

## PARAMETRI CARATTERISTICI DELLE ANTENNE

Con alcune considerazioni

Carlo I4VIL

L'antenna è un dispositivo capace di trasferire energia a radiofrequenza da un punto rice-trasmittente allo spazio libero e viceversa.

Nel caso di un conduttore percorso da corrente continua, questo si contorna di un campo magnetico; energia viene sottratta al conduttore per essere immagazzinata nel campo e verrà restituita al cessare della corrente nel conduttore.

Se il conduttore è percorso da corrente alternata, energia viene alternativamente sottratta al conduttore per creare il campo (nella parte di periodo  $T$  dove la corrente è crescente) e restituita al conduttore stesso (quando la corrente decresce). Questo campo di induzione non sottrae, quindi, in media, energia al conduttore e in qualunque punto del filo si misura lo stesso valore di corrente.

Aumentando la lunghezza del conduttore un po' di energia sfugge dal conduttore stesso sotto forma di onda elettromagnetica.

Se avessimo un conduttore lungo molte lunghezze d'onda noteremmo che la corrente decresce regolarmente allontanandoci dal punto di alimentazione.

Se la lunghezza del filo è molto grande, quindi, tutta l'energia immessa nel filo ad una estremità viene irraggiata come onda elettromagnetica; la corrente misurata all'altro estremo del filo è praticamente nulla.

Viene immessa corrente nel filo anche se questo è aperto all'altra estremità! In questo caso non è necessario che il circuito sia chiuso perché scorra corrente!

L'irraggiamento di questo lungo conduttore (long wire) si presenta con lobo molto frastagliato che dipende dalla frequenza di lavoro ed è difficile determinare se in una direzione viene inviata energia oppure no.

Quando le dimensioni del circuito sono intenzionalmente scelte per massimizzare l'energia irraggiata nella direzione desiderata si ha a che fare con una antenna: ciò avviene quando le dimensioni del conduttore sono paragonabili alla lunghezza d'onda. L'antenna, poi, può essere resa *risonante*, con evidenti vantaggi: esempio tipico è il dipolo mezz'onda.

Consideriamo il dipolo mezz'onda alimentato al centro. Applicando una tensione  $v$ , a frequenza  $f$ , la corrente istantanea  $i$  (in fase con la tensione applicata) inizia a percorrere il braccio lungo  $\lambda/4$ .

La corrente che arriva all'estremo aperto del conduttore (solo in parte ridotta dall'irraggiamento) non può, evidentemente, procedere oltre; subisce una riflessione completa e torna indietro verso il generatore. Il punto estremo del conduttore è un punto dove la corrente totale è nulla, ma è anche il luogo dove si ha sovrapposizione di due correnti (diretta e riflessa). Perché queste condizioni siano verificate occorre che la corrente sia totalmente riflessa e subisca uno sfasamento di 180 gradi nella riflessione. Dopo un percorso di ritorno di altri 90 gradi la corrente riflessa si ritrova al generatore. Nel fare questo percorso ha impiegato un certo tempo e quando arriva al centro del dipolo trova il generatore che sta immettendo corrente con la stessa sua fase. La corrente iniziale ha perso, infatti, un intero ciclo di 360 gradi tra andata e ritorno; ha perso 90+90 gradi per l'andata e ritorno nei bracci lunghi  $\lambda/4$  più altri 180 gradi per inversione di fase all'estremità.

L'antenna è *risonante* ad una certa frequenza  $f$  legata alla lunghezza del dipolo; come in una altalena del parco giochi il generatore dà una "spinta" al momento giusto, in fase con la corrente

che sta circolando nel filo.

La tensione di alimentazione è in fase con la corrente e, quindi, l'antenna presenta ai suoi morsetti una impedenza puramente resistiva. Viene quindi trasferita potenza dal generatore all'antenna che viene irradiata sotto forma di onde elettromagnetiche.

