



**Sezione
di
Pisa**

***ARI - CRT Toscana
Corso per aspiranti Radioamatori 2025***

LEZIONE 21

Antenne

Parte seconda

© i5WHC – 24 Settembre 2025



Sezione
di
Pisa

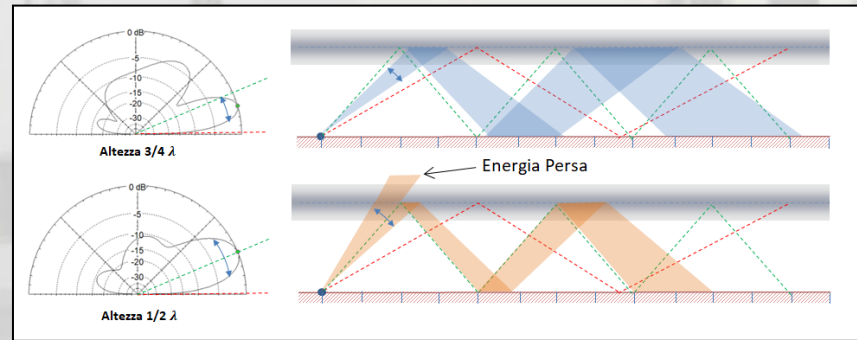
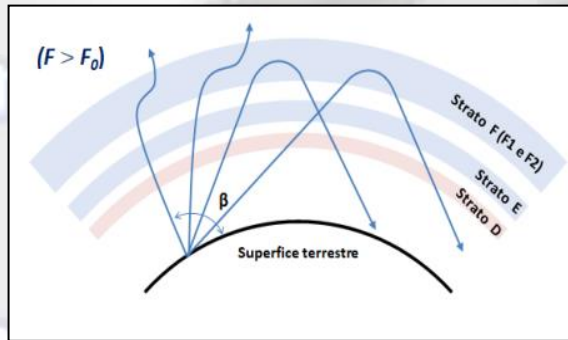
Argomenti della Lezione

- ***Le antenne direttive***
- ***Efficienza di radiazione***
- ***Misure sulle antenne***

Antenne parte seconda

Abbiamo visto nella precedente lezione come la presenza del terreno o di superfici riflettenti possa modificare in modo importante il lobo di radiazione verticale di un'antenna e, come vedremo meglio in questa lezione, in misura minore incidere anche sulla resistenza di radiazione e quindi sull'efficienza di radiazione.

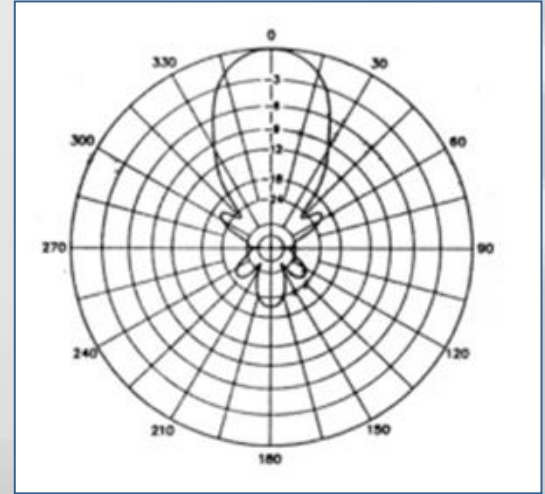
*Dobbiamo sempre tenere conto di questo aspetto perché, come abbiamo visto nella lezione sulla propagazione, ed in particolare nel caso di propagazione ionosferica, **il corretto angolo di radiazione è fondamentale per ottenere le migliori condizioni di riflessione in base alle condizioni di propagazione e alla distanza da coprire.***



Antenne Direttive

Analogamente a quanto abbiamo visto per il lobo di radiazione verticale, una valida strategia per incrementare le possibilità di effettuare un collegamento radio è quella di concentrare nella direzione del nostro corrispondente la maggior quantità di energia che, se irradiata in direzioni diverse, non contribuirebbe alla qualità del collegamento. Di conseguenza la modifica del lobo di radiazione di un'antenna non è solo un effetto indesiderato ma in certe condizioni può risultare molto utile.

*E' il caso delle antenne direttive in cui attraverso meccanismi simili a quelli già visti nel caso della riflessione sul terreno, si può ottenere un lobo di radiazione la cui conformazione è tale da concentrare la potenza irradiata in una specifica direzione. **A parità di potenza applicata all'antenna, l'intensità del campo emesso da un'antenna direttiva nella direzione del «lobo principale» risulta quindi maggiore di quella emessa da un'antenna omnidirezionale.***

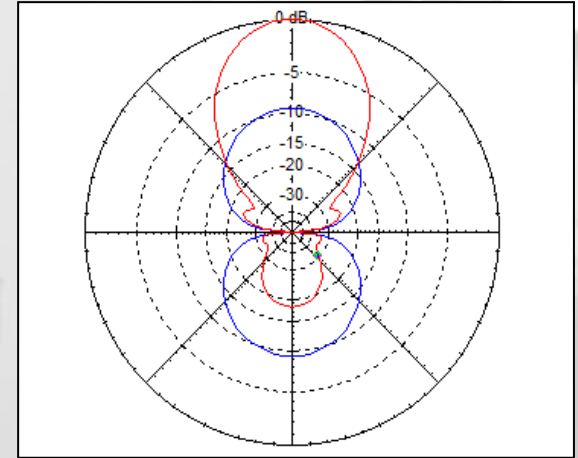


Antenne Direttive

Si definisce infatti «**guadagno**» di un'antenna il rapporto tra l'intensità del campo emesso nella direzione del «**lobo principale**» rispetto all'intensità del campo emesso da un'antenna di riferimento (radiatore isotropico) a parità di potenza applicata

Il guadagno di un'antenna è generalmente espresso in dB (decibel) e più in particolare in **dB_i** se il guadagno è riferito al radiatore isotropico.

