

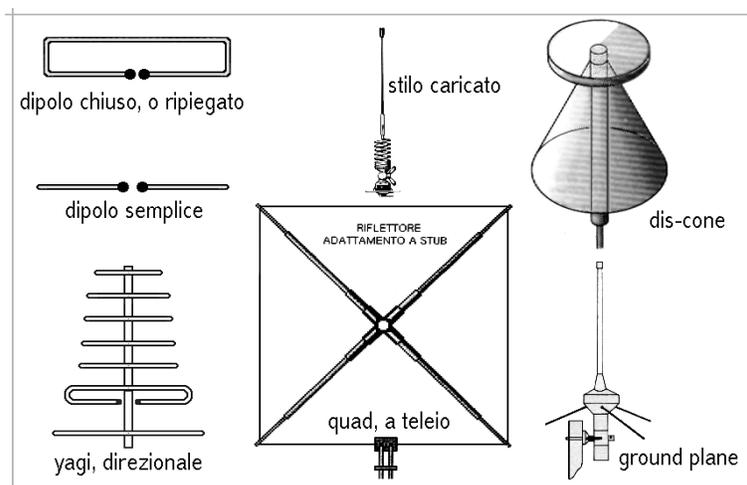
LE ANTENNE

di Giovanni G. Turco, ik0ziz

L'antenna è un dispositivo in grado di ricevere un segnale elettrico ed a convertirlo in onda elettromagnetica per irradiarlo nello spazio circostante e viceversa.

Questa sommaria definizione è sufficiente per essere inserita in un dizionario, ma non basta a chi ha interesse o curiosità a saperne di più.

Dalla definizione fatta si capisce che l'antenna può essere considerata come un trasformatore di energia, posto da trasformatore tra il generatore e lo spazio vuoto.



Vari tipi di antenne, utilizzate anche nelle stazioni radioamatoriali.

Due apparecchi telefonici per poter essere in grado di comunicare tra loro, devono essere collegati tramite una linea di trasmissione.

Un trasmettitore che deve inviare il segnale a molti chilometri di distanza, è collegato anch'esso ad una linea di trasmissione che però, ad un certo punto, termina ad un dispositivo ad esso collegato: l'antenna.

Essa simula la continuità della linea fino al ricevitore, che utilizza a sua volta un dispositivo simile, ricevente, per convertire il segnale da elettrico ad elettromagnetico.

Si può quindi pensare all'antenna come una linea infinita, con caratteristiche di risonanza ed impedenza in stretta comunione con il generatore ed il cavo che la connette ad esso.

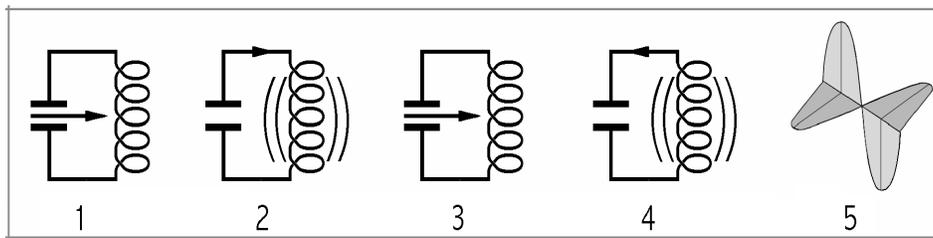
Caratteristiche dell'antenna

Le dimensioni dipendono dalla F_q (frequenza, lunghezza d'onda) sulla quale deve assolvere il suo compito.

Il rapporto di volume è inversamente proporzionato alla frequenza, espressa in MHz, cioè: su una frequenza bassa l'antenna sarà grande e viceversa. I parametri caratteristici dell'antenna sono:

- la **fase**, che è la relazione angolare esistente tra la corrente e la tensione applicate;
- l'**impedenza**, che è il rapporto tra la tensione applicata e la corrente risultante;
- la **resistenza di radiazione** che è strettamente correlata con l'impedenza;
- la **Reattanza**, che è legata alla frequenza ed alla resistenza di radiazione;
- il **guadagno**, che è il rapporto tra la potenza irradiata o ricevuta con riferimento al dipolo isotropico, ed è relativo alla direttività;
- la **direttività**, che è l'intensità di segnale emesso o ricevuto in funzione dell'angolo di irradiazione trasmesso, ed è relativa al guadagno;

- la **larghezza di banda**, che è l'intervallo di frequenza che un'antenna è in grado di ricevere o su cui è capace di irradiare mantenendo impedenza resistiva;
- il **Q**, che è relativo alla reattanza e alla larghezza di banda.



Principio di funzionamento di un'antenna.

- 1) L'energia è immagazzinata sotto forma di campo elettrico nel condensatore.
- 2) Il condensatore si scarica; la corrente che fluisce nell'induttanza genera campo magnetico.
- 3) La magnetizzazione dell'induttanza ricostruisce il campo elettrico nel condensatore.
- 4) Il ciclo si ripete e l'energia elettrica viene nuovamente convertita in energia magnetica.
- 5) La conversione di energia elettrica E in energia magnetica H in modo oscillante, genera campi elettrici e magnetici concatenati, disposti a 90° l'uno rispetto l'altro, che si allontanano dall'antenna propagandosi nello spazio circostante.

Corrente e tensione

Il circuito risonante più corto, sintonizzato ad una certa frequenza, è un conduttore lungo mezz'onda ($\lambda/2$) elettrico, cioè accorciato rispetto all'effettiva lunghezza d'onda calcolata (quella fisica), cioè in funzione del diametro del conduttore del materiale impiegato.

Applicando una carica elettrica ad un suo estremo, la corrente lo percorre per tutta la sua lunghezza fino all'altro estremo dove inverte il flusso e torna al punto di partenza, effettuando così un ciclo completo.

Il segnale a radiofrequenza (RF), continuo e immesso in un'antenna $\lambda/2$, varia in tensione con forma di onda sinusoidale, in quanto le cariche sono fornite in zone differenti del ciclo.

Nel momento di eccitazione del filo, e quindi all'inizio del ciclo, le cariche di segno opposto si trovano agli estremi del conduttore dove, per differenza di potenziale tra essi, l'intensità è massima (si sommano).

La corrente risultante nei due stessi punti di massima tensione, è d'intensità prossima allo zero (minima) poiché, in quel punto vi sono in gioco due correnti che viaggiano in senso opposto tra loro. Infatti, quando la prima carica raggiunge l'estremo del filo inverte la direzione, la seconda, con la stessa intensità, parte nella stessa direzione, quindi opposta alla prima che sta tornando all'origine, provocando l'annullamento di entrambe quasi totalmente.

Il ciclo si ripete fino a che al filo viene immesso il segnale RF.

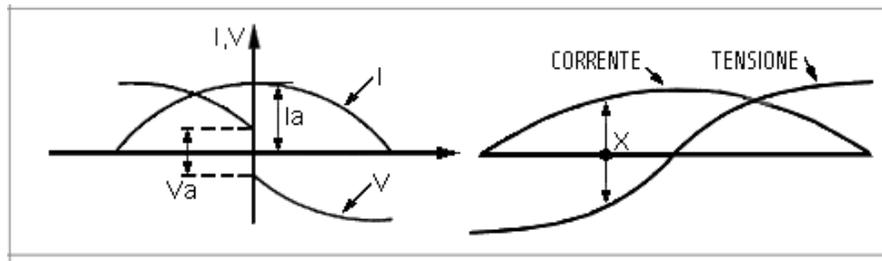
Praticamente durante il percorso, per la variazione d'intensità, la corrente disegna un arco, con inizio e fine alle due estremità di esso, con picco che è individuabile nel punto centrale (ad $1/4$ d'onda).

La tensione, per la stessa ragione, disegna una S con inizio sempre alle due estremità ma all'altezza della massima intensità di corrente, con il punto di minima individuabile nello stesso punto dove la corrente è massima.

Quindi, le forme ad arco e ad S della corrente e della tensione sono dovute alla differenza di intensità variabile lungo il percorso, per motivi di opposizione di fase.

Per quanto sopra, si deduce che tensione e corrente invertono le rispettive polarità ad ogni mezzo ciclo, con intervallo tra essi pari ad un quarto d'onda.

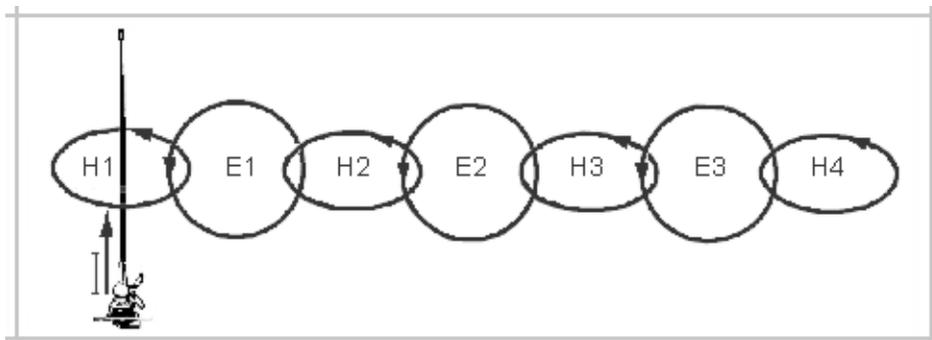
L'ampiezza della corrente misurabile in ogni punto del filo è detta **onda stazionaria di corrente**, ed il valore varia con legge sinusoidale, a seconda della frequenza.



Il punto di massima intensità di corrente lungo un filo è definito *ventre*, quello corrispondente all'intensità minima di tensione si chiama *nodo*.

Irradiazione dell'antenna

Il campo irradiato nelle prossimità dell'antenna, entro una distanza di qualche lunghezza d'onda, è detto di induzione, ma a noi interessa sapere del campo di radiazione, quello a grande distanza dall'antenna, che è caratterizzato da un campo elettrico **E** ed uno magnetico **H**, perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione.



In figura, la corrente **I** percorre l'antenna, producendo il campo elettromagnetico. **E** è quello elettrico, **H** quello magnetico, alternati e perpendicolari tra loro. Quando si stabilisce la polarità di radiazione, ovvero la posizione orizzontale o verticale dell'antenna, si fa sempre riferimento al campo **E**.

Le due intensità di campo **E** ed **H** sono relative all'impedenza caratteristica del vuoto, che è data dalla relazione fra la permeabilità magnetica e dalla costante dielettrica dello stesso. L'impedenza caratteristica del vuoto ha un valore di 377Ω , infatti:

$$E / H = Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120 \pi \approx 377 \Omega.$$

Dove: **Z₀** è l'impedenza caratteristica del vuoto

μ₀ è la permeabilità magnetica del vuoto

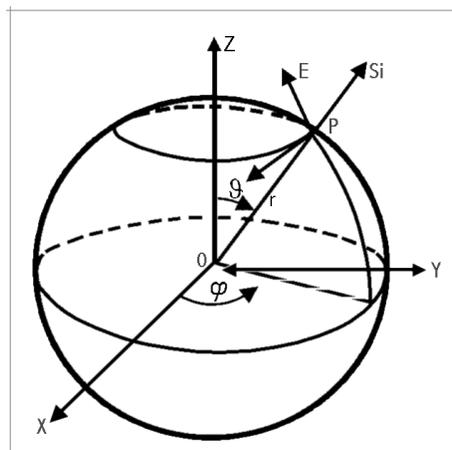
ε₀ è la costante dielettrica del vuoto

Superfici d'onda e fronti d'onda sono le superfici costituite da punti dello spazio nei quali i campi elettrico e magnetico hanno la stessa fase, dipendentemente dalla distanza dall'antenna.

