

GENERALITÀ SULLA RICEZIONE E TRASMISSIONE DELLE INFORMAZIONI

Le modalità della comunicazione elettrica.

Una comunicazione elettrica consiste nell'invio di informazioni, poste sotto forma di segnali elettrici, tra due punti aventi una certa distanza tra loro. Si definisce *informazione*, nel campo delle telecomunicazioni, ogni segnale elettrico che rappresenta suoni, immagini, od impulsi codificati tipici della telegrafia e dei comandi a distanza.

Una delle caratteristiche dei vari tipi di informazione sopra citati, è il *campo di frequenze (banda)* in cui sono situati. Così, ad esempio, i segnali che riproducono suoni, sono compresi in una banda che va da 16 a 16.000 Hz; le immagini trasformate in segnali elettrici, richiedono invece un campo di frequenza più vasto (che può estendersi fino a 12 MHz).

La banda di frequenze occupata definisce inoltre la qualità d'informazione ovvero, un'informazione di tipo acustico mantiene la propria intellegibilità anche se il segnale elettrico che la rappresenta viene limitato entro un campo che va da 300 a 3400 Hz, tuttavia ne risulta alterata quella caratteristica che in acustica viene definita timbro e che è dovuta alle armoniche in cui è scomponibile il segnale stesso.

I campi di frequenza delle informazioni di uso più comune nelle comunicazioni elettriche, sono :

- Radiotecnica:** nelle trasmissioni a modulazione d'ampiezza, la banda del segnale trasmesso arriva fino a 4500 Hz o, in taluni casi di alta fedeltà di trasmissione, fino a 10 KHz. In modulazione di frequenza, la banda arriva fino a 15 KHz.
- Televisione:** come si è già osservato, dato che per trasmettere le immagini è necessaria una quantità d'informazione molto elevata, la banda teorica arriva fino a 12 MHz; in pratica, le trasmissioni avvengono in un campo di frequenze minore (generalmente 7 MHz).
- Telefonia:** nel campo telefonico è sufficiente la intellegibilità del segnale, perciò la banda di frequenza viene limitata tra i 300 ed i 3400 Hz.

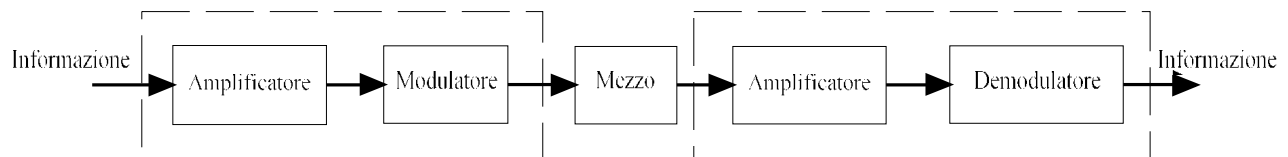


Fig. 1 - Rappresentazione a blocchi di un sistema tipico di comunicazione elettrica

Un sistema tipico per le comunicazioni elettriche, è rappresentato in figura 1. Nell'elemento trasmettitore viene introdotto il segnale elettrico che rappresenta l'informazione; poiché l'ampiezza (tensione, corrente, potenza) dell'informazione elettrica è assai ridotta, questa viene dapprima amplificata, quindi va a modulare una frequenza, detta *vettrice* o *portante*, di valore opportuno, per propagarsi nel mezzo che separa i due punti tra cui si effettua la comunicazione.

Dopo l'amplificazione e la modulazione, il segnale viene inviato nel mezzo di collegamento, che può essere una linea elettrica o lo spazio libero. Poiché nel passaggio attraverso il mezzo il livello del segnale modulato risulta attenuato, l'elemento ricevitore provvede anzitutto ad amplificarlo, quindi lo *demodula*, cioè compie l'inverso dell'operazione di modulazione di cui si è dato cenno più sopra. In tal modo si ottiene di nuovo il segnale elettrico che contiene l'informazione iniziale.

In fase di ricezione il segnale risulta affetto da componenti spurie che non esistevano in trasmissione: tali componenti, sono i *rumori del mezzo* (oltre ovviamente a quelli propri degli amplificatori e degli altri apparati elettronici costituenti il complesso trasmettitore-ricevitore. Il rumore del mezzo e

l'attenuazione della potenza di segnale che in esso ha luogo, pongono dei limiti alla potenza trasmessa, a quella ricevuta, e alla posizione relativa del trasmettitore e del ricevitore.

Onde sinusoidali

In un moto ondulatorio semplice un generico punto P del sistema oscillante si muove di moto armonico.

I parametri che caratterizzano il moto armonico sono:

- il **Periodo** T: è il tempo necessario affinché il punto P compia una oscillazione completa;
- la **Frequenza** f : è il numero di oscillazioni complete che il punto P compie in 1 secondo. Vale

$$\text{la relazione: } f = \frac{1}{T}$$

- la **Lunghezza d'onda** λ : è lo spazio percorso dal fronte d'onda nel tempo $t = T$

Se si indica con v la velocità di propagazione del fronte d'onda, si ha:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad \text{ovvero} \quad v = \lambda \cdot f \quad (1)$$

In generale, un qualunque moto ondulatorio armonico è descritto da una funzione di due variabili, il tempo t e lo spazio x , secondo la relazione:

$$p(t, x) = A_M \cdot \text{sen} 2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2)$$

Il termine A_M , rappresenta lo spostamento massimo del punto P in oscillazione rispetto alla posizione di riposo. Il parametro A_M , è detto **ampiezza** dell'oscillazione.

La precedente relazione si può porre nella forma:

$$p(t, x) = A_M \cdot \text{sen} \left(2\pi \cdot \frac{t}{T} - 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda} \right) = A_M \cdot \text{sen}(\omega t - Kx) \quad (3)$$

dove: $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ è detto **numero d'onda**;

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ è detta } \textbf{pulsazione}.$$

La relazione (3) rappresenta l'equazione di un'onda che si propaga nel verso positivo dell'asse delle x . Si può dimostrare che un'onda che si propaga nel verso opposto è descritta da una equazione che differisce da questa solo per il segno:

$$p(t, x) = A_M \cdot \text{sen}(\omega t + Kx)$$

Esempio:

Il segnale descritto dalla funzione $p(t, x) = 5 \cos \left(6,28 \cdot 10^8 t + \frac{\pi \cdot x}{2} \right)$ ha una frequenza $f = 100$ MHz e

$\lambda = 4$ m.

Interferenza

Con il termine *interferenza* si indica l'effetto dell'azione contemporanea di due o più onde incidenti in una stessa regione dello spazio. Il termine interferenza è, pertanto, sinonimo di *sovrapposizione*. La forma dell'onda risultante dipende dalla relazione di fase tra le onde incidenti.

Consideriamo il caso dell'interferenza di due onde di stessa frequenza e ampiezza, ma con fase diversa, che si propagano nella medesima direzione.

Le equazioni che descrivono il moto sono:

$$p_1(t, x) = A \cdot \text{sen}(\omega t - Kx) \quad \text{per la 1}^{\text{a}} \text{ onda}$$

$$p_2(t, x) = A \cdot \text{sen}(\omega t - Kx - \varphi) \quad \text{per la 2}^{\text{a}} \text{ onda}$$

Con φ si è indicata la differenza di fase tra le due onde. L'equazione dell'onda complessiva dovuta all'interferenza delle due onde è:

$$p(t, x) = A \cdot \text{sen}(\omega t - Kx) + A \cdot \text{sen}(\omega t - Kx - \varphi) = 2A \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \text{sen} \left(\omega t - Kx - \frac{\varphi}{2} \right)$$

L'ultima relazione è stata ottenuta ricordando le formule di prostaferesi:

$$\text{sen} \alpha + \text{sen} \beta = 2 \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \cdot \text{sen} \frac{\alpha + \beta}{2}.$$

L'interferenza ha prodotto un'onda di ampiezza $2A \cos \frac{\varphi}{2}$ avente stessa frequenza delle onde che si sovrappongono.

In particolare si ha:

1. per $\varphi = 0$, le onde sono in fase, l'interferenza è COSTRUTTIVA e la risultante ha una ampiezza $A_{TOT} = 2A$
2. per $\varphi = 180^\circ$ le onde sono in opposizione di fase e l'interferenza è detta DISTRUTTIVA con ampiezza risultante $A_{TOT} = 0$.

Nel caso in cui le onde hanno ampiezze diverse, diciamo A_1 e A_2 , l'equazione dell'onda risultante è ancora di tipo sinusoidale con stessa frequenza delle onde incidenti. L'ampiezza massima, in corrispondenza di sfasamento nullo, vale $A_1 + A_2$, mentre l'ampiezza minima si ottiene per sfasamento di 180° e risulta $|A_1 - A_2|$. In questo caso è impossibile l'interferenza distruttiva completa.

