



UN ALBERO COME ANTENNA

■ di Ezio Mognaschi

Sommario

1. Introduzione
2. Cos'è un albero?
3. Come interagisce con le onde elettromagnetiche?
4. Risultati sperimentali e conclusioni
5. Post scriptum
6. Ringraziamenti
7. Appendice
8. Bibliografia

1. Introduzione

Nella letteratura radiotecnica gli alberi sono solitamente menzionati per due motivi: a) per la loro possibile funzione come sostegni per antenne filari o di altro tipo, b) per l'azione schermante che hanno sui segnali radio. Per quanto riguarda il primo punto la normativa vigente nega loro anche l'umile prerogativa di essere usati come sostegni in quanto essi non soddisfano necessariamente i requisiti di resistenza contro il vento voluti dalla legge; quanto al secondo punto, in parziale, pratica contraddizione con l'uso suggerito al punto a), può capitare di leggere: "A un'antenna molto lunga è preferibile un'antenna ben elevata e libera dalla vicinanza di oggetti (edifici, alberi, fili, ecc.) che presentano un'azione schermante per l'antenna" [1]. Sembra quindi che gli alberi, preziosi elementi del creato, debbano non solo restare estranei al mondo della radio, ma essere ad esso avversi e che i radioamatori, in quanto tali, debbano essere necessariamente misofiti.

Se ci fosse bisogno di esempi pensiamo alla storica rappresentazione della prima stazione ricevente transatlantica a San Giovanni di Terranova che mostra un panorama solo di mare e rocce sullo sfondo del piccolo edificio della stazione, oppure alla fotografia di una spedizione DX dei nostri giorni ove si può vedere spesso un panorama brullo e desolato, nel quale gli unici elementi salienti sono una tenda, qualche antenna montata per l'occasione e gli operatori che resistono eroicamente ad un vento furioso, ...mai nessun albero!

Generalmente poi, si pensa ad un'antenna per radiorecezione come ad un buon conduttore o ad un insieme di buoni conduttori isolati da terra, ed il pensare di usare come antenna un albero, cioè - come vedremo - un conduttore di scarse qualità elettriche, per di più collegato a terra all'estremità inferiore, sembra contraddire le più elementari aspettative. Chi potrebbe pensare di usare un albero come antenna ricevente, se non qualche anticonformista in cerca di delusioni? Tuttavia vedremo che si può usare un albero come antenna ricevente, proprio come un traliccio verticale e conduttore, messo a terra all'estremità inferiore, è stato usato come antenna trasmittente. Inoltre, l'osservazione di come negli alberi colpiti dal fulmine l'intensa corrente a radiofrequenza si scarichi a terra lungo il tronco (spesso scortecciandolo), fa supporre che un albero possa anche essere sede di correnti a radiofrequenza indotte dai campi elettromagnetici che lo investono; correnti piccole, che non lasciano ovviamente alcuna traccia visibile, ma che possono essere rivelate da un radiorecettore.

Nel 1992 venne suggerito [2], sulla base di un'esperienza che risale a qualche decennio fa, di usare proprio un albero per la ricezione in banda ELF. L'esperimento descritto consiste nel piantare due chiodi in un albero d'alto fusto, uno vicino a terra, l'altro

ad altezza d'uomo, e di collegarli, rispettivamente alla massa ed all'ingresso di un amplificatore audio per ricevere i segnali di radio natura. È stato poi suggerito [3], per lo stesso scopo,

di avvicinare semplicemente l'antenna a stilo di un ricevitore costituito come nel caso precedente da un amplificatore audio, a pochi centimetri dal tronco di un albero, mantenendola parallela ad esso. In entrambi i casi viene riferita la possibilità di ricevere così, oltre ai segnali radio naturali, quelli del sistema Omega e quelli di qualche potente stazione navale attiva su frequenze molto basse.

Queste informazioni mi hanno incuriosito al punto di spingermi ad eseguire delle prove che hanno fornito risultati interessanti non solo in banda ELF, come spiegherò più avanti. In particolare, in base ad esperienze personalmente condotte, posso confermare l'esito positivo di

entrambe le prove sopra descritte.

Nel maggio del '92, in occasione dell'Assemblea A.I.R. a Brallo di Pregola, ho potuto mostrare ad un gruppo di soci l'uso di un albero di **salice**, che sorge isolato in un ampio pianoro, come antenna per la ricezione dalle OL, giù fino a 10 kHz.

Lo stesso anno ho eseguito alcune misure sistematiche dell'intensità del segnale di stazioni di radiodiffusione e di utilità, come riferirò più avanti, usando come antenna, per comodità, un pino del mio giardino.