A distanza considerevole dal punto di radiazione dell'antenna, la superficie sferica si può approssimare al piano tangente in cui giacciono i campi **E** ed **H**. Si può ritenere allora che la propagazione avvenga per onde piane.

Il piano di polarizzazione dell'onda è quello individuato dalla direzione di propagazione e dal campo elettrico **E**.

Alle onde elettromagnetiche è associato un flusso di energia nella direzione di propagazione.



Campo elettromagnetico, vettore di Poynting e superficie d'onda.

La potenza che in un determinato istante attraversa l'unità di superficie normale alla direzione di propagazione è detta **densità di potenza** ed è rappresentata dal vettore di Poynting "S" ($S_i = E \wedge H$ (W / m^2)) che è un vettore avente direzione normale al piano E, H con verso quello della propagazione dell'onda.

Il modulo è uguale al prodotto dei valori istantanei del campo elettrico e magnetico.

Se la corrente nell'antenna varia con la legge sinusoidale nel tempo, i due campi elettromagnetici variano anche essi con la stessa legge, e allora si può affermare che :

$$S = \frac{1}{2} EH \quad (W / m^2)$$

dove: **S** è il valore medio (in un periodo) della potenza che attraversa l'unità di superficie normale nella direzione di propagazione.

E, H sono le ampiezze dei campi **EM** che si suppone varianti con legge sinusoidale.

Il campo prodotto dall'emissione a radiofrequenza si misura in potenza **P**.

La potenza emessa da un'antenna isotropica (irradiazione a 360°) può essere messa in relazione con la densità (di potenza) **S** e con il campo elettrico **E**.

Infatti, ad una distanza **r** dall'antenna, la potenza si distribuisce su di una superficie sferica di raggio **r**, e si ottiene che $S = P / 4 \pi r^2$.

Il flusso di energia nella direzione di propagazione può essere indicato anche dalla potenza irradiata per angolo solido $P' i$ e si ha:

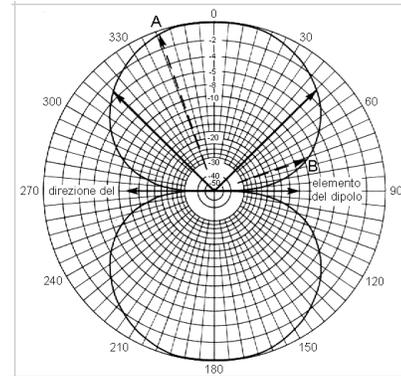
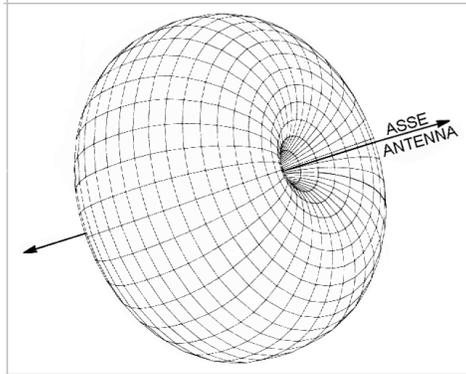
$$P' i = \frac{S 4 \pi R^2}{4 \pi} = S r^2$$

La misura **S** è quella che abitualmente usiamo, e la lettura avviene sullo strumento collocato all'interno dei ricevitori (il famoso "S come Santiago").

Ogni punto "S" equivale a 6 dB fino a S9 mentre, oltre questo valore, la misura è letta direttamente in dB nella parte solitamente evidenziata con colore diverso dalla prima parte della scala dello strumento di misura.

Radiatore isotropico e dipolo elementare

Il dipolo elementare irradia con intensità pressoché uniforme in tutte le direzioni e produce un lobo che può essere considerato **isotropico**. Esso, con caratteristica di guadagno zero e direttività intorno a 360 gradi, viene considerato quale riferimento per le caratteristiche di guadagno e direttività di tutti gli altri tipi di antenne.



È costituito da un conduttore filiforme di lunghezza d'onda elettrica minore rispetto a quella d'onda fisica ed è percorso da una corrente costante in ampiezza lungo tutta la sua superficie in una direzione definita.

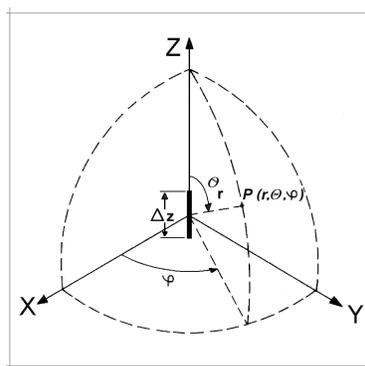
Questa caratteristica è motivo della irradiazione non uniforme in tutte le direzioni.

Esso può essere considerato come trasformatore di energia a radiofrequenza che riceve dal generatore ed irradia nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche. Allo stesso tempo esso è un adattatore d'impedenza tra il generatore ed il vuoto intorno a sé.

Il dipolo è da considerare, come le linee di trasmissione, un circuito a costanti distribuite, pertanto, l'andamento generale della corrente è simile a quello già descritto per le linee di trasmissione e dipende, in particolare, dal carico e dalla lunghezza della linea che ne determina anche l'impedenza.

L'irradiazione del dipolo elettrico elementare è più intensa nelle direzioni che sono ad angolo retto con la linea del filo conduttore, mentre si ha una diminuzione verso le direzioni di misura che si allineano al conduttore, fino a che in coincidenza, cala rapidamente verso lo zero.

L'intensità di campo intorno al dipolo elementare varia quindi a seconda della punto in cui viene misurata rispetto allo stesso.



Campo prodotto da un dipolo elettrico elementare.

Diagrammi di radiazione

Un'antenna che irradia omogeneamente in tutte le direzioni è detta radiatore isotropico.

L'intensità di campo delle antenne reali, invece, varia con la direzione ed il comportamento è rappresentato mediante i "solidi di radiazione" ed i "diagrammi di radiazione".

Se in ogni direzione dello spazio si riporta, partendo dal punto di origine del sistema di coordinate associato all'antenna presa in considerazione, un segmento proporzionale al modulo $|\mathbf{E}|$ del campo elettrico irradiato o alla direttività \mathbf{D} , si ottiene una figura conosciuta col nome di "solido di irradiazione".

I diagrammi di radiazione sono le curve che si ottengono selezionando il solido di radiazione con piani opportuni. Per difficoltà di rappresentazione tridimensionale, così come in realtà si espande nello spazio, i diagrammi vengono raffigurati su due sezioni piane perpendicolari fra loro, quella verticale e quella orizzontale.

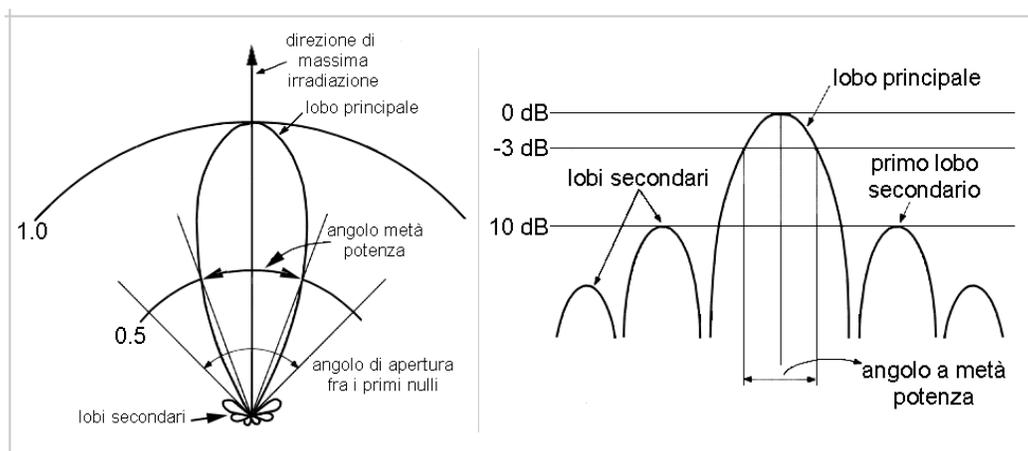
In relazione alla posizione dell'antenna, vengono indicati come diagrammi di radiazione dell'una o dell'altra polarità e contengono riferimenti ai minimi e massimi di guadagno e direttività.

In particolare viene raffigurato quello che indica la direzione di massima radiazione, ed è definito **lobo principale**, mentre altri sono chiamati **lobi secondari**.

I parametri principali riportati nei diagrammi di irradiazione sono:

1. angolo di apertura d'irradiazione totale espresso a metà potenza, che corrisponde all'angolo tra le due direzioni in cui il diagramma d'irradiazione si riduce di 3 dB rispetto al suo massimo valore;
2. angolo di apertura del lobo principale compreso tra i primi nulli del diagramma;
3. rapporto tra la massima ampiezza del diagramma del lobo principale e secondario

I diagrammi di radiazione normalizzati in campo ed in potenza coincidono nel caso in cui siano espressi in decibel, per cui l'angolo di apertura a metà potenza corrisponde a quello tra le due direzioni in cui il diagramma di radiazione si riduce di 3 dB rispetto al suo valore massimo.



A sinistra : Diagramma di radiazione in potenza del tipo polare normalizzato.

A destra : Diagramma di radiazione in potenza, normalizzato cartesiano in dB.

Guadagno e direttività

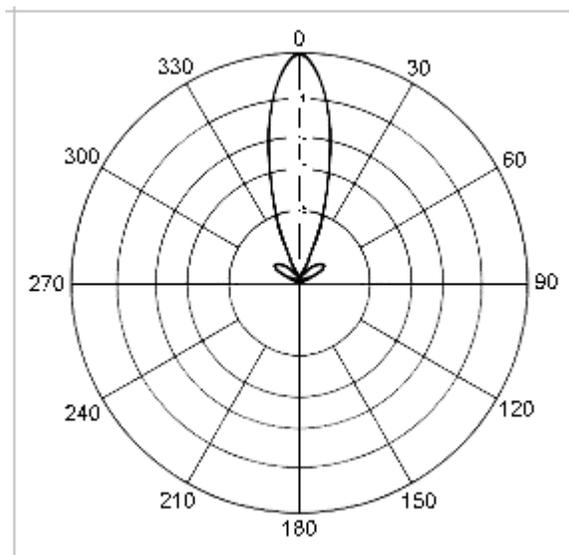
Il guadagno è rappresentato con \mathbf{G} .

In un'antenna il \mathbf{G} nella direzione di irradiazione massima è dato dal rapporto tra la potenza irradiata da una antenna isotropica P_i (intorno a 360°) e la potenza P_a con la quale si deve alimentare l'antenna reale, quella esistente, efficace ad ottenere un campo eguale in uno stesso punto ad una certa distanza.

Il guadagno \mathbf{G} è espresso in **dB** (decibel) $G \text{ (dB)} = 10 \log G$.