Può capitare di trovare valori di guadagno di un'antenna espressi in **dBd** quando il guadagno non è riferito al radiatore isotropico ma è riferito ad un dipolo reale la differenza tra i due valori è pari a **2,1 dB**



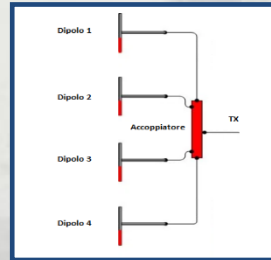
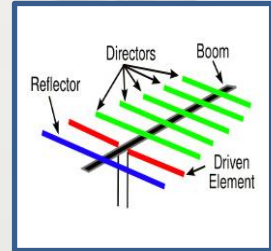
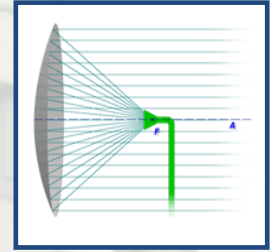
Antenne Direttive

Vediamo adesso in quale modo si può concentrare la potenza irradiata in una specifica direzione ottenendo l'effetto di «direttività» dell'antenna:

Esistono vari metodi per ottenere l'effetto di «direttività» :

- *Porre una superficie riflettente opportunamente sagomata in prossimità dell'elemento radiante (**specchio parabolico**)*
- *Posizionare degli elementi «parassiti» di opportuna lunghezza allineati nella direzione in cui si vuol concentrare il fascio (**antenna Yagi**)*
- *Far «lavorare» assieme più elementi radianti alimentati in fase opportuna (**antenne collineari o array**)*

*E bene però ricordare sempre che **in ambiente reale all'effetto di direttività ottenuto con l'uso di un'antenna direttiva si somma sempre a quello prodotto dall'ambiente circostante (terreno, ecc..)***



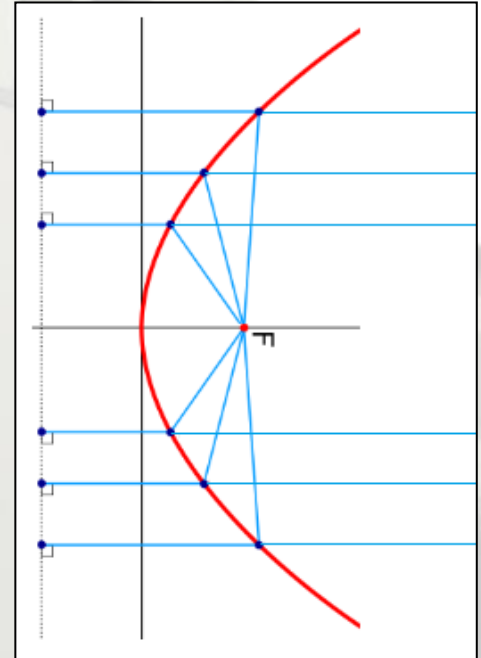
Antenne Direttive

Vediamo adesso nel dettaglio come ciò avviene:

Consideriamo il caso di uno specchio parabolico, dalla matematica sappiamo che una parabola ha due fondamentali caratteristiche geometriche:

- *è il luogo geometrico dei punti equidistanti dal fuoco F e da una retta chiamata direttrice*
- *qualunque punto della superficie della parabola forma angoli uguali con la congiungente al fuoco e una retta parallela all'asse della parabola stessa passante per tale punto.*

Quindi ponendo un elemento radiante nel fuoco di una parabola il campo emesso in TX, che si rifletterà sulla superficie della parabola, genererà un fascio piano parallelo all'asse della parabola stessa concentrando quindi tutta l'energia irradiata in una unica direzione, così come in RX un'onda piana che raggiunge la superficie della parabola sarà concentrata nel fuoco.



Antenne Direttive

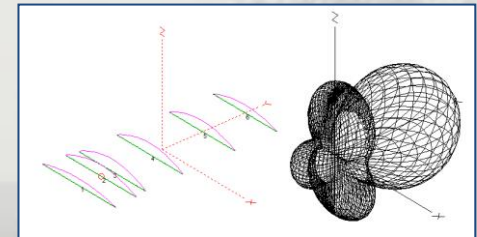
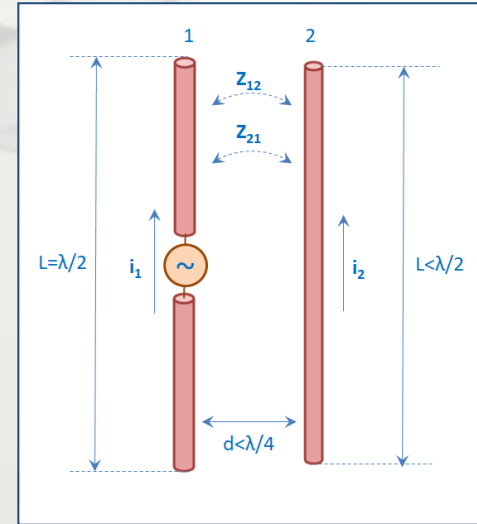
Consideriamo il caso di un dipolo $\lambda/2$ alimentato al centro in prossimità del quale sia posto, all'interno dell'area di «**campo vicino reattivo**», un secondo elemento di dimensioni simili.