Se il dipolo è troppo corto alla frequenza  $f$ , la corrente di ritorno arriva troppo presto (in anticipo) al centro del dipolo dove è posto il generatore; sommandosi alla corrente immessa in quell'istante dal generatore dà luogo ad una corrente totale comunque in anticipo sulla tensione di alimentazione. L'antenna presenta ai morsetti di alimentazione una impedenza con una componente capacitiva.

Se il dipolo, invece, fosse troppo lungo alla frequenza  $f$ , ai morsetti presenterebbe una impedenza con componente induttiva.

L'impedenza presentata ai morsetti, quindi, cambia in funzione della frequenza: per il migliore adattamento al generatore occorre compensare la parte reattiva, magari utilizzando un accordatore d'antenna.

Siccome la corrente nel filo fluisce solo nella direzione del conduttore, anche il campo magnetico variabile e le onde elettromagnetiche che nascono, avranno una direzione legata a quella corrente. Sono, infatti, perpendicolari alla corrente nel dipolo e, per esempio, nessuna onda verrà emessa nella direzione del filo non essendoci alcuna componente di corrente perpendicolare a questa direzione.

Il dipolo mezz'onda presenta, quindi, una certa direttività.

Nella tabella seguente sono indicati alcuni valori della conversione tra fase e lunghezza elettrica. Poiché la relazione è lineare, possono essere facilmente calcolati anche valori intermedi.

FASE		LUNGHEZZA ELETTRICA	FRAZIONI DI PERIODO
gradi	radianti	$\lambda$	T
0	0	0	0
90	$\pi/2$	$\lambda/4$	1/4
180	$\pi$	$\lambda/2$	1/2
270	$3/2 \pi$	$3/4 \lambda$	3/4
360	$2 \pi$	$\lambda$	1

Se il conduttore è immerso in un campo elettromagnetico in esso verrà indotta una f.e.m. che farà circolare una corrente nel sistema ricevente. La stessa antenna può funzionare, quindi, sia da ricevente sia da trasmettente e identiche saranno le caratteristiche di direttività, guadagno, impedenza, etc.

### Caratteristiche generali

Le principali caratteristiche elettriche di un'antenna sono:

- a) Polarizzazione
- b) Direttività
- c) Guadagno
- d) Resistenza di radiazione e impedenza
- e) Larghezza di banda

## a) Polarizzazione

Le onde elettromagnetiche vengono irradiate con una polarizzazione che viene convenzionalmente definita dall'orientamento della componente elettrica del campo.

Questa componente è sempre parallela alla corrente che circola nel conduttore e, spesso ma non sempre, è parallela alla dimensione lineare dominante dell'antenna stessa. Così un' antenna con correnti perpendicolari al terreno trasmette onde e.m. polarizzate verticalmente ed un'antenna con correnti parallele al terreno trasmette onde polarizzate orizzontalmente.

La polarizzazione lineare di un'onda elettromagnetica può sempre essere scomposta in due componenti: parallela e perpendicolare all'antenna lineare di ricezione. L'antenna ricevente rivelerà soltanto la componente parallela.

Si hanno anche antenne con polarizzazione circolare (o, più generalmente, ellittica) ottenuta dalla combinazione di onde emesse da dipoli incrociati con alimentazione a  $90^\circ$  oppure da antenne ad elica.

In questo caso nel definire la polarizzazione occorre anche dire il senso di rotazione (destrorsa o sinistrorsa).

Il verso viene convenzionalmente definito guardando l'antenna emittente ed osservando il senso di rotazione del campo elettrico emesso mentre si propaga avvicinandosi all'osservatore.

Anche la polarizzazione circolare può essere considerata come la sovrapposizione di due onde lineari; quindi il dipolo in ricezione capterà soltanto la componente a se' parallela con una perdita netta di 3 dB.

Per ricevere al meglio un'onda polarizzata circolarmente occorre un'antenna con stessa polarizzazione e stesso senso di rotazione; un' antenna con polarizzazione destrorsa non è adatta, perciò, a ricevere un'onda polarizzata circolare sinistrorsa.