In via generale il \mathbf{G} dipende dal rapporto tra esso e la direttività (\mathbf{D}).

La direttività \mathbf{D} di un'antenna è rappresentata dal rapporto tra la potenza irradiata da una antenna isotropica e la potenza P_r che deve irradiare l'antenna reale per ottenere lo stesso valore del campo elettromagnetico nello stesso punto a grande distanza.



viene distribuita su un angolo minore di 360° (dipolo isotropico).
 Lobo di irradiazione di una antenna con guadagno in una direzione.
 Si dice che guadagna poiché la potenza inserita ad essa

Anche D è espresso in decibel : $D \text{ (dB)} = 10 \log D$.

Se l'antenna non ha perdite $G = D$ mentre, in caso contrario, $G < D$.

Quindi il guadagno indica la direttività dell'antenna, cioè la capacità di essa ad irradiare l'energia concentrandola in una direzione desiderata.

Ad esempio, $G=2$ ($G=3\text{dB}$) significa che per avere lo stesso campo nella direzione di massima irradiazione dell'antenna reale, il radiatore isotropico deve impiegare potenza doppia; oppure che a parità di potenza irradiata, la densità di potenza nella direzione di massima irradiazione dell'antenna è il doppio della densità di potenza nella stessa direzione del radiatore isotropico, - o che il campo è $\sqrt{2}$ volte più grande.

Nella pratica del radioamatore, le antenne che hanno un guadagno G nella direzione d'irradiazione sono dette "direttive" o "direzionali" e sono composte da uno o più elementi oltre al dipolo, posizionati prima o dopo di esso ad una certa distanza.

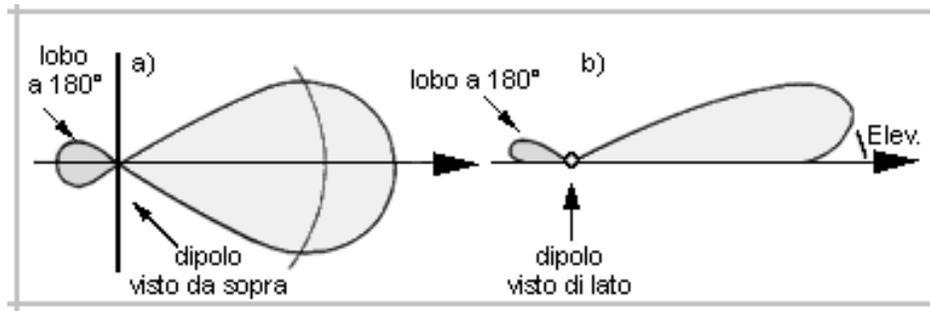
L'elemento posizionato dietro al dipolo è definito **riflettore** ed è più lungo; quello che è posto davanti al dipolo si definisce **direttore**, ed è più corto.

Angolo d'irradiazione verticale

La direttività verticale è determinante per effettuare buoni collegamenti su frequenze dai 14 MHz (20 metri) in su. L'angolo d'elevazione dipende da varie componenti, non ultima l'altezza dell'antenna dal suolo, che determina il numero di riflessioni sullo strato ionosferico che il segnale effettua per giungere ad un ricevitore situato ad una certa distanza. Ad ogni riflessione il segnale viene attenuato. Se ne deduce quindi, che l'angolo d'irradiazione verticale più basso permette al segnale di giungere a destinazione con meno salti, quindi nel minor tragitto e col risultato di minore attenuazione di radiofrequenza.

Se l'angolo d'irradiazione verticale non è sufficiente, si verifica l'effetto fading selettivo per le interferenze tra onde che hanno percorso cammini diversi.

Gli angoli che permettono buoni collegamenti a lunga distanza su 14 MHz sono compresi tra 3° e 15°, mentre per collegamenti a breve distanza sono compresi tra 15° e 30°. Su 21MHz gli angoli buoni sono tra 3° e 13° e sui 28 MHz quelli tra 3° e 10°.



Lobi orizzontale e verticale prodotti da un dipolo $\lambda/2$.

Reciprocità in ricezione

L'area efficace **A_{eff}** (area efficace) di una antenna ricevente è il rapporto tra la potenza **P_d** (potenza disponibile) trasferita al carico, ovvero all'uscita dell'antenna in condizione di adattamento e quando sia orientata nella stessa direzione dell'onda per la massima ricezione, e la densità di potenza **S** dell'onda incidente: $A_{eff} = P_d / S$

L'area efficace **A_{eff}** e guadagno **G** sono legati dalla relazione

$$G = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2}$$

La formula che consente di determinare la potenza disponibile **P_d** all'uscita di un'antenna ricevente, di guadagno **G_r**, posta nello spazio libero, a distanza **r** da un'antenna trasmittente di guadagno **G_t** (che irradia una potenza **P_i**), stabilendo che le due antenne devono essere orientate nelle direzioni, rispettivamente di massima ricezione e di massima radiazione, è la seguente: $P_d = A_{eff}(\theta, \phi)S$.

Si può dimostrare che la funzione **f** (θ, ϕ) è la stessa che si ha in trasmissione (in particolare quindi la direzione di massima radiazione è pure quella di massima sensibilità).

Inoltre si trova che il rapporto tra guadagno e area efficace di un'antenna è una costante universale, valida per ogni antenna: $G/A = 4\pi/\lambda^2$.

Queste proprietà sono di fondamentale importanza e consentono di qualificare un'antenna senza riguardo al modo con cui viene usata.

Per un'antenna ricevente, nel caso siano individuabili tensioni e correnti alla sezione d'uscita, come nel caso del cavo coassiale, la tensione a vuoto è funzione dell'orientamento dell'antenna rispetto all'onda, ed è proporzionale alla forza elettrica dell'onda stessa.

Predisponendo l'antenna nella miglior condizione di ricezione (quando funzione di (θ, ϕ) è uguale ad 1, polarizzata caratteristica), si può scrivere la predetta proporzionalità con :

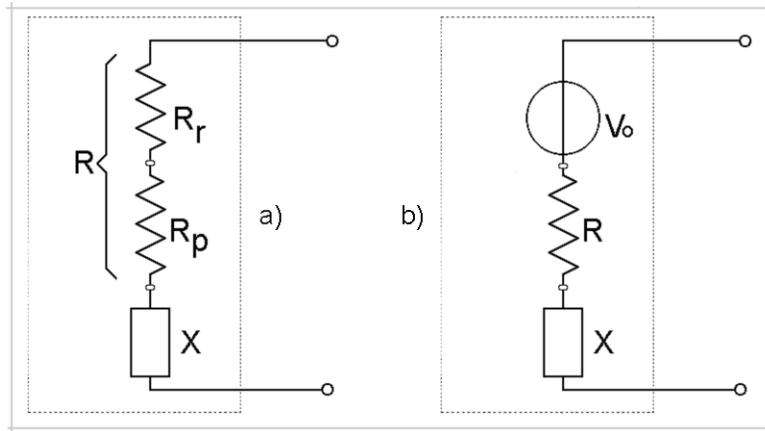
$$|V_o| = 1|E|$$

dove $|V_o|$ è la tensione a vuoto ed $|E|$ è la forza elettrica dell'onda incidente (2-1).

Il parametro 1, che ha le dimensioni di una lunghezza, è detto **lunghezza efficace** dell'antenna.

Va infine osservato che, l'impedenza d'uscita dell'antenna considerata in trasmissione, è la stessa di quella in ricezione. Tale impedenza deve quindi identificarsi con quella del circuito riportato nella figura sotto in a), ove l'antenna ha il ruolo di un bipolo passivo.

Pertanto, il circuito equivalente diviene quello in figura, lato b).



In a) il circuito equivalente tipo serie di un'antenna trasmittente.

In b) il circuito equivalente tipo serie di un'antenna ricevente.

La potenza disponibile dal generatore in figura a), cioè estraibile con un carico adattato e risonante con la reattanza X vale : $P_d = |V_o|^2 / 4R$.

Confrontando la formula appena riportata con quella per il calcolo della Pd, per la funzione di $(\theta, \phi) = 1$, si ottiene (tenendo conto della formula del calcolo di S e del modulo di V_o), la seguente espressione :

$$A = I^2 \frac{\eta}{4R}$$

che è fondamentale e mette in evidenza un vincolo tra i parametri fondamentali di un'antenna ricevente A, 1 ed R valido per qualunque antenna.

Resistenza di radiazione

Si definisce come resistenza di radiazione (**R_r**), il rapporto tra la potenza irradiata (P_i) ed il quadrato del valore efficace della corrente I nel punto dell'antenna in cui essa è d'intensità massima (ventre di corrente):

$$R_r = P_i / I^2 .$$

Si può pensare l'antenna come costituita di due resistenze (R_d - R_r), che tengono conto, rispettivamente, della potenza dissipata (d) e della potenza irradiata (r).

La potenza dissipata in calore, parte reale, nelle antenne radioamatoriali in genere, è insignificante se la confrontiamo a quella effettivamente irradiata, poiché il rapporto tra la resistenza di radiazione R_r e la resistenza R del materiale col quale sono fatte generalmente le antenne, sia che si tratti di un filo sottile che di un filo di un certo diametro, rimane alto, perché il valore ohmico dei conduttori di tale diametro è di circa 0.7-1,5 ohm.

La resistenza irradiata R_r è parte simulata, praticamente inesistente, il che permette l'irradiazione della radiofrequenza che altrimenti sarebbe anch'essa persa in calore.

Quando il diametro del tubo impiegato comincia ad essere consistente la R_r varia, e per conoscerne il valore potrete riferirvi al paragrafo riguardante la reattanza.

La variazione della R_r è comunque più veloce quando il radiatore è più lungo di $\lambda / 2$. In ogni caso è bene che la R_r non sia mai inferiore a 20 ohm, poiché al di sotto di questa cifra l'adattamento dell'antenna diventa critico.

La resistenza di radiazione R_r è spesso causa della variazione dell'impedenza caratteristica Z_{in} (impedenza d'ingresso) dell'antenna, che è uguale al rapporto tensione/corrente applicato all'ingresso.

Uno dei motivi che provocano la variazione della R_r è la posizione del cavo di trasmissione, la cui calza può accoppiarsi induttivamente all'antenna.

In pratica, il materiale conduttivo e non solo, che si trova nelle vicinanze dell'antenna è considerato motivo di variazione d'impedenza. Anche il suolo sottostante partecipa alla variazione della R_r e quindi al rendimento.

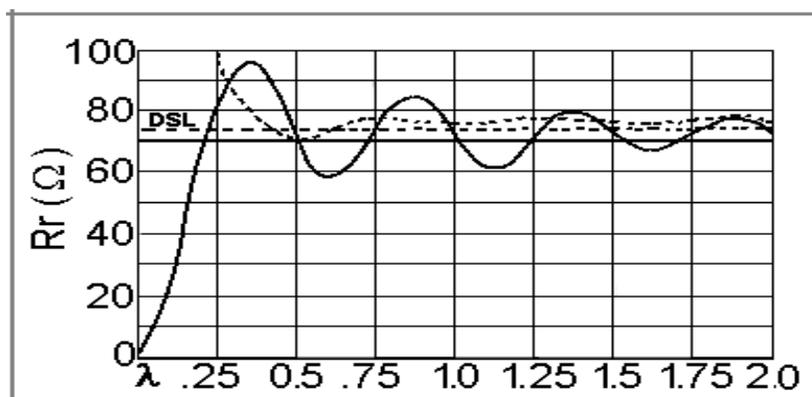


Tavola per determinare la R_r in un'antenna posta ad una certa altezza dal suolo.