Per effetto della mutua induzione che si stabilisce tra i due elementi (analogamente a quanto avviene tra i due avvolgimenti di un trasformatore) la corrente I_1 che circola nell'elemento 1 darà origine ad una corrente I_2 nell'elemento 2, di conseguenza entrambi gli elementi irradieranno un campo elettromagnetico.

In funzione della differenza di fase tra le due correnti e della distanza tra i due elementi i due campi potranno sommarsi o sottrarsi a seconda della direzione in cui si propagano.

Dimensionando opportunamente distanza e dimensioni dell'elemento 2 (radiatore passivo) è quindi possibile predeterminare la differenza di fase tra le due correnti e di conseguenza la direzione in cui si ha la massima radiazione.

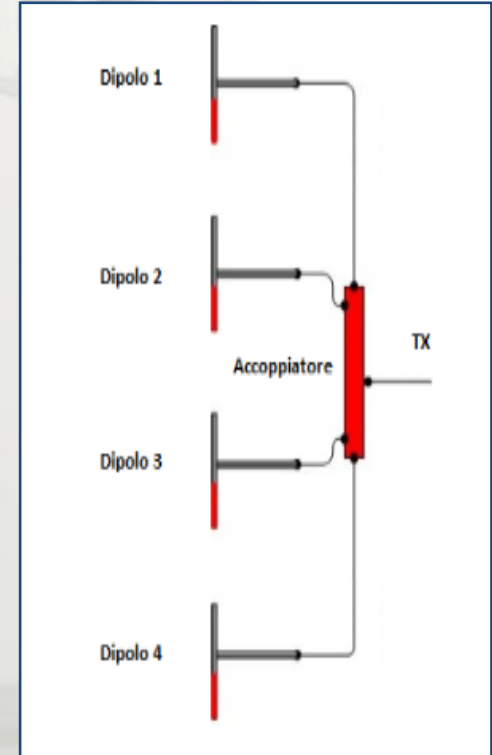
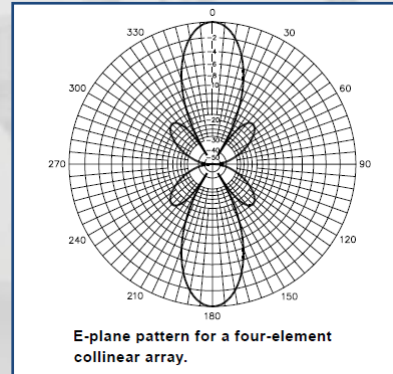
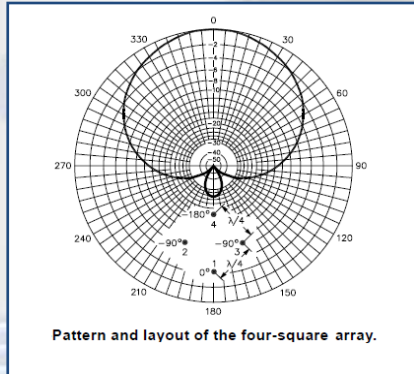
Questo è il principio su cui si basa il funzionamento di un'antenna YAGI-UDA (dal nome dei suoi inventori Hidetsugu Yagi e Shintaro Uda,)



Antenne Direttive

Analogo effetto di «direttività» può essere ottenuto combinando opportunamente le fasi dei campi emessi da una cortina di antenne (Array).

In funzione della posizione di ciascun elemento radiante e della fase con cui sono alimentati i singoli elementi (attraverso l'impiego di un dispositivo di accoppiamento) è possibile determinare la direzione in cui i singoli fasci emessi da ciascun elemento radiante andranno a sommarsi, appartengono a questa tipologia di antenne anche le Log-Periodic



Antenne Direttive

Legato al concetto di «Guadagno» possiamo definire una ulteriore grandezza «ERP» *Effective Radiate Power* (potenza effettivamente irradiata).

Come abbiamo già detto l'intensità del campo elettromagnetico emesso da una antenna direttiva nella direzione del lobo di massima radiazione risulta tanto maggiore quanto più elevato è il suo guadagno.

I valore di ERP è definito come il valore di potenza che dovremmo applicare ad un radiatore isotropico, che ha per definizione guadagno unitario, affinché possa generare un campo della stessa intensità di quello emesso dall'antenna direttiva nella direzione del lobo di massima radiazione :