Questa caratteristica può venire utilizzata per limitare l'effetto di interferenza dovuto al raggio riflesso ; nella riflessione (suolo o pareti verticali) si ha un'inversione di senso (perfetta, solo se la superficie è metallica). L'antenna ricevente (polarizzazione circolare di stesso senso dell'antenna trasmittente) riceverà solo l'onda diretta (non è abilitata a ricevere onde circolari di senso opposto, quali quelle che provengono da riflessioni).

Non esiste un'antenna capace di ricevere qualunque tipo di polarizzazione. Vediamo ,infatti, che per ogni tipo di antenna si può definire un fattore di perdita per polarizzazione K che va da 0 a 1 (tra parentesi le attenuazioni in dB).

POLARIZZAZIONE ONDA E.M.	POLARIZZAZIONE ANTENNA			
	Lineare orizzontale	Lineare verticale	Circolare destra	Circolare sinistra
Lineare oriz.	K=1 (0)	K=0 ( $\infty$ )	K=0.5 (3)	K=0.5 (3)
Lineare vert.	K=0 ( $\infty$ )	K=1 (0)	K=0.5 (3)	K=0.5 (3)
Circolare dx	K=0.5 (3)	K=0.5 (3)	K=1 (0)	K=0 ( $\infty$ )
Circolare sx	K=0.5 (3)	K=0.5 (3)	K=0 ( $\infty$ )	K=1 (0)

Combinando tra loro antenne di diversa polarizzazione si può cambiare la polarizzazione totale del sistema; per esempio, con due antenne lineari (una orizzontale e l'altra verticale) si può costituire un sistema per polarizzazione circolare; oppure con due antenne ad elica con polarizzazione circolare dx e sx si può costituire un sistema con

polarizzazione lineare. In ogni caso qualche tipo di polarizzazione rimane escluso.

Per ricevere qualunque tipo di polarizzazione occorrono due antenne (di opposta polarizzazione), ma anche due ricevitori (ricezione in diversità per polarizzazione).

## b) direttività

La direttività  $D$  è il rapporto tra l'intensità di radiazione  $U_m$  nella direzione di max. radiazione e l'intensità di radiazione  $U_0$  mediata su  $4\pi$  steradiani (intensità di radiazione di sorgente isotropa a pari potenza).

$$D = \frac{U_m}{U_0} = \frac{4\pi}{W} \cdot U_m \quad \text{dove } W = \text{potenza totale irradiata.}$$

La direttività non tiene conto del rendimento, delle perdite, ecc.

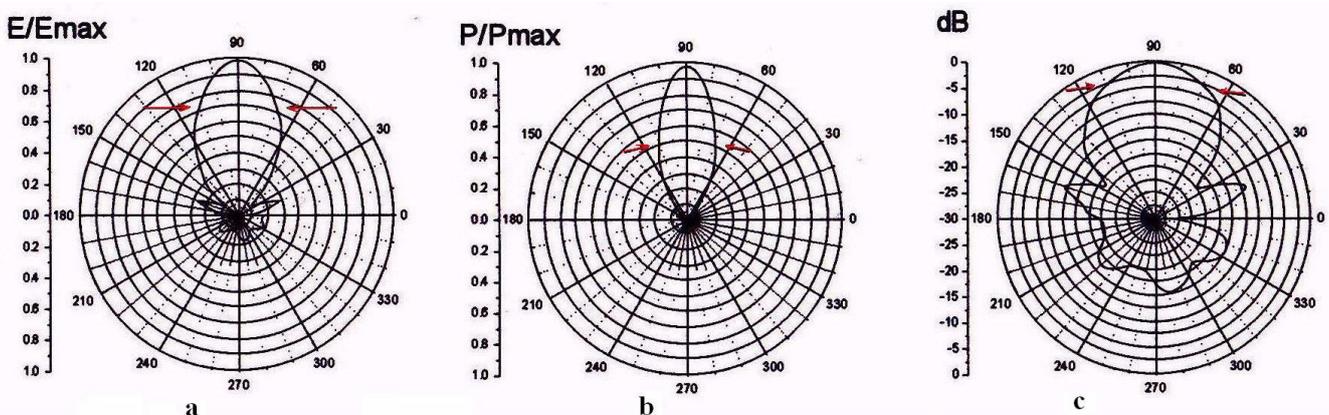
I diagrammi di radiazione orizzontale e verticale permettono di conoscere le intensità e le direzioni di massimo irraggiamento dell'antenna, oltre, evidentemente, alla larghezza del fascio a  $-3$  dB, e al rapporto fronte/retro, valori che normalmente sono indicati anche nei data sheets. Quando si osservano tali diagrammi occorre ricordarsi, però, che sono diagrammi bidimensionali che non permettono, quindi, di avere una visione completa. Il diagramma di radiazione orizzontale, per esempio, mostra l'intensità del segnale irraggiato dall'antenna per tutti i 360 gradi di azimut, ma solo per altezza zero.