La linea tratteggiata indicata con DSL si riferisce al dipolo nello spazio libero.

La curva a tratti è relativa ad antenne verticali, quella continua ad antenne orizzontali.

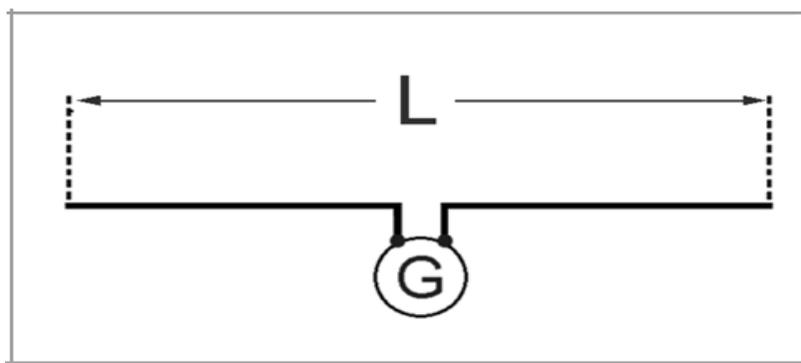
Quando l'antenna è posizionata in modo da essere considerata libera da interventi mutanti estranei, ovvero in spazio libero, la R_r è di circa 73Ω quando si utilizza un filo di diametro infinitamente sottile.

Con l'impiego di conduttori cilindrici generalmente essa è di valore intorno a 63Ω .

Impedenza d'ingresso e risonanza dell'antenna

L'impedenza d'ingresso Z_{in} in un radiatore, varia a seconda del punto in cui viene alimentato, poiché essa dipende dal rapporto tra corrente e tensione presenti nel conduttore che variano d'intensità in ogni suo punto durante l'intero ciclo dell'impulso a radiofrequenza ($Z_{in} = V / I$).

I radioamatori utilizzano vari tipi di antenne, ma sono quelle con ingresso RF al centro del radiatore le più diffuse.

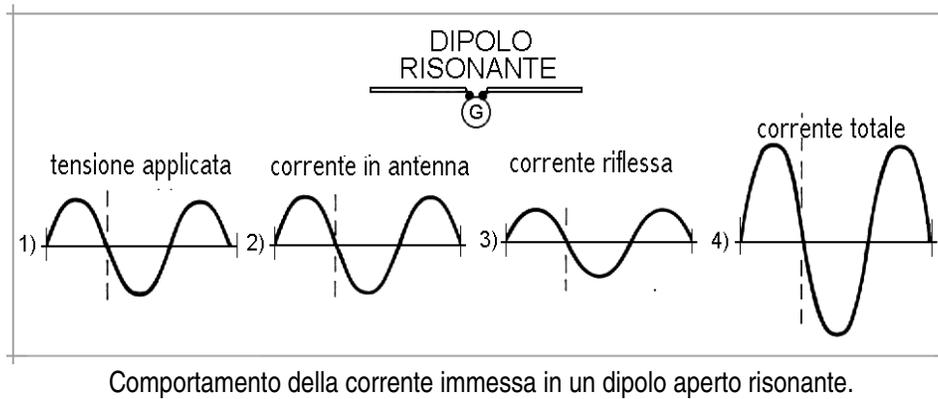


Dipolo alimentato al centro. L'impedenza di un'antenna di questo tipo, fatta con filo sottile è di circa 73 ohm che cala col crescere del diametro. Generalmente si utilizzano conduttori di diametro entro $25\text{-}30 \text{ mm.}$ per un'impedenza di circa 52 ohm.

Il miglior rendimento di un'antenna si ottiene quando al suo ingresso l'impedenza è puramente resistiva.

Questo avviene solo quando in quel punto la tensione e la corrente sono esattamente in fase tra loro.

Esaminiamo la figura che segue, nella quale ci si riferisce ad uno solo dei due rami che compongono l'intera struttura, in quanto nell'altro il comportamento è uguale e quindi i valori si sommano.



In 1) è la tensione applicata, ed in 2) si evidenzia la corrente in fase, da essa prodotta.

Siccome la corrente percorre 180° elettrici totali ($\lambda/2$) lungo un percorso di 90° elettrici ($\lambda/4$), il radiatore si può considerare risonante.

Infatti, tale percorso, che sembra comportare uno sfasamento di 180° della componente riflessa della corrente rispetto alla corrente uscente, in effetti, siccome all'estremità del dipolo la corrente s'inverte provocando uno sfasamento di 180° , lo sfasamento totale è di 360° , e la riflessa arriva in fase con la corrente uscente nel punto di alimentazione.

In 3) la componente uscente si somma con la componente della corrente riflessa e la corrente sommata, risultante, è in 4).

In questa situazione essendo in fase, il dipolo è risonante si può considerare (visto dal generatore) puramente resistivo.

E' molto importante che un sistema aereo per essere efficace, in rapporto alla potenza oltre che della stessa impedenza Z_g del trasmettitore e Z_o della linea, sia soprattutto risonante alla frequenza su cui è fatta funzionare.

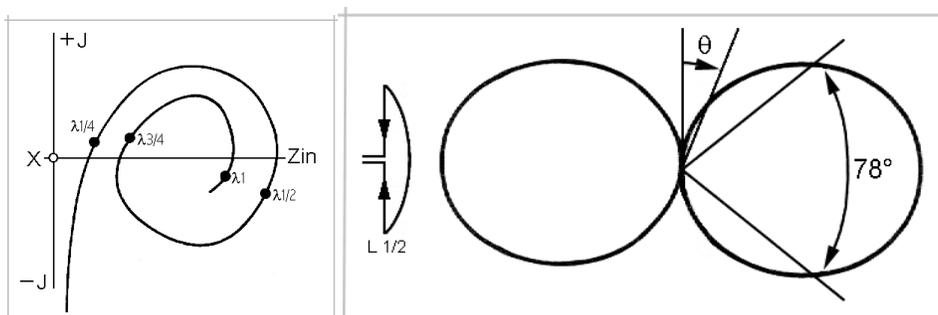
Se questi parametri non sussistono così come descritti, l'antenna subisce modificazioni che ne penalizzano la resa. Purtroppo, nella migliore delle situazioni, non si ottiene mai una pura resistenza nel punto di alimentazione, e questo vale per qualsiasi antenna.

La Z_{in} è composta dalla $R_r + R_d$, cioè dalla resistenza di radiazione e dalla resistenza di perdita in calore.

A queste due componenti se ne aggiunge sempre una terza, la **reattanza Jx** , che può essere di negativa ($-Jx$) o positivo ($+Jx$), seguiti da una cifra $n(x)$ ed indicano rispettivamente il valore di reattanza capacitiva (X_c) e induttiva (X_L) della R_r , e allora Z_{in} sarà definita come:

$$Z_{in} = R_r + R_d + Jx$$

dove: Z_{in} è l'impedenza d'ingresso coniugata del radiatore, R_r è la resistenza di radiazione, R_d è la resistenza di perdita in calore e Jx è la componente reattiva, che viene sempre indicata con la Z_{in} anche se la cifra di valore n è pari a zero, quindi per definizione l'impedenza d'ingresso di un'antenna è $Z_{in} \pm Jn$.



Nella figura a sinistra la variazione dell'impedenza Z_{in} a variare della lunghezza d'onda.

Sotto il lobo d'irradiazione di un dipolo aperto lungo $\lambda/2$. θ è l'angolo a metà potenza.

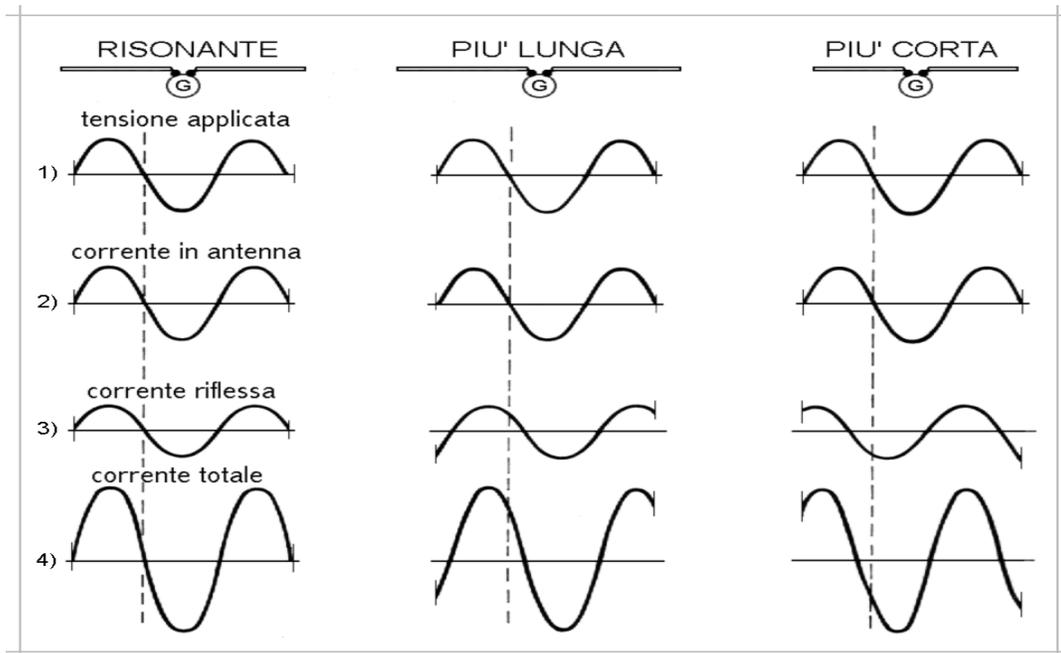
Reattanza

Uno dei motivi che rendono un radiatore reattivo è la lunghezza diversa rispetto alla frequenza di risonanza.

Se è più lungo la sua impedenza d'ingresso presenta una componente induttiva ($Z_{in} + j n$) in quanto la fase della corrente applicata risulta in ritardo sulla tensione, quindi non in fase con la componente d'uscita.

Quando è più corto, la sua impedenza d'ingresso risulta capacitiva ($Z_{in} - j n$) poiché, in questo caso, la fase della corrente è in anticipo rispetto alla tensione applicata.

Nella tabella che segue sono figurati i tre casi: dipolo risonante, dipolo più corto e più lungo, per l'andamento della corrente in ognuno di esso.



Andamento della corrente nei casi di dipolo risonante, più lungo e più corto.

Si deduce che, anche quando varia la frequenza sulla quale il dipolo è fatto risuonare, l'impedenza assume una componente X_c o X_l , a seconda che essa sia rispettivamente più bassa o più alta.

E' necessario quindi che l'antenna sia risonante, perché sia possibile l'irradiazione della massima energia proveniente dal trasmettitore.

Si può compensare la componente reattiva X , e in generale il valore dell'impedenza, mediante dispositivi di adattamento che sono ampiamente trattati in altro articolo dedicato.