Guadagno		Attenuazione	
Valore dB	Rapporto in potenza	Valore dB	Rapporto in potenza
0	1	0	1
1	1,26	-1	0,79
3	2	-3	0,5
6	4	-6	0,25
10	10	-10	0,1
20	100	-20	0,01
30	1000	-30	0,001

$$ERP_{(W)} = Ptx_{(W)} * Guadagno$$

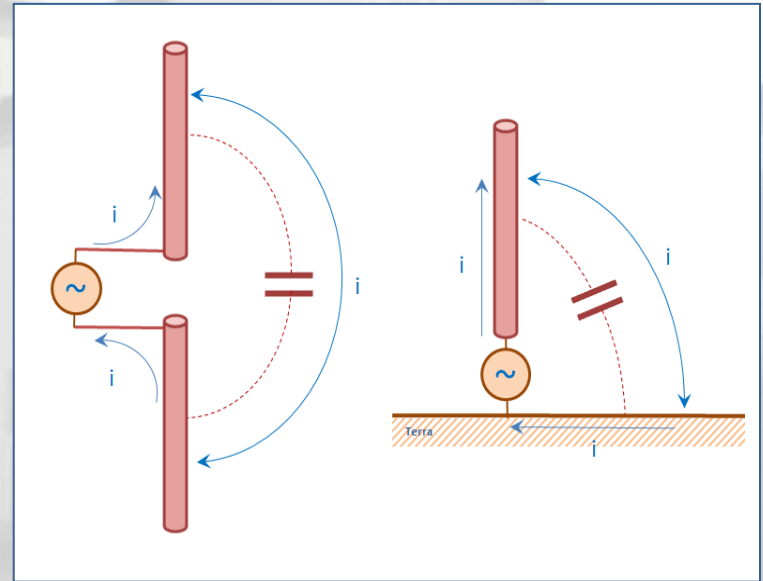
Se il valore del guadagno è espresso in dBi la formula per calcolare il valore di ERP diventa:

$$ERP_{(W)} = Ptx_{(W)} * 10^{(G_{(dB)}/10)}$$

Antenne – efficienza di radiazione

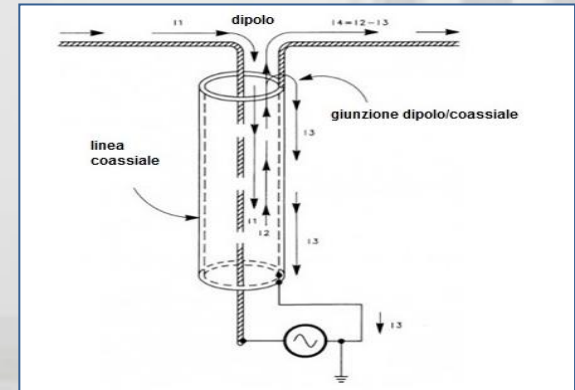
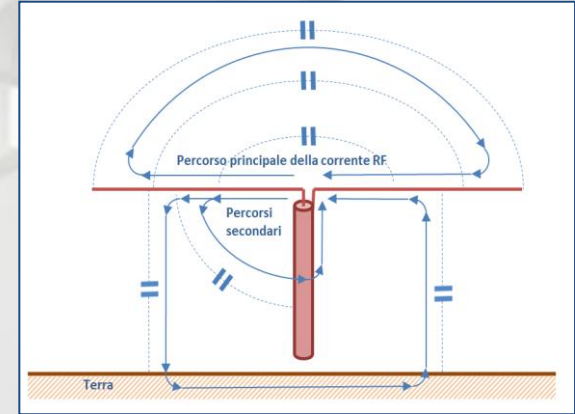
Affinché possa circolare una corrente nell'elemento radiante, che come già detto è il meccanismo che sta alla base del processo di radiazione, **è sempre necessario che le cariche elettriche dispongano di un «percorso» attraverso il quale la corrente stessa possa richiudersi verso il generatore.**

Questo significa che un elemento radiante, in particolare se si tratta di un'antenna «sbilanciata», **deve sempre avere un adeguato «contrappeso» attraverso il quale possa richiudersi la corrente RF verso il generatore**, ma come vedremo, il problema riguarda in parte anche le antenne «bilanciate». Tale aspetto, spesso sottovalutato è invece elemento determinante per il corretto funzionamento e la buona efficienza di un'antenna



Antenne – efficienza di radiazione

*Contrariamente a quanto si potrebbe pensare il problema della corretta richiusura delle correnti RF interessa non solo le antenne «sbilanciate» come una verticale ma anche antenne «bilanciate» come un dipolo in quanto sebbene la maggior parte della corrente RF fluisca tra i due bracci simmetrici esiste comunque la possibilità che una parte della corrente RF possa attraversare anche percorsi diversi a causa degli immancabili mutui accoppiamenti con gli oggetti conduttori circostanti primi fra tutti la calza esterna del cavo di discesa (correnti di modo comune) e il piano di terra. **Questo è il motivo per cui è sempre opportuno prevedere un adeguato blocco RF (choke) nel punto di alimentazione***

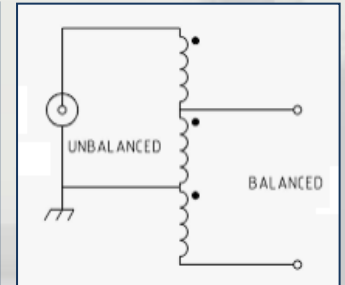
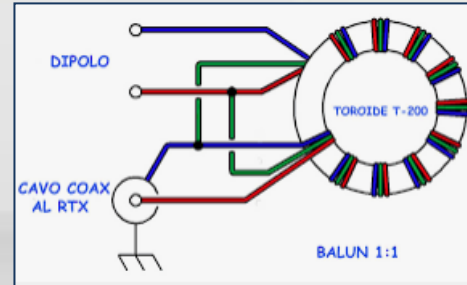


Antenne – Balun

Tranne poche eccezioni tutte le antenne hanno la caratteristica di essere «**bilanciate**» e quindi richiederebbero una linea di alimentazione anch'essa bilanciata ma, come abbiamo visto in una precedente lezione, gli apparati moderni utilizzano uscite sbilanciate per l'impiego dei cavi coassiali.