Il diagramma di radiazione verticale, invece, mostra l'intensità dell'irraggiamento dell'antenna per altezza variabile, ma solo nella direzione azimutale di massima radiazione.

E' evidente che solo con un disegno tridimensionale è possibile descrivere completamente l'irraggiamento dell'antenna in tutte le direzioni.

Occorre, inoltre, controllare le grandezze riportate sugli assi dei diagrammi di radiazione.

Osservando frettolosamente i diagrammi seguenti (fig.1) saremmo portati a pensare che il diagramma b si riferisca ad una antenna molto più direttiva delle altre; e nessuno prenderebbe sul serio un'antenna con diagramma di radiazione così goffo come il diagramma c.



**Fig. 1 a,b,c - Diagrammi di radiazione che riportano grandezze diverse di una medesima antenna. Le tre grandezze sono legate tra loro da leggi matematiche che permettono facilmente di passare da una all'altra. I tre diagrammi riportano pertanto le stesse informazioni.**

**Le frecce indicano la larghezza di banda a  $-3$  dB, uguale per i tre diagrammi.**

In realtà sono diverse le grandezze riportate ! Tutti i tre diagrammi si riferiscono alla stessa antenna ! E' facile osservare, infatti, che i punti a -3 dB sono gli stessi e che la larghezza del lobo principale tra i primi minimi è la stessa nei tre diagrammi.

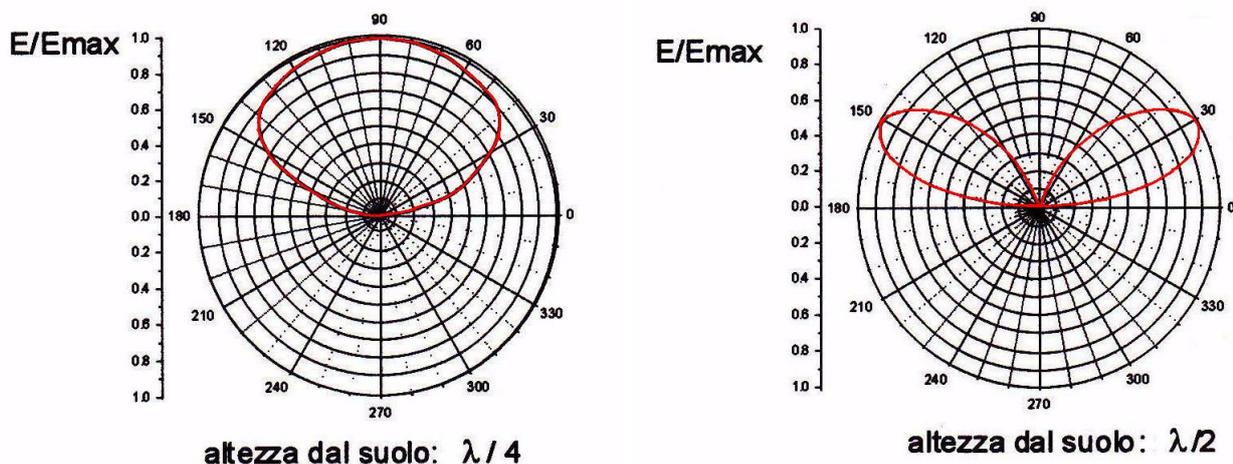
I diagrammi di radiazione possono riportare il valore relativo del campo ( $E/E_{max}$ ), oppure l'intensità relativa ( $I/I_{max}$ ).

