. Fù così che nacque il paradosso delle radiocomunicazioni, rimasto tale per molti anni:

"Fermo restando che lungo la tratta ionosferica percorsa da un segnale in onda corta non ci possono essere amplificatori di sorta, quale fenomeno fisico compensa la forte attenuazione di tratta dei segnali transcontinentali rispetto a quelli da breve distanza?"

L'elementare soluzione del paradosso giunse quando finalmente dopo anni d'inutili ipotesi e misure ci si ricordò che le particelle d'aria formanti la ionosfera sono trattenute dalla forza di gravità che agisce in modo radiale per cui la superficie ionosferica non poteva essere piana, ma concava. Abbandonando il concetto di riflessione speculare (puntiforme) su una superficie piana per una concava e richiamandosi ai fenomeni di focalizzazione dell'energia tipici dell'ottica geometrica, è abbastanza facile dimostrare l'esistenza e quantizzare il guadagno ionosferico. Il ridicolo sta che a anni di distanza ci sono ancora autori che scrivono convinti, della riflessione ionosferica speculare.

La riflessione ionosferica di un segnale a radiazione zenitale (verticale) dipende dalla frequenza utilizzata e dalla densità elettronica dello strato riflettente. La frequenza oltre la quale il segnale "buca" lo strato e si perde nello spazio è detta: **frequenza critica o frequenza limite**, abbreviato: **f_o**, seguito dall'identificazione dello strato. Esempio: foF2, designa la frequenza critica dello strato F2. La si calcola con la formula [9] dell'indice di diffrazione (vedi: capitolo 3.2 onda ionosferica e indice di rifrazione). Essendo l'angolo d'incidenza Φ della radiazione verticale uguale a zero, risolvendo in **f_o** con **n** uguale alla densità elettronica si ottiene:

$$f_o = 9 (n)^{1/2}$$

Gli istituti geofisici inviano verticalmente alla ionosfera, in continuazione, impulsi a frequenza variabile da 0 a 10 MHz. Misurando i tempi di ritorno a terra del segnale, tenendo conto della penetrazione dell'onda negli strati e della velocità di propagazione, deducono l'altezza degli strati in funzione della frequenza **h(foF_x)** e compilano gli **"ionogrammi"**.

La ionosfera è rappresentata di solito come una sovrapposizione di strati separati dal vuoto. Gli ionogrammi mostrano al contrario una traccia a catenella con un minimo fra i picchi di due strati detto: **valle**, di cui si è già detto nei precedenti capitoli. Funzione discontinua con decadimento e incremento monotono fra due discontinuità, che rivela l'esistenza una certa densità elettronica residua e la possibilità che l'onda in transito venga rifratta anche fra due strati.

Un collegamento radio, salvo si voglia esplicitamente raggiungere ricevitori posti oltre la ionosfera come i satelliti non usa la propagazione zenitale, ma obliqua.

Si assuma un segnale irradiato **obliquo**, con angolo d'incidenza fra: $0^\circ < \Phi < 90^\circ$ e frequenza superiore a **1MHz**, volendo evitare l'attenuazione supplementare d'aumentata probabilità di collisione fra elettroni. Si assuma altresì una giornata magneticamente tranquilla. L'onda incidente subirà una rifrazione (vedi capitolo 3.2 onda ionosferica e indice di rifrazione). Ricordando che frequenza di plasma e frequenza limite sono la stessa cosa si sostituisca nella formula dell'indice di rifrazione **f_p** con **f_o**:

$$n_e = \text{sen } \Phi = [1 - (\omega_p/\omega)^2]^{1/2} = [1 - (f_p/f)^2]^{1/2} = [1 - (f_o/f)^2]^{1/2}$$

Applicando la nota relazione trigonometrica: $(\text{sen}^2 \Phi + \text{cos}^2 \Phi) = 1$ e risolvendo in **cos (Φ)**, si otterrà il cosiddetto: **"Teorema del coseno"** (per gli americani: della cotangente) preposto alla propagazione ionosferica obliqua:

$$\text{cos} (\Phi) = (fo/f)$$

Il coseno dell'angolo Φ d'incidenza di un'onda irradiata in modo obliquo nella ionosfera è uguale al rapporto fra la frequenza critica f_o (o frequenza di plasma f_p) e la frequenza di lavoro f.

La frequenza massima utilizzabile in modo obliquo per un collegamento a una determinata distanza si chiama: MUF (Maximum Useable Frequency) e viene indicata nelle previsioni della propagazione. Conoscendo la distanza di cerchio massimo che separa i due terminali radio, l'altezza dello strato riflettente e la frequenza limite si può calcolare l'angolo d'incidenza nella ionosfera, la MUF e scegliere il genere d'antenna il cui diagramma verticale e la cui frequenza di risonanza soddisfi i risultati.