Per connettere quindi un'antenna bilanciata ad una linea sbilanciata come un cavo coassiale si deve utilizzare un dispositivo di adattamento, tale dispositivo prende il nome di «**BALUN**» (abbreviazione di **Balanced to Unbalanced**).

Vedremo meglio però nella slide successiva come questi dispositivi possono, e in qualche caso devono, svolgere anche ulteriori importanti funzioni.

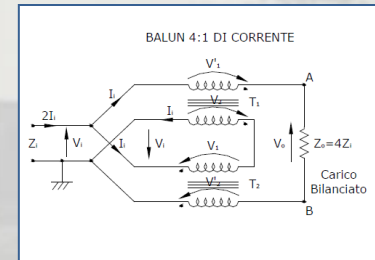
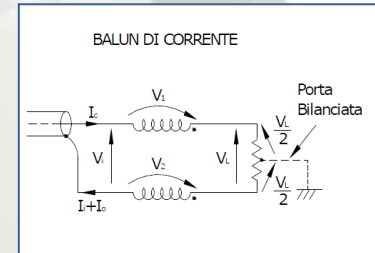


Antenne – Balun

*Il corretto adattamento tra antenna e linea nel punto di alimentazione deve di norma poter rispondere a **tre diverse esigenze** :*

- *Adattare un carico bilanciato (antenna) ad una linea sbilanciata (cavo coax)*
- *Adattare il valore di impedenza dell'antenna a quello della linea di alimentazione qualora fosse diverso*
- *Evitare la possibilità che correnti RF possano percorrere la superficie esterna del cavo coax (correnti di modo comune) dando luogo a RFI*

Molto spesso queste tre diverse funzioni possono essere svolte da un unico dispositivo che prende il nome di «Balun di corrente» o «Guanella Choke»



Antenne – Efficienza di radiazione

A questo punto è lecito porsi una domanda:

In condizioni di perfetto adattamento tutta la potenza elettrica generata dal mio trasmettitore è sempre irradiata sotto forma di campo elettromagnetico dall'antenna ?

La risposta è ovviamente «NO»

O meglio ciò potrebbe avvenire solo in un caso teorico ovvero quando l'antenna fosse posta in un ambiente ideale (spazio libero) privo di interferenze spaziali e l'antenna stessa fosse realizzata con conduttori ideali (privi di perdite).

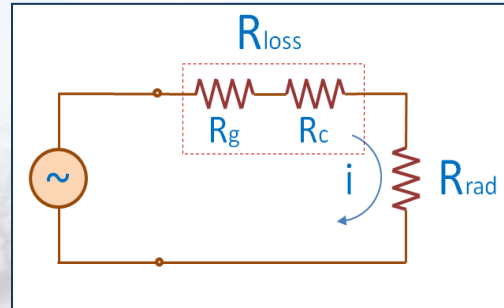
Purtroppo nella realtà non è mai così

Si definisce quindi efficienza di radiazione di un'antenna il rapporto percentuale tra l'effettiva potenza irradiata sotto forma di campo elettromagnetico e la potenza fornita dal trasmettitore al punto di alimentazione:

$$\eta_r = \frac{P_{ir}}{P_{Tx}} \%$$

Antenne – Efficienza di radiazione

Dobbiamo sempre ricordare che nella realtà l'impedenza Z_0 che un'antenna presenta nel punto di alimentazione, che è puramente resistiva solo alla risonanza, è sempre data dalla somma di più componenti :



R_{rad} Resistenza di Radiazione

R_{loss} Resistenza di perdita

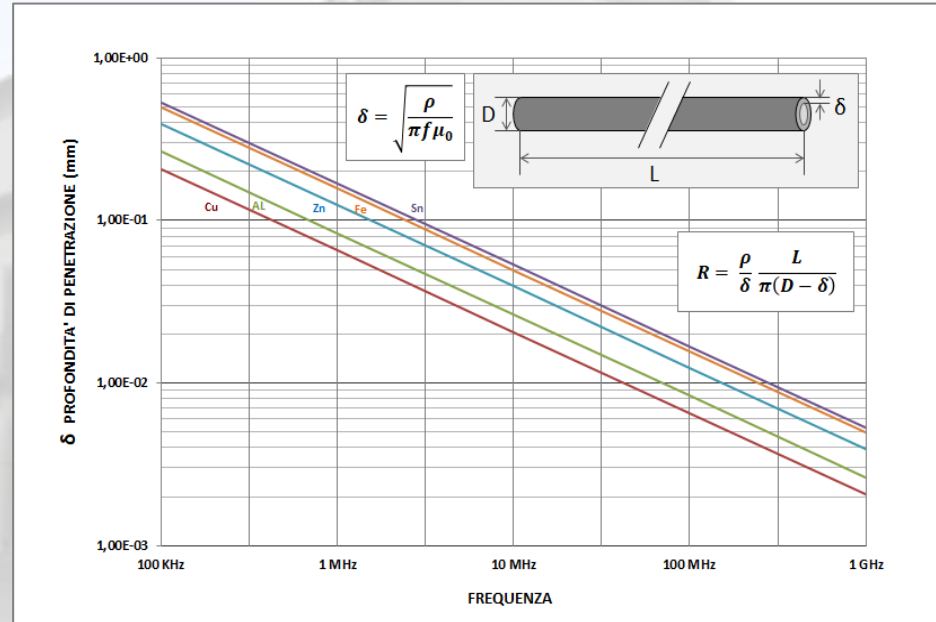
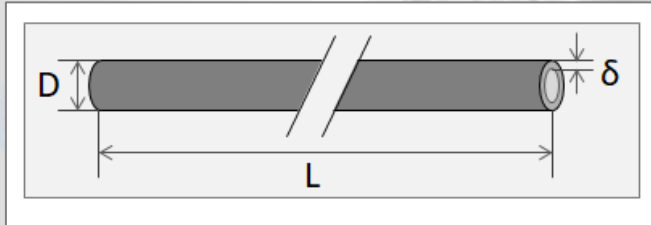
La resistenza di perdita R_{loss} è a sua volta la somma di vari contributi:

- *La potenza dissipata per effetto Joule nella resistenza elettrica R_c dei conduttori che costituiscono l'elemento radiante e dalle perdite nel dielettrico degli isolatori*
- *La perdite nel terreno R_g o in oggetti conduttori circostanti e posti nell'area di «campo vicino» in cui circola la corrente indotta dai campi generati dall'antenna*

Antenne – Efficienza di radiazione

E' bene infatti ricordare come, a causa del «effetto pelle», una corrente RF percorre solo la parte esterna di un conduttore e la profondità di penetrazione δ dipende dalla frequenza e dal materiale con cui è realizzato il conduttore stesso.

Di conseguenza è come se la resistività del conduttore, a parità di sezione, aumentasse all'aumentare della frequenza.



Antenne – Efficienza di radiazione

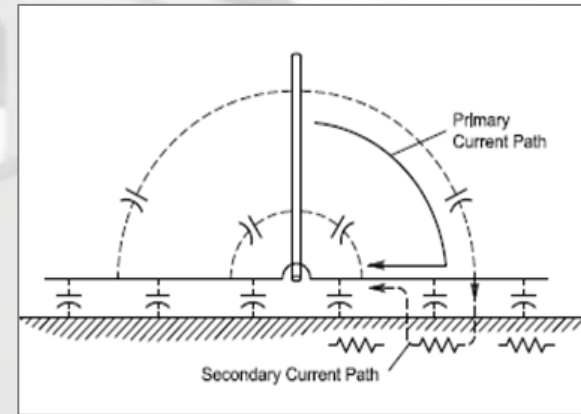
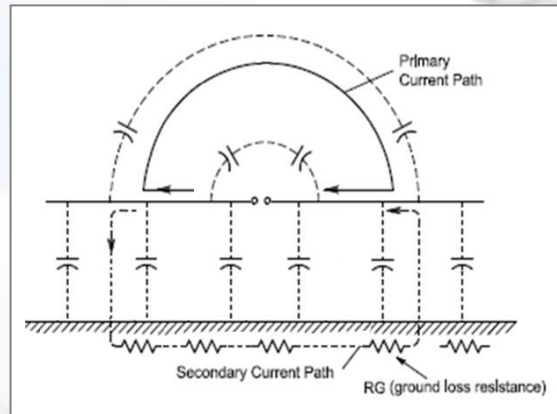
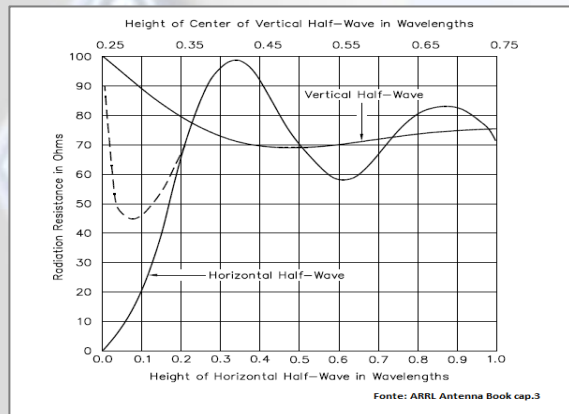
Le perdite dovute a «effetto pelle» sono particolarmente evidenti nel caso di antenne con rapporto di finezza l/d elevato **come le «filari» di elevata lunghezza**.

Affligge meno gli elementi radianti di elevato diametro dove le perdite nell'elemento radiante sono principalmente dovute a problemi di isolamento

A titolo di esempio nella tabella a fianco sono riportati i valori di resistenza di perdita R_c dei conduttori, causata dall'effetto pelle in base alla sezione del conduttore stesso, e che possono presentare i conduttori con cui sia realizzato un dipolo filare per le HF