Recentemente l'amico prof. B. Carpenè mi ha cortesemente segnalato una breve nota di un radioamatore statunitense [4] nella quale si descrive l'uso di un acero, alto 18 m, per la ricezione nell'intervallo da 100 kHz a 30 MHz.

Occorre infine ricordare che, negli anni '30, con l'espressione "antenna-albero" o "pilone irraggiante" veniva indicata una particolare antenna trasmittente costituita da un traliccio metallico verticale formato da due tronchi di piramide a base quadrata, uniti per le basi e sovrapposti, cioè formata da una struttura avente dimensioni trasversali non trascurabili rispetto a quella verticale. Un'antenna di questo tipo, alta 267 m e larga, nel punto medio, 11.5 m, venne utilizzata nel 1933 per il trasmettitore di Nashville [5].

Prima di avanzare un'interpretazione quantitativa sul funzionamento di un albero come antenna ricevente esporrò un modello che ipotizzi cosa sia un albero dal punto di vista elettrico e come esso interagisca con le onde elettromagnetiche. Riferirò poi i risultati sperimentali delle mie prove e discuterò brevemente l'accordo con la teoria sviluppata in un'apposita Appendice.

2. Cos'è un albero?

Un albero può essere considerato come una struttura, estesa prevalentemente in senso verticale, ma con dimensioni trasversali non trascurabili, e costituita, nel caso di un albero vivo, di materiale semiconduttore, collegata al suolo per mezzo del suo apparato radicale che forma una buona presa di terra, almeno per lo scopo in questione. Nel presente contesto la parola "semiconduttore" viene usata nel suo significato letterale che verrà chiarito più avanti.

Un albero assomiglia quindi ad un'antenna verticale di larghezza non trascurabile rispetto all'altezza. Questo fatto riduce l'induttanza ed aumenta la capacità dell'antenna ed ha come conseguenza l'abbassamento del fattore di qualità del circuito equivalente dell'antenna stessa, che diventa un'antenna a larga banda. Il caso limite di larghezza trascurabile rispetto all'altezza corri-

sponde al caso di un'antenna di tipo Marconi. Ma si noti che, mentre in un'antenna Marconi il ricevitore è inserito in serie all'antenna, alla sua base, nel presente caso il ricevitore è collegato in parallelo ad una porzione dell'antenna stessa, come verrà discusso in dettaglio più avanti.

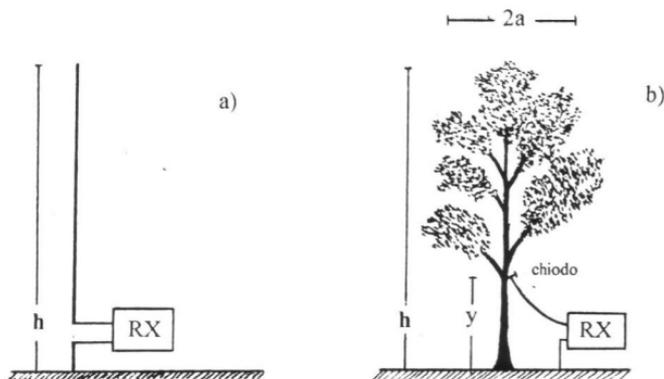


FIGURA 1: a) antenna Marconi; b) un albero usato come antenna.

Un albero morto, che come antenna non funziona, si differenzia dal caso precedente in quanto il materiale di cui è costituito è divenuto isolante, ed è tanto più isolante quanto più l'albero è secco. Si tenga inoltre presente che, per ovvii motivi, gli alberi nascono e si sviluppano generalmente su terreni umidi, buoni conduttori e si trovano quindi, generalmente, collocati su di un buon "piano di terra".

Perché ho affermato che un albero vivo è costituito di materiale semiconduttore? Semplicemente in base al valore della conducibilità elettrica del legno di cui è fatto.

Non ho trovato dati relativi alle proprietà elettriche del legno vivo in nessun manuale, perciò ho eseguito la misura della resistività elettrica di due alberi appartenenti a specie botanicamente molto diverse tra loro: una gimnosperma (pino) ed un'angiosperma (salice). La misura è stata effettuata a 50 Hz con un sistema a 4 elettrodi usando, per l'eccitazione della corrente, il secondario a 50 V di una saldatrice elettrica che fungeva da trasformatore di isolamento rispetto alla rete. Senza entrare nel dettaglio della misura riferisco solo i risultati ottenuti nel mese di luglio del 1992: la resistività di volume di un *Pinus nigra* Arnold di circa 35 anni è risultata di 7400 Wcm, quella di un *Salix alba* L. di 5 anni di 4300 Wcm. Il legno di salice è più conduttore di quello di pino, come è ragionevole aspettarsi in base al maggiore contenuto di acqua di quest'ultima essenza. Le misure di resistività da me effettuate permettono dunque di classificare il legno vivo tra i semiconduttori (che presentano resistività tra 10^2 e 10^9 Ω cm). I metalli, che sono buoni conduttori, hanno resistività dell'ordine di 10^{-6} Ω cm, mentre i buoni isolanti hanno resistività da 10^{14} a 10^{22} Ω cm. I legni secchi hanno resistività che vanno da 3×10^{10} Ω cm per l'acero, a 4×10^{13} Ω cm per il mogano e si situano, dal punto di vista della resistività, tra i semiconduttori ed i buoni isolanti. Il legno secco, come è noto, è un isolante, ma non un buon isolante.

