

# LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE NELLO SPAZIO

prima parte - di P. SOATI

*E' da più di una decina di anni che non abbiamo più scritto sulla propagazione delle onde elettromagnetiche. E' questo un argomento che è opportuno riprendere per il fatto che se in passato interessava una ristretta cerchia di studiosi, attualmente, in considerazione dell'eccezionale sviluppo delle emissioni nelle gamme delle onde corte VHF e UHF, esso non può essere ignorato dalla massa di lettori che per un motivo qualsiasi leggono questa rivista.*

*La conoscenza dei vari fenomeni che influenzano la propagazione delle onde em, in funzione della loro lunghezza, infatti non può più essere limitata a coloro che si interessavano di radiocomunicazioni a distanza ma bensì deve essere estesa ai tecnici radio-televisivi, ai dilettanti ed agli stessi installatori di antenne, i quali debbono essere in grado di operare nel loro specifico settore con una preparazione teorico-pratica adeguata in modo da svolgere la propria attività, sia dilettantistica o professionale, con piena cognizione di causa.*

## LE ONDE ELETTROMAGNETICHE

Le perturbazioni spaziali variabili note normalmente con il nome di onde elettromagnetiche (in effetti le onde em abbracciano tutto lo spettro che va dai raggi gamma alle onde lunghissime) che consentono di realizzare le radiocomunicazioni, sono essenzialmente individuate dalla coesistenza di un campo magnetico e di un campo elettrostatico, aventi delle linee di forza che sono disposte a 90° l'uno dall'altro e che si spostano con la stessa velocità della luce che, come è noto, è di circa 300.000 km/s (si tratta di una velocità approssimativa; recenti esperimenti hanno permesso di stabilire che essa è dell'ordine di 299.792 km/sec,  $\pm$  3 km/sec.). Figura 1.

Da tale spostamento si arriva al concetto della propagazione nello

spazio delle onde radio, che come si è detto fanno parte dello spettro delle onde em.

Si definisce come **lunghezza d'onda**, la distanza che intercorre fra due uguali valori successivi di una sinusoide, come è messo in evidenza dalla figura 2 dalla quale si può anche comprendere quale sia il concetto di **ampiezza**.

Le radiocomunicazioni sono pertanto realizzate per mezzo di onde em la cui lunghezza è compresa fra decine di migliaia di metri ed alcuni millimetri.

## SUDDIVISIONE DELLE GAMME DI FREQUENZA

Lo spettro delle frequenze radioelettriche è suddiviso in nove gamme, ciascuna delle quali è indivi-

duata da un numero, da una sigla e da una definizione.

Le frequenze sono espresse in **kilohertz** (kHz), sino a 3000 kHz inclusi, in **megahertz** (MHz), da 3 MHz a 3000 MHz inclusi, in **gigahertz** (GHz) da 3 GHz a 3000 GHz inclusi.

I simboli e prefissi hanno il seguente significato:

Hz = hertz, k = kilo ( $10^3$ ), M = mega ( $10^6$ ), G = giga ( $10^9$ ), T = tera ( $10^{12}$ ).

Le onde elettromagnetiche, in funzione della loro lunghezza e di particolari fenomeni si propagano mediante onde di superficie ed onde ionosferiche. In talune condizioni si deve tenere conto anche delle cosiddette onde troposferiche.

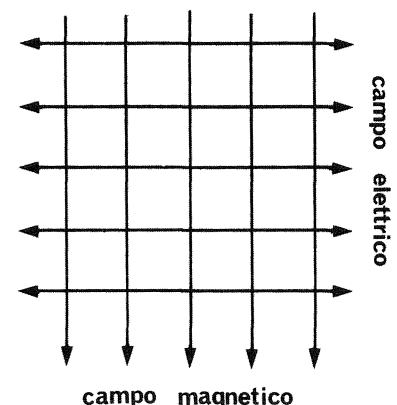


Fig. 1 - Come si presentano a distanza le due componenti elettromagnetiche di una emissione radio.

RIPARTIZIONE DELLE GAMME					
Gamma n.	Simbolo	Frequenze limite	Lunghezza d'onda limite	Definizione italiano e inglese	Suddivisione metrica
4	VLF	3 ÷ 30 kHz	100 000 ÷ 10 000 m	frequenze estremamente basse (very low frequencies)	onde miriametriche (onde lughissime)
5	LF	30 ÷ 300 kHz	10.000 ÷ 1.000 m	frequenze basse (low frequencies)	onde chilometriche (onde lunghe)
6	MF	300 ÷ 3000 kHz	1.000 ÷ 100 m	frequenze medie (medium frequencies)	onde ettometriche (onde medie e medio-corte)
7	HF	3 ÷ 30 MHz	100 ÷ 10 m	frequenze alte (high frequencies)	onde decametriche (onde corte)
8	VHF	30 ÷ 300 MHz	10 ÷ 1 m	frequenze altissime (very high frequencies)	onde metriche
9	UHF	300 ÷ 3000 MHz	100 ÷ 10 cm	frequenze ultra elevate (ultrahigh frequencies)	onde decimetriche
10	SHF	3 ÷ 30 GHz	10 ÷ 1 cm	frequenze super elevate (super high frequencies)	onde centimetriche
11	EHF	30 ÷ 300 GHz	10 ÷ 1 mm	frequenze estremamente elevate (Extremely high frequencies)	onde millimetriche
12	—	300 ÷ 3000 GHz	1 ÷ 0.1 mm	—	onde decimillesime

L'onda di superficie o di terra (**groundwave**), che interessa in modo particolare le gamme VHF e UHF in cui avvengono le emissioni radiofoniche FM e televisive, si propaga prevalentemente lungo la superficie terrestre e a sua volta può suddividersi in due distinte componenti l'onda diretta e l'onda di superficie riflessa. L'onda di superficie, in relazione alla sua lunghezza può assicurare collegamenti, per quanto concerne lo spettro più basso delle onde corte, fino a circa 600 km specialmente se il percorso copre una superficie acquosa.

Per onde ionosferiche s'intendono quelle radiazioni che sono riflesse, una o più volte, verso la terra dagli alti strati della ionosfera.

Poiché le condizioni della ionosfera possono subire delle alterazioni specialmente in relazione all'attività solare, la propagazione delle onde em, mediante riflessione può talvolta subire dei temporanei mutamenti. Per contro possono ritenersi abbastanza stabili, e quindi prevedibili, le variazioni stagionali e quelle dovute al passaggio dal giorno alla notte, sempre in funzione del ciclo delle macchie solari, di cui parleremo più diffusamente in seguito.

Talvolta le onde em subiscono delle riflessioni o delle rifrazioni anche nella regione della troposfera per cui in questo caso si parla di onde troposferiche.

Si tratta di un fenomeno che generalmente è dovuto alla presenza nella zona della troposfera di masse d'aria aventi temperatura ed umidità anormali e ad esso è dovuta la ricezione a media distanza di quelle onde em che generalmente hanno portata ottica, figura 3.

## POLARIZZAZIONE DELLE ONDE EM

In fisica per polarizzazione s'intende quel fenomeno che trasforma una vibrazione elettromagnetica ordinaria, come ad esempio le onde radio, in una vibrazione ordinata in un modo particolare (cioè polarizzata).

Senza addentrarci nella descrizione del fenomeno, che del resto è trattato ampiamente nei trattati di fisica, diciamo che per polarizzazione di un'onda elettromagnetica

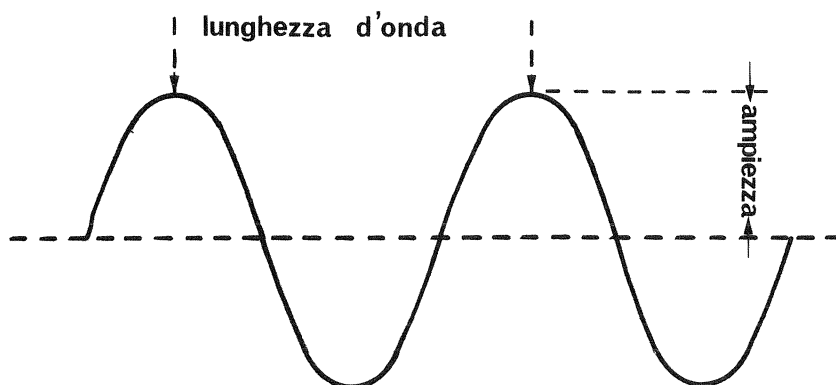


Fig. 2 - Concetto di lunghezza d'onda (  $\lambda$  ) e di ampiezza.

s'intende la direzione delle linee di forza componenti il campo elettrico. La figura 4 rappresenta, nello spazio, il campo elettrico nel piano XZ ed il campo magnetico nel piano YZ provocati dall'emissione di una corrente sinusoidale. I due piani pertanto sono normali fra di loro e la direzione Z coincide con la direzione di propagazione. In questo caso si ha una polarizzazione orizzontale.

Il piano comprendente le direzioni dei due campi cioè XY viene detto **fronte d'onda**. Quando il piano che contiene la **componente elettrica** è parallelo alla superficie terrestre si dice, per convenzione, che si ha una **polarizzazione orizzontale**, quando invece tale campo è perpendicolare, cioè normale, alla superficie terrestre si ha la **polarizzazione verticale**.

Nelle gamme delle onde corte la propagazione è caratterizzata da notevoli e frequenti variazioni del piano di polarizzazione fatto questo che si verifica in misura minore per le onde molto lunghe ed in particolare nelle gamme VHF e UHF.

## RIFLESSIONE, RIFRAZIONE E DIFFRAZIONE

Per **riflessione** s'intende quel fenomeno per cui una radiazione qualsiasi viene rinviata, in modo ordinato e regolare, dalla superficie di separazione fra due mezzi di natura diversa oppure da parte di superfici di discontinuità.

Qualsiasi mezzo od ostacolo, avente delle proprietà conduttrici e di dimensioni comparabili con la lunghezza delle onde em interessate, è in grado di effettuare la loro riflessione. La riflessione però può avvenire anche ad opera di un mezzo isolante purché esso abbia una costante dielettrica differente da quella posseduta dal mezzo in cui viaggiano normalmente le onde em come è il caso delle emissioni che partendo dalla terra che percorrono come è il caso delle emissioni che i vari strati dell'atmosfera ed incontrano successivamente la ionosfera. Un altro esempio del genere è dato dai radar i cui treni d'onda sono riflessi dagli ostacoli che essi incontrano.

Se lo spostamento delle onde em avviene obliquamente attraverso un mezzo avente un indice di rifrazione diverso da quello iniziale, il

fronte d'onda subisce una deviazione che è nota con il nome di **rifrazione**. Questo fenomeno, identico a quello che si verifica per le onde luminose, è una conseguenza della variazione di velocità alla quale sono soggette le onde em quando, lungo il loro percorso, incontrano dei mezzi aventi indici di rifrazione differenti. Si ha un avvicinamento alla superficie che separa i due mezzi se l'onda passa da un mezzo più denso ad un'altro meno denso e un allontanamento qualora il pas-

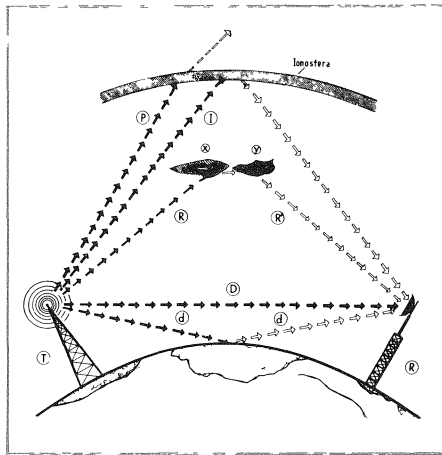


Fig. 3 - Esempi di riflessione, rifrazione, e diffrazione delle onde em. T = antenna trasmittente, R = antenna ricevente, D = onda di superficie diretta, d - d' = onda di superficie riflessa, R - R' = onda troposferica rifratta in x e y, I = onda ionosferica riflessa, P = onda leggermente rifratta nella ionosfera e che si perde nello spazio

saggio avvenga da un mezzo meno denso ad uno più denso. Diminuendo la frequenza aumenta l'indice di rifrazione.