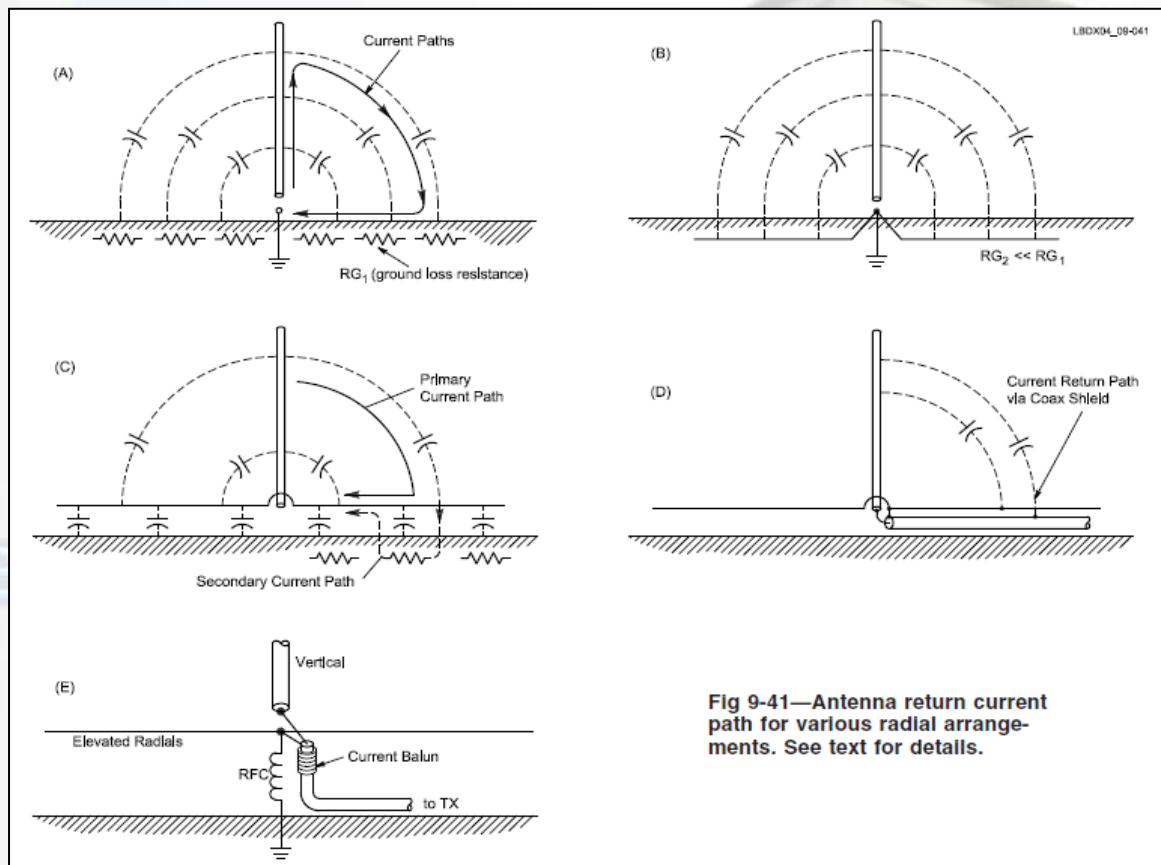
Resistenza di perdita nel conduttore (Ω) per un dipolo $\lambda/2$		Frequenza (MHz)					
		1,8	3,5	7	14	21	28
δ (mm)		0,049	0,035	0,025	0,017	0,014	0,012
Lunghezza (mt.)		80	40	20	10	7,5	5
Diametro Conduttore (mm)	1	9,26	6,36	4,45	3,13	2,86	2,20
	1,5	6,07	4,19	2,94	2,07	1,90	1,46
	2	4,51	3,13	2,20	1,55	1,42	1,09
	2,5	3,59	2,49	1,75	1,24	1,13	0,87

Antenne – Efficienza di radiazione



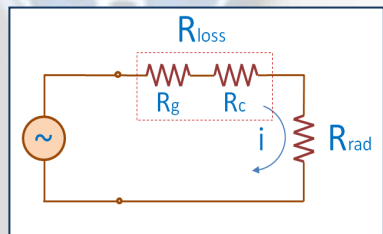
*Le perdite nel terreno dipendono dalle caratteristiche dielettriche del terreno stesso e sono generalmente maggiori in terreni di scarse caratteristiche dielettriche dove le correnti indotte penetrano a maggiore profondità. Le perdite aumentano quando diminuisce l'altezza da terra dell'antenna in rapporto alla sua lunghezza d'onda. Le perdite nel terreno sono molto importanti e, nel caso di un'antenna orizzontale, dipendono essenzialmente dall'altezza a cui è installata e **diventano significative per altezze inferiori a $\lambda/4$** . In caso di antenne verticali, anche se montate a terra, **é sempre e comunque necessario l'uso di un adeguato numero di radiali**.*

Antenne – efficienza di radiazione



Antenne – Efficienza di radiazione

Abbiamo definito «efficienza di radiazione» η_r di un'antenna il rapporto tra la potenza effettivamente irradiata P_{ir} e la potenza rf P_{Tx} erogata dal TX al punto di alimentazione:



$$\eta_r = \frac{P_{ir}}{P_{Tx}} = \frac{I^2 * R_{rad}}{I^2 * Z_o} = \frac{I^2 * R_{rad}}{I^2 * (R_{rad} + R_{Loss})} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{Loss}}$$

Appare qui evidente come l'efficienza di radiazione della nostra antenna sia direttamente proporzionale al rapporto tra il valore della «resistenza di radiazione dell'antenna R_{rad} » e il valore complessivo della «resistenza di perdita R_{loss} ».

Appare altresì evidente come un'antenna con un basso valore di R_{rad} a parità di perdite avrà un'efficienza minore.