Per quanto riguarda la costante dielettrica del legno i dati in letteratura sono scarsi e la sua misura nei semiconduttori è molto difficoltosa. I pochi dati da me trovati forniscono, per la costante dielettrica relativa, $2 \leq \epsilon_r \leq 3.5$ per il legno secco, $4 \leq \epsilon_r \leq 6$ per il legno con contenuto di acqua dal 5 al 10 %, $\epsilon_r = 10$ in corrispondenza al 30% ed $\epsilon_r = 20$ in corrispondenza al 50% di acqua. D'altra parte, per contenuti di acqua superiori al 50%, la costante dielettrica del legno deve essere minore di quella dell'acqua stessa che è pari ad 80. Dai dati sopra riportati si può dedurre che per il legno vivo del *Pinus nigra* Arnold, che presenta un contenuto di acqua da me misurato tra il 45 ed il 50 %, il valore di ϵ_r sia pari a circa 20.

Chiarita la natura elettrica di un albero, consideriamone ora la

struttura. Per descriverne compiutamente la forma che è, in generale, estremamente complicata, occorrerebbe ricorrere ad una recentissima branca della geometria, la geometria frattale. Questo porterebbe però a complicazioni in larga misura inutili in quanto nell'interazione con un'onda elettromagnetica - che verrà trattata in Appendice - quello che conta è il rapporto tra la lunghezza d'onda e le dimensioni dell'albero e non i dettagli della sua struttura. Nel limite che considereremo, di onde la cui lunghezza d'onda sia maggiore dell'altezza dell'albero, la forma di quest'ultimo, con una brutale semplificazione, può essere schematizzata come un cilindro verticale avente resistività di volume ρ , tipica di un semiconduttore, costante dielettrica ϵ_r , altezza h e raggio a . Questo modello estremamente rozzo si adatta bene, ad esempio, ad un pioppo ed a tutti gli alberi "alti e schietti" - per citare i cipressi di Carducci -, meno bene alle querce ed agli alberi da frutto i quali sviluppano ampiamente le loro chiome in senso orizzontale. Useremo egualmente questo modello in base al semplice principio secondo il quale è meglio usare un modello rozzo, ma trattabile quantitativamente, piuttosto che un modello perfetto, ma difficilmente trattabile dal punto di vista matematico.

3. Come interagisce un albero con le onde elettromagnetiche?

Quando un'onda elettromagnetica investe una struttura materiale qualsiasi essa induce dei potenziali distribuiti lungo la struttura stessa in relazione alla forma della struttura, alle sue proprietà elettriche ed al rapporto tra le sue dimensioni e la lunghezza d'onda λ . La trattazione del caso specifico che stiamo considerando è piuttosto complicata e comporta, necessariamente, l'uso di strumenti matematici e di argomentazioni fisiche di una certa complessità. Per questo motivo, questa trattazione viene esposta in Appendice. Qui riprendiamo dall'Appendice solo il risultato finale e cioè l'equazione (12) che fornisce il valore dell'ampiezza del segnale a radiofrequenza lungo un albero di altezza h :

$$\Delta V_o(y) = I_o K y (h - y) / \lambda$$

ove y è la quota alla quale viene prelevato il segnale e K ed I_o sono delle costanti definite nell'Appendice.

La differenza di potenziale $\Delta V_o(y)$ può essere prelevata per mezzo di due chiodi metallici piantati nel tronco, uno alla base ed uno a quota y , o meglio (per l'albero) tra un chiodo piantato nel tronco a quota y ed una presa di terra, come in figura 1b.