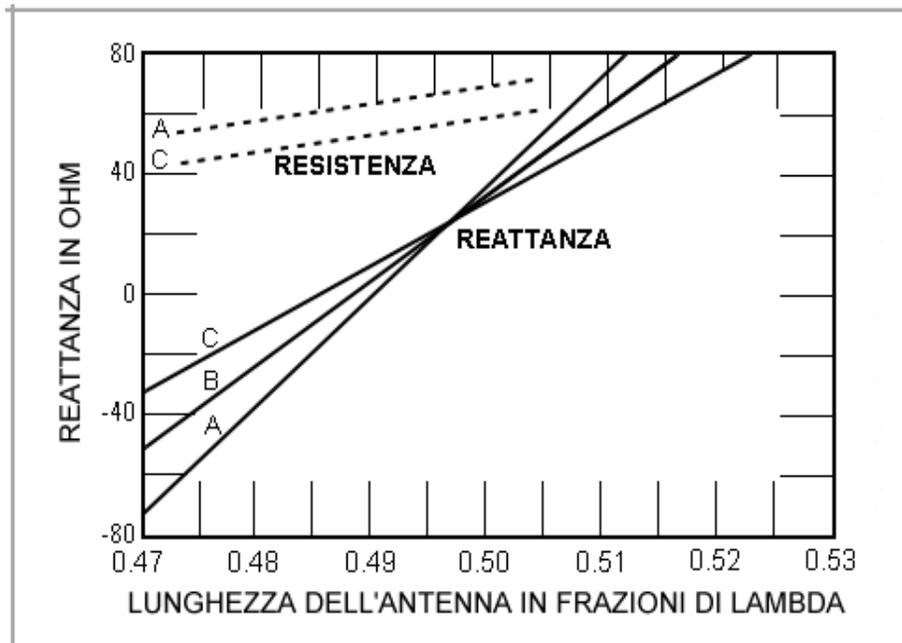
L'entità di aumento della reattanza è relativa al rapporto tra essa ed il diametro del conduttore.

A conduttori di diametro grande la reattanza presenta una curva più piatta, ovvero la variazione è più lenta nel mutare la lunghezza del dipolo. A conduttori di piccolo diametro, essa varia repentinamente.

Con radiatori filiformi, al minimo variare della frequenza alla Z_{in} dell'antenna si somma una importante entità di X_c oppure X_l , a seconda che la trasmissione venga effettuata più in alto o più in basso rispetto alla frequenza di risonanza. L'utilizzo di un tubo cilindrico è quindi quasi sempre conveniente, a beneficio anche della banda passante, poiché con l'utilizzo di tubi di diametro grosso l'efficienza dell'antenna si estende su un intervallo più largo (banda passante più ampia) mantenendo l'antenna entro parametri accettabili.

Con una larghezza di banda maggiore, cioè con diametri grossi rispetto al filo più sottile, il Q diminuisce e viceversa, così come aumenta il valore reattivo.

Il "Q" indica il valore di selettività dell'antenna. A valori di alto Q la banda passante del dipolo diviene più stretta.

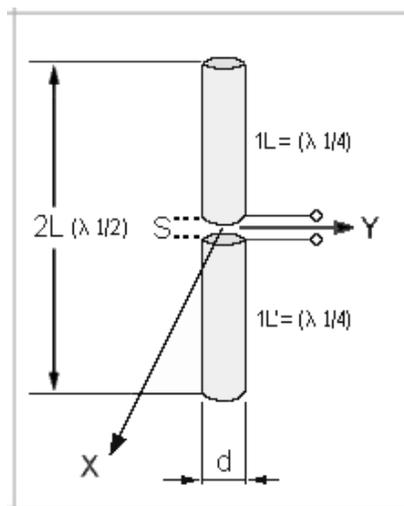


Variatione della reattanza e della resistenza in un dipolo più lungo o più corto di $\lambda/2$. La curva A è riferita a rapporto λ/d pari a 25.000 la curva B a λ/d pari a 2.500, la C pari a 1.250. Da preferire rapporti bassi per una banda passante più ampia.

Dipolo cilindrico

Il dipolo semplice è anche definito **antenna cilindrica** quando il diametro del radiatore è sufficientemente grosso. E' largamente impiegato, soprattutto a partire dalle bande VHF in su.

Il dipolo cilindrico è formato da due parti, ciascuna lunga $1/4$ d'onda elettrica ($1L+1L'=2L=\lambda/2$).



Dipolo cilindrico, geometria. E' costituito da due semidipoli di lunghezza $2L$ ($2L=1L+1L' = 2L = \lambda/2$) e di diametro "d".

Un elemento da non trascurare ai fini del mantenimento dell'impedenza è la distanza "S" al centro dei due bracci.

A frequenze alte è più critica che su quelle basse, e mediamente, per reattanza zero o trascurabile, è $0,00581$ di l (F 145 MHz = 12 mm). Il diagramma di radiazione non è più costituito da due circonferenze nel piano x-z come nel dipolo elementare, ma è più schiacciato. Angolo di irradiazione α e guadagno G valgono: $\alpha = 78^\circ$ G (dB) = 2, 14 dBi

La Rr è di 60 ohm circa con diametro $2d$ non di filo sottile, nel qual caso è di 73 ohm.

Sappiamo che in un dipolo semplice, filiforme e libero da ostacoli, l'impedenza è di circa 73Ω , a condizione che sia collocato ad una altezza dal suolo pari a qualche lunghezza d'onda rispetto alla frequenza sulla quale è risonante, ed in queste condizioni è considerata in spazio libero.

All'aumentare del diametro del conduttore, la resistenza d'irradiazione cala assieme alla reattanza.

Tanto è più grosso il diametro meno è lungo il dipolo. Questo in quanto le onde elettromagnetiche (sotto forma di energia a radiofrequenza), viaggiano in un mezzo materiale che, rispetto allo spazio vuoto, presenta una costante dielettrica diversa, e quindi la velocità di propagazione è più bassa.

Questo è il motivo per cui perde la caratteristica sinusoidale della distribuzione della corrente.

La lunghezza fisica del dipolo si definisce tenendo conto del rapporto $\lambda/2 / d$ (rapporto tra lunghezza d'onda e diametro del conduttore).

Mediamente, in un dipolo con diametro minore di $1/100$ di λ , l'impedenza si riduce intorno ai 63Ω .

Mediante il grafico di seguito riportato, si può dedurre la lunghezza approssimata del dipolo.

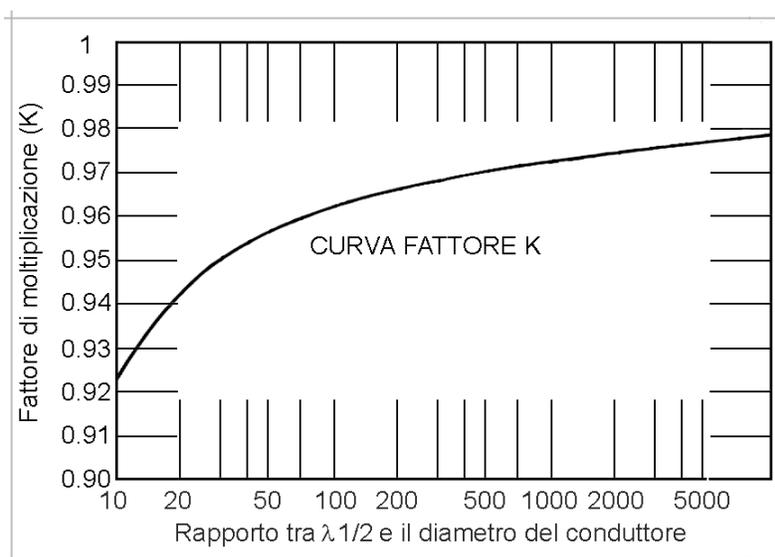


Grafico per determinare il fattore di accorciamento di un dipolo cilindrico.

Ad esempio, per calcolare le dimensioni di un dipolo aperto, che sia sintonizzato su 14,000 MHz si procede come di seguito, utilizzando un tubo in alluminio di diametro di 20 mm.

Si applica la formula seguente: $L(2L) = \frac{C}{F} \div 2$

dove: C = velocità di propagazione della luce, 299.793

F = frequenza d'uso, 14 MHz

2 = dividendo per ottenere la lunghezza in $1/2 \lambda$ elettrica.

Il risultato è una lunghezza (L) di 10,70 m. \times K (fattore di accorciamento)

Facendo uso della tabella, in basso si individua il numero che indica il rapporto risultante da $L (\lambda/2) / d$ (in metri) ovvero: $(F)14 : (d) 0.020 = 535$ (rapporto λ/d).

Tracciando una linea verticale da quel punto, leggiamo un fattore K di 0.97, quindi avremo:

$(L) 10,70 \times (K) 0.97 = (L) 10,38$ metri, che sarà la lunghezza del dipolo.

La distanza "S" tra i due semi dipoli contribuisce alla variazione della R_r ed è mediamente, di 0.0081λ .

Questo parametro non è molto determinante in dipoli su frequenze HF.

Per conoscere la resistenza d'irradiazione del dipolo si fa uso della tabella seguente:

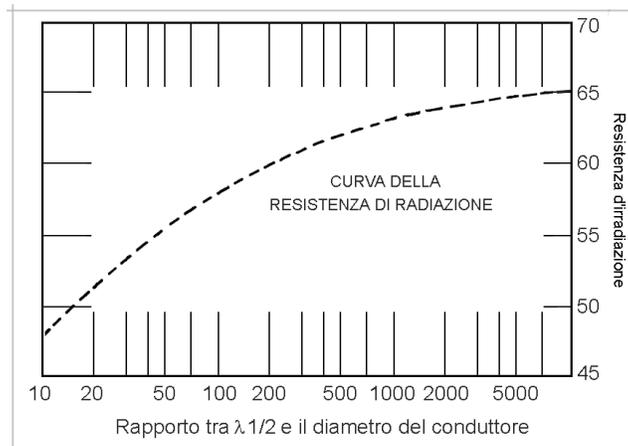


Grafico della variazione della R_r in un dipolo a mezz'onda in rapporto a $\lambda/2/d$.

Come si può vedere, per un rapporto $\lambda/2/d$ (L/d) di 535 la R_r è di 62,5 Ω .
 Si può ottenere un'impedenza minore di 62,5 ohm riducendo la lunghezza dei due semidipoli.
 Per determinarla si calcola: $62,5 \times K2L$

dove: 62,5 è il valore della impedenza del dipolo
 $K2L$ è il coefficiente per determinare la R_r desiderata

Ad esempio, se volessimo ottenere dal dipolo calcolato i 50 Ω classici, dovremmo operare in questo modo:

$$62,5 \Omega \times K2L = 50 \Omega \Rightarrow K2L = 0,8$$

La lunghezza del dipolo è deducibile dal grafico che segue :

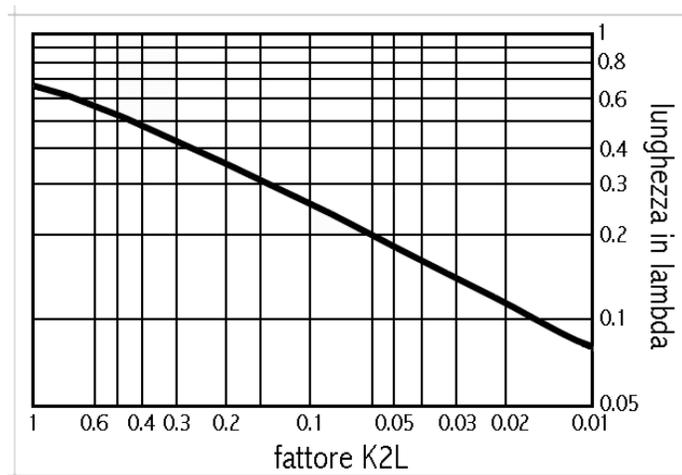


Grafico per determinare la resistenza di radiazione relativa alla lunghezza in un dipolo minore di $\lambda/2$. In corrispondenza del numero di coefficiente scelto in basso nel grafico, si legge, sulla destra, la nuova lunghezza.