Onde stazionarie

Il fenomeno delle onde stazionarie è un caso particolare di interferenza di due onde che provengono da direzioni opposte. Il fenomeno delle onde stazionarie si manifesta tutte quelle volte che un'onda nel propagarsi in un mezzo subisce riflessione. L'onda diretta e l'onda riflessa interferiscono generando un'onda stazionaria.

Ad esempio, consideriamo una corda tesa fissata ad un estremo. Se si pone in oscillazione la corda, dalla parte dell'estremo mobile, si ottengono delle onde dirette che viaggiano verso l'estremo fisso. Giunte in tale punto le onde si riflettono nella direzione della sorgente del moto. Lungo la corda sono, pertanto, presenti sia onde dirette che riflesse. Esse interagiscono generando delle onde stazionarie.

Consideriamo, per semplicità, due onde di stessa ampiezza e frequenza che si propagano in direzioni opposte. Si ha:

$$p_1(t, x) = A \cdot \text{sen}(\omega t - Kx); \text{ per l'onda nella direzione } \mathbf{positiva} \text{ dell'asse delle } x;$$

$$p_2(t, x) = A \cdot \text{sen}(\omega t + Kx); \text{ per l'onda nella direzione } \mathbf{negativa} \text{ dell'asse delle } x.$$

L'interferenza delle due onde produce come risultante la seguente onda stazionaria:

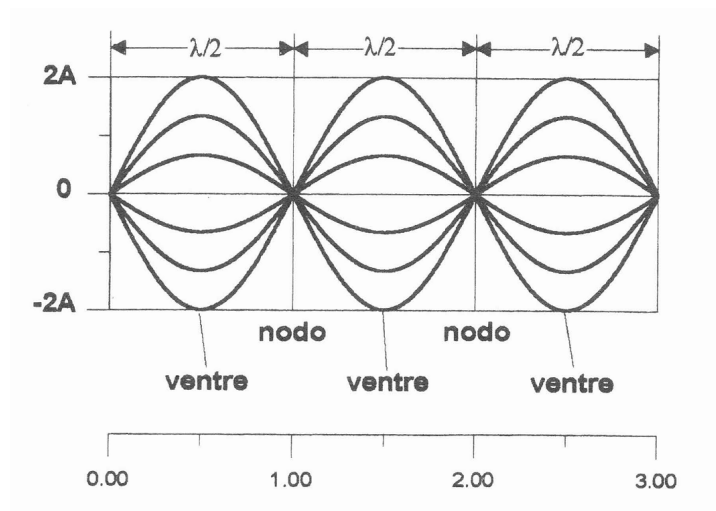
$$p(t, x) = A \cdot \text{sen}(\omega t - Kx) + A \cdot \text{sen}(\omega t + Kx)$$

Applicando le formule di prostaferesi, si ottiene:

$$p(t, x) = 2A \cdot \cos Kx \cdot \text{sen}\omega t$$

L'onda risultante è sinusoidale di stessa frequenza delle onde che interferiscono. L'ampiezza dell'onda presenta dei massimi nei punti x per i quali il $\cos Kx = \pm 1$ e di minimi nei punti in cui $\cos Kx = 0$. I punti di massimo sono detti **ventri** mentre quelli di minimo sono detti **nodi**.

In fig. si riporta il diagramma in funzione dello spazio di un'onda stazionaria.



Rappresentazione di un'onda stazionaria.

La distanza tra i ventri si ottiene risolvendo l'equazione:

$$\cos Kx = \pm 1 \quad \text{ovvero} \quad Kx = n\pi \quad \text{con} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Essendo per la (3) $K = \frac{2\pi}{\lambda}$, si ottiene:

$$\frac{2\pi}{\lambda} x = n\pi \quad \text{e finalmente} \quad x = \frac{n\lambda}{2}$$

La distanza **d** tra due ventri consecutivi è: $d = \frac{\lambda}{2}$.

Analogamente la distanza tra i nodi si ricava risolvendo l'equazione:

$$\cos Kx = 0 \quad \text{ovvero} \quad Kx = (2n+1)\frac{\pi}{2} \quad \text{con} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Posto $K = \frac{2\pi}{\lambda}$, si ottiene:

$$x = \frac{(2n+1)\lambda}{4}$$

Anche in questo caso la distanza tra due nodi successivi è: $d = \frac{\lambda}{2}$.

È facile verificare che la distanza tra un ventre e il successivo nodo vale: $\frac{\lambda}{4}$.

Se la lunghezza d'onda del mezzo trasmissivo è confrontabile con $\frac{1}{4}$ di λ , lo studio dei canali di trasmissione deve essere affrontato con le teorie delle onde elettromagnetiche. Negli altri casi si usa la teoria usata per i circuiti a regime sinusoidale. In tali circostanze si parla di tensioni, correnti e angoli di fase.

Una volta stabilito il regime di onde stazionarie non si può più avere trasporto di energia in nessun verso. I nodi sono *punti fermi nello spazio* attraverso i quali l'energia non può fluire. L'energia nelle onde stazionarie è confinata nei moti oscillatori compresi tra due nodi. Il nome di **onda stazionaria** indica proprio che il fenomeno è ondulatorio (onda) senza trasporto di energia (stazionario) lungo il sistema vibrante.

L'energia può propagarsi nello spazio circostante solo grazie al movimento oscillatorio compreso tra due nodi. La caratteristica fondamentale del fenomeno delle onde stazionarie risiede nel fatto che esso può instaurarsi solo e soltanto per ben determinate frequenze dell'onda. Da quanto detto, e tenendo conto della figura che rappresenta l'onda stazionaria, è facile convincersi che le onde stazionarie si

hanno soltanto se la lunghezza l della corda vibrante è un multiplo intero di $\frac{\lambda}{2}$. In formule:

$$l = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{con} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Poiché: $\lambda = \frac{v}{f}$, dalla precedente relazione si ricava la frequenza di oscillazione:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot l} \quad (14)$$

La velocità di propagazione v dipende dalle caratteristiche geometriche e dalla natura del materiale con cui è realizzato il sistema vibrante.

Nel caso delle onde elettromagnetiche la velocità di propagazione coincide con quella della luce $c = 3 \cdot 10^8$ m/sec.

Nel campo delle telecomunicazioni il fenomeno delle onde stazionarie è sfruttato nella costruzione delle antenne.

Le frequenze di oscillazione consentite in un sistema in regime di onde stazionarie, per la (14), sono:

$$f_1 = \frac{v}{2 \cdot l} \quad f_2 = \frac{v}{l} \quad f_3 = \frac{3 \cdot v}{2 \cdot l} \quad \text{ecc.}$$

Le frequenze f_1, f_2, f_3, \dots sono dette **frequenze di risonanza**.

In particolare, la f_1 è detta *prima armonica* o *fondamentale* le successive frequenze sono denominate *seconda armonica*, *terza armonica*, ecc.

Il fenomeno delle onde stazionarie è sfruttato negli strumenti musicali per la generazione dei suoni. Se si pizzica la corda di una chitarra si ottiene un'onda stazionaria con due nodi negli estremi fissi della corda. La frequenza generata è quella della fondamentale il cui valore dipende esclusivamente dalla lunghezza della corda e dalle sue caratteristiche geometriche (diametro) e fisiche (tipo di materiale). La vibrazione della corda genera un suono la cui intensità viene esaltata dalla cassa armonica dello strumento.

Nel campo delle telecomunicazioni il fenomeno delle onde stazionarie si verifica nella trasmissione dei segnali lungo i canali di comunicazione.

Se il carico non riesce ad assorbire totalmente l'energia inviata dal trasmettitore, parte di questa energia ritorna verso il generatore sotto forma di onda riflessa. L'interferenza tra onda diretta e riflessa genera onde stazionarie. Spesso il fenomeno è dannoso e deve essere eliminato mediante un opportuno *adattamento di impedenza*, in altri casi è vantaggiosamente sfruttato per ottenere dei sistemi trasmettenti a frequenze fisse come nel caso delle antenne.

Esempio

Un'onda stazionaria si propaga alla velocità di 2000 m/s su una corda elastica fissata ai suoi estremi. Determinate la lunghezza d'onda e la frequenza del 1° e 3° nodo di oscillazione se la sua lunghezza è di 5 metri.

Soluzione

Dalla relazione $x = \frac{n\lambda}{2}$ si determina: $\frac{\lambda}{2} = \frac{x}{n}$

Se $n=1, 3$ si ottiene:

$$\lambda_1 = \frac{2 \cdot 5}{1} = 10 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{2 \cdot 5}{3} = 3,34 \text{ m}$$

Poiché: $f = \frac{v}{\lambda}$, si ottengono: $f_1 = \frac{2000}{10} = 200 \text{ Hz}$ $f_2 = \frac{2000}{3,34} = 600 \text{ Hz}$

Il mezzo di trasmissione.

Una informazione, opportunamente amplificata e modulata, si propaga nel mezzo di trasmissione sotto forma di *onda elettromagnetica*. Per comprendere in che cosa consiste un'onda elettromagnetica, si considerino due elementi conduttori, isolati tra loro, ai quali viene applicato, mediante un generatore, un segnale sinusoidale di una certa potenza, avente frequenza f .