Limitiamo dapprima l'attenzione alla dipendenza dell'intensità del segnale da y , cioè ci chiediamo dove convenga piantare il chiodo al fine di avere il massimo segnale. È facile verificare che l'ampiezza del segnale a radiofrequenza è rappresentata dall'equazione di una parabola con massimo per $y = h/2$. La figura 2

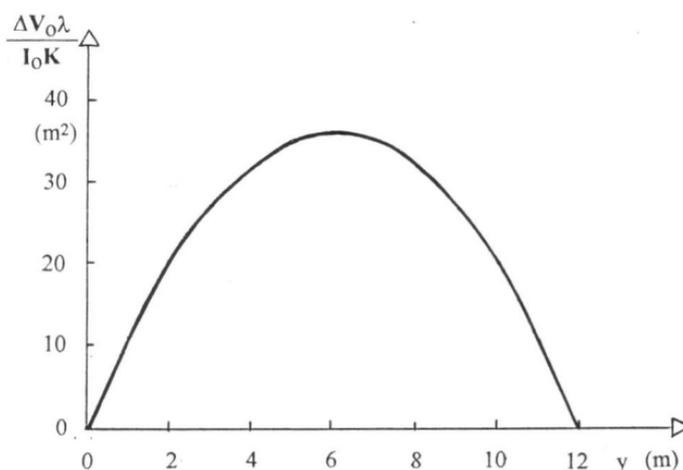


FIGURA 2: dipendenza dell'intensità del segnale dalla quota y .

riporta il grafico del rapporto $\Delta V_o(y)\lambda/(I_oK)$, in funzione di y , ove si è posto $h = 12$ m. La teoria, delineata in Appendice, indica che il massimo segnale, nelle ipotesi semplificatrici introdotte, si può ottenere a metà dell'altezza dell'albero; ma, mentre il segnale all'inizio cresce rapidamente in funzione di y , già dopo $h/3$ esso cresce lentamente. Come regola pratica un'altezza pari ad $h/3$ è sufficiente per ottenere un segnale vicino al massimo ottenibile, senza spingersi sino alla metà dell'altezza dell'albero. (Vedi Fig. 2).

Per quanto riguarda la dipendenza dell'intensità del segnale dalla lunghezza d'onda, essa è inversamente proporzionale a λ , cioè un'antenna "corta" quale è un albero è tanto meno efficiente quanto più grande è la lunghezza d'onda che deve ricevere. Infine, è evidente che un albero isolato costituisce un'antenna omnidirezionale, mentre un filare di alberi potrebbe presentare caratteristiche direttive.

4. Risultati sperimentali e conclusioni

L'albero da me usato come antenna era un *Pinus nigra* Arnold alto circa 12 m. Il segnale è stato prelevato tra uno di una serie di chiodi infissi nel tronco dell'albero, rispettivamente alle quote di 1 m, 2 m, 4 m e 6 m da terra ed una presa di terra, realizzata in prossimità dell'albero stesso. Non occorre che i chiodi siano conficcati profondamente per due motivi. Il primo, di carattere generale, è che la corrente a radiofrequenza è prevalentemente superficiale; il secondo, di carattere specifico, è dovuto all'anatomia del tronco. Esso è costituito, procedendo dall'esterno verso l'interno, dalla corteccia, relativamente poco conduttrice in quanto formata prevalentemente di sughero, dal libro nel quale scorre la linfa elaborata discendente anch'essa poco conduttrice, dall'alburno nel quale ha luogo il trasporto di linfa ascendente, ricca di sali in soluzione acquosa che è perciò la parte relativamente più conduttrice ed infine dal durame formato da tessuti conduttori morti. Allo scopo di prelevare il segnale a radiofrequenza basta che i chiodi trapassino la corteccia ed il libro, e raggiungano l'alburno. In pratica una penetrazione di uno o due centimetri è sufficiente. Ciascun chiodo era collegato, per mezzo di un corto pezzo di conduttore flessibile, ad un connettore "faston" maschio la cui femmina era saldata al conduttore centrale di un cavo coassiale. La calza del cavo coassiale era collegata a terra. I quattro cavi coassiali scendevano lungo il tronco e potevano essere collegati, uno alla volta, al sistema ricevente. Quest'ultimo era formato da un convertitore per OL modello LX885 di Nuova Elettronica, seguito da un ricevitore Sony ICF-2010. Se il sistema ricevente, come nel mio caso, presenta un'alta impedenza di ingresso, in modo da perturbare molto poco la distribuzione di potenziale lungo il tronco, la connessione può essere effettuata semplicemente con un filo conduttore, meglio se schermato, per essere sicuri che il segnale sia quello captato dall'albero e non dal filo di discesa. Per basse impedenze d'ingresso occorre interporre tra l'albero-antenna ed il sistema ricevente un opportuno trasformatore di impedenza, altrimenti si captano solo i segnali più intensi, come quelli degli eventuali trasmettitori locali. Sempre a proposito della penetrazione del chiodo nel tronco ho potuto osservare che il segnale è nullo appena appoggiato il chiodo al tronco e che esso aumenta gradualmente man mano che il chiodo penetra nel tronco, sino a raggiungere un valore costante ad una profondità oltre la quale è inutile spingersi perché il segnale non aumenta più.

