

# Collegamenti a grandi distanze

---

*I2RTT, Rosario Bizioli*

---

Entriamo un momento in una stazione di radioamatore e ascoltiamo: « *CQ only Pacif Area* » (chiamata generale solo per le stazioni della zona del Pacifico).

Ed ecco che dopo breve tempo si sente rispondere la voce amica di qualcuno che abita là, nel bel mezzo dell'Oceano Pacifico. Come è possibile?

Come è ottenibile ciò?

Si prende una radio ricevente e una trasmittente, si inserisce la spina nella corrente, e...

Eh no! non basta! Bisogna fare i conti anche con qualche bizzarro fenomeno della natura per poter dire: « Ora voglio parlare, mettiamo, con un australiano » e, ipso-facto, la voce del corrispondente richiesto esce dal tuo altoparlante.

Già Guglielmo Marconi si era accorto che le sue onde radio obbedivano a fenomeni sconosciuti, e stranamente andavano oltre l'orizzonte ottico scavalcando le colline; ma si era accorto che c'era anche... qualcosa d'altro.

In questo momento il nostro amico radioamatore è in contatto con il Brasile.

C'è una forte « evanescenza », ma riesce egualmente a mantenere il collegamento, e a ricevere i dati del corrispondente. Solo tre minuti più tardi il brasiliano non c'è più, la sua voce non si sente più.

E pensare che stava arrivando forte con un segnale molto chiaro!

Cosa è successo? E' solo trascorso del tempo, pochi minuti.

Ecco che cosa fa, di quell'amico radioamatore, un radioamatore abile, capace di parlare con tutti (o quasi) i colleghi radioamatori residenti nei luoghi che lui desidera contattare: è un radioamatore abile perché ha la conoscenza dei fenomeni che a lui servono per raggiungere il suo scopo. E' un radioamatore abile perché sa che il Brasile lo poteva collegare solo in quel particolare momento della giornata: anche pochi minuti di tolleranza e non se ne fa più nulla. Il povero amico brasiliano sarebbe rimasto là a sgolarsi a chiamare qualcuno dell'Italia, ma inutilmente, quando le condizioni che permettono il collegamento radiofonico fra i due paesi non sono più idonee.

modo che il transistor sia ben interdetto: rispettando i valori se i transistori non sono difettosi la corrente a vuoto nei finali è minore di 0,1 mA; valori superiori a 1 ÷ 2 mA non sono da tollerare; si può tentare prima di sostituire i transistori di ridurre le resistenze senza eccedere perché altrimenti viene a essere insufficiente il pilotaggio per la saturazione del transistor (verificare di conseguenza che la tensione tra collettore ed emitter dei finali, quando saturati, sia al massimo di 3 ÷ 5 V soprattutto controllare  $Q_4$  e  $Q_{26}$  in quanto i PNP pilota hanno guadagno inferiore del corrispondente NPN). Anche i diodi  $D_5$  e  $D_{14}$  e soprattutto  $D_6$  e  $D_{13}$  hanno questo scopo in particolare  $D_6$  e  $D_{13}$  contribuiscono a evitare il primo tratto della curva degli zener e quindi ad avere una commutazione più rapida degli stadi successivi: è per questo motivo che devono essere al germanio meglio se con correnti inverse un po' alte.

La protezione dei finali da cortocircuiti sul plastico è ottenuta con la limitazione della corrente massima e precisamente da  $R_8$  e  $R_{52}$  che controreazionano i transistori collegati al negativo e da  $R_9$  e  $R_{51}$  per i transistori collegati al più (la tensione alla base dei pilota viene limitata dagli zener  $D_4$  e  $D_{15}$ ).

Con questo accorgimento e con il fatto che i finali sono montati su un dissipatore tutto sommato surdimensionato, si rendono inutili i circuiti di protezione; a dire il vero ne ho provati alcuni ottimi quando il carico era una resistenza (variabile di potenza) ma insoddisfacenti con le locomotive sul plastico in quanto o intervenivano quando non dovevano o non intervenivano affatto.

Vediamo ora le regolazioni: tenere contemporaneamente premuti i due pulsanti di inversione ( $P_1$  e  $P_2$ ) e regolare  $R_{30}$  e  $R_4$  affinché i tempi siano per periodo 1 tutto interdetto, 4 saturato un senso di marcia, 1 tutto interdetto, 4 saturato l'altro senso di marcia (oscilloscopio sui collettori di  $Q_{12}$  e  $Q_{19}$ );  $R_{30}$  regola la simmetria mentre  $R_4$  il rapporto 1/4 variando la tensione di alimentazione dei generatori di corrente  $Q_{13}$  e  $Q_{18}$ . Senza oscilloscopio si può ugualmente procedere nel seguente modo: porre  $R_4$  per la massima tensione sul più di  $C_2$ , regolare  $R_{30}$  affinché la tensione misurata sul collettore di  $Q_{12}$  sia uguale a quella di  $Q_{19}$  (il tester deve essere a lancetta perché i digitali, misurando in c.c. tensioni quadre, danno a volte indicazioni strane), regolare ora  $R_4$  finché queste tensioni si siano ridotte in modo apprezzabile (ma non eccessivo) e verificare con le locomotive che il relè d'inversione si ecciti. Resta ora da regolare la velocità di marcia della locomotiva; porre questa su un percorso chiuso, porre  $R_{v1}$  ( $R_{v2}$ ) (regolazione velocità) e  $R_{11}$  ( $R_{12}$ ) (taratura velocità max) nella posizione di massima resistenza, regolare  $R_{26}$  ( $R_{33}$ ) affinché le lampadine della locomotiva siano spente. Portare  $R_{v1}$  ( $R_{v2}$ ) all'altro estremo e regolare  $R_{11}$  ( $R_{12}$ ) per la massima velocità voluta (attenzione a non esagerare perché si corre il rischio di capovolgimenti in curva). Ripetere se necessario le regolazioni di zero e max. In questo modo si ottiene però un tratto di corsa di  $R_{v1}$  e  $R_{v2}$  che non muove le locomotive ma che comincia a illuminare le lampadine; se non piace si può ovviare inserendo un interruttore in serie ai potenziometri citati e regolare  $R_{26}$  e  $R_{23}$  per la velocità minima.