I diagrammi di radiazione per intensità di radiazione e per potenza relativa sono identici ( power patterns ).

Possono anche riportare i valori direttamente in dB, nel qual caso bisogna fare attenzione ai limiti della scala: una scala estesa per 30 dB dà maggiori informazioni di una estesa solo per 10 dB (permette di valutare meglio i lobi laterali ed il rapporto fronte/retro), ma fa apparire orribile (ad un osservatore disattento) un'ottima antenna (vedi Fig.1c).

I diagrammi di radiazione orizzontale e verticale permettono di controllare se l'antenna è adatta al tipo di servizio che è chiamata a svolgere. Per antenne HF , dove viene utilizzata la riflessione ionosferica, è importante avere un angolo verticale di massima radiazione tale da permettere il migliore servizio per una data distanza (angoli bassi per lunghe distanze, angoli alti per piccole distanze).

Come si può vedere dai diagrammi seguenti (Fig 2), uno stesso dipolo mezz'onda può avere diagrammi verticali di radiazione molto diversi in dipendenza dal tipo di suolo e, per un suolo "standard", dall'altezza dal suolo. Per altezza  $h=\lambda/4$  si ha irraggiamento ad angoli elevati; ciò facilita i collegamenti a breve distanza ,sempre che la frequenza di lavoro sia inferiore alla frequenza critica per angoli di incidenza così elevati (la radiazione, cioè, non deve forare lo strato ionizzato riflettente).



**Fig. 2 : diagramma di radiazione verticale di dipolo mezz'onda posto ad altezza  $\lambda/4$  e ad altezza  $\lambda/2$  dal suolo buon conduttore.**

Se lo stesso dipolo è posto ad  $h= \lambda/2$  , il lobo si abbassa ed ha un max. a circa  $30^\circ$  sopra l'orizzonte. Ciò lo rende indicato per medie distanze.

In tutti i casi il dipolo ha componenti a bassi angoli ( $<10^\circ$ ) quasi trascurabili; il dipolo, cioè, non è indicato per collegamenti a lunga distanza.

Per frequenze superiori si ha ,in genere, il problema di non sciupare la potenza irraggiata in direzioni sopra l'orizzonte; occorre quindi studiare una composizione di antenne con la direzione di

massima radiazione che sia rivolta verso il basso.

Infatti, da un trasmettitore posto in montagna, per esempio, le onde radio vedono la pianura molto sotto il piano orizzonte; se il dislivello è di  $\Delta h=1000$  m, allora un sito posto in pianura alla distanza di 10 km, per esempio, è visto con un angolo di  $5.7^\circ$  sotto l'orizzonte.

La presenza di lobi laterali minori è sempre indesiderata, ma per alcune applicazioni (satelliti, Moon bounce,...) può avere lo spiacevole effetto di peggiorare il rapporto segnale/rumore dei deboli segnali da ricevere. Per queste applicazioni i lobi laterali devono essere ridotti al minimo possibile.

Il costruttore deve sempre venire ad un compromesso: un'antenna può essere ideata per il massimo rapporto fronte/retro, ma ciò comporta una riduzione del massimo guadagno ottenibile e anche la presenza di più marcati lobi laterali. Oppure la scelta può cadere per il massimo guadagno, nel qual caso avremo a che fare con una piccola banda passante utile e, probabilmente, con un rapporto fronte/retro non dei migliori.