Ho eseguito le misure dell'intensità del segnale di diverse stazioni, in funzione della quota y , ove era prelevato il segnale da misurare. La misura dell'intensità del segnale è stata effettuata utilizzando la scala a 10 LED di cui è dotato il ricevitore. Il sistema ricevente è stato successivamente tarato iniettando nel convertitore un segnale a 500 kHz e prendendo nota del segnale minimo occorrente per accendere i diversi LED, con una procedura simile a quella che ho già descritta in precedenza [6]. Anche in questo caso una lettura, mettiamo, di 6 LED significa che è pre-

sente un segnale di almeno 1 mV, ma inferiore a 2.2 mV che farebbe accendere 7 LED.

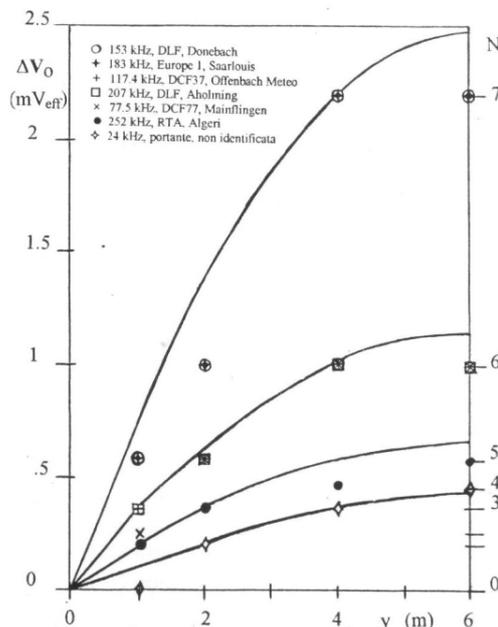


FIGURA 3: intensità del segnale ΔV_o in mV_{eff} (scala a sinistra) prelevato da un *Pinus nigra* Arnold alto 12 m, in funzione dell'altezza y in m. La scala di destra si riferisce al corrispondente numero N di LED accesi nel ricevitore Sony ICF-2010.

La figura 3 mostra i risultati delle misure di intensità di segnale per alcune stazioni, ottenute a Brallo di Pregola (PV) il 23 giugno 1992 tra le ore 0945 e le ore 1100 ora italiana. Le stazioni identificate appartengono tutte all'area europea o mediterranea e i loro segnali sono stati ricevuti per onda di terra. Non sono stati riportati in figura i dati relativi ai più intensi segnali ricevuti, come quelli di Montecarlo su 216 kHz, Allouis su 162 kHz, in quanto, per queste stazioni, si è osservato un segnale di livello 6 o 7 LED indipendentemente dalla quota y . Questo fatto era probabilmente dovuto ad un effetto di saturazione a causa del segnale troppo intenso in relazione ai limiti della caratteristica dinamica del convertitore. Nei dati riportati in figura 3 è evidente l'andamento quasi lineare dell'intensità del segnale in funzione dell'altezza y sino a 4 m, mentre da 4 m a 6 m il segnale rimane costante o quasi. Le curve a tratto continuo rappresentano il valore calcolato per l'intensità del segnale in base all'equazione (12) dell'Appendice.

Dai dati riportati si può anche dedurre l'ordine di grandezza della corrente a radiofrequenza presente nell'albero, indotta dall'onda proveniente da una singola stazione radio. Prendiamo la maggiore differenza di potenziale misurata che è di circa 2 mV alla quota di 6 m; tra questa quota e terra la resistenza elettrica della porzione di albero è di circa 2 k Ω . La corrente è quindi di circa 1 μA .

A questo punto il lettore potrebbe chiedersi come mai le misure non sono state spinte sino alla cima dell'albero, come mai non sono state ripetute di notte, come mai non sono riportati dati relativi alle OM... La risposta è semplice: le misure sono state effettuate per curiosità molto prima di sviluppare l'interpretazione riportata in questo articolo e sono state esse a stimolare la formulazione di una teoria e non viceversa! Devo confessare che l'osservazione che il segnale non aumenta, o aumenta poco, da un'altezza pari ad un terzo di quella dell'albero a quella pari alla metà, mi ha lasciato molto perplesso per tanto tempo finché, da un'attenta lettura del Terman [6] e della letteratura degli anni '30 sulle antenne - anni nei quali è stata sviluppata la teoria delle antenne trasmettenti per radiodiffusione - mi sono convinto che la

non linearità osservata può essere spiegata sulla base dei due fattori discussi nell'Appendice. Cioè a) tenendo conto della distribuzione di tensione e di corrente lungo l'albero, anche se in modo approssimato, b) introducendo la resistenza elettrica dell'albero, che è tutt'altro che trascurabile rispetto all'impedenza che si potrebbe calcolare per un buon conduttore di quella forma. La misura del preciso valore della resistività del legno vivo e la stima della sua costante dielettrica hanno poi permesso di stabilire entro quali limiti, cioè sino a quali frequenze, sia valida la trattazione esposta.