Un'ultima precisazione: le regolazioni non sono critiche anche se è bene farle con una certa cura, inoltre tutti i trimmer sono collegati in modo che se il cursore non tocca, il treno rallenti o addirittura si fermi e questo per maggior sicurezza nell'uso.

\* \* \*

Con questo ho finito sperando di aver risolto il problema a qualcuno: sono disposto a esaminare le eventuali difficoltà che vi sorgessero. \* \* \* \* \*

Quel collegamento è stato possibile in un momento della giornata, e non lo è più in un altro momento. Possiamo affermare che dipende dall'orario del giorno; e siccome l'orario del giorno è determinato dalla posizione del Sole, è il Sole che modifica le condizioni. E' il Sole con tutti i suoi fenomeni a permettere o meno che un collegamento radio oltre i rilievi montuosi o la curvatura terrestre sia fattibile.

E' il Sole o, meglio, le sue irradiazioni che incontrano la Terra nel loro viaggio spaziale a modificare le condizioni di collegamento.

Tra i 60 e i 500 km di altezza dalla superficie terrestre, nel regno dell'atmosfera altamente rarefatta, avvengono reazioni, interazioni, flussi, movimenti e fenomeni in gran quantità. Abbiamo la fotoionizzazione solare dell'ozono, dell'ossigeno biatomico, dell'azoto nelle forme molecolari e atomiche; abbiamo la formazione di elettroni di ionizzazione per radiazioni corpuscolari; ionizzazione per illuminazione diretta. Ecco perché tutta questa zona è chiamata « ionosfera ».

E' in questa zona che le onde radio si riflettono e tornano sulla Terra superando tranquillamente l'orizzonte ottico.

In realtà le onde radio viaggiano (o meglio si propagano) in linea pressoché diretta o, come si dice, in linea ottica. Ci sono, è vero, fenomeni che « flettono » la linea retta con cui viaggiano le onde radio, ma sono di entità trascurabile quando si considerano collegamenti a grandi distanze.

I collegamenti DX (a grande distanza) sono fattibili solo perché i segnali radio si riflettono nelle zone ionosferiche, che funzionano a guisa di giganteschi naturali ripetitori.

La figura 1 sintetizza tre fenomeni che si hanno quando un'onda radio (o meglio un fascio di onde) incontra una zona ionizzata dell'alta atmosfera.

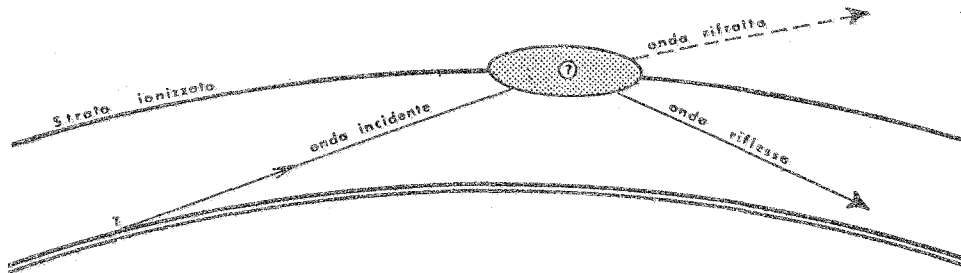


figura 1

Un'onda radio emessa dall'emittente « T » che incide su uno strato ionizzato subisce:

- una riflessione verso terra con angolo eguale a quello incidente;
- una rifrazione che consiste in una deviazione dalla direzione rettilinea di partenza (la deviazione può essere anche molto forte);
- una attenuazione per assorbimento (visualizzata nella zona con il punto interrogativo).

Nota: la figura è solo dimostrativa e non rispetta una scala reale.

## I fuochi dell'ellisse

Precisi conteggi di potenze emesse e segnali ricevuti mostrano, nel rispetto delle usuali leggi di propagazione delle onde radio, che collegamenti effettuati realmente a distanze anche superiori ai 10.000 km non potrebbero teoricamente effettuarsi salvo introducendo la possibilità di una intensificazione del segnale stesso durante il percorso.

Non è reale l'ipotesi esemplificatrice che considera l'onda emessa da una trasmittente come un fascio dalle dimensioni della stessa lunghezza d'onda, in quanto se questo « fascio di energia » incontra lo strato ionizzato e da questo si riflette (sia pure senza gravi perdite di intensità), non troviamo però alcun incremento del segnale lungo il percorso: e qualche incremento ci deve essere, lo vediamo con i nostri strumenti, con lo S-meter, che riceviamo segnali più forti di quanto ce lo permette la legge universale della propagazione delle onde!