Per la migliore scelta dell'antenna si deve considerare, quindi, per quale tipo di servizio e applicazione verrà impegnata.

### c) gain

Il guadagno (gain) di un'antenna è il rapporto tra la potenza di alimentazione di un'antenna di riferimento e la potenza con cui bisogna alimentare l'antenna in esame per ottenere, nella direzione di massima radiazione, la stessa intensità di segnale.

Generalmente, come antenna di riferimento, si usa il dipolo.

E' un'informazione che occorre sempre indicare quando si parla di guadagno di un'antenna; anzi, occorrerebbe indicare se il guadagno è riferito al dipolo nello spazio libero o ad un dipolo reale posto a  $k$  lunghezze d'onda da terra.

In genere viene espresso in dB con deponente una lettera che indichi il tipo di riferimento ( $dB_i$ ,  $dB_d$ ,  $dB_{ic}$ , ecc.).

Esempio in banda HF : si confrontino sperimentalmente un dipolo  $\lambda/2$  ed una antenna direttiva Yagi di 4 elementi con guadagno  $G=10$   $dB_d$  : la differenza dei guadagni è 10 dB (pari ad un rapporto 10 in potenza). Si potrebbe pensare che i segnali ricevuti ( su percorso a lunga distanza) dovrebbero differire di 10 dB o che il dipolo, se venisse alimentato con potenza 10 volte maggiore della Yagi, dovrebbe produrre al ricevitore la stessa intensità di segnale dell'antenna direttiva. Ciò è clamorosamente falso; specialmente su percorsi a lunga distanza si osserva sperimentalmente che la differenza tra i segnali ricevuti è ben superiore ai 10 dB . Per trovare una semplice spiegazione basta osservare che per raggiungere grandi distanze con il minor numero di salti tra superficie terrestre e ionosfera (ogni riflessione porta a ulteriore attenuazione di percorso) occorre trasmettere con il minor angolo verticale possibile. L'antenna direttiva abbia un diagramma di radiazione verticale del tipo (Fig.3)

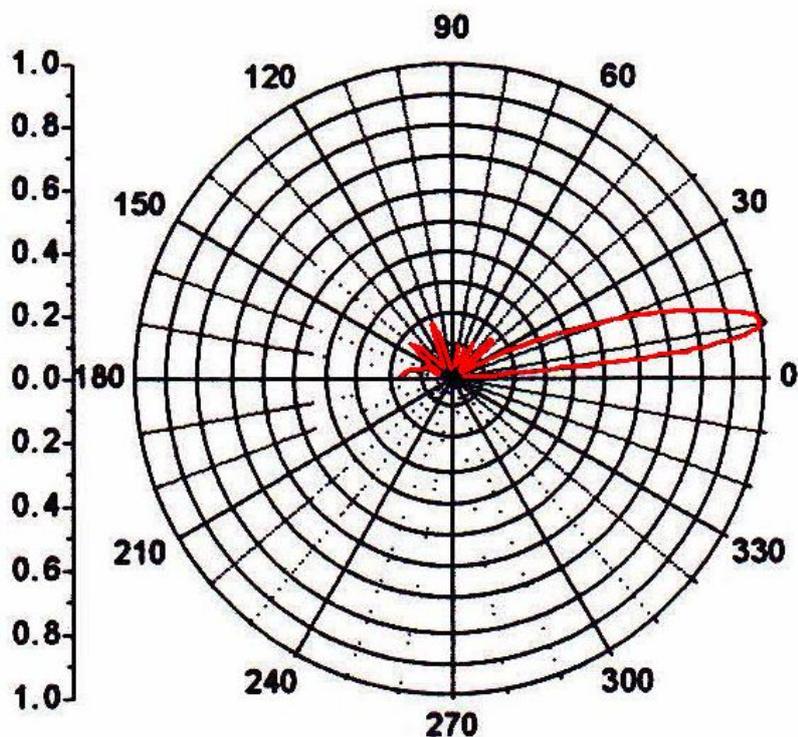


Fig. 3 : diagramma di radiazione verticale di antenna molto direttiva.