Riducendo la MUF del 10 ... 15%, prescindendo dall'attenuazione dello strato D e da disturbi solari e geomagnetici, si ottiene la OWF (Optimum Working Frequency) o FOT (frequenza ottima di lavoro) che garantisce una probabilità di collegamento del 80 ... 90%.

La MUF è un limite, ma non l'unico. I segnali, per raggiungere lo strato riflettente devono attraversare gli strati inferiori. Ne consegue che le frequenze attorno a 3 MHz prima, durante e dopo il mezzogiorno sono inutilizzabili essendo fortemente attenuate dagli strati inferiori: specialmente lo strato D. Esiste quindi oltre una frequenza limite superiore anche una frequenza limite inferiore: la LUF (Lowest Useable Frequency) sotto la quale ogni collegamento ionosferico è impossibile. In questo senso si richiama l'attenzione sul fatto

che durante il giorno i segnali che attraversano gli strati inferiori oltre essere attenuati vengono anche pririfratti e conseguentemente ricevuti a una distanza inferiore a quella calcolabile con la MUF.

L'esperienza di molti anni di radio ha evidenziato i limiti della teoria delle MUF:

- ❑ non permette la previsione dell'intensità dei segnali in arrivo. Quindi non permette di conoscere a priori se essi supereranno la soglia di rumore del ricevitore
- ❑ non spiega il paradosso delle comunicazioni

Il primo limite è stato superato creando algoritmi che, implementati su sistemi informatici, sulla base della distanza di cerchio massimo del collegamento desiderato, data e ora, dati tecnici del ricevitore, potenza del trasmettitore, guadagno d'antenna, grado di concavità della ionosfera e situazione geomagnetica in forma di indici dedicati, forniscono le frequenze che garantiscono l'intensità massima dei segnali.

Il secondo limite è stato superato tenendo conto della compensazione ionosferica (guadagno) insita nello spicchio ionosferico percorso dal segnale. Per meglio chiarire questo concetto s'ipotizzino un trasmettitore e un ricevitore situati nei fuochi geometrici di uno spicchio di ionosfera a forma d'elisse. Per le proprietà geometriche dell'elisse, l'energia emessa dall'antenna trasmittente verrà riflessa dalla ionosfera, teoricamente senza attenuazione, focalizzandosi sull'antenna ricevente. La ionosfera è però il prodotto di due fenomeni dinamici: la ionizzazione e la ricombinazione, fenomeni turbolenti e antitetici tendenti a modificare nel tempo la concavità (raggio di curvatura) della superficie ellittica, quindi variare la posizione dei fuochi. Ne consegue che l'antenna trasmittente e ricevente, supposte stabili, variando la concavità non coincideranno più con i fuochi dell'elisse. E il guadagno ionosferico e i segnali ricevuti caleranno velocemente, ma non istantaneamente. In natura nulla muta istantaneamente! L'instabilità produrrà un ondeggiamento dello strato e un'evanescenza dei segnali sempre più rapida e profonda con il trascorrere del tempo, fino all'interruzione della comunicazione. In realtà ciò che ogni radio-operatore in collegamento transoceanico teme.

La vecchia teoria delle MUF premette una ionosfera isotropa, mentre essa sovente soffre d'anisotropia da disturbo geomagnetico. Anche se i giorni disturbati su un miniciclo solare di 27 giorni sono di regola abbastanza contenuti. Per cui le vecchie MUF non sono tutte da buttare. Prese con le dovute riserve permettono di chiarire anomalie o valutare possibilità di traffico radio a corta e media distanza in modo rapido, semplice e, perché no, anche sicuro.

Prima di chiudere è bene spendere qualche parola sulla trasparenza degli strati, funzione della densità elettronica, della lunghezza d'onda e dall'angolo d'incidenza. Semplificando oltre il lecito per meglio capire il fenomeno, si immagini l'onda incidente come una biglia che cade su un tessuto a maglia tonda. La biglia attraverserà il tessuto solo se il suo diametro sarà inferiore a quello del tessuto. Si sostituisca il diametro della biglia con la lunghezza d'onda λ . Si concluderà che l'onda attraverserà o non attraverserà lo strato se la densità elettronica sarà tale da offrire spazi fra le cariche ("maglie") non comparabili o comparabili con λ .