Il lavoro sperimentale non è terminato ed invito i lettori interessati a contribuire a questa ricerca.

Ci si potrebbe infine chiedere quale sia il vantaggio di usare un albero come antenna. Il non portarsi appresso pesanti ed ingombranti rotoli di filo o fasci di aste e relativi ammassi per allestire un'antenna tradizionale e sfruttare invece quello che la natura ci offre è, a mio avviso, non solo un vantaggio quando ci si allontana dal proprio QTH, ma anche un modo di entrare nell'ambiente naturale per meglio conoscerlo. Inoltre, nelle situazioni in cui, per qualche motivo, non si può o non si vuole stendere una filare od innalzare una verticale e, ovviamente, ove esiste un albero, si può sfruttare quest'ultimo come antenna ricevente. L'ulteriore sperimentazione potrà poi mettere in evidenza vantaggi e limiti dell'uso di un albero come antenna così come permetterà di trovare il migliore sistema per prelevare da un albero il segnale a radiofrequenza.

5. Post scriptum

Termino con due raccomandazioni, forse ovvie, ma importanti. La prima, per la sicurezza dell'operatore e la salvaguardia delle apparecchiature, è di non sperimentare alberi come antenne nell'imminenza o durante i temporali; la seconda è di provvedere sempre a rimuovere, dopo l'uso, i chiodi infissi negli alberi. Questo sia per proteggere la salute e l'integrità della pianta, sia per evitare incidenti e danni a chi dovesse, in futuro, utilizzare il legno dell'albero.

6. Ringraziamenti

Ringrazio il prof. B. Carpenè, Curatore dell'Orto Botanico dell'Università di Pavia, per le informazioni, le utili discussioni e la supervisione sugli argomenti di carattere botanico, l'ing. Alessandro Galeazzi, Membro del Comitato Scientifico dell'A.I.R. per la cortese ed attenta lettura del manoscritto, per le osservazioni e gli utili suggerimenti forniti ed il prof. Roberto Canobbio compagno in molte sperimentazioni sulla ricezione delle VLF.

7. Appendice

In generale, quando un'onda elettromagnetica di frequenza f , frequenza angolare $\omega = 2\pi f$ e lunghezza d'onda λ investe un tratto rettilineo di un'antenna ricevente, induce dei potenziali distribuiti lungo di essa. La *differenza di potenziale indotta per metro di lunghezza* vale $E \cos \Phi \cos \theta$, dove

$$E = E_0 \sin \omega t. \quad (1)$$

E_0 è l'intensità del campo in Vm^{-1} , Φ l'angolo tra il piano di polarizzazione dell'onda ed il conduttore, e θ è l'angolo tra il fronte d'onda e l'antenna. La quantità $E \cos \Phi \cos \theta$ rappresenta quindi, ad ogni istante t , la componente del campo parallela all'antenna e polarizzata nello stesso piano dell'antenna, ed è quella utile per indurre un segnale. Il vettore campo elettrico di un'onda elettromagnetica generata da un'antenna trasmittente verticale ha, in prossimità della superficie terrestre, una piccola inclinazione in avanti [7]. Questa inclinazione dipende dalla frequenza e dalle caratteristiche elettriche del terreno e può raggiungere il valore massimo di 22° . Per le frequenze di radiodiffusione e per i terreni

normali è sempre inferiore a 15° e sarà ancora minore per le frequenze più basse. Assumendo per l'inclinazione il valore $\theta = 15^\circ$ e polarizzazione verticale, cioè $\Phi = 0$, la componente verticale del campo elettrico E dell'onda incidente, è $E \cos \theta$, pari a $0.97 E$. Cioè il 97% dell'intensità del campo è utile per indurre una differenza di potenziale in un'antenna verticale.

I potenziali indotti dall'onda elettromagnetica sono distribuiti lungo l'antenna e provocano l'eccitazione di correnti, di modo che, se si inserisce una impedenza di carico (il nostro ricevitore) in parallelo con una parte di antenna di lunghezza y , l'energia sottratta all'onda viene, in parte, ceduta al carico. L'antenna può essere considerata come un generatore di forza elettromotrice $V(y)$, di impedenza interna $Z_a(y)$, con in parallelo l'impedenza di carico Z_L , come schematizzato in figura 4. Si suppone il terreno perfettamente conduttore e trascurabile l'impedenza del filo di collegamento tra l'albero ed il ricevitore.