La lunghezza del dipolo sarà di $0,043\lambda$, ovvero calcolato a λ elettrica (21,41m.).
 Accorciando il dipolo si è anche introdotto in esso una reattanza capacitiva, questo vuol dire che è più corto rispetto alla risonanza, quindi occorre compensarla con una reattanza induttiva, che si calcola con

$$X_c = Z_0 \cot g \frac{L_{totale}}{2}$$

la Z_0 si calcola con

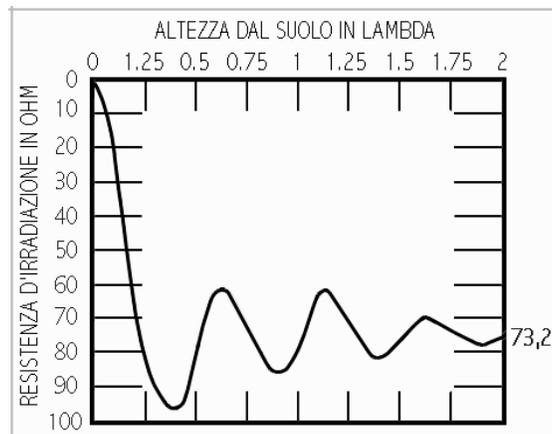
$$Z_0 = 276 \log_{10} \frac{L_{totale}}{d \sqrt{1 + \left(\frac{L_{totale}}{4h} \right)^2}}$$

dove L_{totale} è la lunghezza dei due bracci del dipolo ($1L+1L'$ ($2L$);
 d è il diametro del tubo impiegato;
 h è l'altezza dal suolo, che influenza la R_r di un'antenna.

Si calcolerà poi l'induttanza da porre al centro del dipolo.

Il dipolo è installato in polarizzazione orizzontale o verticale, poi si controlla che l'impedenza e la risonanza non abbiano subito variazioni. Nel caso di avvenute variazioni, si operano aggiustamenti simmetrici delle lunghezze dei due segmenti (bracci).

La minima altezza del dipolo dal suolo deve essere almeno 0.65λ . Per antenne distanti dal suolo fino a due lunghezze d'onda la resistenza d'irradiazione varia come nel grafico seguente:



Variazione della Resistenza d'irradiazione al variare dell'altezza dell'antenna dal suolo.
 Il grafico è valido per distanze dal piano riflettente contenute entro due lunghezze d'onda.

Per antenne distanti dal suolo oltre 2 lunghezze d'onda, considerate libere in aria, è valido il grafico riportato all'inizio di questo capitolo.

Anche il dipolo a $1/2 \lambda$, come quello isotropico, è ritenuto il dispositivo di confronto di riferimento per poter determinare il guadagno di tutti gli altri tipi di antenna.

Dipolo risonante in armonica

Un dipolo può essere lungo due o più mezze lunghezze d'onda. In questo caso è definita risonante in "armonica".

Il numero delle $\lambda/2$ corrisponde al numero di armoniche e ad ognuna corrisponde un'onda stazionaria di corrente. La configurazione è definita **collineare**, cioè come due o più dipoli operanti insieme, quindi con una efficacia d'irradiazione maggiore, un guadagno di direttività.

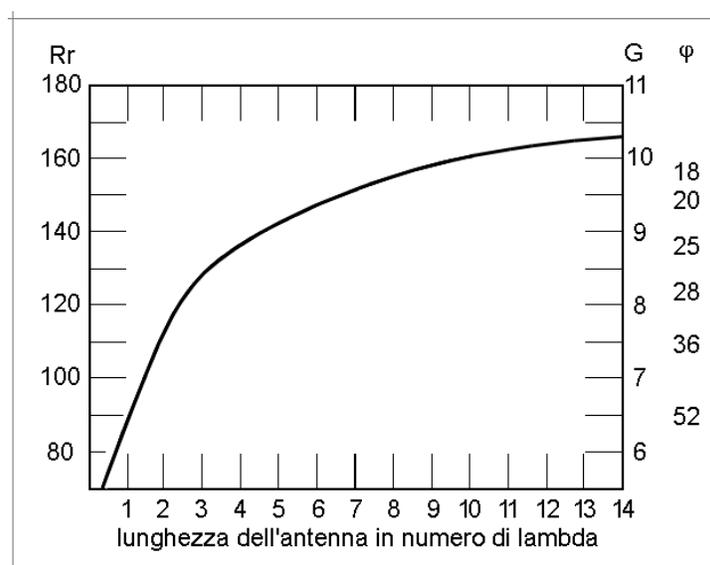
La lunghezza del dipolo in armonica è, di regola, minore rispetto al calcolo C / F e non solo per l'accorciamento che implica il fattore di velocità (k) del materiale utilizzato, ma anche per effetto capacitivo che alcuni tipi di isolatori, posti alle sue estremità per tenerlo posizionato, introducono (end effect). Infatti, nelle due sezioni di $\lambda / 2$ esterne del filo, gli isolatori introducono una certa capacità addizionale ad alta tensione.

La lunghezza di un dipolo calcolato in armonica, non deve quindi essere presa per certa. E' opportuno quindi prepararlo un poco più lungo e verificarne la risonanza con uno strumento adatto, e se necessario man mano tagliuzzarlo simmetricamente fino ad ottenere il miglior risultato.

La formula per il calcolo di un radiatore armonico è la seguente:

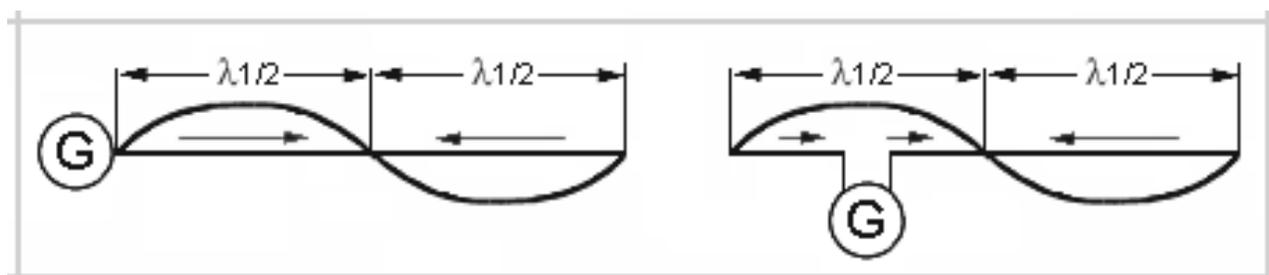
$$\frac{149.9 \cdot n}{F}$$

dove n è il numero di mezze lunghezze d'onda.



Variatione della R_r , del guadagno in dB e l'angolo di irradiazione rispetto all'asse dell'antenna nel radiatore di lunghezza maggiore di $\lambda / 2$.

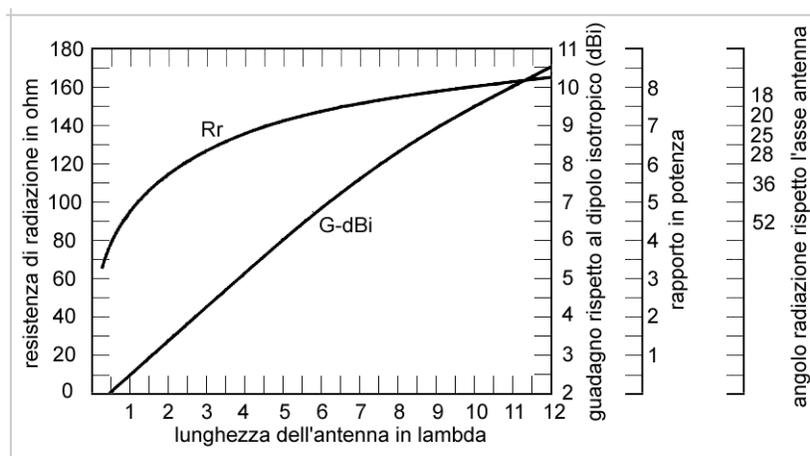
Per la corretta distribuzione della corrente e per una buona efficienza di irradiazione, le antenne risonanti in armonica devono essere alimentate ad un estremo o in un ventre di corrente, ovvero a $\lambda / 4$ da un capo del filo oppure nei punti corrispondenti a multipli dispari.



Modi corretti di alimentare un dipolo risonante in armonica, per una distribuzione di corrente che si inverte nelle sezioni a $\lambda / 2$ di appartenenza. Nel caso di alimentazione ad un capo del radiatore, a sinistra nella figura, la corrente viaggia in direzioni opposte in ogni sezione pari a lambda mezzi, alternandosi lungo il percorso. A destra, con alimentazione ad un quarto d'onda da un capo, l'inversione di corrente si ripete nelle sezioni a mezz'onda seguenti.

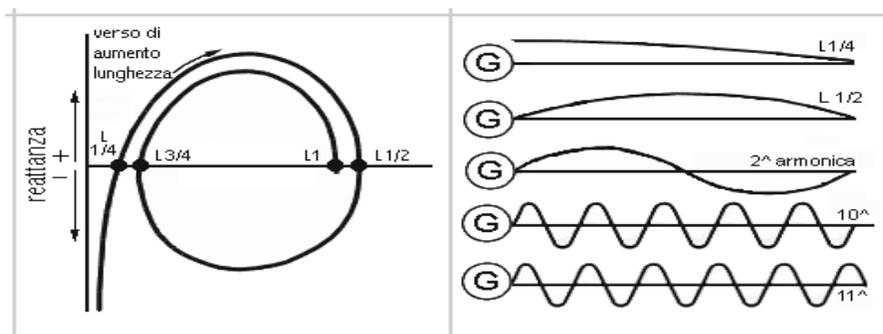
Un dipolo risonante in terza armonica, rispetto al dipolo semplice, guadagna di circa 3 dB ed ha un'impedenza di ingresso di circa 90Ω , variabile con l'altezza dal suolo ed adattabile mediante stub (vedi il capitolo "Adattamenti di impedenza"). Questo tipo di radiatore può essere, se opportunamente curata l'impedenza d'ingresso (che varia naturalmente a seconda della frequenza), un ottimo escamotage per utilizzare un unico sistema per diverse bande.

La resistenza d'ingresso nelle antenne risonanti in armonica è bassa quando le mezze lunghezze d'onda sono dispari; è alta, invece, quando sono pari. La Z_{in} dipende anche dal diametro del conduttore: a diametri alti corrisponde un'impedenza di valore più basso, e viceversa.