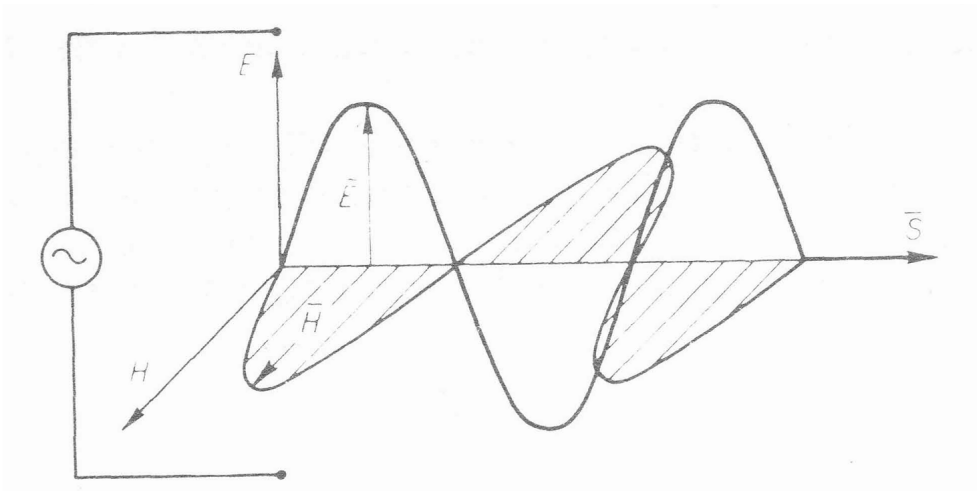


Fig. 2 - Propagazione delle onde elettromagnetiche: \vec{E} = vettore rappresentativo del campo elettrico, il cui piano di giacitura coincide con quello di conduttori; \vec{H} = vettore rappresentativo del campo magnetico avente piano di giacitura ortogonale al precedente; \vec{S} = vettore di Poynting.

Tra i due conduttori si origina un campo elettrico \vec{E} variabile con la frequenza del segnale e rappresentabile mediante un vettore che giace sul piano cui appartengono i due conduttori. La differenza di potenziale applicata tra i conduttori, variando con una certa frequenza, fa sì che il mezzo isolante che li separa, sia percorso da una corrente anch'essa variabile con frequenza f ; il sistema conduttori-isolante, si comporta infatti alla stregua di una capacità, per cui, alla frequenza f , una certa quantità di corrente attraversa l'isolante stesso (dielettrico).

La corrente che attraversa il mezzo dielettrico (corrente di spostamento) origina un campo magnetico \vec{H} , variabile con frequenza f , che può essere rappresentato mediante un vettore giacente su di un piano perpendicolare a quello formato dai conduttori (vedi Fig. 2).

La simultanea presenza di un campo elettrico \vec{E} e di un campo magnetico \vec{H} , giacenti su piani ortogonali, fa sì che, nello spazio tra i due conduttori, si propaghi, con verso perpendicolare al piano di \vec{E} e di \vec{H} , la potenza fornita dal generatore, sotto forma di un'onda elettromagnetica sinusoidale, avente frequenza eguale a quella del generatore.

La densità della potenza associata all'onda elettromagnetica, è definibile con un vettore ortogonale al piano di \vec{E} e di \vec{H} (cioè avente verso coincidente con quello di propagazione dell'onda stessa), detto vettore di Poynting (Fig. 2) esprimibile con: $\vec{S} = \vec{E} \cdot \vec{H}$ (il prodotto è di tipo vettoriale).

Poiché l'intensità del campo elettrico si misura in V/m e quello del campo magnetico in A/m, il vettore di Poynting risulta misurabile in W/m^2 ed esprime, in ogni punto del mezzo di propagazione, la densità di potenza istantanea della radiazione elettromagnetica in quel punto del mezzo.

Il rapporto tra l'intensità del campo elettrico e quella del campo magnetico è espresso in Ω e rappresenta l'impedenza caratteristica del mezzo in cui avviene la propagazione del segnale.

Tale impedenza caratteristica, indicata con Z_0 , vale 377Ω per il vuoto.

L'onda elettromagnetica si propaga nello spazio con andamento sinusoidale e con una velocità che, nel vuoto, è pari a quella della luce, per cui tra la frequenza f , la lunghezza d'onda λ e la velocità della luce c , si stabilisce la seguente relazione (*legge del moto rettilineo uniforme*):

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

dove $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Il mezzo di propagazione di un'onda elettromagnetica, alla quale associato (con i metodi che verranno esaminati nel seguito), il segnale elettrico contenente una informazione, è essenzialmente di due tipi:

- 1) *Linea*: è costituita da due conduttori paralleli isolati fra loro, che congiungono l'apparato trasmittente a quello ricevente.
- 2) *Spazio*: rappresenta il mezzo di propagazione dell'onda che prende origine da conduttori foggianti in modo opportuno, detti *antenne*.

L'onda elettromagnetica può collegare un apparato trasmittente ad un apparato ricevente, a condizione che siano entrambi muniti di antenna, il primo al fine di propagare l'onda elettromagnetica nello spazio, il secondo al fine di riceverla e trasformarla nell'informazione utile.

Linee.

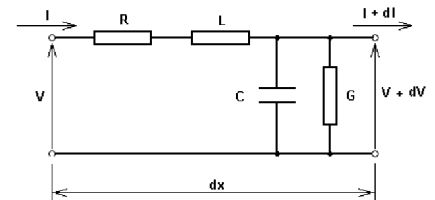
I due conduttori costituenti le linee sono connessi al generatore di segnale, in modo che l'onda elettromagnetica si genera e si propaga nello spazio da essi delimitato. Ciò avviene secondo le modalità viste nel paragrafo precedente, in quanto il campo elettrico e quello magnetico che sostengono l'onda sono presenti in qualsiasi punto della linea.

Il vantaggio principale della linea è la direzionalità di trasmissione, ovvero l'onda elettromagnetica si propaga nella direzione imposta dai conduttori senza altre dispersioni di potenza che non siano quelle dovute alla attenuazione della linea stessa.

Le linee possono essere considerate, ai fini delle comunicazioni elettriche, come quadripoli passivi, che operano una attenuazione sui segnale che le percorre. Come tali, vengono definite mediante alcuni parametri caratteristici. Tali parametri sono suddivisi in *costanti primarie* e *costanti secondarie*.

Costanti primarie :

Prendono questo nome i parametri resistivi e reattivi distribuiti della linea. Mediante i *parametri distribuiti (caratteristici di ogni conduttore o coppia di conduttori)* si tiene conto del fatto che, all'interno del quadripolo costituente la linea non vi sono specificamente delle resistenze, delle capacità o delle induttanze, ma la linea stessa presenta:



- a) una *resistenza per unità di lunghezza R*, dovuta alla struttura metallica dei conduttori;
- b) una *induttanza per unità di lunghezza L*, dovuta al fatto che la linea è costituita da conduttori metallici filiformi percorsi da corrente;
- c) una *capacità per unità di lunghezza C*, dovuta al fatto che gli elementi della linea si presentano come due conduttori metallici separati tra loro da un isolante;
- d) una *conduttanza per unità di lunghezza G*, dovuta al non perfetto isolamento tra i due conduttori della linea.

Se dal trasmettitore viene applicato alla linea un segnale sinusoidale avente tensione V e corrente I , è possibile esprimere il comportamento del quadripolo rappresentato dalla linea a mediante un sistema di equazioni differenziali, nelle incognite I e V , avente come coefficienti R , L , G , C . Dalla risoluzione di

tale sistema si possono ricavare le espressioni di quelle che vengono definite le *costanti secondarie* della linea, le quali risultano quindi funzione delle precedenti.

Costanti secondarie :

Sono essenzialmente : a) *la costante di propagazione* ; b) *la impedenza caratteristica*.

a) *La costante di propagazione* di una linea è legata alle costanti primarie dalla relazione :

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

e quindi, in generale, un numero complesso che si scrive nella forma:

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

in cui:

α = parte reale. rappresenta la *costante di attenuazione*

La costante di attenuazione è definita dal logaritmo naturale (cioè di base *e*) del rapporto tra i due moduli delle tensioni V_i e V_o o delle correnti I_i , ed I_o , che si hanno alle estremità di entrata e di uscita di un tronco di linea di lunghezza unitaria (metro, km, ...):

$$\alpha = \ln \left| \frac{V_i}{V_o} \right| = \ln \left| \frac{I_i}{I_o} \right|$$

La costante α così definita, risulta espressa in *neper* per unità di lunghezza (np/m, np/km ...).

Per un tronco di linea di lunghezza d , l'attenuazione del segnale è data, in *neper*, dal prodotto $\alpha \cdot d$

β : coefficiente dell'immaginario, rappresenta la costante di fase.