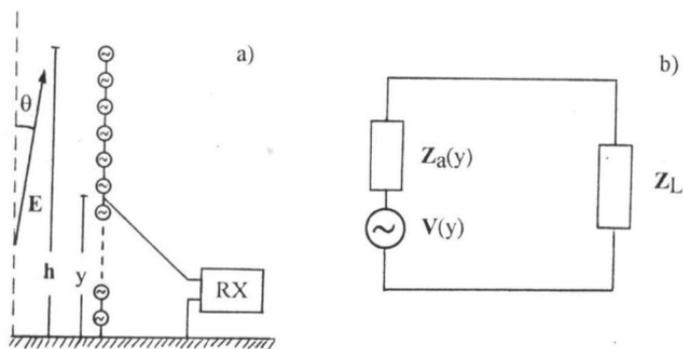


FIGURA 4: a) schema elettrico corrispondente alla figura 1b) con potenziali distribuiti e connessione del ricevitore all'albero-antenna; b) circuito equivalente di a) comprendente: un generatore di forza elettromotrice $V(y)$, con impedenza interna $Z_a(y)$ ed un'impedenza di carico Z_L .

La soluzione del circuito equivalente è:

$$I(y) = V(y) / [Z_a(y) + Z_L] \quad (2)$$

e la differenza di potenziale V_L ai capi del carico, tenendo conto della (2), è:

$$V_L = I(y) Z_L = V(y) Z_L / [Z_a(y) + Z_L]. \quad (3)$$

Per determinare V_L occorre dunque conoscere la distribuzione della corrente $I(y)$.

È facilmente comprensibile come sia $I = 0$ in cima all'albero (estremità isolata) e come la corrente abbia un determinato valore I_0 alla base. L'andamento di I in funzione di y è, innanzitutto, sicuramente continuo e, per antenne corte rispetto alla lunghezza d'onda quali quelle che stiamo considerando, è anche monotono; cioè è sempre o crescente o decrescente.

Si può mostrare [7] che la corrente a radiofrequenza $I(y)$, presente alla quota y , lungo un conduttore di lunghezza h con l'estremo inferiore in contatto con la terra mentre l'altro è aperto, è data, in prima approssimazione, da:

$$I(y) = I_0 \sin [2\pi(h - y)/\lambda] \sin \omega t \quad (4)$$

ove I_0 è l'intensità massima della corrente che si ha per $y = 0$, cioè alla base dell'albero.

Il potenziale di un punto a quota y , rispetto a terra è in opposizione di fase rispetto alla corrente ed è dato da:

$$V(y) = V_0 \cos [2\pi(h - y)/\lambda] \sin \omega t. \quad (5)$$

ove V_0 è il valore massimo del potenziale, che si ha per $y = h$.

Per semplicità di trattazione mi limiterò a considerare il caso della ricezione di onde la cui lunghezza d'onda λ sia tale che $\lambda \gg 4h$, cioè per le quali l'altezza h dell'albero sia molto minore di

un quarto d'onda ed il sistema sia quindi non risonante. È il caso di onde lunghissime, lunghe e medie. Infatti, rispetto ad un albero alto 30 m, ed è già un'altezza considerevole, le onde medie di minore lunghezza d'onda, circa 200 m, possono essere considerate "lunghe". In questo caso si possono sviluppare in serie le funzioni seno e coseno dipendenti da y che compaiono nelle (4) e (5) e, senza grave errore, limitarsi al primo termine dello sviluppo. Si ottiene:

$$I(y) = I_0 [2\pi(h - y)/\lambda] \text{ sen } \omega t, \quad (6)$$

$$V(y) = V_0 [1 - \pi^2(h - y)^2/\lambda^2] \text{ sen } \omega t. \quad (7)$$

La rappresentazione grafica della dipendenza spaziale delle equazioni (4), (5), (6) e (7) è riportata in figura 5.

Naturalmente un albero ha una struttura molto più complicata di quella di un conduttore rettilineo ed inoltre è costituito di mate-

ed un punto a quota y qualsiasi, con $0 \leq y \leq h$, lungo il tronco.

La differenza di potenziale $\Delta V(y)$ che potremo prelevare è quindi data da:

$$\Delta V(y) = I(y) R(y) \quad (8)$$

ove la resistenza $R(y)$ della porzione di albero tra terra ed il punto a quota y è data da:

$$R = \rho y/S \quad (9)$$

ed $S = \pi a^2$ è la sezione trasversale dell'albero.

Sostituendo nell'equazione (8) la (6) e la (9) si ottiene:

$$\Delta V(y) = (I_0 \rho/S) y [2\pi(h - y)/\lambda] \text{ sen } \omega t. \quad (10)$$

L'espressione (10) ci dice che, alla quota y , è presente un segnale a radiofrequenza di ampiezza $\Delta V_0(y)$, cioè si può scrivere:

$$\Delta V(y) = \Delta V_0(y) \text{ sen } \omega t \quad (11)$$

ove

$$\Delta V_0(y) = I_0 K y(h - y)/\lambda \quad (12)$$

e K , nell'ipotesi che ρ ed S siano costanti lungo il tronco, è una costante che comprende diverse caratteristiche del sistema considerato.