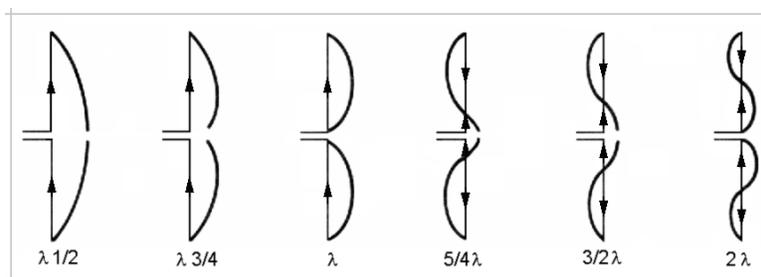


Resistenza d'irradiazione, guadagno, rapporto di potenza e angolo di un dipolo armonico.

Rispetto al dipolo a mezz'onda, nei radiatori armonici le variazioni di frequenza modificano l'impedenza più rapidamente. La fase della corrente riflessa varia maggiormente e l'introduzione di reattanza X_c o X_l è più repentina a partire dalla prima armonica, ma poi tali variazioni si attenuano sulle armoniche più alte, sulle sezioni associate alle frequenze più basse. La banda passante è molto più stretta, giacché il Q è molto alto.



Variazione d'impedenza in un dipolo alimentato al centro. La variazione tra armoniche alte vicine è minore che tra quelle vicine basse, ma tra una bassa ed una molto alta è più accentuata.



Sopra: comportamento della corrente in un dipolo $\lambda/2$ e più lungo, alimentato al centro

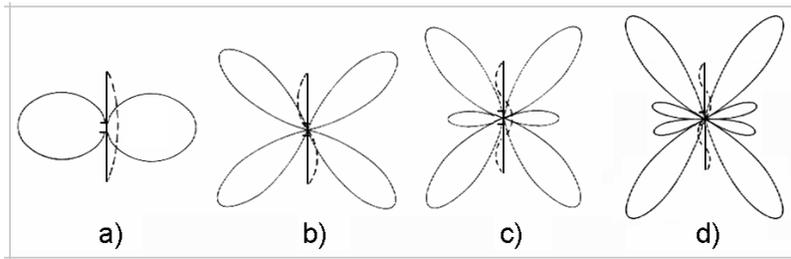
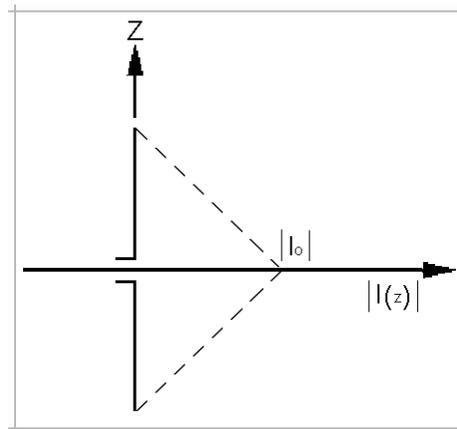


Diagramma di radiazione in campo per dipolo $\lambda/2$ (a), λ (b), $\lambda/4$ (c), $\lambda/2$ (d).

Dipolo corto

Un radiatore può essere anche corto rispetto a $\lambda/2$ - $K < \text{or} \ll 1$.

In questo caso, la distribuzione della corrente è a punta, triangolare rispetto al fronte.



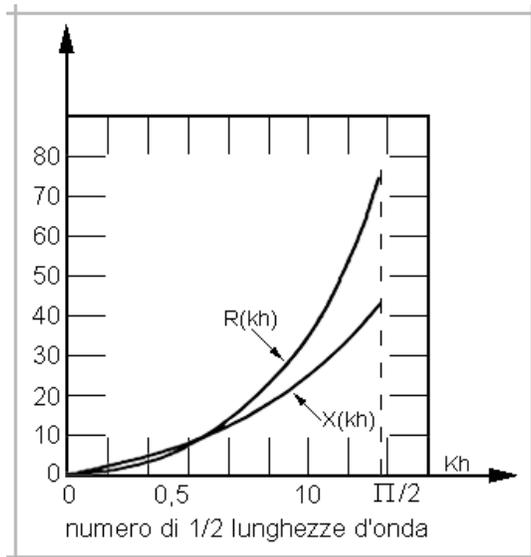
Distribuzione della corrente in un dipolo filiforme più corto di $\lambda/2$. La $I(z)$ è uguale a

$$I_0 \left[1 - \frac{|z|}{L} \right] \text{ dove } L \text{ è metà di } 2L \text{ (} \lambda/4 \text{)}$$

L'impedenza d'ingresso per questo tipo di dipolo, a partire da $\lambda/4$ e ancora più corto, può essere calcolata mediante la seguente formula :

$$Z_{in} = R(K, L) - j \left[120 \left(\ln \frac{2L}{d} - 1 \right) \cot g(K, L) - X(K, L) \right]$$

dove le funzioni $R(K, L)$ e $X(K, L)$ sono riportate nella figura che segue:



In figura, la variazione delle funzioni $R(kL)$ e $X(kL)$. Dalla formula su riportata segue inoltre che:

$$Z_{in} = 20(kL)^2 - j120(kL)^{-1} \left(\log \frac{2L}{d} - 1 \right)$$

Antenna più corta di $\lambda/4$ accorciata da K rispetto alla lunghezza fisica.

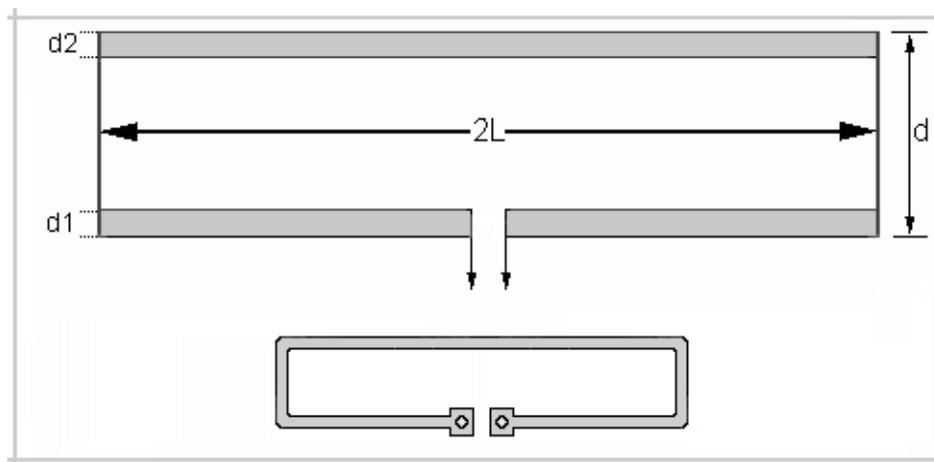
$$Z_{in} = (73.12 + j42.46) \text{ (Antenna } \lambda/2 \text{ (} 2L=\lambda/2 \text{))}.$$

Dipolo ripiegato

Il dipolo ripiegato, dall'inglese "folded dipole", si può descrivere come costituito da due dipoli di lunghezza uguale, in parallelo fra loro con gli estremi uniti.

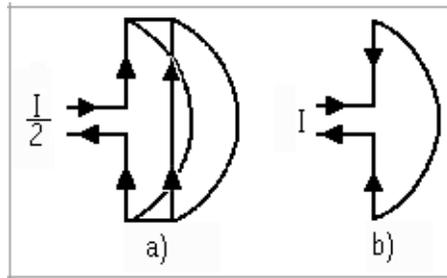
È ripiegato a rettangolo, e due dei quattro lati sono più piccoli del lato radiante e nello stesso tempo molto più piccoli di λ e formano, nell'insieme, una spira molto stretta. La lunghezza totale è di 1λ .

L'alimentazione è al centro di uno dei due lati più lunghi, ed è riferito a terra (bilanciato).



Struttura del dipolo ripiegato. Sotto la conformazione pratica.

Nel caso in cui $2L$ sia uguale a $\lambda/2$, la corrente sul singolo ramo del dipolo ripiegato presenta lo stesso andamento di quella vista in un dipolo semplice.



- a) Distribuzione della corrente in un dipolo lungo 1λ fisico e ripiegato a $\lambda/2$.
 b) Confronto con l'andamento della corrente nel dipolo semplice.

Da un punto di vista dell'irradiazione si ottiene dunque lo stesso diagramma del dipolo semplice a $\lambda/2$, che presenta una corrente di ampiezza doppia rispetto a quella presente sul singolo ramo del dipolo ripiegato.

Si può dire quindi che a parità di potenza il campo irradiato risulta doppio.

Infatti, i contributi delle due correnti presenti nei rami del dipolo ripiegato si sommano in fase, essendo questi ultimi sfasati di poco nello spazio (la distanza tra i rami più lunghi è minima rispetto alla lunghezza d'onda).

Tenendo conto, quindi, che a parità di campo e di potenza irradiata la corrente di alimentazione necessaria è la metà di quella nel dipolo semplice a $\lambda/2$, ne consegue che l'impedenza, vista dalla linea di trasmissione al suo ingresso, è più elevata che nel dipolo semplice ($73,2\Omega$).

Se R_r' è la resistenza di radiazione nel dipolo semplice ed R_r quella nel dipolo ripiegato, allora:

$$P_d = \frac{1}{2} R_r' |I|^2 = \frac{1}{2} R_r \left(\frac{|I|}{2}\right)^2 = R_r = 4R_r'$$

Quindi, la resistenza di radiazione nel dipolo ripiegato è quattro volte quella del dipolo semplice, infatti:

$$R_r = 4R_r' = 73\Omega \times 4 = 292\Omega$$

I vantaggi di questo tipo di dipolo sono diversi, tra cui:

- la maggiore larghezza di banda:
è infatti impiegato per servizi ove occorra una banda passante ampia, come per le trasmissioni broadcast.
- l'altezza efficace:
che è pari a circa $0,637\lambda$, doppia rispetto al il dipolo semplice.
- la robustezza:
da un punto di vista meccanico il dipolo ripiegato è più solido del dipolo semplice.

Variando la sezione d_2 del ramo non alimentato e la distanza d tra gli assi dei due rami, si può alterare il valore della resistenza d'irradiazione del dipolo ripiegato. Nella figura seguente è riportato il valore del fattore di passaggio K dalla R_r del dipolo semplice a quella del dipolo ripiegato, in funzione del rapporto d/λ , per vari valori del rapporto d_2/d_1 .

Un sistema per aumentare la larghezza di banda del dipolo in questione è quello di aumentarne il numero delle sezioni più lunghe.