Lunghezza d'onda e frequenza sono legate da una nota proporzionalità in cui il fattore proporzionale è la velocità di propagazione dell'onda: c , nel caso dell'onda elettromagnetica nel vuoto pari a 300000 km/s:

$$f = c / \lambda$$

Ne consegue che essendo la densità elettronica inversamente proporzionale all'altezza, lo strato superiore: F2, avrà "maglie" più strette e rifletterà i segnali a frequenza più alta che in virtù della lunghezza d'onda più corta: "bucheranno" gli strati inferiori. Si può quindi concludere che la trasparenza degli strati è inversamente proporzionale all'altezza e alla frequenza di trasmissione.

3.6. Intensità dei segnali ricevuti

La progettazione di un generico circuito radio punto/punto prende il via dalla comparazione delle caratteristiche dei ricevitori offerti dal mercato e scegliendo il modello più appropriato. Se il mercato offre nulla o se per decisione d'impresa viene imposto un certo capitolato, si tenterà in proprio o con la collaborazione delle ditte del ramo la realizzazione di un prototipo.

Sommando alla sensibilità del ricevitore per un dato rapporto segnale/disturbo in dB (ossia la tensione ai capi del bocchettone d'antenna del ricevitore necessaria per superare il rumore di fondo generato dall'apparecchiatura stessa) le perdite della discesa d'antenna e di eventuali organi di allacciamento e commutazione si ottiene la tensione richiesta ai capi dell'antenna, in dB. La sensibilità non è l'unico dato di fabbricazione importante. Selettività, stabilità in frequenza, tasso d'intemodulazione, ecc sono altrettanto importanti, ma non determinano la tensione d'antenna richiesta per garantire la comprensibilità della comunicazione. Si considerino le seguenti definizioni:

Il segnale misurato ai capi di un'antenna su una data impedenza è proporzionale alla metà dell'intensità del campo elettrico generata dal trasmettitore in un dato luogo e in un dato momento. Il fattore di proporzionalità è l'altezza (sovente detta anche lunghezza) efficace dell'antenna: h_{eff} , uguale all'integrale della corrente sinusoidale d'antenna lungo il conduttore, diviso per il massimo di corrente d'antenna.

$$U_{ant} = h_{eff} (E/2)$$

L'altezza efficace di un'antenna è sempre inferiore alla sua altezza fisica:

$$h_{ant} > h_{eff}$$

La distribuzione dell'intensità di campo generata da un trasmettitore in onde ultracorte in una determinata zona è di genere gaussiano (curva a campana). La progettazione di questi impianti si basa sul principio che l'intensità di campo misurate debbano essere uguali o superiori alle mediane definite internazionalmente $E_{mediano}$. Il termine: mediana oppure valore mediano è una grandezza statistica con probabilità d'evento del 50%. Le allora PTT svizzere e la BBC inglese pubblicarono nel 1970 e nel 1977 dei rapporti sul calcolo dell'intensità mediana di campo generata da trasmettitori in onde medie per una potenza di riferimento di 1 kW. In particolare la BBC considerava la propagazione ionosferica dei segnali 6 ore dopo il tramonto in stato di ricombinazione, con numero di macchie solari $R=0$ e assenza di flusso solare, in funzione del guadagno d'antenna, della latitudine magnetica dei luoghi di trasmissione e della eventuale posizione costiera. Tenendo presente che il comportamento dei segnali ionosferici in onde corte è abbastanza simile a quello delle onde medie a lunga distanza dopo il tramonto. Dopo aver adattato le formule della BBC e dalle PTT al calcolo della mediana dell'intensità di campo della stazione DK1NL in Ulm con potenza 50 W e avere trasformato il campo in tensione ai capi dall'antenna, riferendosi a un'altezza efficace dell'antenna h_{eff} di 5m e un'impedenza di 50 ohm. Dopo avere calcolato la mediana di 96 valori di tensione della stessa stazione, misurati in Ravenna durante il 2004. I valori che compaiono nella tabella sottostante sono stati analizzati.

Dati					U mediana calcolata		U mediana misurata
Strato	Dist [km]	f [MHz]	hant [m]	heff [dB]	BBC [dBμ]	PTT [dBμ]	Ravenna [dBμ]
F2	447	7	5	8	34	34	32

È interessante constatare come le mediane calcolate siano uguali e divergano di soli **2 dB** dalla mediana misurata, pari al **6%** d'errore, non dimenticando che la tensione misurata sul ricevitore include le perdite d'inserzione della discesa d'antenna e l'errore di lettura dello strumento del ricevitore.

Si può pertanto concludere che il sistema di calcolo proposto dai due Enti è applicabile ai collegamenti in banda 7 MHz di media distanza e a riflessione ionosferica unica. Attenzione però a non generalizzare questo risultato estendendolo a altre bande di frequenza e altri modi di propagazione senza riscontri. Sarebbe un grosso errore di metodo!

Skip 350 - rappresentazione della mediana del segnale di dk1nl in Ravenna