E' detto **angolo limite** il valore massimo dell'**angolo di incidenza** con il quale l'onda può passare da un mezzo meno denso ad uno più denso senza subire la riflessione (cioè subendo soltanto una rifrazione). Oltrepassato tale valore l'onda anziché essere rifratta viene riflessa totalmente come mostra la figura 3.

Fenomeni notevoli di rifrazione si verificano ad esempio quando le onde elettromagnetiche passano dalla superficie marina su quella terrestre; in questo caso si possono verificare zone i cui segnali non sono udibili. Si tratta di un inconveniente piuttosto grave che taluni casi, che si sono verificati anche recentemente, ha impedito di ricevere da parte delle stazioni costiere i segnali di soccorso di navi in pericolo.

Un'altra proprietà delle onde elettromagnetiche, e che ha una certa importanza nella ricezione delle emissioni radiofoniche FM e TV è quella di essere soggetta al fenomeno della **diffrazione**. Si tratta di un fenomeno che si manifesta ogni qualvolta un'onda qualsiasi, sia essa elettromagnetica, sonora o meccanica, incontra un ostacolo per cui tutti i punti dell'ostacolo stesso diventano a loro volta sorgente

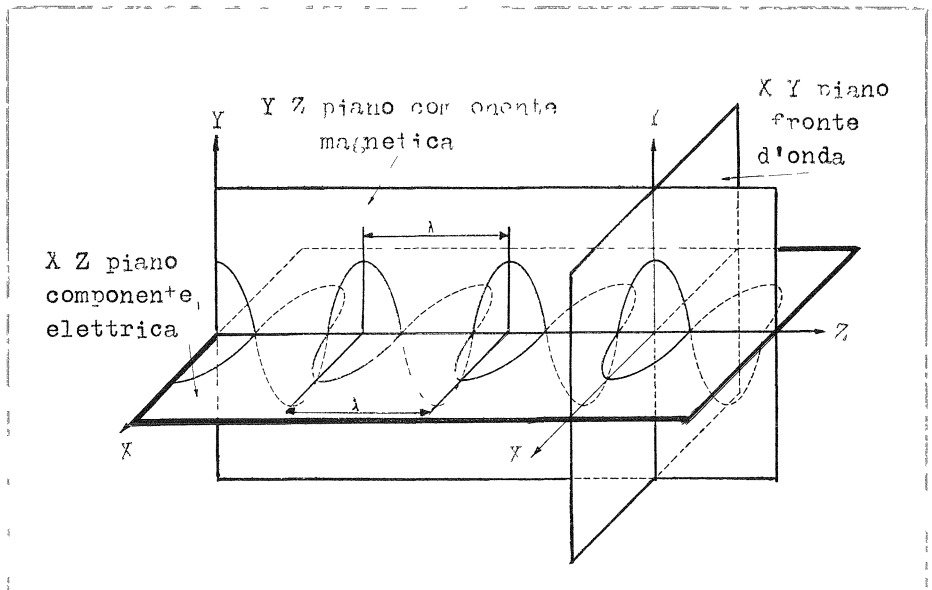


Fig 4 - Onda polarizzata orizzontalmente. In questo caso XZ è il piano orizzontale, rispetto al suolo, che contiene la componente elettrica. La componente magnetica è in fase con la componente elettrica e sono ortogonali fra di loro.

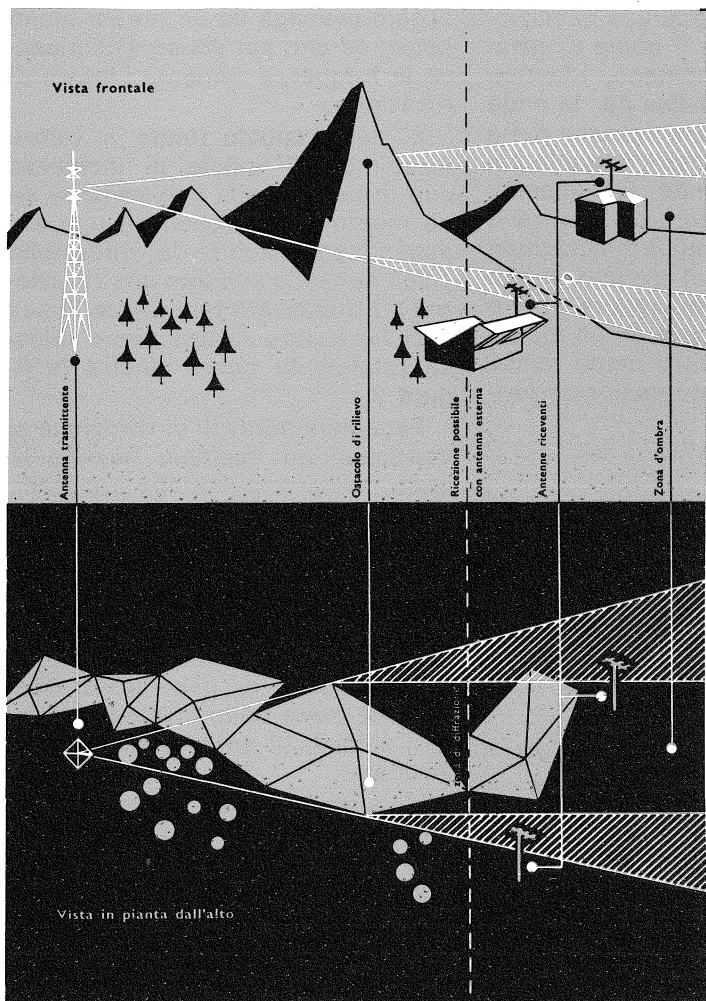


Fig. 5 - Classico esempio di propagazione per diffrazione di una emissione della gamma VHF. Alle due antenne riceventi pervengono i radiosegnali pur essendo l'antenna trasmittente coperta da un ostacolo.

di altre onde sferiche coerenti ed elementari.

La ricezione di stazioni, che lavorano su frequenze molto elevate (VHF o UHF) e che si trovano alle spalle di ostacoli aventi notevoli dimensioni è dovuta per l'appunto a dei fenomeni di **diffrazione** (figura 5).

E' questo un particolare che gli installatori di antenne che operano in località situate in profonde valli circondate da colline e montagne debbono tenere in considerazione. Talvolta l'orientamento di un'antenna nelle direzioni più impensate consente per l'appunto di ottenere dei risultati se non ottimi per lo meno passabili.

## IONOSFERA

La ionosfera è costituita da gas estremamente rarefatti e sensibilmente ionizzati dimodoché le onde em possono essere assorbite o riflesse. Essa è stata oggetto di lunghi studi iniziati da Kenelly nel 1902 continuati con successo da

Heaviside, Vergard, Birkenland, Arrehenius ed altri e che continuano tuttora con l'ausilio dei satelliti artificiali

La ionosfera ha origine dalle radiazioni ultraviolette che danno luogo alla ionizzazione delle particelle gassose che si trovano nell'alta atmosfera, un argomento sul quale ritorneremo parlando dell'attività solare. In linea di massima si può affermare che le principali cause della ionizzazione dei vari strati della ionosfera sono dovute all'azione della luce solare, ai forti campi elettromagnetici, alle emissioni

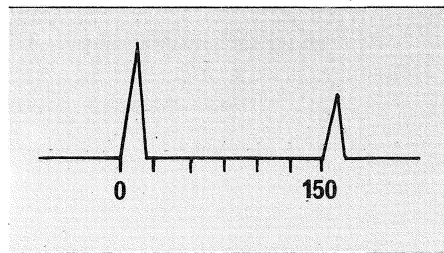


Fig. 6 - Registrazione oscillografica del raggio riflesso da uno strato ionosferico di radio impulso.

radioattive terrestri, alle radiazioni stellari e corpuscolari, alle radiazioni cosmiche e ad una certa influenza da parte di taluni pianeti.

L'intensità della ionizzazione è dunque legata a diversi fattori ragione per cui la sua distribuzione non può variare secondo una legge uniforme. La stratificazione della ionosfera sarebbe dovuta al fatto che i gas che costituiscono l'alta atmosfera sono tanto più rarefatti quanto maggiore è la loro altezza e che i raggi ultravioletti sono caratterizzati da frequenze diverse che danno luogo a differenti effetti sui gas che costituiscono l'alta atmosfera.

## STRATI IONIZZATI

L'esistenza degli strati ionosferici, aventi proprietà di riflettere le onde em, in modo diverso a seconda della loro frequenza, come si è detto, è stata provata sperimentalmente molti anni orsono mediante registrazione oscillografica del raggio riflesso di un radio-impulso (figura 6).

Questo metodo, poiché si conosce il tempo impiegato dall'impulso per raggiungere lo strato e fare ritorno al punto di partenza ed è nota la velocità di propagazione delle onde em, permette di stabilire l'altezza dello strato che ha dato origine alla riflessione. Tali esperimenti hanno consentito altresì di stabilire che per ciascun strato ionosferico, cioè per ogni massimo di concentrazione, per una data ora, in una data stagione, esiste una frequenza limite oltrepassando la quale le onde em irradiate con un angolo di 90° non vengono più riflesse sulla terra. Questa frequenza è nota con il nome di **frequenza critica** e di essa parleremo in seguito.

## STRATO IONIZZATO «D»

E' la prima zona in cui si nota una sensibile ionizzazione e che staziona fra i 50 ed i 90 km e che non è sempre presente. Comunque la sua presenza è limitata alle ore diurne, e dà luogo ad un certo indebolimento, per assorbimento, delle frequenze più alte che l'attraversano per raggiungere gli strati superiori. In questo strato le onde medie, e talvolta le onde lunghe possono essere riflesse. Ciò spiega la loro ricezione a sensibile distanza, sempre però accompagnata da pro-



fondi effetti di evanescenza, nelle ore diurne.

### STRATO IONIZZATO «E»

Fra i 90 km ed i 140 km circa, esiste una zona in cui la ionizzazione è più intensa di quella che caratterizza lo strato «D»: essa è stata denominata strato «E». Il massimo di concentrazione in genere si manifesta verso mezzogiorno dipendendo dalle radiazioni ultraviolette del Sole, mentre durante le ore notturne tende a scomparire immediatamente dopo il tramonto del Sole stesso. La sua densità varia sensibilmente in relazione alle stagioni e all'angolo con cui giungono sulla Terra i raggi solari.