La costante di fase β è definita come angolo di sfasamento che si ha tra le tensioni V_i e V_o , o tra le correnti I_i ed I_o che si misurino agli estremi di entrata e di uscita di un tronco di linea di lunghezza unitaria. È quindi espressa in radianti per unità di lunghezza (rad/m, rad/km, ...).

Per un tronco di linea di lunghezza d , lo sfasamento totale tra le grandezze di entrata e di uscita è dato dal prodotto $\beta \cdot d$ in radianti.

La lunghezza di un tronco di linea che determina uno sfasamento di 2π rad, definisce la lunghezza d'onda della propagazione lungo la linea.

b) L'impedenza caratteristica Z_o di una linea è espressa in funzione delle costanti primarie dalla relazione :

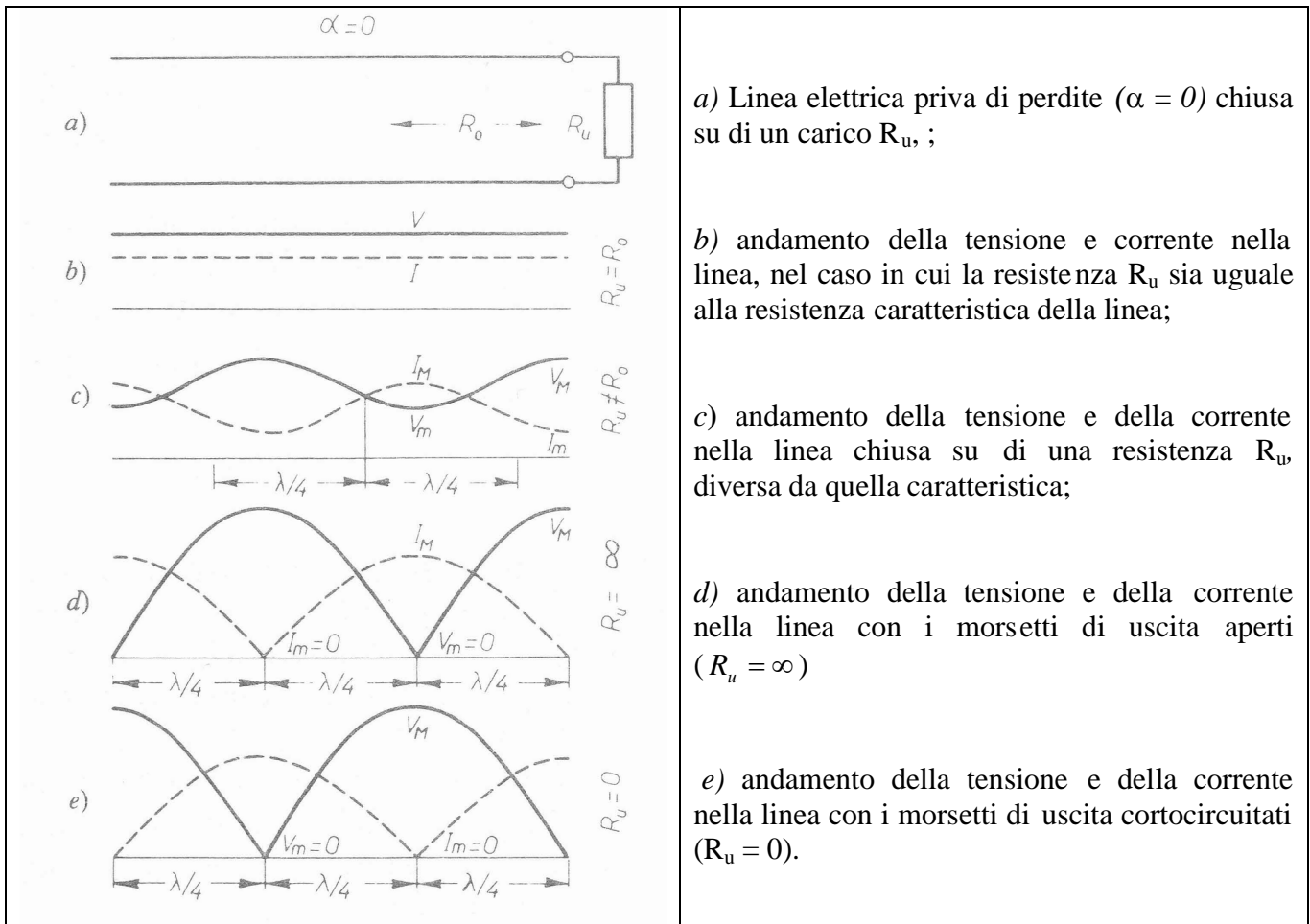
$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \text{ [ohm]}$$

è anch'essa, in generale, un numero complesso e risulta eguale all'impedenza (rapporto tensione / corrente) che si verifica in ogni punto di una linea di lunghezza infinita. Da questo segue che, se una linea qualsiasi viene chiusa su di una impedenza di valore eguale alla sua impedenza caratteristica, se cioè si attua l'adattamento delle impedenze, essa si comporta come se avesse lunghezza infinita.

Da ciò trae origine un importante fenomeno:

se una linea ha lunghezza infinita (caso teorico), ovvero è chiusa sulla propria impedenza caratteristica Z_o (caso pratico), l'onda elettromagnetica si propaga lungo di essa progressivamente, cioè la potenza erogata dal generatore all'entrata della linea, viene trasmessa al carico applicato all'uscita della linea, salvo quella che si dissipa ad opera delle costanti primarie parassite (R , G) che determinano l'attenuazione di tensione e di corrente già definita.

Se invece la linea è chiusa su di un carico di impedenza Z_u , diversa da Z_0 , la potenza pertinente all'onda diretta dal generatore al carico, viene riflessa in parte, od anche totalmente, dando luogo ad una propagazione inversa, dal carico verso il generatore, cioè ad un'onda riflessa.



La simultanea presenza, nella linea, delle due onde, diretta e riflessa, determina un regime di onda stazionaria, così detto in quanto le due onde, di tensione e di corrente, componendosi vettorialmente (cioè in ampiezza e fase) determinano dei valori massimi (somma di grandezza in fase) e dei valori minimi (somma di grandezze in opposizione di fase) che si verificano in punti fissi della linea.

Precisamente, si rileva che nei punti in cui si ha un massimo, o ventre, di tensione, si ha un minimo, o nodo, di corrente, e viceversa, ad un ventre di corrente, corrisponde un nodo di tensione. Si verifica inoltre che tra due nodi o due ventri successivi della stessa grandezza (tensione o corrente), intercorre una distanza pari alla metà della lunghezza d'onda già definita $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$.

Nelle linee usate in telecomunicazioni, cioè per alta frequenza, si possono in generale trascurare le costanti primarie dissipative rispetto a quelle reattive; si ha cioè:

$$R \ll \omega L \quad G \ll \omega C$$

conseguentemente le espressioni già date per le costanti secondarie e Z_0 , assumono l'aspetto:

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC} = j\beta ; \quad \alpha = 0$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = R_0; \quad X_0 = 0$$

In tali condizioni, se la linea non è adattata alla resistenza di carico ($Z_u \neq R_0$) si verifica, come già detto, un regime d'onda stazionaria in cui però nodi e ventri, di tensione o di corrente, hanno valori costanti lungo tutta la linea.

Il regime stazionario può allora essere valutato mediante il rapporto d'onda stazionaria, R.O.S., definito dal rapporto tra il valore massimo di tensione (V_M), o di corrente, (I_M), ed il valore minimo corrispondente (V_m od I_m) che si verifica a distanza $\frac{\lambda}{4}$ dal primo:

$$R.O.S = \frac{|V_M|}{|V_m|} = \frac{|I_M|}{|I_m|}$$

tale rapporto può variare da 1 ad ∞ ; il primo caso si verifica quando $R_u = R_0$ cioè si ha il regime progressivo senza onda riflessa; si ha invece $R.O.S. = \infty$ quando $R_u = 0$ (linea in corto circuito) oppure $R_u = \infty$ (linea a vuoto); in questi casi infatti tensione e corrente hanno valori nulli nei nodi.

I tipi di linea più comunemente usati in telecomunicazioni sono:

1) *Linee bifilari*: costruite da due conduttori separati da materiale dielettrico. Hanno impedenza caratteristica calcolabile, in ohm, mediante la formula:

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{2D}{d} \quad [\]$$

ove :

d = diametro dei conduttori;

D = distanza tra i conduttori;

ϵ_r = costante dielettrica relativa dell'isolante che separa i conduttori.

Lo svantaggio della utilizzazione di linee bifilari (piattine) per le applicazioni ad alta frequenza è costituito dal fatto che il segnale che si propaga lungo la linea non risulta protetto dai disturbi elettrici esterni, per cui l'onda che percorre la linea giunge all'utilizzatore affetta da rumore raccolto lungo il percorso.