Si osserva subito che circa metà potenza viene irraggiata con angoli inferiori a  $10^\circ$ . Il dipolo posto a  $h = \lambda/2$  presenta, invece, per angoli inferiori a  $10^\circ$  un irraggiamento molto ridotto.

Se invece il confronto avvenisse con il dipolo posto a  $h = \lambda/4$  vedremmo che a bassi angoli praticamente nulla viene irraggiata!

La maggior parte della potenza viene irraggiata verso l'alto (la qual cosa può andare bene solo per percorsi a breve distanza, a patto che la frequenza critica verticale abbia un valore più elevato della frequenza di lavoro)

#### d) impedenza e resistenza di radiazione

L'impedenza presentata dall'antenna al punto di alimentazione è puramente resistiva solo per la frequenza di risonanza (Fig.4); l'antenna è però utilizzabile per un intervallo di frequenze che può essere anche molto ampio.

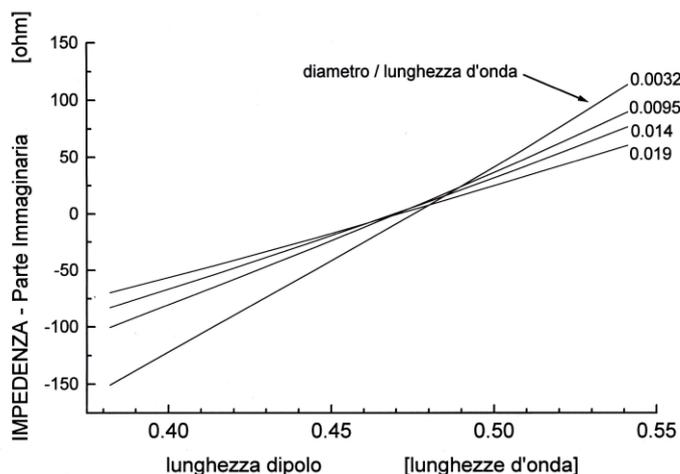
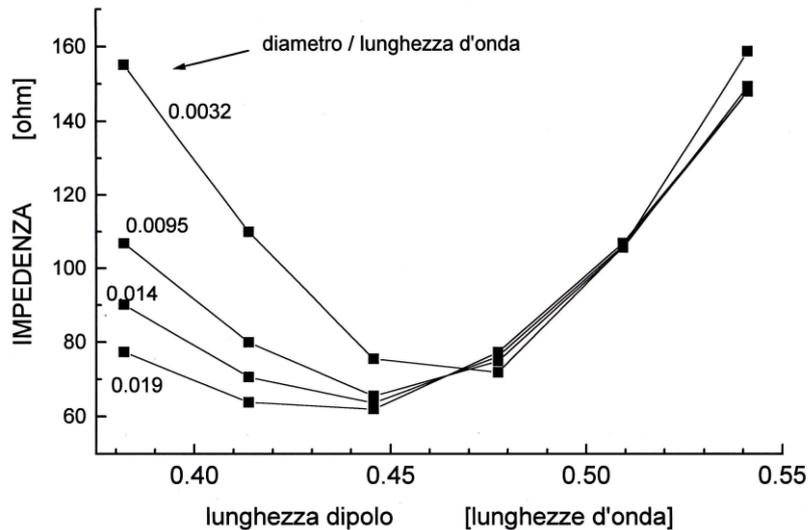


Fig. 4: parte immaginaria dell'impedenza  $Z$  presentata da un dipolo mezz'onda nello spazio libero.

La condizione di risonanza si verifica quando la parte immaginaria di  $Z$  è nulla. Ciò dipende, oltre che dalla lunghezza del dipolo, anche dal diametro del conduttore.