Lo strato «E» interessa le comunicazioni che avvengono a distanze inferiori ai 2000 km, mentre non ha alcuna influenza sulle comunicazioni a grande distanza in considerazione del basso angolo con il quale lo colpiscono le onde em provenienti dalla Terra.

### STRATO SPORADICO «E»

La presenza di nuvole di ionizzazione nell'atmosfera, provocate generalmente dallo scoppio di meteore che penetrano nell'atmosfera stessa, può dare origine a dei fenomeni di riflessione anormali. Quando queste nuvole vengono a trovarsi all'altezza che è propria dello strato «E», anche nelle ore notturne, e provocano una maggiore concentrazione della ionizzazione che può dar luogo alla riflessione a distanza di quelle componenti delle onde a portata ottica (**specialmente nella gamma VHF**) che normalmente sono assorbite o sono destinate a perdersi nello spazio.

Tale fenomeno si verifica prevalentemente nella stagione estiva e ad essa è dovuta la ricezione a distanza (anormale) di talune emittenti televisive o di altro genere.

Questo strato è noto per l'appunto con il nome di «**strato sporadico E**».

### STRATO IONIZZATO «F»

Fra i 140 km ed i 300 km esiste un'altra zona fortemente ionizzata, alla quale si deve per l'appunto la proprietà di riflettere a grande distanza le onde corte che generalmente è nota con il nome di «**strato F**» e che si divide nelle due com-

ponenti «**Strato F<sub>1</sub>**» e «**Strato F<sub>2</sub>**».

Lo strato F<sub>1</sub> che staziona fra i 140 km ed i 250 km è presente soltanto

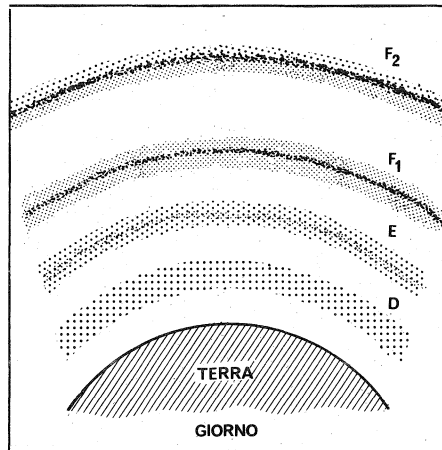


Fig. 7 - I vari strati ionizzati come si presentano normalmente durante le ore diurne.

nelle ore diurne e le sue caratteristiche sono simili a quelle dello strato E. Talvolta riflette le onde em di frequenza più elevata ma in genere le onde em che lo investono con un'adatta incidenza obliqua e che proseguono verso lo strato F<sub>2</sub> subiscono un'ulteriore attenuazione (oltre a quella subita nello strato E).

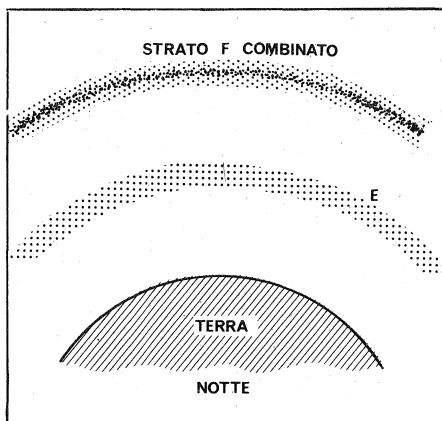


Fig. 8 - Gli strati ionizzati presenti nelle ore notturne. Lo strato E si riferisce alle condizioni sporadiche.

Lo strato F<sub>2</sub> staziona ad un'altezza di 150 km ÷ 250 km durante la notte e di 250 ÷ 300 km durante il giorno, naturalmente rispetto alla Terra. Durante l'inverno, e sempre nelle ore diurne tale altezza è invece compresa fra 150 ÷ 300 km. Queste variazioni di altezza ovviamente sono dovute alle variazioni del calore solare nelle varie ore

del giorno e della notte. Sembra però che tale strato subisca una notevole influenza anche da parte del campo magnetico terrestre ed infatti nel prevedere le condizioni di propagazione, di cui avremo occasione di parlare nel prossimo articolo, la Terra è suddivisa in tre distinte zone rappresentanti dei differenti gradi di intensità magnetica che sono dette: **est, ovest ed intermedia**.

Da notare che le zone aurorali Nord e Sud sono della massima importanza nella propagazione a distanza delle onde em tramite riflessioni nello strato F<sub>2</sub> specialmente nel periodo di massima attività solare.

NOTE  
PER IL TECNICO

# LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE NELLO SPAZIO

seconda parte - di Piero SOATI

## PROPAGAZIONE DELLE ONDE EM SOPRA LA SUPERFICIE TERRESTRE

In considerazione del fatto che la superficie terrestre nel suo insieme non è certamente da considerare un conduttore perfetto le componenti il campo elettrico che si irradiano da un'antenna trasmittente subiscono una certa inclinazione per cui parte di esse penetrano nel suolo dove sono rapidamente assorbite determinando una notevole perdita di energia.

Se invece le onde em si propagassero al di sopra di una superficie perfettamente conduttrice le linee di forza elettriche sarebbero perfettamente perpendicolari al suolo per cui non si verificherebbe alcuna perdita dell'energia irradiata. A queste condizioni ideali ci si avvicina quando le onde em viaggiano al di sopra di una superficie acquosa, come quella del mare o dei grandi laghi. Infatti l'acqua marina presenta una conduttività che è circa 5000 volte maggiore di quella propria dei terreni secchi.

La natura elettrica di un terreno, come è noto, è strettamente legata alla **costante dielettrica**, che si esprime con la lettera  $\epsilon$  in unità semplici, con riferimento alla costante dielettrica del vuoto che, arbitrariamente, è fissata in 1 (cioè l'unità) e dalla **conduttività**, espressa dalla lettera  $\delta$ , e che si esprime in mho/a e che è l'inverso della resistività.

La tabella 1 mette in evidenza le caratteristiche di costante die-

lettrica e conduttività di alcune classiche superfici terrestri.

Da quanto abbiamo detto risulta evidente che la profondità di penetrazione delle componenti elettriche delle onde em nel suolo

dipende strettamente dalle caratteristiche di quest'ultimo.

Nella seguente tabella 2 pertanto è messa in evidenza la profondità di penetrazione  $P_p$ , in metri, dell'energia radioelettrica, in fun-

TABELLA 1

Tipo di superficie	$\epsilon$	$\delta$ mho/m
Acqua marina	80	4 ÷ 5
Acqua dolce	80	1 ÷ 10 x 10 <sup>-3</sup>
Terreno molto umido	30	5 ÷ 20 x 10 <sup>-3</sup>
Terreno medio	15	0,5 ÷ 5 x 10 <sup>-3</sup>
Terra artica	15	5 x 10 <sup>-4</sup>
Terreno molto secco e grandi città industriali	3	0,5 ÷ 1 x 10 <sup>-4</sup>
Ghiaccio polare	3	2,5 x 10 <sup>-5</sup>

TABELLA 2

Frequenza	Profondità di penetrazione (metri)				
	$\epsilon = 80$ $\delta = 4$	$\epsilon = 80$ $\delta = 5 \times 10^{-3}$	$\epsilon = 30$ $\delta = 10^{-2}$	$\epsilon = 10$ $\delta = 10^{-3}$	$\epsilon = 3$ $\delta = 10^{-4}$
10 kHz	2,5	71	50	164	507
100 kHz	0,79	23	16	52	173
1 MHz	0,25	10,6	5,5	21	95
10 MHz	0,080	9,5	3,0	16,7	92
100 MHz	0,026	9,4	2,9	16,7	92
1 GHz	0,013	9,4	2,9	16,7	92

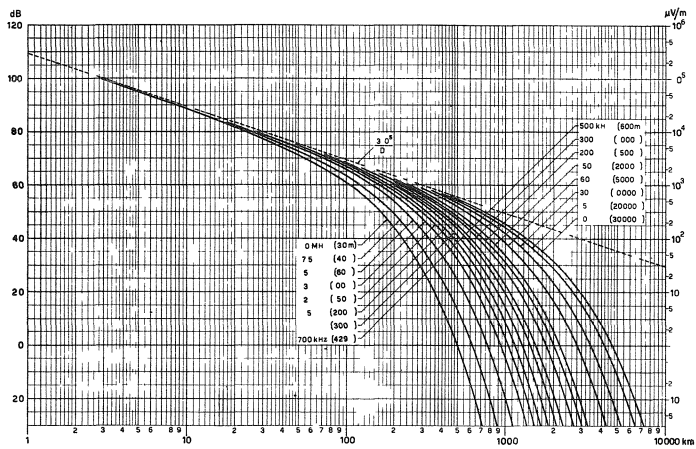


Fig 1 Curva di propagazione dell'onda di superficie su superficie marina Costante dielettrica = 80 conduttività = 4 mho/m Gamma frequenza 10 kHz — 10 MHz

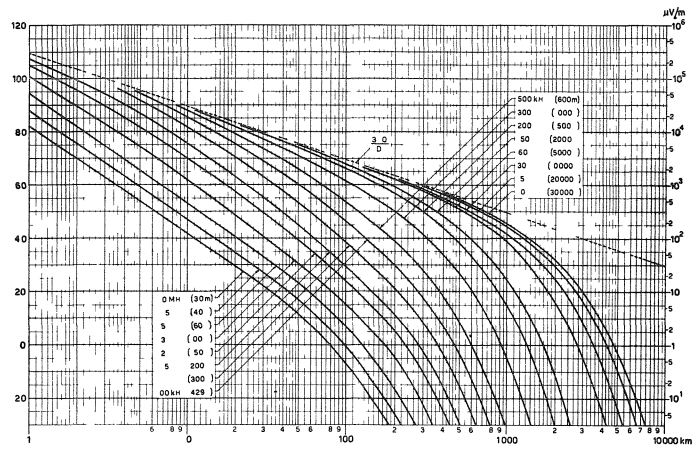


Fig 4 Curva di propagazione dell'onda di superficie sulla terra Costante dielettrica = 4 conduttività =  $3 \times 10^3$  mho/m Gamma ma frequenza 10 kHz — 10 MHz

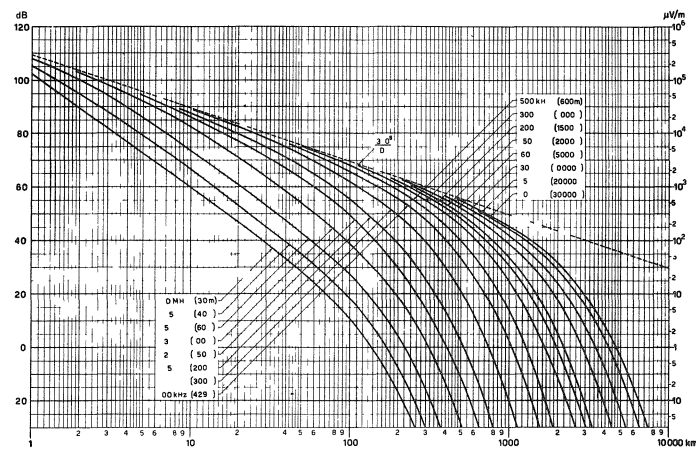


Fig 2 Curva di propagazione dell'onda di superficie sulla terra Costante dielettrica = 4 conduttività =  $3 \times 10^2$  mho/m Gamma ma frequenza 10 kHz — 10 MHz