2) *Cavi coassiali*: sono costituiti da un conduttore cilindrico cavo (realizzato normalmente in filo intrecciato) sull'asse del quale vi è un altro conduttore, separato dal primo mediante una guaina isolante.

Lungo il cavo coassiale la propagazione dell'onda elettromagnetica avviene nello spazio tra i due conduttori e risulta di conseguenza protetta dai rumori elettrici esterni (in forma di onde elettromagnetiche).

L'impedenza caratteristica del cavo coassiale si calcola mediante la formula:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D}{d} \quad [\]$$

ove :

d = diametro esterno del conduttore interno;

D = diametro interno del conduttore esterno;

ϵ_r = costante dielettrica relativa del materiale isolante posto tra i conduttori.

Antenne

Al fine di poter trattare la propagazione nel secondo dei mezzi di trasmissione visti, lo spazio, occorre esaminare i dispositivi che consentono di irradiare o captare le onde elettromagnetiche, cioè le *antenne*. Il principio di funzionamento dell'antenna è il medesimo visto in figura 11.2. L'antenna trasmittente si può considerare come un tratto di linea a vuoto i cui conduttori, anziché essere paralleli, formano un angolo di 180° fra di loro; quindi l'isolante, ovvero la zona in cui ha luogo la propagazione, è tutto lo spazio circostante.

L'antenna ricevente, che può avere la medesima forma di quella trasmittente, viene disposta in un punto generico della parte di spazio in cui la potenza dell'onda trasmessa, nonostante la attenuazione subita durante la propagazione, è ancora percepibile, e la fornisce all'apparato ricevente sotto forma di energia elettrica.

La più semplice antenna è il dipolo, la cui struttura è riportata in fig. 11.4 a): essa è costituita da un elemento di materiale conduttore (con al centro il generatore di segnale) avente una lunghezza

$$l = K \frac{\lambda}{2}$$

con :

= lunghezza dell'onda elettromagnetica :

K = costante dipendente dal tipo di materiale con cui è costruita l'antenna; vale 0,93 per il rame, e 0,83 per l'alluminio.

Il dipolo si comporta come una linea di lunghezza $\frac{\lambda}{2}$ con i morsetti di uscita aperti; perciò si instaura in esso una situazione d'onda stazionaria, che, a causa della lunghezza del dipolo, ha un massimo (ventre) di corrente in corrispondenza del punto centrale e si annulla in corrispondenza delle estremità (nodi); la tensione ha invece andamento opposto (nodo al centro, ventri alle estremità).

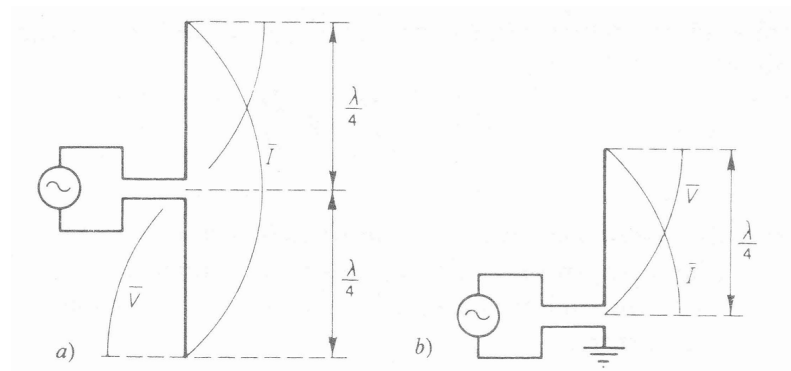


Fig. 11.4 - a) Dipolo hertziano. In figura si è posto in evidenza l'andamento dell'onda stazionaria di tensione e corrente lungo l'antenna. Poiché si ha un nodo di tensione nel centro dell'antenna ivi si ha

anche un ventre di corrente, mentre alle due estremità (che distano $\frac{\lambda}{4}$ ciascuna dal centro) si hanno rispettivamente due nodi di corrente e due ventri di tensione; b) dipolo marconiano. In figura si è posto in evidenza l'andamento dell'onda stazionaria di tensione e corrente. Si osservi che l'aver connesso uno dei morsetti del generatore a terra non altera (rispetto al dipolo hertziano) le condizioni di radiazione; infatti, in corrispondenza del generatore, l'onda di tensione ha un nodo che rappresenta un punto a potenziale zero.

Il dipolo di lunghezza $\cong \frac{\lambda}{2}$ esaminato (dipolo hertziano), ha la proprietà di irradiare energia elettromagnetica nello spazio secondo superfici equipotenziali che presentano l'andamento di figura 11.8a).

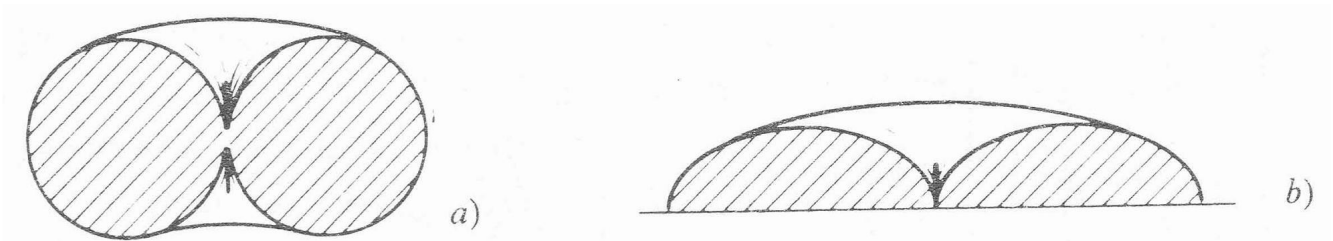


Fig. 11.8 - a) Solido di radiazione di un dipolo hertziano, sezionato lungo un piano contenente il dipolo. Tagliandolo mediante un piano al dipolo e passante per il suo centro, si ottiene una sezione circolare; b) solido di radiazione di un dipolo marconiano.

Dal punto di vista costruttivo presenta il seguente svantaggio: deve essere posto nello spazio in modo che il generatore si trovi a metà di esso, ovvero disti $\frac{\lambda}{4}$ da ciascuna delle due estremità isolate. Per trasmissioni alle più basse frequenze radio (onde lunghe) realizzare una struttura sospesa che soddisfi a queste condizioni si presenta spesso impossibile. Infatti una frequenza tipica delle onde lunghe è ad esempio 300 kHz e ad essa corrisponde una lunghezza $h = 1.000$ m.

Questo significa che un dipolo hertziano utilizzato come antenna per tali frequenze dovrebbe avere una lunghezza di 500 m. Onde ovviare alle difficoltà tecniche causate da tali dimensioni, si è provveduto a diverse soluzioni. Un primo metodo è quello di sostituire al dipolo hertziano quello marconiano

(Fig. 11.4b). In tale dipolo, il tratto di conduttore costituente l'antenna è lungo solamente $\frac{\lambda}{4}$ ed è

applicato ad uno dei morsetti del generatore di segnale; l'altro morsetto è collegato alla terra, che, considerata come un conduttore perfetto, provvede a fornire al dipolo marconiano il rimanente tratto di lunghezza $\frac{\lambda}{4}$.

Anche l'uso del dipolo marconiano non è tuttavia soddisfacente a risolvere il problema delle antenne per onde lunghe (con l'esempio precedente occorre pur sempre un conduttore di lunghezza 250 m) ma si può provvedere ad ulteriori modifiche che consentono di ridurre le dimensioni delle antenne entro limiti tecnicamente accettabili.

Tuttavia i provvedimenti tesi a sostituire il dipolo hertziano non sono privi di svantaggi; per comprendere questo, occorre compiere alcune valutazioni di ordine quantitativo.

Potenza irradiata. Resistenza di radiazione.

All'antenna si richiede che irradia nello spazio la massima potenza di segnale. Si può dimostrare che la potenza irradiata da un generico dipolo vale:

$$P_i = 790 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 I^2 \quad [\text{W}]$$

ove:

l = lunghezza del dipolo in metri;

λ = lunghezza d'onda del segnale in metri;

I = valore efficace della corrente di segnale nel ventre d'onda, in ampere.

Dalla questa relazione si ricava che l'antenna si comporta come un utilizzatore resistivo che, percorso da una corrente di segnale I , dissipa una potenza $P_i = R_r I^2$ ove:

$$R_r = 790 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \quad [\]$$

è definita *resistenza di radiazione dell'antenna* e si può considerare come una resistenza che, inserita in serie alla antenna, dissiperebbe, percorsa dalla corrente di segnale, una potenza pari a quella che in realtà l'antenna irradia nello spazio.

Nelle ultime due formule si è indicata genericamente con l la lunghezza della antenna, che può essere $l \cong \frac{\lambda}{2}$ nel dipolo hertziano, $l \cong \frac{\lambda}{4}$ in quello marconiano (il "circa" si riferisce alla necessità di tener conto del fattore K della formula 11.2). Tuttavia occorre considerare che ciò è stato fatto nella ipotesi che l'antenna irradia in maniera uniforme su tutta la lunghezza, il che non è possibile in quanto la corrente, in situazione d'onda stazionaria (vedi Fig. 11.3 e 11.4) ha andamento sinusoidale lungo l'antenna.