A questo punto troviamo un semplice rimedio per spiegare l'esistenza di un « meccanismo » naturale che intensifica le onde radio nel loro percorso ionosferico.

Si può fare un paragone.

Se su un termometro centigrado posto in zona d'ombra riflettiamo con un normale specchio la luce solare, si nota un certo aumento di temperatura. Se sullo stesso termometro riflettiamo la luce solare con due specchi avremo un raddoppio dell'aumento della temperatura; con più specchi avremo sempre ulteriori incrementi.

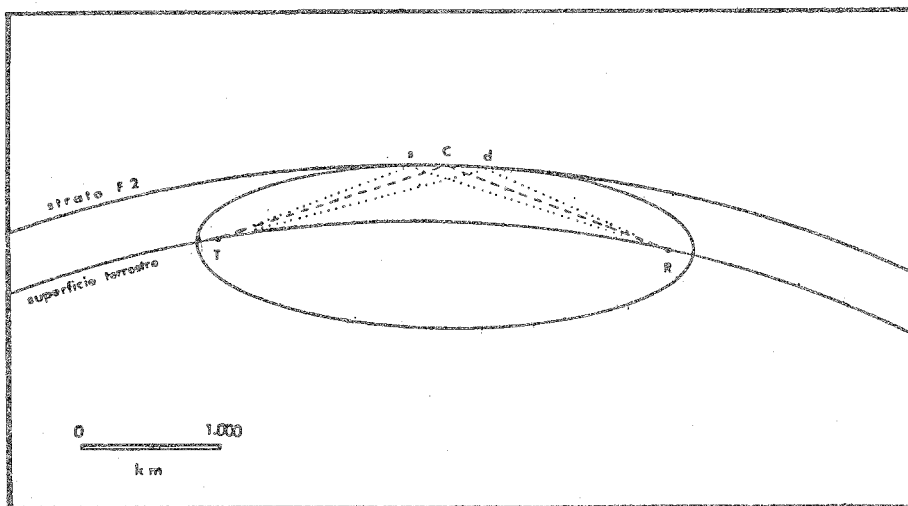


figura 2

Schema di esempio in scala con dati reali di un collegamento fra due stazioni distanti 2.900 km per riflessione sullo strato F2 a 400 km di altezza da Terra con angolo medio utile di emissione compreso fra 6° e 10° di elevazione sopra la tangenza terrestre.

Dalla emittente « T » sita sulla superficie terrestre viene emesso un fascio di onde radio che giungono alla ricevente « R », al di là della curvatura terrestre, dopo una riflessione sullo strato ionizzato F2.

Non è solamente il raggio centrale simboleggiato in tratteggio (quello che raggiunge e rimbalza dal punto « c ») il responsabile di tale risultato, ma tutto un vasto fascio di onde che si estende intorno ad esso. Questo fascio di onde è delimitato dai raggi punteggiati « Ts » e « Td » che raggiungono lo strato e « sR » e « dR » che raggiungono la stazione ricevente; è tutta una sequenza continua di radiazioni elettromagnetiche che si riflettono nel tratto di strato fra « s » e « d » e giungono in fase in « R ».

Ciò è spiegabile ipotizzando una ellisse costruita sui fuochi « T » e « R » che tangono lo strato in « C ». Nel tratto « s-d » le due curve (lo strato ionosferico reale di forma circolare e l'ellisse teorizzata) sono sufficientemente coincidenti sì da ritenerle reali entrambe. Per la stessa definizione matematica dell'ellisse è naturale che in « R » (fuoco di ellisse oltre che stazione ricevente) giunga riconcentrata tutta una vasta serie di onde e non già un solo raggio.

Il tratto ionosferico compreso tra « s » e « d » risulta essere di circa 500 km; in realtà questo tratto potrebbe anche essere ridotto a poche migliaia di metri per potersi avere egualmente il « fuoco di riconcentrazione » di forte intensità.

Orbene, se appuriamo che la zona ionosferica che riflette le onde radio si comporta come una serie di « specchi » che riflettono i segnali ricevuti dall'emittente e li rispediscono tutti verso la stazione ricevente senza cambiarne la fase, avremo la giustificazione per l'aumento della quantità di segnale già riscontrato in pratica.

Se si inseriscono le stazioni trasmittente e ricevente nei fuochi di una ipotetica ellisse con curva radente allo strato, come evidenziato dalla successiva figura 2, si nota con interesse, pur nella tolleranza degli errori di graficismo, che per decine di chilometri le due curve coincidono, permettendo così a una notevole quantità di « raggi » di convergere, in fase, nel fuoco ove è posta la stazione ricevente « R », intensificando notevolmente il segnale complessivo ricevuto. Le onde che giungono in « R » sono in fase in quanto la distanza di percorso, pur con angoli di elevazione di emissione diversi, è la medesima (vedi la definizione matematica dell'ellisse).

### Collegamenti transemisferici

Se lo strato fosse geometricamente sferico i collegamenti più lunghi non potrebbero superare i 4.000 km in quanto il « fuoco » di riconcentrazione avverrebbe a ridosso della superficie terrestre e lì i segnali radio verrebbero assorbiti e dispersi in riflessioni irregolari.

A questo punto interviene a nostro favore un altro fenomeno.