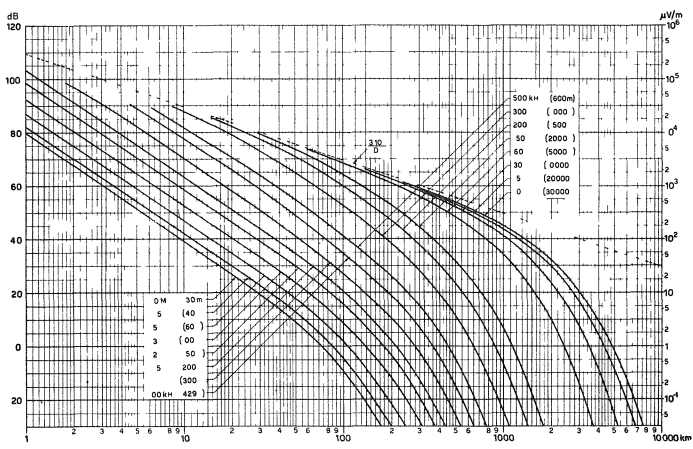


Fig 5 Curva di propagazione dell'onda di superficie sulla terra Costante dielettrica = 4 conduttività =  $10^3$  mho/m Gamma ma frequenza 10 kHz — 10 MHz

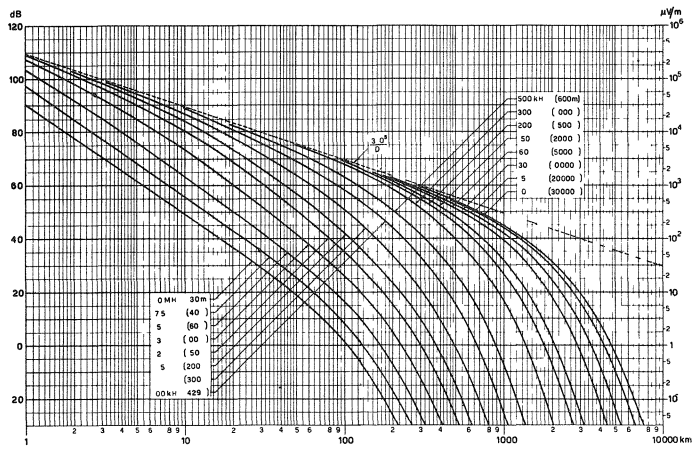


Fig 3 Curva di propagazione dell'onda di superficie sulla terra Costante dielettrica = 4 conduttività =  $10^2$  mho/m Gamma frequenza 10 kHz — 10 MHz

## ONDA DI SUPERFICIE, TROPOSPERICHE ED IONOSPERICHE

L'onda di superficie, detta anche onda di terra (ground wave) e caratteristica di quasi tutte le lunghezze d'onda ad eccezione di quelle corte in cui tale componente si attenua rapidamente via via che si va verso le frequenze più elevate. Essa segue la curvatura terrestre ed è quindi soggetta a subire l'influenza del suolo che attraversa, ragione per cui nei suoi riguardi vale in modo particolare quanto si è detto nel paragrafo precedente.

L'intensità del campo elettromagnetico delle onde di superficie, in funzione della distanza, oltre che dalla natura del suolo e pure influenzato dalle condizioni meteorologiche, dall'altezza dell'antenna ed ovviamente dalla frequenza im-

zione di diverse caratteristiche di costante dielettrica, di conduttività e per valori differenti di frequenza

Questa tabella mette altresì in evidenza che, ad eccezione per la propagazione al di sopra del mare, alle frequenze superiori a 10 MHz

la profondità di penetrazione è praticamente indipendente dalla frequenza

Le figure 1, 2, 3, 4 e 5 rappresentano le diverse curve di propagazione dell'onda di superficie per differenti valori di conduttività e di costante dielettrica

piegata. Quest'ultimo è un fattore molto importante poiché come si è già detto le perdite in energia aumentano notevolmente con il crescere della frequenza, tanto è vero che a partire da un valore di frequenza di 2 MHz il raggio di azione dell'onda di superficie si attenua rapidamente.

In linea di massima l'onda di superficie è polarizzata verticalmente per il fatto che la componente orizzontale viene corto circuitata dalla superficie terrestre.

Per frequenze aventi un valore superiore agli 8 MHz si nota frequentemente la cosiddetta **zona di salto** (skip zone) in cui si verifica un'area di silenzio, e nella quale non è possibile ricevere le emissioni di una data stazione. Questa zona viene sempre a trovarsi fra il limite di portata dell'onda di superficie ed il limite della zona di ricezione ionosferica (cioè del primo salto), fig. 6.

Le onde di superficie, quando interessano le gamme VHF, UHF ed altre più elevate, generalmente sono dette onde ottiche e si suddividono in **onde dirette** ed **onde di superficie riflesse**, come si è visto alla figura 3 della prima puntata. Da notare che la composizione ottica delle VHF e delle UHF, ed anche delle onde aventi frequenze attorno ai 3 MHz, è quella che assicura i collegamenti fra gli aeromobili.

Pertanto l'onda diretta è da considerare la componente tipica che permette le comunicazioni fra posti situati a distanza ottica, fra aerei e stazioni terrestri, fra aerei o stazioni terrestri e astronavi in condizioni di visibilità, intendendo con ciò l'assenza di ostacoli diretti od indiretti. Essa è influenzata in modo trascurabile, in questo caso, dall'azione del suolo (in modo grossolano per comunicazioni fra aerei, o zone molto elevate si può ritenere che l'intensità di campo vari inversamente al quadrato della distanza) ma risente dei fenomeni di rifrazione dovuti all'atmosfera i quali, come si è già detto, in particolari condizioni permettono la ricezione a distanze notevolmente superiori all'orizzonte ottico.

L'onda di superficie riflessa è invece quasi sempre presente nel caso in cui l'emissione avvenga nella gamma delle onde medie tra-

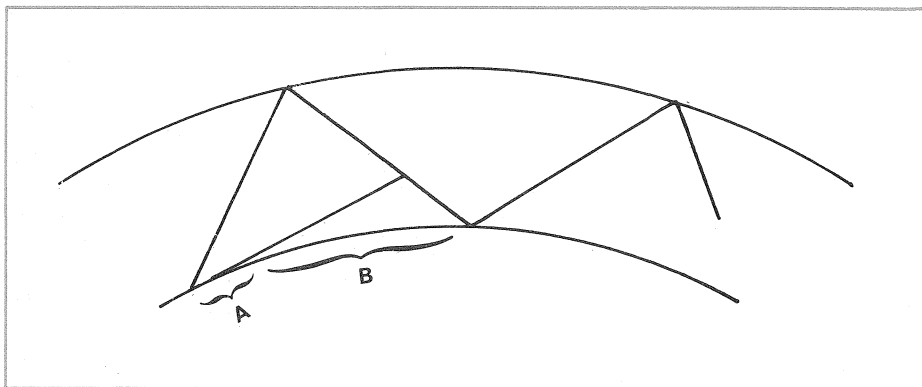


Fig. 6 - Zona di silenzio caratteristica delle emissioni aventi frequenza superiore agli 8 MHz. A = zona di ricezione dell'onda di superficie, B = zona di silenzio.

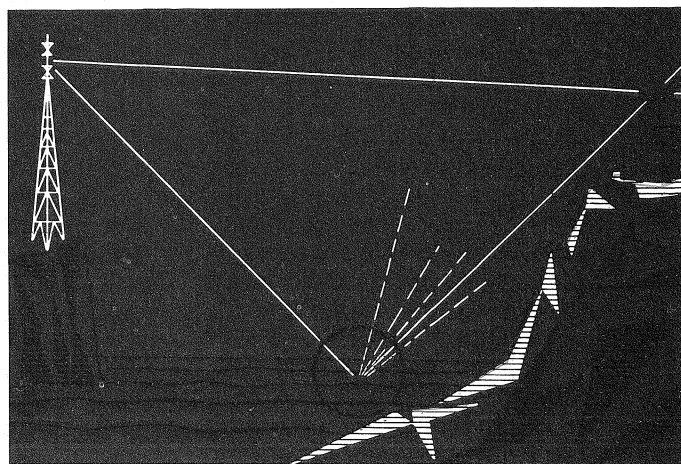


Fig. 7 - Esempio di onda diretta, in alto, e di onda di superficie riflessa. In questo caso la riflessione avviene ad opera di una superficie liquida.

mite stazioni collegate ad antenne installate ad una discreta altezza oppure sia effettuata su frequenze superiori ai 30 MHz, per collegamenti con stazioni a portata ottica e con antenne la cui altezza sia più volte maggiore del valore della lunghezza d'onda, come mostrano le figure 7 e 8.

In questo caso l'onda di superficie riflessa oltre ad accusare le perdite di energia a cui si è già fatto cenno può dare luogo ad una alterazione di fase rispetto all'on-

da diretta la qualcosa, al posto ricevente, oltre ad una diminuzione del campo em può provocare una certa distorsione dei segnali.

Nel caso di comunicazioni fra aerei il campo em, approssimativamente può essere calcolato mediante la seguente formula:

$$E = \frac{E' (4 h' h'')}{\lambda d^2}$$

in cui  $E$  = campo em,  $E'$  = campo dell'onda ottica a distanza unitaria,  $h'$ ,  $h''$  = altezza dell'antenna ricevente e dell'antenna trasmittente,  $\lambda$  = lunghezza d'onda,  $d$  = distanza.

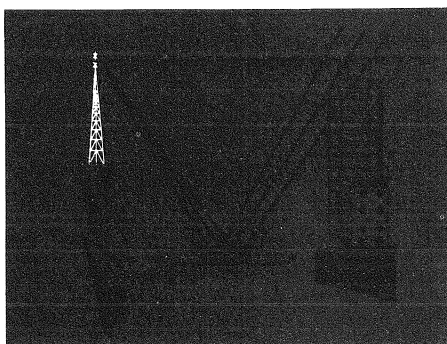


Fig. 8 - Esempio di onda diretta, in alto, e di onda di superficie riflessa da un mezzo in movimento.

## ONDE TROPOSPERICHE

Premettiamo che si definisce come **troposfera** quella regione inferiore dell'atmosfera terrestre, immediatamente aldisopra della superficie della terra in cui, in condizioni di normalità la temperatura desce con l'aumentare dell'altezza, ad eccezione di certi strati locali in cui si manifesta inversione di temperatura; che si definisce come **tropopausa** il limite superio-

re della troposfera al di sopra della quale la temperatura cresce leggermente con l'altezza oppure resta costante e infine che si chiama **inversione di temperatura** quel fenomeno per cui, specialmente nella troposfera, la temperatura aumenta anziché diminuire con l'altezza.

Tutte le frequenze usate nel campo delle radiocomunicazioni, in modo più o meno accentuato, possono subire delle modifiche alla normale propagazione nella troposfera. Ciò naturalmente avviene quando in questa regione si verificano dei fenomeni che possiamo definire anormali, e che influenzano maggiormente le onde che normalmente hanno portata ottica le quali, già nelle normali condizioni dell'atmosfera trovano un ottimo mezzo di propagazione.