Per tener conto di tale disuniformità si introduce un fattore di forma α , che deve essere moltiplicato per la lunghezza l dell'antenna: si ottiene in tal modo l'effettiva lunghezza radiante l_{eff} che deve essere sostituita nella (11.3) e (11.4) in luogo di l .

Per i dipoli di tipo marconiano ed hertziano, il fattore di forma vale:

$$\alpha = \frac{2}{\pi} = 0,636$$

In base a queste considerazioni è possibile eseguire un confronto tra il dipolo hertziano ed il dipolo marconiano.

Esprimendo la lunghezza di antenna in termini di $\frac{\lambda}{4}$ per il dipolo hertziano si ricava (dalla 11.3):

$$P_i = 790 \left(\frac{2 \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{2}{\pi}}{\lambda} \right)^2 I^2 = 790 \frac{1}{\pi^2} I^2 = 80 \cdot I^2 \quad [\text{W}]$$

ne segue che la resistenza di radiazione di un dipolo hertziano vale:

$$R_r \cong 80 \quad [\]$$

Per un dipolo marconiano occorre invece tener conto di due elementi:

- 1) Nonostante la lunghezza sia $\frac{\lambda}{4}$ si assume, nelle considerazioni quantitative, la lunghezza $\frac{\lambda}{2}$ in quanto la terra, cui è connesso l'altro morsetto del generatore, sostituisce il tratto mancante.
- 2) La potenza irradiata dal dipolo marconiano è metà di quella del dipolo hertziano in quanto questo, non avendo punti di contatto con la terra, irradia la propria potenza in tutto lo spazio circostante. Il primo invece, che è per metà costituito dalla terra, irradia su metà dello spazio poiché l'altra metà della potenza ad esso fornita è assorbita dalla terra stessa, assunta come perfetta conduttrice.

In base a tali considerazioni, l'espressione della potenza del dipolo marconiano vale :

$$P_i = \frac{1}{2} \left[790 \left(\frac{2 \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{2}{\lambda}}{\pi} \right)^2 I^2 \right] = \frac{1}{2} (80 \cdot I^2) = 40 \cdot I^2 \quad [\text{W}]$$

Ne segue che la resistenza di radiazione del dipolo marconiano risulta:

$$R_r \cong 40 \quad [\]$$

Dal confronto tra i due risultati si comprende che l'uso del dipolo marconiano, dimezzando le dimensioni della antenna, ne dimezza anche la potenza irradiata (a parità di corrente).

Si osservi che, come risulta dalla formula (11.2), i dipoli hertziani non misurano esattamente $\frac{\lambda}{2}$ ma sono all'incirca del 3-5%, più corti e altrettanto dicasi per quelli marconiani, che sono più corti di $\frac{\lambda}{4}$ del 3-5%,. Ciò causa una riduzione ulteriore della resistenza di radiazione, che risulta:

$$R_r \cong 75 \quad [\] \quad \text{per il dipolo hertziano,}$$

$$R_r \cong 37 \quad [\] \quad \text{per il dipolo marconiano.}$$

La frequenza d'antenna.

Un'antenna, dal punto di vista del comportamento elettrico può essere rappresentata con un circuito risonante serie. Infatti i parametri distribuiti dal tratto di linea che la costituisce, possono essere schematizzati con una capacità C una induttanza L ed una resistenza R, secondo lo schema di figura 11.5 a) e b). In base a tale struttura, l'antenna possiede una propria frequenza di risonanza:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ove L è data dall'induttanza per unità di lunghezza della linea costituente l'antenna, moltiplicata per la lunghezza dell'antenna stessa ed egualmente C è la capacità distribuita della linea, moltiplicata per la lunghezza della medesima. Poiché le considerazioni precedenti sono state svolte in funzione della lunghezza d'onda, è bene trasformare la 11.5 in termini di lunghezza d'onda.



Fig. 11.5 - a) Dipolo marconiano; b) circuito risonante equivalente al dipolo marconiano.

Dato che $\lambda = \frac{c}{f}$ ne segue:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = c \cdot 2\pi \sqrt{LC} = 18,85 \cdot 10^8 \sqrt{LC} \text{ in metri.}$$

λ_0 è la lunghezza d'onda dell'antenna per cui, un dipolo hertziano a frequenza di risonanza f_0 ha lunghezza (teorica)

$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{18,85}{2} \cdot 10^8 \sqrt{LC} \text{ [m]}$$

con L, misurata in henry e C in farad.

L'analogia tra l'antenna ed il circuito risonante serie, consente una importante constatazione : evidentemente la condizione essenziale di funzionamento è che la frequenza propria dell'antenna coincida con quella del segnale da trasmettere (in tal caso infatti l'antenna si comporta come una pura resistenza). Si presentano, tuttavia, a livello pratico, i problemi di lunghezza d'antenna precedentemente esaminati. Poiché si è visto che, anche con il dipolo marconiano le dimensioni dell'antenna rimangono notevoli (specie nel campo delle onde lunghe) è possibile utilizzare le proprietà del circuito risonante al fine di realizzare antenne di lunghezza non eccessiva anche in caso di funzionamento con elevati.

Se si osserva la formula 11.6), si nota che è possibile aumentare λ_0 , aumentando L o C, e questo può essere fatto aggiungendo all'antenna elementi reattivi discreti.

Da questo segue che una antenna di una certa lunghezza (e perciò con una frequenza f_0) può essere fatta funzionare anche per frequenze più basse (cioè lunghezza d'onda maggiori) disponendole alla base (cioè verso il generatore) una induttanza L_s , in modo che risulti (Fig. 11.6 a, b):

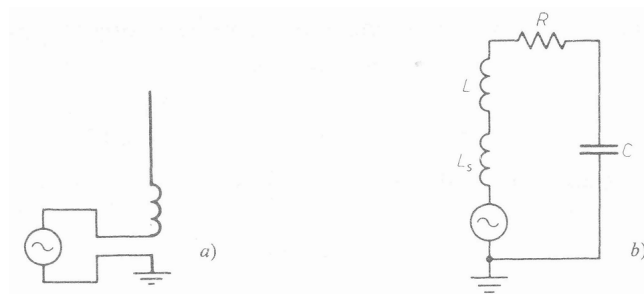


Fig. 11.6 - a) Antenna allungata artificialmente alla base mediante induttanza; b) circuito equivalente dell'antenna di figura 150 a).

$$\lambda_0' = 18,85 \cdot 10^8 \sqrt{C(L + L_s)}$$

e si raggiunge in tal modo la lunghezza d'onda del segnale da trasmettere. L'*allungamento artificiale d'antenna* si può realizzare anche disponendo in parallelo alla capacità d'antenna C, una capacità aggiuntiva C_p , e questo si ottiene ad esempio ponendo sulla sommità dell'antenna degli elementi conduttori: la capacità che tali elementi presentano verso il suolo, viene a trovarsi in parallelo alla C d'antenna (Fig.11.7 a, b).

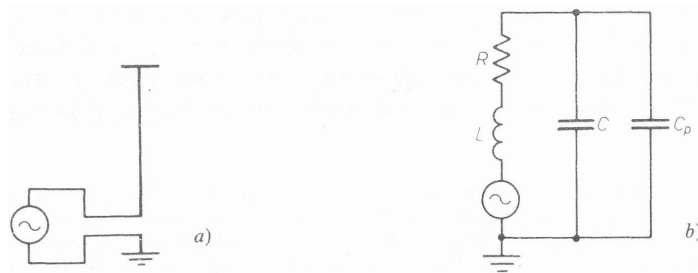


Fig. 11.7 - a) Antenna allungata artificialmente alla sommità mediante una capacità; b) circuito equivalente dell'antenna di figura 11.7 a).

Rendimento d'antenna.

La potenza di radiazione non coincide con la potenza fornita dal segnale all'antenna, in quanto questa assorbe una certa quantità di potenza durante il funzionamento.

Schematizzando le perdite che avvengono nell'antenna con una resistenza percorsa dalla corrente I di segnale, e definendo questa *resistenza equivalente di antenna*, R_{eq} , si può dimostrare che la potenza erogata dal generatore di segnale per irradiare una potenza P_i vale:

$$P = P_i + P_p$$

ove

$$P_i = R_r \cdot I^2 \text{ e } P_p = R_{eq} \cdot I^2$$

perciò il rendimento dell'antenna risulta:

$$\nu_i = \frac{P_i}{P_i + P}$$

Antenne riceventi.

Le antenne esaminate nei paragrafi precedenti possono funzionare indifferentemente da trasmettenti o riceventi e il loro comportamento elettrico non muta. Perciò lo schema equivalente di una antenna ricevente risulta costituito da un circuito serie comprendente:

- un generatore di f.e.m. E che rappresenta il segnale indotto dall'antenna trasmittente in quella ricevente;
- una resistenza che corrisponde alla resistenza dell'antenna;
- l'impedenza d'ingresso del circuito che utilizza il segnale ricevuto.