La rotazione terrestre fa sì che tutta la massa atmosferica (e quindi anche ionosferica) sia sensibilmente più alta all'equatore che non ai poli. Questa massa atmosferica la si può immaginare, nel complesso terrestre, come se fosse formata da due calotte fortemente inclinate contenenti centralmente i poli e congiunte all'equatore; più semplicemente la massa atmosferica è a forma di ellissoide.

Una differenza di quota di 50 km fra i poli e l'equatore è sufficiente a permettere a un fascio di onde radio emesse in tangenza alla Terra (o più esattamente con qualche grado di elevazione) di raggiungere distanze ben superiori ai 4.000 km tipici del « balzo » della prima concentrazione.

Considerando una media degli eventi e trascurando per un momento l'influenza giornaliera solare, abbiamo la normale possibilità di collegamento transemisferico come evidenziato dalla figura 4.

Una trasmittente « T » sita a medie latitudini con antenna diretta a sud è facilmente abilitata a collegarsi con stazioni riceventi « R » poste nell'altro emisfero. E' naturalmente una situazione media che difficilmente si può presentare così costantemente perfetta. I raggi solari illuminano, nel loro ciclo giornaliero, tra alba e tramonto, più di metà del globo aumentando la ionizzazione degli strati in genere: nella zona illuminata lo strato F2 potrebbe riflettere frequenze più alte se lo strato D sottostante non assorbisse maggiormente.

Dato notevole del collegamento considerato nella figura 4 è l'avvicinamento a Terra dell'onda radio nella zona « m » a una quota di 25 km. E' in quella zona che si trova il fuoco dell'ellisse di riconcentrazione delle onde radio. Il motivo per cui il segnale non si impatta sulla superficie terrestre è dovuto all'inclinazione dello strato F2. Il disegno è in scala e si considerano 400 km di quota all'equatore e 350 km alla latitudine di 40°, della posizione dello strato. Basterebbero però anche solo 10 km di differenza di quote per avere il primo fuoco di riconcentrazione (in « m ») a una altezza ancora di ben 8 km da Terra, sempre sufficienti a superare qualsiasi ostacolo naturale.

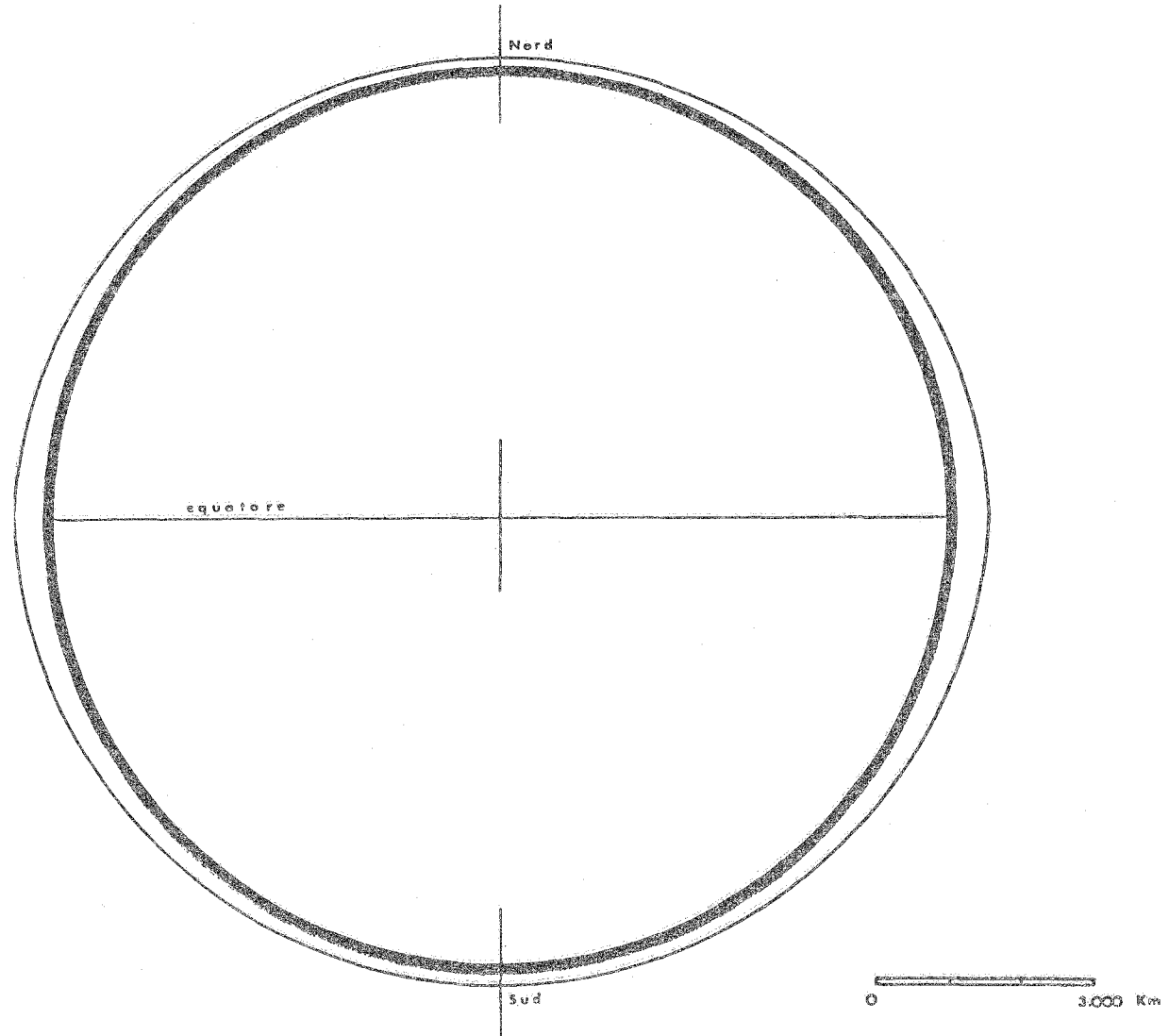


figura 3

*Andamento ellissoidale di uno strato atmosferico (curva esterna) di altezza variabile tra i 100 e i 400 km.*