In relazione al fatto che l'indice di rifrazione dell'aria (che varia in funzione della pressione barometrica, della temperatura, dell'umidità e che è legato al coefficiente dielettrico dell'aria stessa) decresce normalmente con l'altezza, le onde ottiche del tipo VHF, ed in modo meno accentuato quelle UHF, subiscono un leggero curvamento che permette loro di raggiungere una distanza che si può considerare superiore del 15% alla distanza ottica vera e propria. In questo caso l'orizzonte raggiunto dalle onde em in tali condizioni viene detto **orizzonte apparente**.

Qualora a causa della presenza di masse calde nell'atmosfera si verifichi una **inversione di temperatura** (ossia che la temperatura che normalmente decresce di 6,5° per ogni chilometro di altezza invece aumenti) nella zona troposfe-

rica interessata al fenomeno si formano delle superfici di separazione aventi densità differenti per cui quelle componenti delle VHF e delle UHF, che normalmente sono destinate a perdersi nello spazio, sono invece nuovamente riflesse sulla terra a distanze molto superiori a quella dell'orizzonte apparente, distanze che in qualche caso possono superare il migliaio di chilometri.

Tale genere di ricezione a distanza è noto con il nome inglese di **duct** e viene detta a **guida d'onda** poiché in questo caso le onde em sono convogliate a grande distanza in un modo del tutto simile a quello che avviene nelle guide d'onda, questi condotti si formano ad altezze relativamente basse e pertanto sono soggetti a brusche variazioni anche a causa dei forti venti che dominano nelle regioni dell'alta atmosfera.

E' un tipo di propagazione, assai frequente nel campo delle VHF, che avviene frequentemente nei mesi estivi, e che permette talvolta la ricezione dei programmi televisivi e delle emissioni a modulazione di frequenza, oltre quelle dei radioamatori che lavorano sulle frequenze di 50 MHz e 144 MHz, a distanze rilevanti.

### ONDE IONOSFERICHE

Sono dette ionosferiche quelle componenti delle onde em la cui ricezione a grande distanza è resa possibile dalle riflessioni che esse ricevono negli alti strati della ionosfera e di cui si è diffusamente scritto nella puntata precedente.

Per raggiungere distanze rilevan-

ti ovviamente le onde em devono subire più riflessioni nello **strato F**, almeno per quanto concerne le onde corte, secondo il seguente concetto:

Numero di salti	Lunghezza del percorso (km)
1	meno di 4000
2	4000 ÷ 8000
3	8000 ÷ 12000

Ciò è chiaramente illustrato in figura 9.

Sebbene tutte le onde em che abbiano una frequenza compresa fra 10 kHz e 40 MHz possano subire delle modifiche al loro stato (fase, evanescenza e così via) negli strati ionosferici, le frequenze alte, cioè le onde corte di giorno e di notte e le onde medie e quelle lunghe di notte, sono quelle che maggiormente si avvantaggiano della presenza di detti strati.

### PROPAGAZIONE PER DISPERSIONE

Nel recente dopoguerra è stato messo a punto un nuovo sistema di comunicazione a distanza tramite l'impiego di frequenze proprie della gamma UHF, ed anche maggiori, che è noto con il termine inglese di **Scatter Propagation** od anche **Tropospheric Scatter**.

Questo sistema sfrutta la presenza permanente di alcune zone di turbolenza della ionizzazione in prossimità delle quali, e per punti molto vicini fra di loro, si hanno degli indici di rifrazione alquanto differenti che consentono comunicazioni anche a distanze dell'ordine di 2000 km.

Come mostra la figura 10 a causa dello sparpagliamento le onde em giungono al ricevitore con una intensità piuttosto debole pertanto è indispensabile utilizzare dei trasmettitori di una certa potenza. Comunque in questi anni anche in tale campo si sono fatti progressi notevoli, poiché il sistema ha avuto ampia diffusione in tutto il mondo, pertanto attualmente si impiegano trasmettitori la cui potenza è compresa fra 1 kW e 50 kW con antenne paraboliche, sia in trasmissione che in ricezione, il cui diametro può oscillare fra i 4

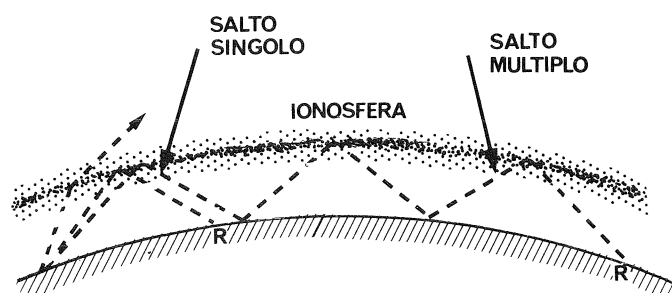


Fig. 9 - Onde ionosferiche. E' visibile un'onda che dopo aver subito una leggera rifrazione si perde nello spazio, un'onda che subisce un solo salto ed un'altra che invece subisce tre salti.



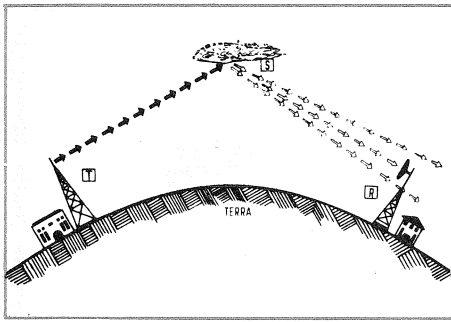


Fig. 10 - Esempio di propagazione per dispersione, scatter propagation. T = antenna trasmittente, R = antenna ricevente, S = zona di turbolenza.

m ed 20 m. Le gamme maggiormente usate sono le seguenti: 300 ÷ 450 MHz, 755 ÷ 985 MHz, 1700 ÷ 2500 MHz, 4400 ÷ 5500 MHz, mentre in passato si utilizzavano con risultati più scarsi, frequenze molto più basse, cioè dell'ordine di 40 ÷ 50 MHz.

A titolo di esempio si precisa che attualmente si sono realizzati dei sistemi di ponti radio in grado di coprire distanze dell'ordine di 250 km, usando la frequenza di 1000 MHz, con potenze di 1 kW, antenne aventi il diametro di 10 m e con una capacità di oltre 100 canali. Con potenza di 50 kW ed antenne aventi il diametro di 37 m è possibile coprire distanze di oltre 900 km con una capacità di 24 canali.

Con il termine di **Back Scatter Propagation**, cioè propagazione per dispersione all'indietro, s'intende un sistema di propagazione che è da considerare come un'eco del precedente e che è impiegato soltanto per studiare le zone di turbolenza specialmente con i radar.

### EFFETTI DELLE METEORE E DELLE AUREE BOREALI SULLE ONDE EM

Il passaggio nell'alta atmosfera, cioè nella troposfera ed anche nella ionosfera, di meteore può dare luogo a fenomeni di ionizzazione i quali talvolta permangono per un periodo piuttosto lungo e che sovente possono essere la causa della riflessione a grandi distanze delle onde corte e delle componenti VHF che sono destinate a disperdersi nello spazio.

Poiché la caduta dei meteoriti nell'atmosfera è assai frequente si cerca di sfruttare questo fenomeno nel corso delle perturbazioni ionosferiche, cioè quando viene a mancare la regolare riflessione ionosferica e la propagazione delle gamme relative alle onde corte praticamente è chiusa, allo scopo di mantenere la continuità di certi collegamenti. In pratica si viene a realizzare un tipo di collegamento che può essere assimilato a quello precedentemente illustrato e cioè

alla ricezione a distanza per dispersione.

E' stato pure osservato che in presenza di un'aurora polare, la propagazione delle onde corte subisce una attenuazione tale da rendere le comunicazioni a notevoli distanze piuttosto difficoltose mentre per contro le onde metriche, e talvolta quelle centimetriche, sono riflesse a grandi distanze dall'aurora stessa la quale viene a comportarsi esattamente come uno strato riflettente.

In questo caso però la ricezione, specialmente dei segnali modulati, è quasi sempre difficile a causa dei complessi fenomeni di evanescenza.

Infatti un'aurora polare (un'aurora evidentemente può essere boreale ed australe) all'esame spettroscopico si presenta con delle righe appartenenti ad atomi eccitati di ossigeno e di azoto semplicemente, doppiamente e triplicamente ionizzati. Si ammette che questi ioni siano gli stessi che si trovano nello **strato F**, in parte dovuti all'assorbimento della radiazione solare, che hanno migrato verso i poli sotto l'influenza del campo magnetico terrestre ed in parte atomi divenuti ioni per il bombardamento subito nel momento della produzione dell'aurora polare.

(segue)

NOTE  
PER IL TECNICO

# LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE NELLO SPAZIO

quarta parte - di P. SOATI

## RADIOCOLLEGAMENTI CON I SATELLITI ARTIFICIALI ED ASTRONAVI

Le frequenze più adatte per comunicare con i satelliti artificiali, o per controlli telemetrici, debbono essere scelte secondo particolari criteri, dovendo le onde em attraversare gli strati ionosferici talvolta anche nel doppio senso come nel caso dell'inseguimento spaziale.

Le onde aventi frequenze comprese fra 10 MHz e 30 MHz, se inviate con un angolo appropriato (in modo cioè che non subiscano la riflessione verso la terra), e quelle fino a circa 200 MHz praticamente non subiscono alcuna influenza da parte dell'atmosfera terrestre. Pertanto la loro attenuazione, in funzione della distanza, è facilmente calcolabile tramite le note formule. Per contro l'atmosfera terrestre da luogo a sensibili fenomeni di assorbimento via via che si sale in frequenza, ragione per cui oltre i 15.000 MHz (15 GHz) le perdite sono piuttosto elevate anche per le emissioni verticali mentre praticamente si ha assorbimento totale, dovuto alla presenza nell'atmosfera di ossigeno e vapore acqueo, per percorsi poco inclinati rispetto all'orizzonte.

In relazione a questo fenomeno i radar meteorologici, come si è già detto, impiegano sempre frequenze superiori ai 10.000 MHz.

In linea di massima le comunicazioni con i satelliti artificiali e le astronavi (spazio-terra e terra-spazio) avvengono su una gamma

di frequenze, detta **finestra terra-spazio** (earth-space window) che è compresa fra i 1000 MHz ed i 10.000 MHz.

Nelle tabelle che abbiamo pubblicato nel n° 12/1976 di SELEZIONE RADIO TV è possibile individuare le varie gamme di frequenza che sono state assegnate, nelle tre regioni, a questi servizi e agli altri collaterali, come la meteorologia via satellite e la ricerca spaziale.

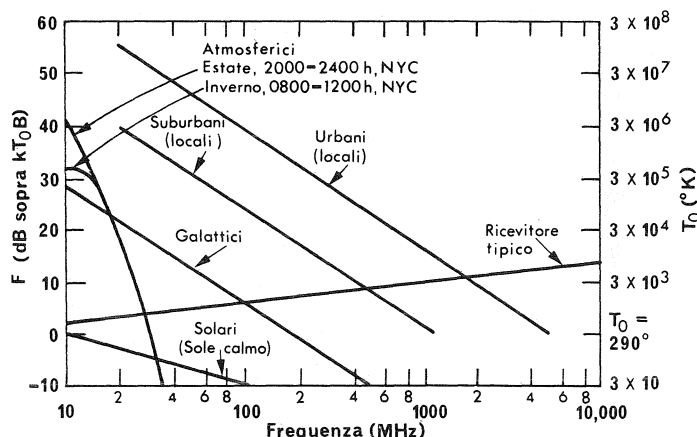
La scelta della frequenza più adatta a questo genere di comunicazioni è ovviamente legata anche ai **rumori** che possono essere captati dall'antenna, di cui la figura 1 ne illustra le caratteristiche riferite alla **finestra spazio-terra** a cui si è fatto cenno. I rumori cosmici sono più sensibili alle frequenze basse e la loro intensità diminuisce via via che si sale di frequenza. Il massimo di intensità si riscontra in corrispondenza della via Lattea.