La corrente nell'antenna è massima allorché la frequenza di ricezione coincide con quella di risonanza, e vale:

$$I = \frac{E}{R}$$

ove

R è la somma della resistenza di radiazione R_r , e della resistenza equivalente R_{eq} ,

E è la f.e.m. ricevuta, considerata uniformemente distribuita sull'antenna: ovviamente, per poter considerare una uniforme distribuzione della tensione lungo l'antenna occorre introdurre il fattore di forma definito nel paragrafo precedente, in base al quale si ottiene che la lunghezza efficace dell'antenna è inferiore a quella reale.

Antenne direttive.

Il dipolo hertziano e marconiano hanno rispettivamente propagazione di potenza ad andamento spaziale del tipo riportato in figura 11.8 a) e b) (diagrammi di radiazione).

Questi tipi di radiazione che coprono una vasta zona di spazio sono utili per taluni tipi di trasmissione o ricezione ; per altri è più opportuno concentrare la zona di radiazione di potenza in una sezione di spazio (lobo) abbastanza ristretta. Per ottenere questo si realizzano antenne le quali, oltre che dal dipolo fondamentale (solitamente hertziano) connesso ai trasmettitore o al ricevitore, risultano costituite da elementi passivi definiti *riflettori* e *direttori*, che consentono di dare una direzione preferenziale alla radiazione.

La possibilità di usare il dipolo hertziano è data dal fatto che normalmente l'applicazione di antenne direttive avviene nel campo delle onde corte ($100 \div 10$ m) e ultracorte ($10 \div 1$ m), per cui la lunghezza del dipolo $\frac{\lambda}{2}$ è abbastanza contenuta.

Il principio di funzionamento di una antenna direttiva è basato sulla seguente proprietà :

se un dipolo non alimentato (passivo) è accoppiato induttivamente con un dipolo alimentato (attivo) è anch'esso in grado di irradiare una onda elettromagnetica. L'ampiezza e la fase dell'onda irradiata dal dipolo passivo sono funzione dell'accoppiamento, ovvero della sua distanza dal dipolo attivo, e delle sue dimensioni.

Le proprietà degli elementi passivi accoppiati ad un elemento attivo, consentono di realizzare antenne con una direzione di radiazione preferenziale.

In particolare, un elemento passivo viene definito riflettore allorché ha una lunghezza leggermente maggiore del dipolo attivo ; precisamente, se l è la lunghezza del dipolo attivo, quella del riflettore deve essere $r \cong 1,05 \cdot l$.

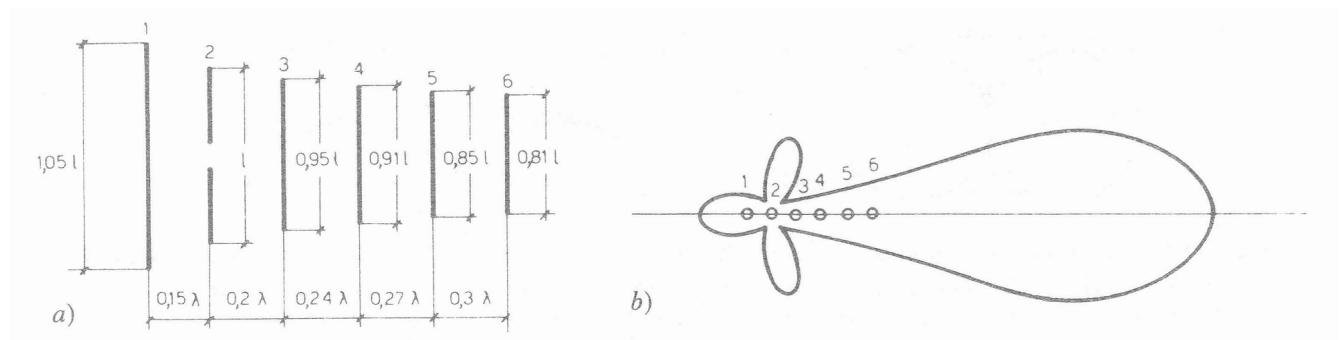


Fig. 11.9 - a) Antenna Yagi direttiva a sei elementi: 1 = riflettore; 2 = dipolo; 3 ÷ 4 ÷ 5 ÷ 6 = direttori; b) diagramma di radiazione dell'antenna di figura 11.9 a).

Un elemento passivo viene invece definito direttore allorché ha lunghezza minore del dipolo attivo; precisamente $d \cong 0,95 \cdot l$.

Grazie alle rispettive lunghezze, il riflettore ha una frequenza propria più bassa di quella del dipolo attivo, il direttore ha una frequenza propria più alta di quella del dipolo attivo.

In figura 11.9 a) è riportato uno schema di antenna costituita da un dipolo attivo, un riflettore e quattro direttori con le relative dimensioni e distanze (*antenna Yagi*).

In figura 11.9 b) è riportato il diagramma di radiazione che si ottiene con tale antenna: come si vede, la presenza dei direttori stabilisce un lobo nella direzione preferenziale di propagazione, mentre quella del riflettore impedisce la propagazione nel verso opposto.

La direzionalità rimane valida sia che l'antenna funzioni come ricevente che come trasmittente.

Un altro vantaggio dell'antenna a elementi passivi è quello di poter ottenere, grazie a questi, un certo guadagno di potenza di radiazione rispetto al semplice dipolo; infatti, concentrando la potenza in una direzione preferenziale, essa fa sì che in un punto situato ad una certa distanza, il segnale ricevuto abbia una potenza molto maggiore di quella che avrebbe nello stesso punto, se fosse emesso da un dipolo a radiazione circolare ed eguale potenza di radiazione. In particolare, se a un dipolo hertziano viene aggiunto un riflettore, il guadagno di potenza, riferito a quello del semplice dipolo (assunto di 0 dB), risulta circa 3 ÷ 5 dB; se gli viene invece aggiunto un direttore, il guadagno di potenza è circa 2 ÷ 3 dB. Ogni elemento direttore successivo al primo porta ad un guadagno di circa 1,2 dB (in quanto migliora la direzionalità). Ne segue che l'antenna a un riflettore e 4 direttori di figura 11.9 a) ha, rispetto al solo dipolo hertziano, un guadagno di circa 10,2 dB nella direzione di propagazione.

Il guadagno direzionale di potenza cui danno luogo gli elementi parassiti, è funzione della distanza degli stessi dal dipolo attivo, e tra loro; precisamente: aumentando la distanza tra gli elementi dell'antenna direttiva, diminuisce il guadagno, si allarga la banda di frequenza di ricezione e aumenta l'impedenza dell'antenna. Viceversa se si diminuisce la distanza, aumenta il guadagno ma calano la banda e l'impedenza di antenna.

Nel caso particolare di antenna a 4 direttori e un riflettore, si faccia riferimento ai valori riportati in figura 11.9 a) (con cui si ottiene, come si è osservato, un guadagno circa uguale a 10,2 dB)

Impedenza d'antenna

Dato che spesso, per soddisfare a necessità di miglioramento della propagazione o ricezione, l'antenna deve essere posta a una certa distanza dall'apparato trasmettitore o ricevitore, il collegamento tra l'antenna e l'apparato stesso avviene mediante linee.

Per rendere ottimo il trasferimento della potenza di segnale tra i veri dispositivi, occorre che l'impedenza della linea e quella dell'antenna risultino adattate. Questo si ottiene facendo in modo che la resistenza di radiazione dell'antenna sia eguale all'impedenza caratteristica della linea (in caso contrario hanno luogo delle riflessioni di segnale causate dall'istaurarsi della situazione d'onda stazionaria).

La propagazione delle onde elettromagnetiche.

Esaminato, attraverso lo studio delle antenne, il modo con cui si emettono onde elettromagnetiche nello spazio (oppure si ricevono da esso), occorre ora studiare le modalità di propagazione delle onde nello spazio stesso.

Allorché vengono emesse dall'antenna (si fa riferimento a un generico dipolo non direttivo), le onde si propagano in tutte le direzioni ed occorre fare distinzione tra due tipi di propagazione:

- 1) *Onde dirette*, che si propagano rasente il suolo.
- 2) *Onde indirette*, che si riflettono o rifrangono nell'atmosfera.

A seconda del tipo di propagazione, le onde subiscono diverse influenze:

a) *influenza del suolo*.

Osservando che un conduttore perfetto è "opaco" per quanto riguarda le onde elettromagnetiche, in quanto le assorbe completamente e un dielettrico perfetto è "riflettente" in quanto non le assorbe, si può pensare che il suolo si comporti come un mezzo semitrasparente ovvero, in parte assorbe ed in parte riflette le onde che si propagano lungo di esso.