*I dati, non conformi al reale, servono solo per rendere apprezzabile il confronto visivo con il globo terrestre (cerchio in grossetto) nella riproduzione in scala della sezione della Terra.*

Se il « fuoco » si dovesse concentrare a ridosso di una montagna il segnale non riuscirebbe a superarla; qualora invece il fuoco del fascio di onde toccasse la Terra, magari su un oceano anche in tranquillità, vi sarebbe una riflessione, ma con notevole dispersione angolare dei raggi, per la convessità (e irregolarità) della superficie. E inoltre, in misura quantitativamente superiore, parte preponderante dell'energia elettro-magnetica verrebbe assorbita. Ci sarebbero sicuramente alcuni raggi che risalirebbero verso gli strati con le leggi di riflessione, ma la loro intensità sarebbe ben difficilmente intelligibile e rilevabile.

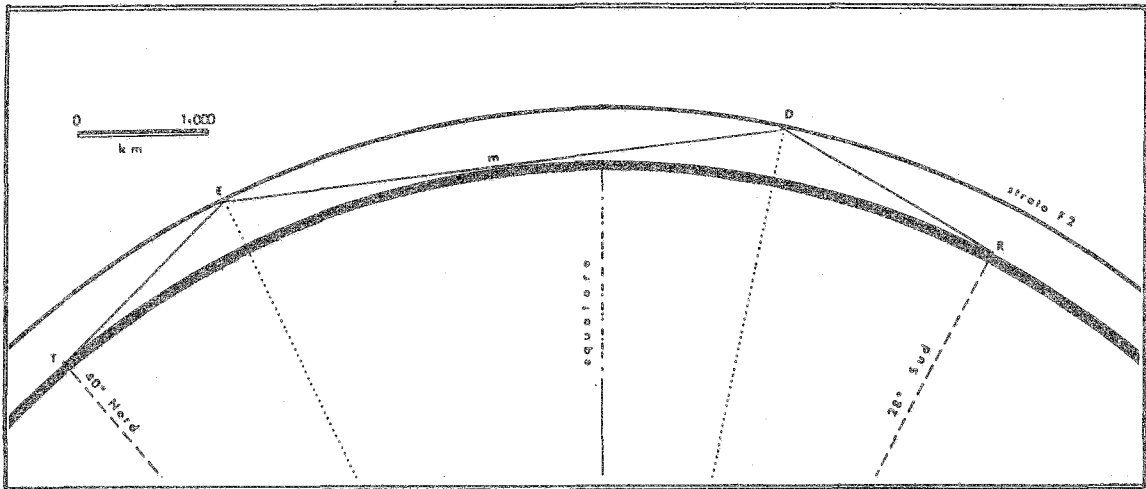


figura 4

*E' schematizzato in scala l'andamento di un fascio di onde radio che partendo dall'emittente « T », insiste in « E » su un tratto di strato ionizzato, riflette verso la superficie terrestre che sfiora in « m », e, senza deviare dal suo andamento rettilineo specchia nuovamente sullo strato in « D »; infine giunge dopo un'altra riflessione alla ricevente « R ». Ognuna delle due riflessioni sullo strato sono in realtà delle concentrazioni verso un « fuoco » con la dinamica introdotta dalla già citata ipotetica ellisse tangente lo strato.*

La distanza del collegamento, sempre nell'esempio di figura 4, fra le due stazioni è di 7.900 km, mentre le onde radio, per la loro propagazione rettilinea, hanno dovuto percorrere 8.250 km simboleggiati dalla linea spezzata « T-E-D-R ».

I collegamenti si intendono sempre bilaterali, anche se non indicato, nel senso che la stazione « R » che capta le emissioni della stazione « T » può, da questa, farsi a sua volta sentire.

Approssimativamente un decimo di grado di variazione nell'angolo di elevazione dell'emissione delle onde radio specchia su una fascia di 10 km alle quote dello strato F2.

E' molto importante e interessante notare che dal disegno in scala la dimensione della riga che simboleggia il percorso dell'onda è dell'ordine dei 20 km di spessore.

### Collegamenti monoemisferici

La difficoltà di spiegazione della dinamica del balzo plurimo (diverse ri-concentrazioni focali) si ha soprattutto quando si considerano collegamenti, sempre in condizioni medie, tra stazioni poste nel medesimo emisfero: l'inclinazione dello strato F2 non ha elevazioni centrali come capita a livello dell'equatore nei collegamenti transemisferici. Ciononostante è ancora spiegabile perché il piano dell'ellisse ipotetica tangente lo strato non passa per il centro della Terra in quanto la zona di strato ionosferico interessata, pur equidistante dalla superficie terrestre, presenta una declinazione verso i poli. In queste condizioni il secondo fuoco (alla concentrazione del primo balzo) viene a trovarsi qualche grado più a sud rispetto alla direzione dell'antenna trasmittente, ed è sollevato, dal suolo a una quota che

potrebbe non superare i 500 m, con il chiaro rischio di impedimento da parte di rilievi anche non troppo elevati.  
 Nelle figure seguenti si possono seguire passo passo le dimostrazioni che conducono a questi interessanti risultati.