Il rumore proviene da alcune Costellazioni, come quella del Cigno, del Toro, di Cassiopea ed altre è dell'ordine di **1 jansky** ( $10^{-22}$  W/m<sup>2</sup> Hz), sulla frequenza di 200 MHz e si riduce a  $10^{-24}$  W/m<sup>2</sup> Hz, su 3.500 MHz.

Il Sole, ed anche la Luna, sono sorgenti di rumori, talvolta molto intensi. In condizioni di Sole tranquillo il massimo disturbo si ha fino alla frequenza di 100 MHz (vedere figura 1) mentre in presenza di un'attività solare piuttosto intensa il rumore può variare da  $10^{-18}$  W/m<sup>2</sup> Hz, su 150 MHz, a  $10^{-20}$  W/m<sup>2</sup> Hz su 3500 MHz.

Questo problema ovviamente è di maggiore importanza per quanto concerne il tragitto **Satellite-Terra**, a causa della limitata potenza dei radiotrasmettitori di bordo, mentre per il percorso **Terra-Satellite** sono in gioco potenze molto più elevate.

Fig. 1 - Influenza dei vari tipi di rumori sulla gamma «finestra terra-spazio» per comunicazioni con satelliti artificiali ed astronavi. E' stata impiegata una antenna omnidirezionale sopra la superficie terrestre.



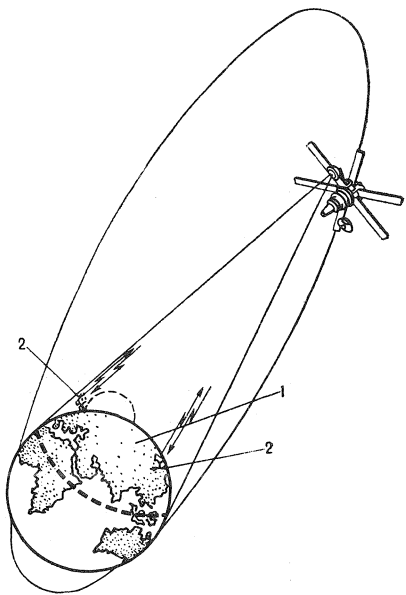


Fig. 2 - Telecomunicazioni via satellite artificiale del tipo Molniya. 1 = zona di radiovisibilità (tratteggiata), 2 = stazioni terrene.

### ANOMALIE NELLA PROPAGAZIONE DELLE ONDE EM

Si è già detto che durante i periodi di maggiore attività delle macchie solari si riscontra un notevole miglioramento della propagazione delle onde em, che si traduce in pratica in un aumento del limite superiore delle frequenze che normalmente sono impiegate per assicurare i radiocollegamenti a grande distanza. In concomitanza con la maggiore attività solare si possono però verificare fenomeni che, come l'evanescenza (**fading**) di cui parleremo in seguito, possono alterare profondamente le condizioni di propagazione delle onde em.

Ci riferiamo in modo particolare ai **disturbi ionosferici improvvisi**, detti **SID** (**sudden ionospheric disturbances**) ed alle tempeste ionosferiche e magnetiche. I primi fenomeni, cioè i **SID**, sono sovente detti **effetto Dellinger**, dallo scienziato che ne ha studiato le cause, e quando sono molto intensi possono portare al **fade-out**, ossia ad una **evanescenza totale** dei segnali.

E' stato possibile accertare che il fade-out si manifesta sempre in corrispondenza di un **flare**, ossia di una eruzione solare e che le radiazioni che ne sono la causa viaggiano con la stessa velocità della luce. Tale constatazione è stata messa in evidenza dal fatto che

all'osservazione ottica del fenomeno corrispondeva l'alterazione della propagazione delle onde em.

Da notare che se l'eruzione solare dura un periodo di tempo piuttosto breve, ad esempio da qualche secondo ad alcuni minuti, il fade-out, che è dovuto ad una intensificazione anomala della ionizzazione dello **strato D**, con relativo assorbimento delle onde em, si protrae per un tempo molto maggiore.

Ciò è da attribuire all'elevato grado di intensità raggiunta dallo strato D per cui la ricombinazione degli elettroni e degli ioni avviene lentamente con la conseguenza che il fade-out può prolungarsi anche per due o tre ore.

L'effetto Dellinger, che avviene sempre contemporaneamente ad una perturbazione del campo magnetico terrestre, è molto più intenso alle basse latitudini in cui i raggi solari giungono con angoli elevati. In queste condizioni le frequenze basse sono maggiormente influenzate dal fenomeno.

Salvo condizioni di fade-out pro-

lungati dovuti a violente eruzioni solari le anomalie in questione si manifestano prevalentemente durante le ore diurne ed interessano pertanto le onde em che si propagano per riflessione sugli strati ionosferici e che effettuano percorsi diurni.

Le tempeste ionosferiche, anche esse legate alle eruzioni solari, possono avere sulle radiocomunicazioni una influenza più deleteria per il fatto che la loro durata è sempre maggiore di quella che caratterizza l'effetto Dellinger. In questo caso il fade-out, o comunque le anomalie di propagazione, possono durare più a lungo talvolta addirittura più giorni. Sembra associato che la loro origine sia da attribuirsi alle eruzioni cromosferiche di corpuscoli ionizzati provenienti dalle zone delle macchie solari. Queste radiazioni sono emesse sotto forma di getti che, contrariamente a quanto avviene per le onde em, si propagano soltanto in una ben determinata direzione. In fondo si tratta di un vantaggio, poiché i loro effetti deleteri sulla propa-

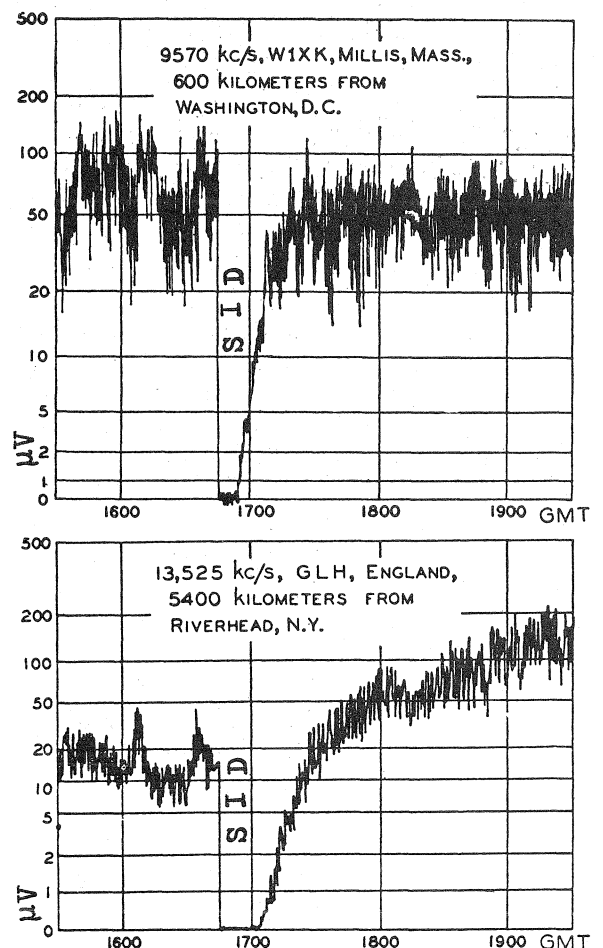


Fig. 3 - Effetto SID (disturbo improvviso della ionosfera) rilevato contemporaneamente su due stazioni radiofoniche di frequenza diversa.

gazione delle onde em, sono limitati a quei getti orientati verso il nostro pianeta.

Alle tempeste ionosferiche fanno riscontro quasi sempre le tempeste magnetiche le quali possono essere a causa di anomalie anche nelle comunicazioni via cavo e che si manifestano con un certo ritardo rispetto a quelle che si riscontrano nei radiocollegamenti, poiché i corpuscoli ionizzati si propagano ad una velocità notevolmente inferiore a quella della luce ed impiegano un certo tempo per raggiungere la Terra. Ciò spiega il motivo per cui le trasmissioni via cavo possano subire delle anomalie con un ritardo che va dalle 12 alle 36 ore rispetto ai disturbi ionosferici improvvisi.

Da notare che i suddetti fenomeni sono quasi sempre la causa di un aumento dell'altezza dello strato F, e talvolta anche di una riduzione della sua ionizzazione, per cui non è più possibile la riflessione sulla terra delle frequenze che normalmente vi sono riflesse. I percorsi più danneggiati sono quelli passanti per i poli. A differenza degli effetti di fade-out improvvisi, le tempeste magnetiche talvolta possono essere previste tenendo conto della natura delle macchie solari e del movimento di rotazione del Sole.

## AVVISI RADIO SULLA PROPAGAZIONE DELLE ONDE EM

Molte delle stazioni che effettuano emissioni di **frequenze standard e segnali orari di precisione** (vedi n° 7/8-1977, SELEZIONE RADIO TV, rubrica QTC) trasmettono ogni ora le previsioni sulla propagazione. Ad esempio le stazioni USA del National Bureau of Standards WWV e WWVH trasmettono in fonia, al 15° minuto di ciascuna ora, le previsioni a corto termine della propagazione delle onde em attraverso l'Atlantico del Nord nel seguente modo: **The radio propagation quality forecast at (0100, 0700, 1300, 1900 UT) is....(excellent, very good, good, fair to good, fair, poor to fair, poor, very poor or useless)** che tradotto in italiano significa **«Le previsioni della qualità di propagazione radioelettrica alle ore.... (una delle seguenti ore: 0100, 0700, 1300, 1900 UT) è....(eccellente, molto buona, buona, da discreta a buo-**