Si può notare che la parte immaginaria dell'impedenza si annulla per valori di lunghezza del dipolo minori di  $\lambda/2$ , in dipendenza dal diametro del conduttore (attorno a  $0.47\lambda - 0.49\lambda$ , per i diametri riportati in fig.4). L'impedenza cambia inoltre con l'altezza da terra e per la presenza di altre strutture metalliche nelle vicinanze.



**Fig. 5 : impedenza  $|Z|$  presentata da dipolo mezz'onda, nello spazio libero, per alcuni valori di diametro del conduttore. Si nota che con diametri grandi la larghezza di banda è più elevata. I punti sono tratti dai lavori di King e Middleton riportati in : R.W.P.King - C.W.Harrison, Antennas and Waves: A Modern Approach, M.I.T. Press.**

Come resistenza di radiazione si intende il valore di una resistenza che inserita al posto dell'antenna dissiperebbe la stessa potenza irradiata dall'antenna, a parità di corrente. Oltre a questa resistenza occorre considerare le resistenze equivalenti dovute alle perdite nei conduttori, alle perdite per cattiva conducibilità del terreno, alle perdite dovute agli assorbimenti di altri oggetti posti nelle vicinanze (alberi, ecc.), alle perdite per effetto corona, alle perdite negli isolatori, ecc., perdite che tutte confluiscono in una resistenza parassita  $R_p$ . La somma della resistenza di radiazione e della resistenza parassita costituisce la resistenza di dissipazione di un'antenna.

Per rendimento di un'antenna si intende il rapporto tra la resistenza di radiazione  $R$  e la resistenza di dissipazione ( $R+R_p$ ).

$$\eta = \frac{R}{R + R_p}$$

In genere  $\eta$  è maggiore di 0.90 (in percentuale:  $>90\%$ ) per le antenne VHF e bande alte HF, ma può facilmente scendere a solo qualche unità per cento per le onde medie (e bande basse HF).

### e) larghezza di banda

Per larghezza di banda si intende l'intervallo di frequenza che l'antenna può irradiare senza alterare sensibilmente le proprie caratteristiche di direttività, guadagno, impedenza.

Può essere utile definire la larghezza di banda come l'intervallo di frequenze nel quale il guadagno dell'antenna si mantiene superiore ad un dato valore garantito dal costruttore. Oppure può essere definita

come l'intervallo di frequenza per il quale il ROS si mantiene sotto un certo valore (per esempio:  $\leq 2$ ).

Il costruttore può anche indicare alcune caratteristiche che sono garantite entro un certo intervallo; è una scelta molto corretta e, in questo caso, per alcune frequenze, potremmo osservare caratteristiche migliori di quelle garantite.

Le antenne a larga banda sono costruite in modo da variare di poco le proprie caratteristiche al variare della frequenza; esempi tipici: discone, log-periodic, etc...

Anche senza ricorrere ad antenne ad hoc, un sensibile aumento della larghezza di banda è ottenibile impiegando conduttori di grande diametro.

Per esempio, nel dipolo mezz'onda nello spazio libero l'impedenza cambia molto lentamente con la frequenza attorno alla risonanza (Fig.5) e presenta valori compresi tra i 60-80 ohm al variare del diametro dell'elemento; questi valori permettono una facile alimentazione con cavo coassiale.

Si nota, inoltre, che l'intervallo nel quale la impedenza  $Z$  si mantiene quasi costante è più ampio quando si usano diametri grandi dell'elemento dipolare.

Per esempio, con un diametro di circa  $1/100$  di lunghezza d'onda la impedenza varia tra circa 65 e 90 ohm nell'intervallo tra  $l=0.40 \lambda$  e  $0.495 \lambda$ ; la larghezza di banda è circa  $f_0 \pm 10\%$  consentendo un ragionevole SWR sulla linea di alimentazione di 75 ohm.