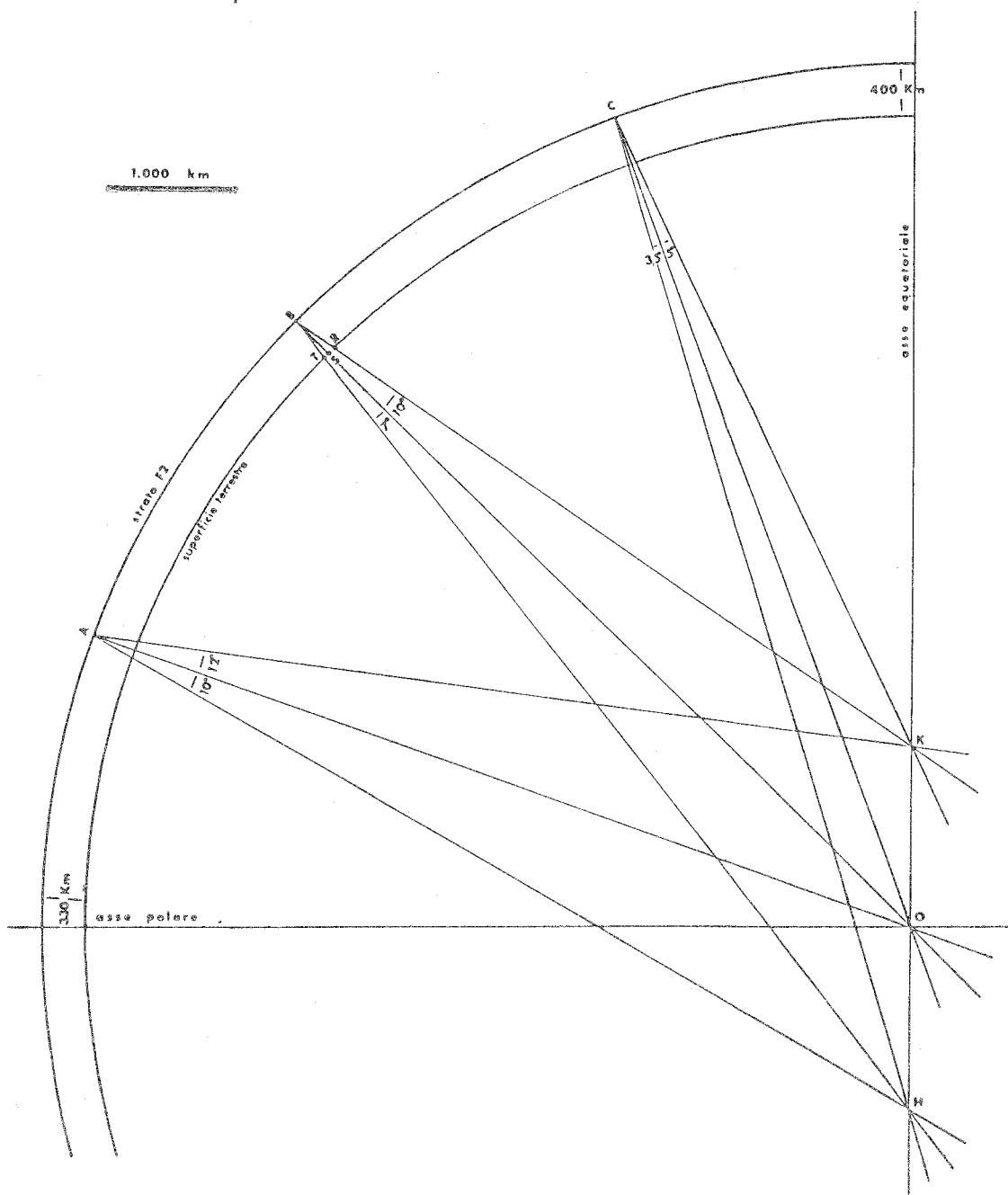


figura 5

Schema in sezione e in scala di una zona terrestre di eguale longitudine.  
 L'asse polare è di 6.357 km e l'asse equatoriale di 6.378 km.  
 Lo strato F2 è visualizzato nella sua forma ellissoidale.



Collegamenti con il Giappone sono relativamente normali: il fuoco di ri-concentrazione alla fine del primo balzo si trova nel vasto bassopiano si-beriano che presenta rilievi di altezze inferiori ai 200 metri. Con l'Australia è abbastanza normale il collegamento via lunga, mentre è molto più diffi-cile collegare la stessa con direzione 80° perché il secondo fuoco di ricon-centrazione avviene nel bel mezzo della catena dell'Himalaya. Facilmente collegabili le coste atlantiche delle due Americhe: qui i fuochi di ricon-centrazione, anche se bassi, si hanno sempre sull'oceano e quindi non vi è impedimento alla prosecuzione del complesso e misterioso viaggio delle nostre amiche onde-radio.