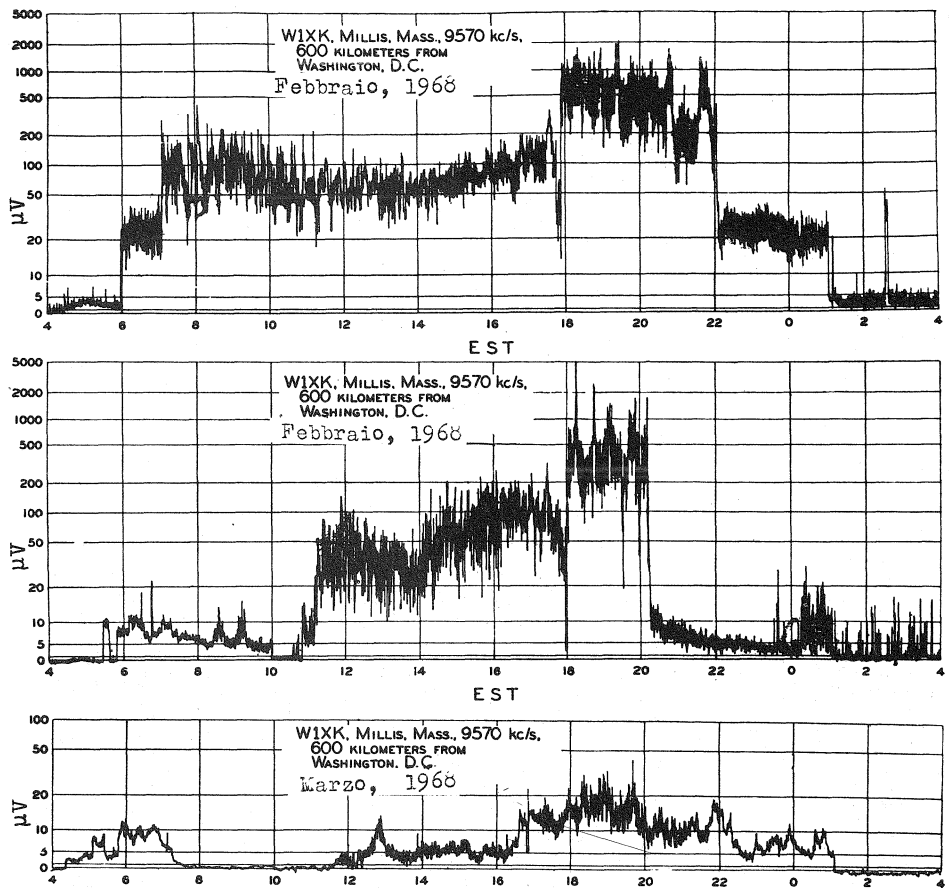


Fig. 4 - Effetti di una tempesta magnetica sulla radiorecezione. In alto la stazione di Millis (USA) su 9570 kHz, ricevuta in normali condizioni di evanescenza. Al centro la stessa stazione ricevuta con tempesta magnetica leggera, in basso ricezione in presenza di una intensa tempesta magnetica.

na, discreta, da cattiva a discreta, cattiva, molto cattiva o inutilizzabile.

Il suddetto avviso è seguito dalle condizioni **geomagnetiche** nel seguente modo: **«current geomagnetic activity is....(quiet, unsettled or disturbed)»** che significa **«l'attività geomagnetica attuale è....(calma, instabile o perturbata)»**.

## L'EVANESCENZA

L'evanescenza, nota anche con il termine inglese di **fading**, è un fenomeno che si riscontra nella propagazione delle onde em e consiste in variazioni irregolari dell'intensità del campo em in ricezione dei segnali radioelettrici.

Questo fenomeno è accentuato nelle componenti che seguono la via ionosferica, cioè le onde medie e le onde corte, mentre assume proporzioni più ridotte nelle onde lunghe ed in quelle onde che hanno prevalentemente portata ottica, come le microonde e le onde millimetriche. Le evanescenze, in cui

si raggruppano le variazioni dei segnali nel tempo, nello spazio ed in frequenza, hanno una influenza determinante nel funzionamento dei segnali radioelettrici.

Questo fenomeno è accentuato nelle componenti che seguono la via ionosferica, cioè le onde medie e le onde corte, mentre assume proporzioni più ridotte nelle onde lunghissime, le onde lunghe ed in quelle onde che hanno prevalentemente portata ottica, come le microonde e le onde millimetriche. Le evanescenze, in cui si raggruppano le variazioni dei segnali nel tempo, nello spazio ed in frequenza, hanno una influenza determinante nel funzionamento dei sistemi di radiocomunicazione e sul tipo di modulazione che si può usare. Infatti la conoscenza della profondità e della rapidità con cui si manifestano prevalentemente le evanescenze, per un dato percorso e per una data gamma di frequenza, consente di fissare la potenza dei trasmettitori, le caratteristiche delle antenne ed il tipo di impianto

diversity, più adatti ad assicurare determinati collegamenti.

Le evanescenze possono essere provocate da fenomeni differenti quali:

- 1°) il movimento della ionosfera e le variazioni dovute alla propagazione dei percorsi multipli, i quali danno luogo alle evanescenze per interferenza.
- 2°) alla rotazione degli assi e degli elissi di rotazione.
- 3°) alla variazione dell'assorbimento ionosferico nel tempo.
- 4°) alla focalizzazione ed alla scomparsa temporanea dei segnali in seguito ad improvvisa variazione della MUF (cioè della massima frequenza utilizzabile).

A questo proposito esistono studi ben dettagliati condotti dal CCIR i quali riguardano tanto le evanescenze a lungo termine quanto quelle a breve termine. Noi limitiamo il nostro esame a qualche cenno sulle caratteristiche proprie dei vari tipi di evanescenza rimandando i lettori che desiderano avere sullo argomento notizie più dettagliate alla bibliografia tecnica.

### EVANESCENZA PER ASSORBIMENTO

Questo tipo di evanescenza è caratterizzata da un periodo piuttosto lungo, più o meno profondo, ed è da attribuirsi all'assorbimento irregolare che le onde em possono subire nella ionosfera in seguito a delle variazioni della concentrazione ionica od anche da sensibili mutamenti nell'altezza degli strati interessanti alla riflessione. Essa è facilmente riconoscibile appunto per il fatto che le variazioni sono piuttosto lente ed uniformi. Talvolta le variazioni, comprese fra qualche decimo di periodo e qualche periodo al secondo, possono essere così regolari da dare l'impressione di essere dovute al battimento fra due stazioni che lavorino sulla stessa frequenza in sincronismo.

### EVANESCENZA PER INTERFERENZA

Questo fenomeno di evanescenza si verifica quando le onde em giungono al ricevitore effettuando percorsi differenti o perché due o più componenti subiscono un diver-

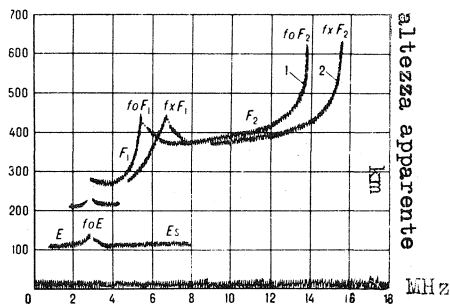


Fig. 5 - Ionogramma ottenuto da un laboratorio sovietico tramite una ionosonda panoramica installata al suolo. 1 = onda ordinaria, 2 = onda straordinaria.

so numero di riflessioni negli strati ionosferici e la terra. In questo caso le varie componenti giungeranno evidentemente al posto ricevente sfasate fra loro dando luogo a delle variazioni dell'intensità dei segnali che, a differenza di quelle che caratterizzano l'evanescenza per assorbimento, sono molto irregolari e tanto più profonde quanto maggiore è lo sfasamento.

Un fenomeno del tutto simile, come si è detto, si manifesta in quelle zone in cui al ricevitore i radiosegnali giungono contemporaneamente tanto per onda di superficie quanto per onda riflessa.

### EVANESCENZA DI SALTO

Si tratta di un fenomeno che si verifica prevalentemente nelle località in cui la ricezione avviene per onda diretta e nelle cui vicinanze le componenti ionosferiche subiscono la riflessione negli strati superiori senza perciò interferire sull'onda diretta stessa. Se a causa di eccezionali mutamenti nella ionosfera questo punto di riflessione subisce degli spostamenti, nella zona di ricezione potranno arrivare anche le componenti ionosferiche per cui si verificheranno dei fenomeni di evanescenza molto profondi con un periodo piuttosto lungo che però cessano non appena ritorna lo stato di normalità.

### EVANESCENZA PER POLARIZZAZIONE

Il piano di polarizzazione di una onda em, che incide sulla ionosfera è soggetto ad un fenomeno di birifrazione che può dare luogo a due componenti **magneto-ioniche** dette rispettivamente **raggio ordi-**

**nario** che gira verso sinistra e **raggio straordinario** che gira verso destra. Essendo diverso l'indice di rifrazione dei due raggi le velocità di penetrazione sono pure diverse.

Queste due componenti uscendo dallo strato ionizzato possono ricombinarsi insieme ma non più come un **piano polarizzato** ma bensì come un campo **elittico** che ruota cambiando, durante un periodo, di ampiezza e di direzione in modo cioè che il vettore rappresentativo percorre una elisse.

Pertanto il campo elittico varia di valore e di orientamento, rispetto all'aereo ricevente dando luogo in ricezione, a delle variazioni di intensità che sono dette evanescenze di polarizzazione.

### EVANESCENZA SELETTIVA

I fenomeni di evanescenza non sono perfettamente identici per tutta una gamma di frequenze ma possono subire notevoli varianti anche per frequenze molto vicine fra loro. Ad esempio variazioni di ampiezza e di fase molto diverse fra loro si possono notare anche sulle frequenze che costituiscono la banda laterale di un'onda modulata per cui si ha come risultato una distorsione della modulazione. A questo fenomeno è stato dato il nome di **evanescenza selettiva**.

Da notare che fenomeni molto simili alla evanescenza per assorbimento si notano nella ricezione di radiosegnali a bordo di autoveicoli, motoscafi ed altri mezzi mobili, quando si attraversano località in cui esistono ostacoli di notevoli dimensioni quali edifici, ponti, gallerie, colline e così via.

### MICROONDE ED ONDE MILLIMETRICHE

Anche le microonde e le onde millimetriche possono essere soggette a leggeri fenomeni di evanescenza in genere dovuti ad interferenza delle componenti che effettuano percorsi differenti, specialmente a causa di riflessioni ad opera di ostacoli aventi dimensioni compatibili con la lunghezza d'onda. Via via che si sale in frequenza i fenomeni di attenuazione, ed anche di parziale riflessione ad opera degli agenti atmosferici, aumentano considerevolmente.

Ad esempio, come è noto, la formula classica relativa alla propa-



gazione delle onde millimetriche, e delle microonde è la seguente:  
 $Att_{dB} = 32,5 + 20 \log F + 20 \log D$   
 in cui **D** indica la lunghezza del percorso in chilometri ed **F** la frequenza di lavoro in megahertz. Queste condizioni ottimali, specialmente per le onde millimetriche, si riscontrano soltanto nello spazio libero, ad esempio per comunicazioni fra satelliti.

Quando la propagazione deve avvenire attraverso l'atmosfera, almeno parzialmente, le cose cambiano sensibilmente per cui la suddetta relazione deve essere sostituita dalla seguente:

$$Att_{dB} = 92,45 + 20 \log_{GHz} + 20 \log D + a + b + c + d + e$$

in cui:

- a = perdite (in dB) dovute al vapore acqueo
- b = perdite (in dB) dovute alla nebbia
- c = perdite dovute all'ossigeno, sempre in dB
- d = l'insieme delle perdite (in dB) dovuti ad altri gas
- e = perdite (in dB) dovute alla pioggia, neve o grandine.

Il fattore **a** varia ovviamente in funzione dell'umidità, della temperatura, della pressione e dell'altezza.

La figura 7 si riferisce ad un grafico in cui si vede l'attenuazione dovuta alla pioggia (**rain**), alla nebbia acquosa (**mist**), al vapore acqueo (**water vapor**), e all'ossigeno (**oxygen**).