Il fenomeno di assorbimento cresce al crescere della frequenza, perciò le onde corte non possono compiere lunghi percorsi per via diretta, ovvero lungo il suolo, in quanto ne vengono in gran parte assorbite.

b) *Influenza dell'alta atmosfera*.

L'atmosfera si può dividere in tre strati successivi : troposfera (0 ÷ 11 km), stratosfera (11 ÷ 60 km) e ionosfera (oltre i 60 km).

Ai fini della propagazione indiretta delle onde elettromagnetiche, lo strato di maggior interesse è la *ionosfera* (vedi Fig. 11.13).

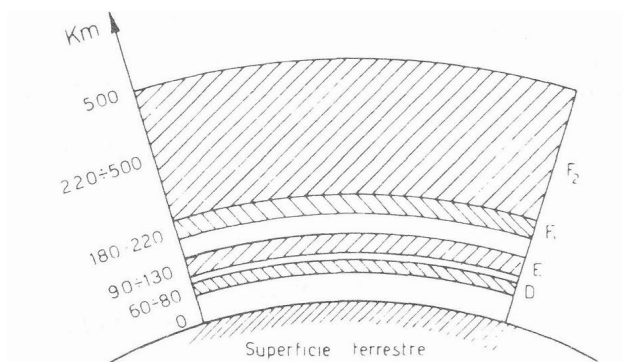


Fig. 11.13 - Distribuzione degli strati dell'atmosfera. Nella fascia da 0 ÷ 60 km vi sono i primi due strati atmosferici denominati rispettivamente *troposfera* (0 ÷ 11 km) e *stratosfera* (11 ÷ 60 km).

Oltre i 60 km inizia la *ionosfera* suddivisa negli strati: D (60 ÷ 80 km) presente solo di giorno; E (90 ÷ 130 km); F_1 (180 ÷ 220 km); F_2 (220 ÷ 500 km). Durante la notte gli strati F_1 ed F_2 si uniscono in un unico strato F localizzato tra i 250 ÷ 350 km. Gli strati sopra elencati sono caratterizzati da un diverso grado di ionizzazione e tra quelli più bassi vi sono fasce di separazione a bassa ionizzazione che modificano l'angolo di rifrazione.

In questa sono presenti molecole di gas ionizzato; le cause di tale ionizzazione sono essenzialmente due: le radiazioni ultraviolette del sole e, in grado minore i corpuscoli elettrizzati emessi dal sole stesso. Dato dunque che la causa principale della presenza della ionosfera è il sole, è evidente che questa avrà spessore e altezza variabile nei vari momenti del giorno e dell'anno. Precisamente, allorché gli agenti ionizzanti solari si indeboliscono, decresce anche la ionizzazione degli strati più bassi della ionosfera e rimane solo quella degli strati alti.

c) *Riflessione e rifrazione delle onde elettromagnetiche*.

Ci supponga, per ipotesi, che tra la stratosfera e la ionosfera vi sia una superficie di separazione perfetta, in modo che le due zone non si compenetrino in alcun punto. L'onda elettromagnetica propagatesi per via indiretta si trova allora a passare da una zona d'aria neutra (stratosfera) ad una di gas ionizzato (ionosfera): da questo segue che, non solo varia la propria velocità di propagazione

($c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$) ma si comporta come un'onda luminosa che attraversa due mezzi a rifrazione diversa,

cioè nella superficie di separazione subisce una deviazione e si scinde in raggi riflessi e raggi rifratti. In realtà il meccanismo di rifrazione e riflessione non è semplice come nel caso di due superfici trasparenti a diverso coefficiente di rifrazione, infatti, mentre queste hanno una zona limite ben definita, la zona limite tra la ionosfera e la stratosfera non ha confini netti, per di più la ionizzazione della prima varia, come si è visto, in funzione dell'altezza. Per questo motivo le radiazioni riflesse (che sono quelle che interessano, in quanto riportano il segnale a terra, cioè in corrispondenza delle antenne riceventi) non vengono riflesse secondo un angolo acuto, ma vengono in parte incurvate all'interno della ionosfera prima di essere rinviate sulla terra (vedi Fig. 11.14).

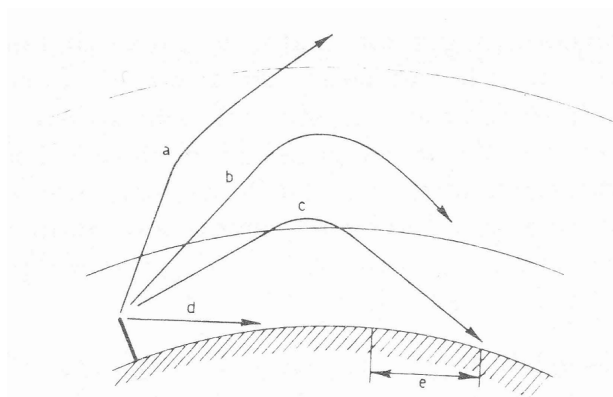


Fig. 11.14 - Andamento delle radiazioni: *a*) onda rifratta; *b* ÷ *c*) onde riflesse; *d*) onda diretta; *e*) zona di silenzio.

Le due fasce rappresentano rispettivamente la stratosfera (fascia inferiore) e la ionosfera (fascia superiore).

La curvatura delle onde nella ionosfera dipende dal diverso indice di rifrazione (diversa ionizzazione) dei vari strati e dalla frequenza delle onde stesse.

Occorre inoltre osservare che le onde lunghe (basse frequenze) si possono riflettere sugli strati a debole ionizzazione, mentre quelle ad alta frequenza si riflettono solo sugli strati superiori della ionosfera, in cui la ionizzazione ha sempre valori maggiori.

Ne segue che, se la frequenza è elevata ma il grado di ionizzazione è basso, la ionosfera si comporta come un mezzo semitrasparente e, qualunque sia l'angolo di incidenza, la quantità di energia di radiazione che ritorna a terra è assai scarsa.

Infine va notato che le radiazioni riflesse nella ionosfera ritornano a terra più facilmente se l'angolo di incidenza è ottuso, mentre vengono più facilmente assorbite se l'angolo di incidenza è acuto figura 11.14.

Vi sono delle zone situate al di là dei punti in cui la radiazione diretta ha ormai perso energia, ed interne all'angolo di riflessione della radiazione indiretta, che vengono definite *zone di silenzio* (Fig. 11.14) e richiedono antenne trasmettenti ausiliarie per captare il segnale.

Modalità di propagazione.

In funzione dei tipi di propagazione esaminati, si classificano le onde elettromagnetiche nel seguente modo:

a) Onde lunghe (da 20 a 550 kHz).

Dato che la frequenza è abbastanza bassa, l'assorbimento del suolo è trascurabile, quindi le onde lunghe hanno buona propagazione diretta.

La riflessione dell'onda indiretta avviene sugli strati bassi della ionosfera. La propagazione per onde lunghe può avvenire su grandi distanze e con molta regolarità.

b) Onde medie (da 550 kHz a 1,5 MHz).

L'onda diretta si propaga a una distanza di qualche centinaio di chilometri. Al di là di questa distanza la trasmissione è affidata alle onde indirette, la cui propagazione, come è noto, dipende sensibilmente dalle variazioni della ionosfera. Il fenomeno di variazione cui dà luogo la irregolarità di ricezione dell'onda elettromagnetica riflessa dalla ionosfera viene definito *fading*.

c) Onde corte (1,5 - 30 MHz).

La portata delle onde corte in propagazione diretta è ancora inferiore a quella delle precedenti, quindi tutta la trasmissione è praticamente affidata alle onde indirette. I fenomeni di variazione della ionosfera si ripercuotono fortemente sulle trasmissioni utilizzando onde corte; al punto che, per assicurare una ricezione abbastanza continua, si usa modificare il valore della frequenza di trasmissione tra il giorno e la notte; in tal modo infatti, nonostante vari l'altezza della ionosfera, varia anche la frequenza del segnale, che va quindi a riflettersi su strati diversi e mantiene pressoché inalterata la posizione di ritorno sulla terra.

d) Onde ultracorte (30 - 300 MHz).

In propagazione diretta queste onde hanno una portata assai limitata, tanto che si usa definirle "onde ottiche" in quanto l'apparato trasmittente e il ricevente debbono essere l'uno in vista dell'altro (alcune decine di chilometri di distanza).

Le onde indirette hanno invece una forte penetrazione nella ionosfera e risentono notevolmente delle variazioni di questa, in modo che, per poter utilizzare questo tipo di lunghezze d'onda per trasmissioni fisse a lunga distanza occorre fare ricorso a riflettori artificiali come possono essere i satelliti.

Nel campo delle onde ultracorte si utilizza talvolta un fenomeno di propagazione per rifrazione e diffrazione sulla stratosfera (*scattering troposferico*), che rende possibile un allungamento della portata di propagazione.

Tale fenomeno è possibile solo alle frequenze più elevate, mediante le quali si sfruttano fenomeni di variazione della costante dielettrica e di debole ionizzazione dello strato più basso dell'atmosfera.