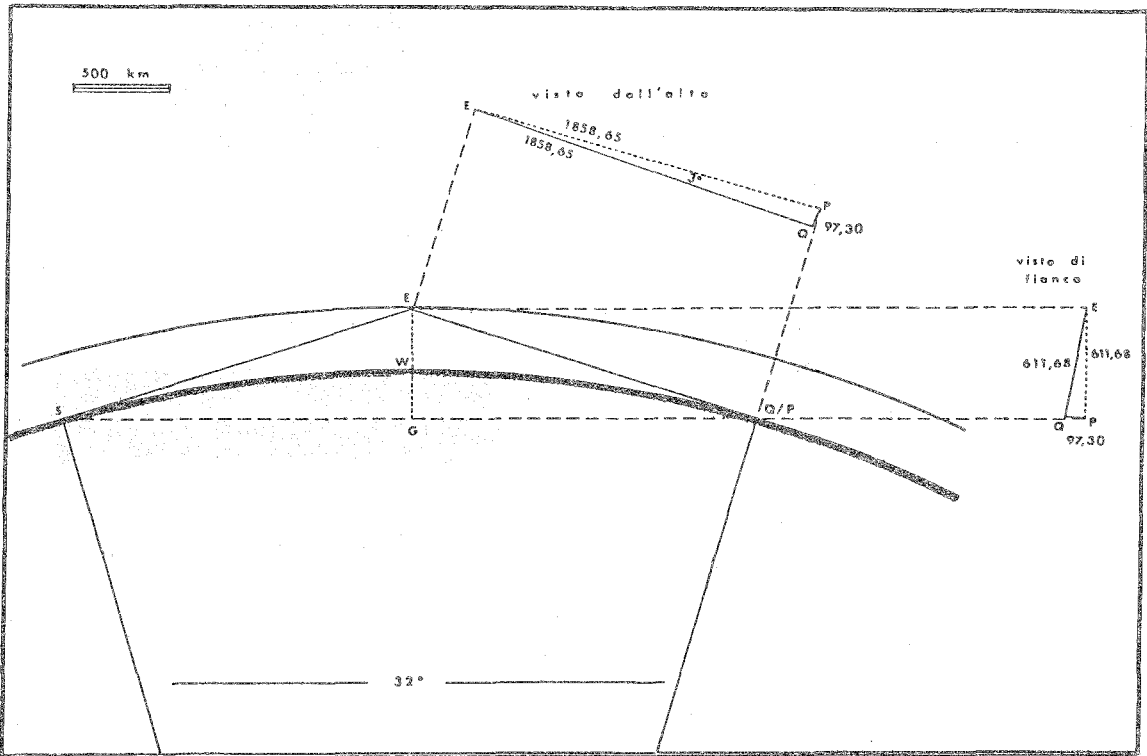


figura 6

Schema in sezione e in scala di una zona terrestre di eguale latitudine.

L'esempio rappresenta la latitudine di 45° con l'eccezione per il tratto E-Q che se ne allontana fino al 42°.

Partendo dall'angolo di 32° formato al centro della Terra dalle proiezioni di « S » e « Q » e considerando il raggio terrestre di 6.368 km si ricava il tratto E-G (somma della « saetta » G-W e dell'altezza dello strato E-W di 365 km). Quindi si risale facilmente alla lunghezza S-E (eguale a E-Q). La distanza Q-P (prospetto « visto dall'alto ») è determinata utilizzando la metà dell'angolo tipico di 3° con la formula: «  $2 \text{ sen } 1,5 \times 1858,65$  ».

Il prospetto « visto di fianco » è dettagliato nella successiva figura 7.

I punti « S », « Q » e « E » appartengono a un piano contenente l'ellisse ipotetica che non passa per il centro della Terra, ma per uno dei fuochi « H » o « K » di cui alla figura 5.

Nei due prospetti: « visto dall'alto » e « visto di fianco », il percorso dell'onda è quello indicato dal tratto pieno E-Q; mentre quello tratteggiato E-P appartiene al piano-sezione della Terra a 45° di latitudine che passa per il centro della Terra.

L'arco S-Q (distanza del collegamento) è di 3.556 km.