Nel caso, se l'alimentazione è connessa su una sezione esterna, l'impedenza vale:

$$R_r = 73n^2 \text{ Ohm, dove } n \text{ è il numero delle sezioni aggiunte.}$$

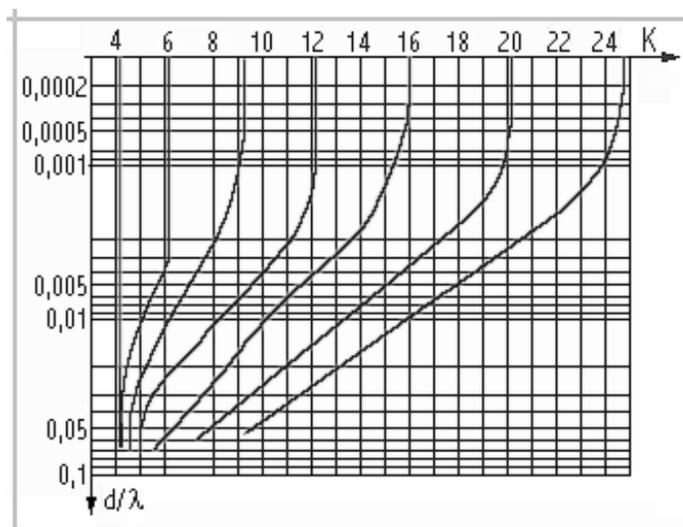
Ma facciamo un esempio di calcolo di dipolo ripiegato, il cui diametro della sezione alimentata "d1" sia 10 mm., e l'altra sezione "d2" 15 mm, spaziate 12 cm., risonante a F 145 MHz:

$$\frac{d2}{d1} = \frac{15}{10} = 1,5 \quad \frac{d}{\lambda} = \frac{0,12}{2,067} = 0,058$$

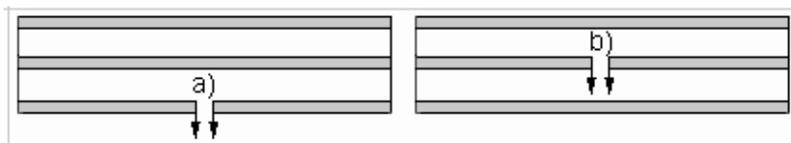
Nel grafico di conversione della resistenza di un dipolo semplice in quella di un dipolo ripiegato in funzione del rapporto d/λ , cerchiamo il valore 0.058 e lo associamo alla curva distinta dal rapporto $d2/d1$, che come abbiamo visto è 1,5.

Sul lato sinistro del grafico troviamo il fattore K corrispondente che è 6,2.

Essendo la resistenza di irradiazione effettiva del dipolo semplice circa 62 ohm, quella del dipolo ripiegato così calcolato sarà 6,2 volte maggiore, ovvero 384 ohm.



Fattore di conversione della resistenza di un dipolo semplice in quella di un dipolo ripiegato in funzione del rapporto d/λ . Le curve sono relative a diversi valori dei parametri $d1/d2$. ($d1/d2 = 1 - 1,5 - 2 - 2,5 - 3 - 3,5 - 4$).



In figura due versioni di dipolo con terzo elemento. In a) con alimentazione su uno degli elementi esterni, e l'impedenza d'ingresso è R_r 630 ohm. In b) l'alimentazione è sull'elemento centrale, e la R_r è di 900 ohm.

Questo tipo di configurazione è detto "a più rami".

Dipolo caricato

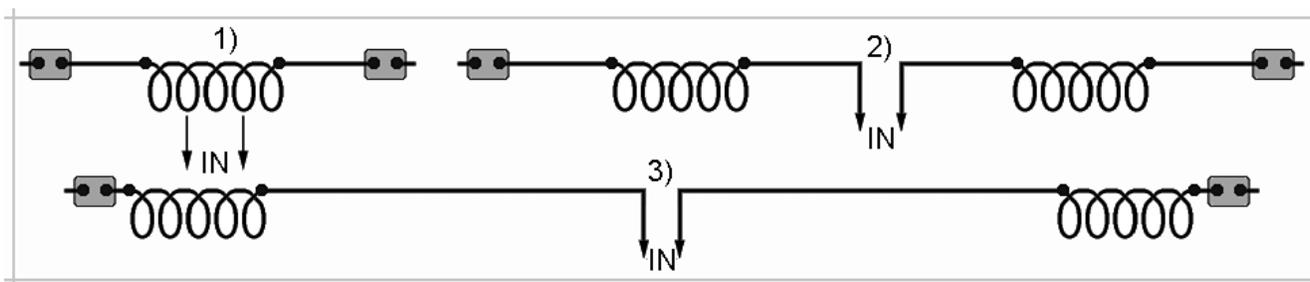
Quando si voglia accorciare un dipolo, per renderlo comunque risonante alla frequenza di trasmissione, in serie ai due semidipoli si inseriscono delle bobine opportunamente calcolate, al fine di compensare la reattanza X_c intervenuta, con una X_l . Le bobine si definiscono **cariche**.

Quanto più corte saranno le parti lineari, tanto più lunghe dovranno essere le cariche.

Quanto più la parte lineare sarà corta, tanto minore sarà l'efficienza del dipolo e nello stesso tempo, essendo il Q molto elevato, la banda passante sarà stretta.

Questo metodo introduce una resistenza di perdita (R_d), il cui valore dipende dalla bontà di realizzazione della carica di compensazione e dalla sua posizione lungo il dipolo.

Per minimizzare tali perdite, è preferibile collocare le induttanze alle due estremità, ed in questo caso le bobine dovranno essere un po' più lunghe, ma generalmente si preferisce posizionarla al centro, per comodità meccanica.



In figura, tre sistemi di carica nei dipoli: centrale, a metà di ogni braccio e agli estremi.

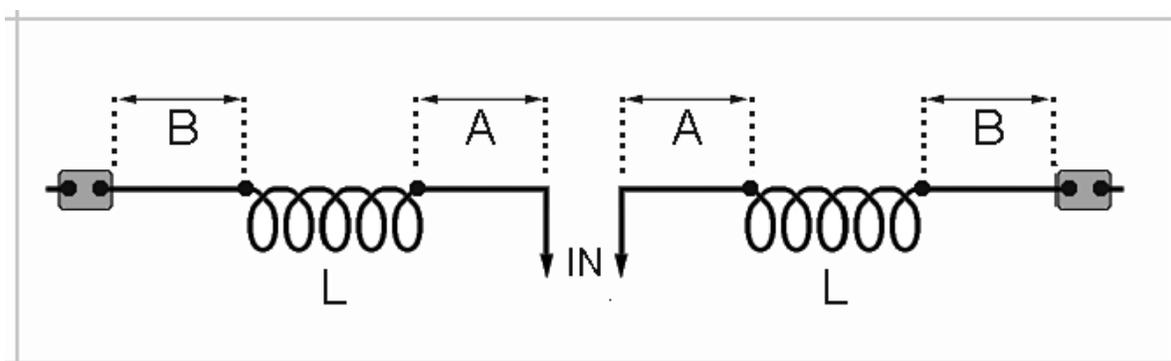
Il valore d'induttanza, per la compensazione della capacità, posto in una certa posizione lungo le due sezioni del dipolo, è deducibile dalla formula: $L = Z / 2\pi F$ dove Z è l'impedenza della bobina.

Dal grafico che segue è possibile dedurre il valore d'impedenza della bobina, a seconda del punto in cui va situata lungo il dipolo e della percentuale di lunghezza del conduttore rispetto alla dimensione naturale.

Facciamo un esempio.

Per costruire un dipolo caricato sulla banda dei 40 metri, riduciamo la parte lineare a soli 10 metri invece che 20 m.

Si decide di posizionare le due bobine, una per braccio, al centro del radiatore, ovvero al centro di ogni lato, come nella figura che segue:



Dipolo caricato. Indicazione delle quote.

Dal grafico che segue, possiamo dedurre l'impedenza della bobina.

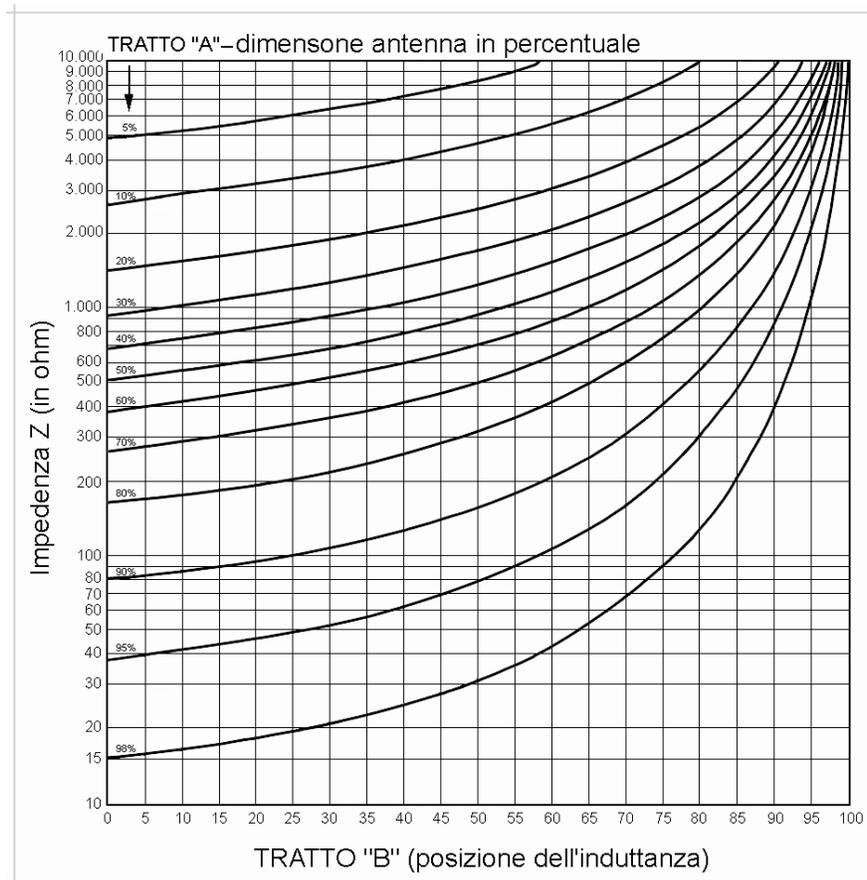


Tavola per determinare il valore approssimato dell'induttanza.

In basso, nei valori del tratto B individuiamo 50 (posizione bobina al centro).
 Da quel punto, tracciamo una linea verticale che taglia la curva relativa al 50 % di riduzione.
 Sul lato sinistro indica che l'impedenza della bobina è di 950 ohm circa.

$$L = \frac{Z}{2\pi f} = \frac{950}{2 \cdot \pi \cdot 3.750} = 40,339 \mu\text{H}$$

Ora, per calcolare quante spire occorrono per l'induttanza necessaria, usiamo la formula:

$$n = \frac{1,6}{rS} \sqrt{L \cdot (9 \cdot a + 10 \cdot b)}$$

dove n è il numero di spire
 L è l'induttanza in μH
 rs è il raggio del supporto

Dovendo realizzare una induttanza di 40,339 μH , su un supporto cilindrico diametro 3 cm. e lungo 32 cm, lasciando uno spazio libero di 10mm ad ogni estremo per il fissaggio, quindi 30 cm. utili, il numero di spire sarà:

$$\frac{1,6}{1,5} \cdot \sqrt{40,339 \cdot (9 \cdot 1,5 + 10 \cdot 30)} = 120 \text{ spire}$$

Il diametro delle spire è dato in relazione allo spazio definito in 300 mm (30cm.):

$$\varnothing \text{ spire} = 300 : 120 = \text{spire da } \varnothing 2,5 \text{ mm.}$$

Questo calcolo vale per spire strette. A seconda della spaziatura tra spire si ci regola di volta in volta.