### SISTEMI PER ELIMINARE GLI EFFETTI DELLE EVANESCENZE

I moderni radiorecettori sono dotati di dispositivi per il controllo automatico della sensibilità, in qualche caso amplificati, il cui compito è quello di attenuare gli effetti delle evanescenze. Ciò in genere è sufficiente per assicurare una buona ricezione dei programmi radiofonici. Nei servizi professionali oltre ad utilizzare delle antenne direttive, ad esempio le antenne rombiche, si ricorre alla ricezione in **diversity** (detta in italiano per **diversità**) la quale consente di ottenere dei segnali i cui periodi di evanescenza sono indipendenti l'uno dall'altro. Pertanto si possono avere i seguenti procedimenti: a) **diversità nello spazio** (antenne spaziate), b) **diversità in frequenza** c) **diversità secondo l'angolo di arrivo delle onde**, d) **diversità di po-**

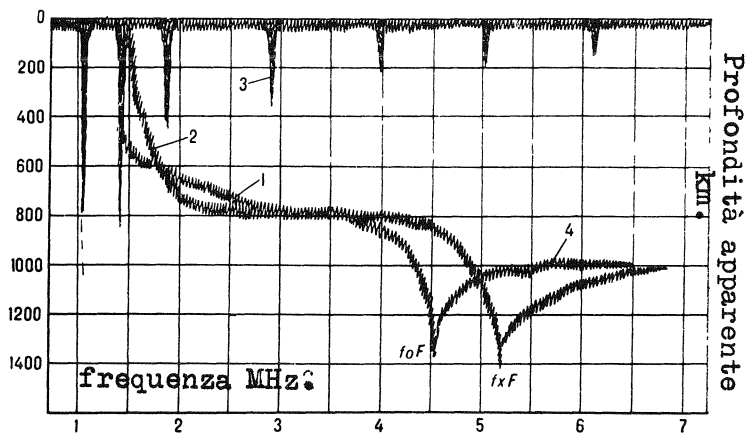


Fig. 6 - Ionogramma ottenuto da una ionosonda installata a bordo di un satellite alla stessa stazione ricevuta con tempesta magnetica leggera, in basso ricezione in tificiale sovietico. 1 = onda ordinaria, 2 = onda straordinaria, 3 = risonanza plasmatrica.

larizzazione, e) **diversità nel tempo** (ripetizione dei segnali), f) **diversità per percorsi multipli**.

La diversità nello spazio si basa sul principio che le onde ionosferiche provenienti da un trasmettitore sono soggette a dei fenomeni di evanescenza che differiscono sensibilmente fra loro anche per zone molto prossime. Pertanto se si collegano due ricevitori a due antenne distanti fra loro alcune lunghezze d'onda, si potrà constatare che quando l'indice dell'indicatore della intensità di campo (S meter), di un ricevitore si sposta, ad esempio, nella posizione di

massimo quello relativo all'altro ricevitore indicherà senz'altro un valore diverso e viceversa. Adottando questo sistema ed impiegando un commutatore elettronico si agisce in modo da inviare alla bassa frequenza soltanto i segnali che provengono dall'antenna che, istante per istante, si trova nelle migliori condizioni di ricezione.

I sistemi diversity in frequenza consistono invece nella utilizzazione di due trasmettitori che irradiano su due frequenze differenti.

In pratica i sistemi diversity sono costituiti da tre ricevitori collegati ad altrettante antenne orien-

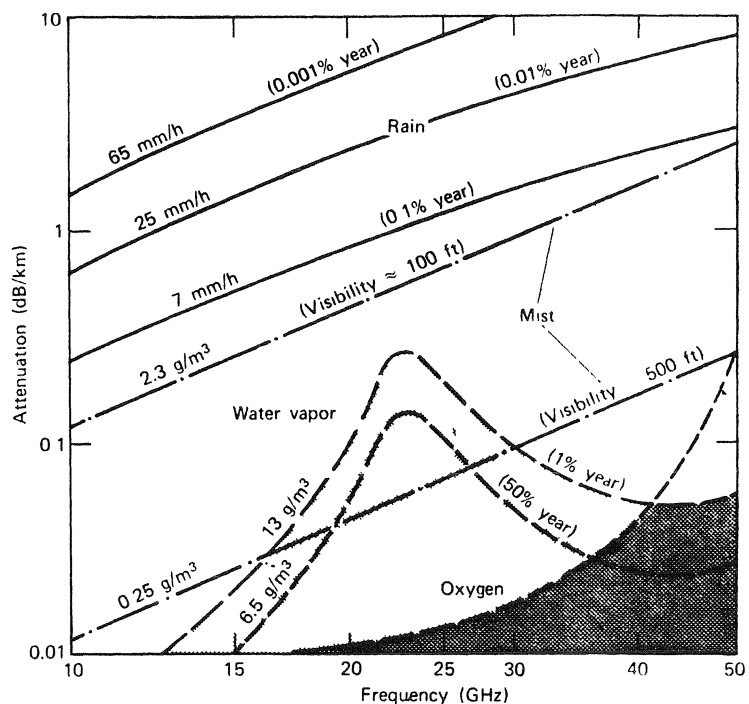


Fig. 7 - Attenuazione delle onde millimetriche in funzione della frequenza per effetto della pioggia (rain), della nebbia acquosa (mist), del vapore acqueo (water vapor) e dell'ossigeno (oxygen) in una località marina, al livello del suolo.

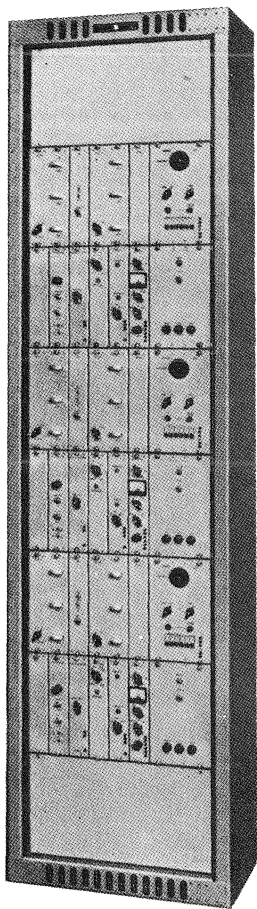


Fig. 8 - Sistema ricevente diversity della Marconi per la ricezione nella gamma 2500 ÷ 27500 kHz, costituito da tre ricevitori contenuti nello stesso pannello.

tate nella stessa direzione e distanti l'una dall'altra da 5 a 10 lunghezze d'onda. I segnali che giungono ai tre ricevitori, dopo lo stadio a frequenza intermedia, sono inviati ad un circuito miscelatore il quale ha il compito di selezionarli inviando all'amplificatore di BF esclusivamente il segnale più forte. I moderni complessi diversity comportano talvolta l'impiego di solo due ricevitori e di due antenne.

### GIROFREQUENZA, EFFETTO LUSSEMBURGO ED INTERMODULAZIONE

Si dice **girofrequenza**, o anche **frequenza giromagnetica**, quella frequenza alla quale gli elettroni liberi nella ionosfera si spostano secondo traiettorie elicoidali i cui componenti sono rispettivamente una traslazione nel senso della direzione del campo generato dalla perturbazione (ossia dalle onde em), passante, ed una rotazione determinata su orbite circolari dovuta all'azione concomitante del

campo magnetico terrestre. Un fattore quest'ultimo che è costante alle stesse quote, ma che varia da località a località per cui sarebbe il caso di parlare di **girofrequenza locale**.

Il valore della girofrequenza è comunque prossimo ai 1500 kHz, per quanto concerne gli elettroni ed ai 50 Hz per gli ioni. In prossimità della girofrequenza si verificano sempre delle condizioni di **non-linearità della propagazione dei campi em** per cui una data stazione «X» che trasmetta su una frequenza prossima a quella della girofrequenza può provocare un fenomeno di intermodulazione su una altra stazione «Y», di frequenza molto diversa le cui onde passino nella stessa zona ionosferica delle onde della stazione «X». In considerazione di questo fenomeno un ricevitore accordato su «Y» può ricevere anche le emissioni di «X» che in questo caso è detta **girostatione**. A questo fenomeno è stato dato il nome di **fenomeno Lussemburgo** essendo stato constatato per la prima volta nel 1933 in Olanda da Tellegen il quale, sintonizzato sulla stazione ad onde medie di Beromünster ricevette altresì i segnali di Lussemburgo che irradiava sulle onde lunghe. V.A. Bailey dette a questo tipo di interferenze il nome di **girointerazione od effetto intermodulante**.

La teoria fondamentale dei fenomeni di non-linearità è stata in seguito formulata nel 1960 da Gurevich e Ginsburg il quale ultimo la perfezionò nel 1971 valendosi degli studi condotti in Italia dal nostro Cutulo nel 1964. In definitiva la propagazione delle onde modulate di grande potenza nel plasma dà luogo in esso a delle perturbazioni che fanno variare la temperatura degli elettroni la quale ha come conseguenza delle modifiche della frequenza di collisione e di carattere chimico sugli ioni, oltre che sulla densità degli elettroni, la qualcosa altera le condizioni di conduttività e di permittività del mezzo.

Queste modifiche prodotte come detto da una sola emissione modulata molto forte, hanno come risultato la sovrapposizione della modulazione di questa onda sulla portante di altre onde che si propagano nella stessa regione. Pertanto, considerato l'elevato numero di emissioni decametriche, ettometri-

che e chilometriche la cui propagazione avviene tramite gli strati **D** e **E** il fenomeno di interazione, o di intermodulazione ionosferica, è molto difficile da distinguere dai disturbi che si verificano in uno stesso canale ed è ancor più difficile da misurare.

### EFFETTO DOPPLER

L'effetto Doppler è il fenomeno fisico, comune alle radiazioni del suono, della luce ed a quelle elettromagnetiche in genere, per cui l'osservatore che è in moto rispetto alla propagazione della radiazione, o viceversa, percepisce il processo periodico che lo costituisce apparentemente alterato nella sua frequenza.

E' noto infatti come il suono di un clacson di un'auto in fase di avvicinamento sembri più acuto di quanto sia in realtà e più basso in fase di allontanamento.

Lo stesso fenomeno, come detto, si verifica anche per le onde em tanto è vero che effettuando delle misure di frequenza delle stazioni standard si è potuto constatare delle variazioni di frequenza comprese fra  $\pm 4 \cdot 10^{-8}$  e  $18 \cdot 10^{-8}$ , variazioni che non erano riscontrabili nelle misure eseguite nelle vicinanze del trasmettitore.

Se infatti si considera un punto di osservazione **P** ed un sistema oscillante avente la frequenza **f**, un osservatore che si trovi in **P** (non in movimento) potrà rilevare che il periodo delle oscillazioni **T** è uguale a  $1/f$ .

Supponiamo adesso che il punto **P** sia in movimento avvicinandosi alla sorgente delle oscillazioni. Il tempo che intercorrerà fra un periodo ed il periodo successivo sarà evidentemente minore, per cui avremo  $T' < T$  a cui corrisponderà un nuovo valore di frequenza  $f' > f$ . Se invece il punto **P** si allontanerà dalla sorgente avremo il periodo  $T'' > T$  a cui corrisponderà  $f'' < f$ . Il valore della variazione dipenderà pertanto dalla velocità relativa del movimento.

Nel caso delle comunicazioni spaziali l'effetto Doppler gioca un ruolo sfavorevole perché la differenza fra la frequenza emessa e quella ricevuta (che può superare, a seconda del valore della frequenza di lavoro, alcune centinaia di kilohertz) obbliga ad allargare la banda passante del ricevitore.