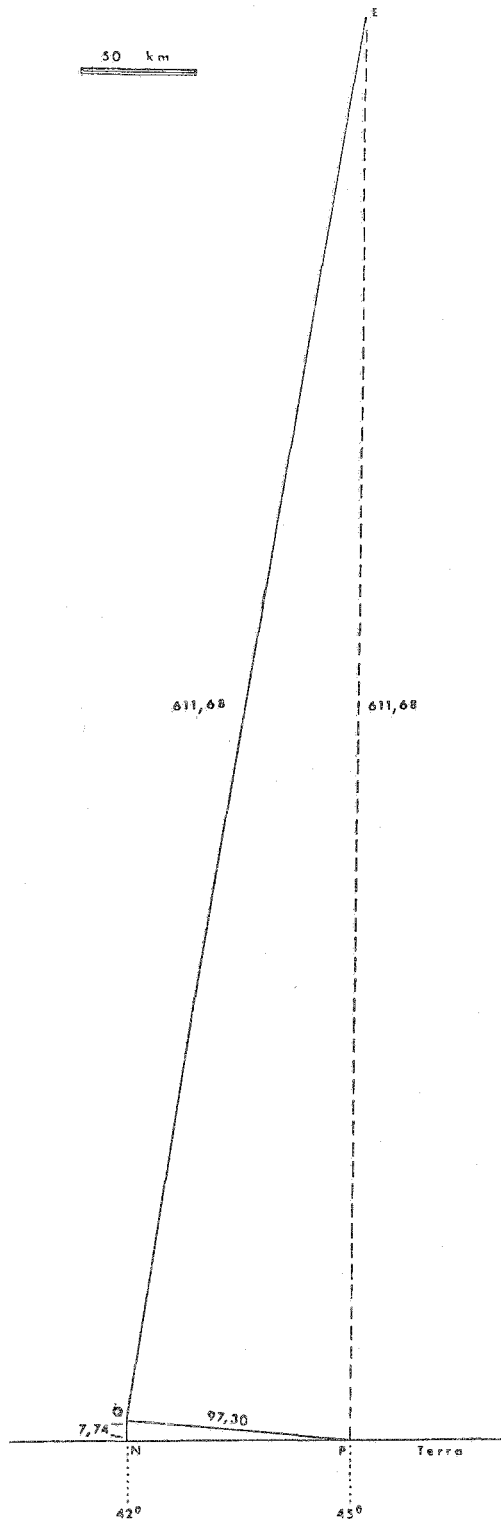


figura 7

Dettaglio della proiezione E-G « vista di fianco » della precedente figura 6. Il quadrato della distanza Q-P diviso il doppio valore dell'altezza E-P determina il tratto Q-N che corrisponde all'innalzamento da Terra del fuoco di riconcentrazione « Q ».

----- + -----

E' la distanza Q-P che porta ad un innalzamento del fuoco (« Q ») dell'ellisse sopra la superficie terrestre di ben 7,74 km, sufficienti a superare praticamente tutti i rilievi montuosi che ivi esistessero. Se l'inclinazione dello strato permettesse anche solo 1° di deflessione del raggio incidente, avremmo egualmente uno spostamento laterale di 32,4 km e un innalzamento rispetto alla superficie di 860 metri.

Queste note sono state desunte e adattate dall'Autore dell'opuscolo monografico « **Dinamica della radioriflessione ionosferica** » edito dalla sezione di Brescia dell'Associazione Radioamatori Italiana. L'opuscolo conduce anche una attenta analisi dei fattori che influenzano la propagazione delle onde radio come già conosciuta a normale livello scientifico. Così ci sono particolari capitoli riguardanti il dettaglio degli strati, le macchie solari, il campo magnetico terrestre.

L'opuscolo è in vendita per la somma di lire 4.000 indirizzando la richiesta a: Sezione ARI Brescia - C.P. 230 - 25100 BRESCIA.

Il centro della Terra « o » prolungato fino ai punti « A », « B » e « C » con angoli rispettivamente di 70°, 45° e 20° sull'asse equatoriale (i paralleli) forma angoli fra loro diversi con il prolungamento dei fuochi « H » e « K » dell'ellisse costituente lo strato F2 ipotizzato alle medie condizioni: queste differenze, rispettivamente di 2°, 3° e 1,5°, danno la misura dell'inclinazione dello strato nel punto considerato. La differenza dei due angoli, massima alla latitudine di 45°, cala fino ad annullarsi in corrispondenza dell'equatore e dei poli.

Se da « T » si trasmettesse verso lo strato con un angolo che si discosta dalla verticale di 7°, troveremmo il segnale riflesso dal punto « B » non con un angolo eguale bensì con uno di 10° (se si trasmettesse esattamente sulla verticale la riflessione avverrebbe con 3° di spostamento). Naturalmente sono considerazioni puramente teoriche in quanto nessun sistema radiante permette un così alto grado di definizione nella separazione degli angoli emittenti e riceventi.

Ora si deve immaginare il disegno con una terza dimensione: la profondità. Una trasmittente posta in « s » con le antenne orientate in tangenza alla superficie terrestre in quel punto lungo la normale del foglio che non è evidentemente visualizzata (immaginabile dalla retta che congiunge l'occhio dell'osservatore con il punto « s »), emette segnali che viaggiano in linea retta fino a incontrare lo strato 1.800 km più in... « basso » (rispetto al piano del foglio), che chiamiamo punto « E », da dove si rifletteranno. Il fascio d'onde emesso dall'antenna dobbiamo pensare di vederlo assialmente nel punto in « s ». Essendo « s » a 45° dall'equatore il punto di riconcentrazione focale, 3.600 km più in « basso » rispetto al piano del foglio (che chiameremo punto « Q »), sarebbe sempre a 45° se lo strato fosse sferico ed equidistante dalla Terra, ma nel caso in esempio sarà a 42° con una differenza di 3° tipica di questa latitudine per i dati considerati.

L'onda radio che va da « S » a « Q » dopo la riflessione in « E » è considerata alla stessa latitudine di 45° e quindi con lo strato ionizzato alla medesima altezza lungo tutto il percorso; ma lo strato è inclinato con la quota crescente rispetto alla superficie terrestre, lungo la terza dimensione, non visualizzata, proseguendo verso la normale al foglio.

L'emissione con pochi gradi di elevazione rispetto alla tangente alla Terra in « S » giunge in « E » dove viene riflessa verso « Q » subendo però uno spostamento rispetto al piano passante per il centro della Terra di 3° dovuto alla inclinazione dello strato in quel punto.

Visto dall'alto il segnale si riconcentra a 97 km di distanza da dove avrebbe dovuto essere se lo strato fosse sferico ed equidistante dalla Terra.\*\*\*