8. Bibliografia

- [1] E. Montù, *Come funziona e come si costruisce una stazione per la ricezione e trasmissione radio telegrafica e telefonica*, Hoepli, Milano, 1928, pag. 252.
- [2] S. DeFrancesco, "ELF experiments", *The Lowdown*, 1/92, pag. 26.
- [3] M. Mideke, "Tree probes and Earth dipoles", *The Lowdown*, 3/92, pag. 27.
- [4] W. C. Small, "Antenna topics", *Monitoring Times*, 9/90, pag. 96.
- [5] "Non più antenna orizzontale, ma pilone irraggiante", *L'Antenna*, 24/33, pag. 33.
- [6] E. Mognaschi, "Stazioni italiane in OM ascoltate in Gran Bretagna ed osservazioni sulla dinamica della ionosfera", *Radiorama*, 4/94, pag. 27.
- [7] F. E. Terman, *Manuale di ingegneria radiotecnica*, Martello, Milano, 1960.

NdR - Questo articolo, del compianto Prof. Ezio Mognaschi, è stato pubblicato, per la prima volta, sul *Radiorama* N. 8 del 1994 a pag. 32.

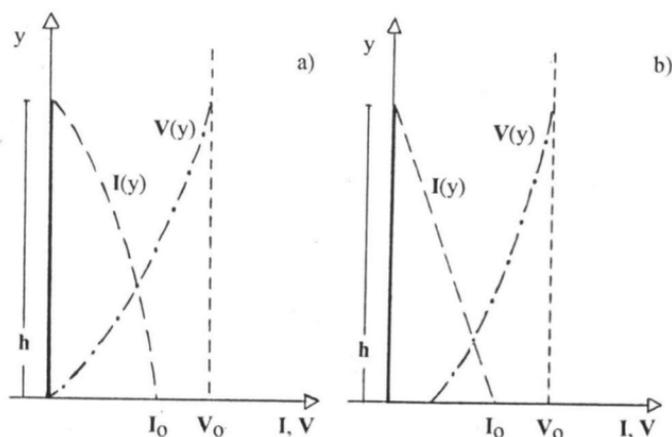


FIGURA 5: distribuzione del potenziale e della corrente lungo un conduttore rettilineo verticale per: a) $\lambda = 4h$, equazioni (4) e (5); b) $\lambda \gg 4h$, equazioni (6) e (7).

riale semiconduttore e non di materiale buon conduttore, perciò è possibile che la reale distribuzione della corrente a radiofrequenza si discosti da quella schematizzata in figura 5, ma, per semplicità di trattazione, assumeremo una dipendenza di I da y e del tipo dato dall'equazione (6), sicuri di usare un'approssimazione ragionevole, anche se non perfettamente soddisfacente.

Per quanto riguarda l'impedenza dell'antenna che stiamo considerando, nel limite di dimensioni trasversali non trascurabili, ma piccole rispetto all'altezza e di altezza piccola rispetto a λ , essa sarebbe di pochi ohm o di poche decine di ohm nel caso di un conduttore metallico [7]. Trattandosi invece di un semiconduttore la sua resistenza ohmica, dell'ordine delle centinaia o delle migliaia di ohm, è prevalente rispetto alla reattanza. In un materiale dielettrico semiconduttore sono presenti, in generale, due correnti: la prima, detta di *conduzione*, è, in base alla legge di Ohm, inversamente proporzionale alla resistività ρ , la seconda, detta di *spostamento*, è proporzionale alla frequenza f ed alla costante dielettrica ϵ_r . Per stabilire quale delle due correnti sia prevalente occorre tenere conto sia delle proprietà elettriche del materiale, sia del valore della frequenza. La corrente di conduzione è molto maggiore di quella di spostamento per $f \ll 1/(2\pi\rho\epsilon_0\epsilon_r)$, ove ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto. Per queste frequenze si può assimilare il tronco dell'albero ad una resistenza elettrica e trascurare la reattanza. Nel caso considerato quest'approssimazione è valida per frequenze *molto minori* di circa 12 MHz, cioè è lecita per onde lunghissime, lunghe e medie. La corrente a radiofrequenza scorre prevalentemente alla superficie del tronco (per effetto pelle) e si può prelevare una differenza di potenziale a radiofrequenza, cioè un segnale, così come si fa con un sistema potenziometrico, semplicemente collegandosi tra la terra (a potenziale zero)