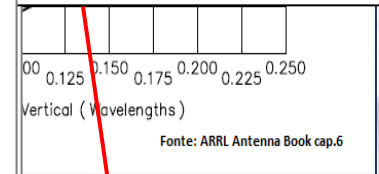
$$ROS = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{Z_0}{Z_L} \text{ (se } Z_L < Z_0 \text{) oppure } \frac{Z_L}{Z_0} \text{ (se } Z_L > Z_0 \text{)}$$

$$\eta_r = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{Loss}}$$

tems

Radials

	60	120
8	11.6	11.6
4	9.1	9.1
2	7.9	6.9
7	6.6	5.2
8	5.6	2.8
2	5.2	0.1



- Caso 1) Dipolo orizzontale F = 7MHz posto a 10m ($\lambda/4$) da terra, alimentato con cavo coax $Z_0 = 50\Omega$ diametro conduttore 1,5mm su terreno di caratteristiche medie
- Caso 2) Dipolo orizzontale F = 3,5 MHz posto a 10m ($\lambda/8$) da terra, alimentato con cavo coax $Z_0 = 50\Omega$ diametro del conduttore 1,5mm su terreno di caratteristiche medie
- Caso 3) Verticale caricata in testa di lunghezza $\lambda/8$, alimentata con cavo coax $Z_0 = 50\Omega$ e posta a terra con 16 radiali $\lambda/8$ interrati, terreno di caratteristiche medie

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
R_{rad}	85 Ω	45 Ω	20 Ω
R_{Loss}	4 Ω	7 Ω	18 Ω
$R_L = R_{rad} + R_{Loss}$	89 Ω	52 Ω	38 Ω
SWR	1,78:1	1,04:1	1,31:1
η_r	95%	86%	52%

Antenne – Efficienza di radiazione

L'analisi dei risultati dei tre casi presi ad esempio evidenzia un importante elemento troppo spesso non correttamente considerato:

«Un buon valore di SWR fornisce una indicazione attendibile circa il corretto adattamento di impedenza nel punto di alimentazione ma non può dare indicazioni attendibili circa l'efficienza di radiazione dell'antenna stessa»



Everyone has heard comments like "My antenna really gets out because the SWR does not rise above 1.5:1 at the band edges." Low SWR is no indication at all of good antenna performance! It is often the contrary. The "antenna" with the best SWR is a quality dummy load. Antennas using dummy resistors as part of loading devices come next (see 603). The TTD (Tilted Terminated Folded Dipole)



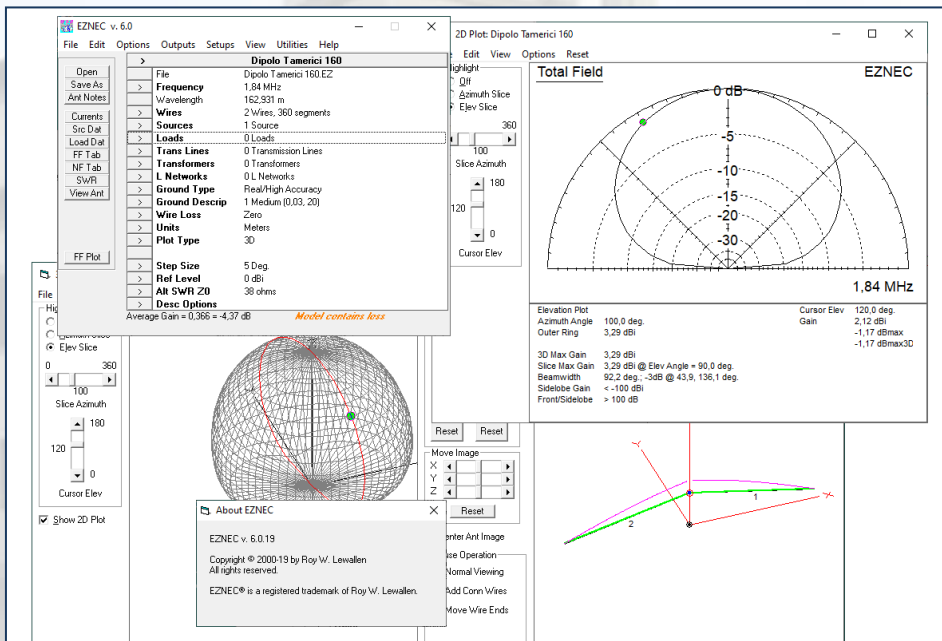
Antenna Artificiale o Carico Fittizio

.....scriveva il compianto John Devoldere, ON4UN nel suo libro Low-Band DXing : "The Antenna with best SWR is a quality dummy load", "**L'antenna con il miglior valore di SWR è un buon carico fittizio!**" una provocazione che però rende bene il concetto che un basso valore di SWR non è sempre garanzia dell'efficienza di radiazione dell'antenna.

Sempre John aggiunge che la probabile spiegazione di questa errata percezione per la quale SWR sia un criterio di valutazione dell'efficienza di un'antenna deriva dalla semplicità con cui tale valore può essere misurato rispetto alla notevole difficoltà che si presenta invece nel poter valutare strumentalmente l'effettiva efficienza di radiazione di un'antenna....

Antenne – Misure sulle antenne

Oggi chi vuole dedicarsi all'autocostruzione, rispetto al passato, dispone a buon mercato di molti strumenti sia HW che SW di ausilio al corretto dimensionamento e alla valutazione preliminare delle prestazioni di un'antenna. E' però necessario saper interpretare correttamente i molti dati che tali strumenti ci mettono a disposizione.



Antenne – Misure sulle antenne

Proviamo a fare qualche esempio pratico:

Misure di Impedenza con Analizzatore d'antenna:

*Quando si effettuano misure di impedenza con l'analizzatore d'antenna dobbiamo sempre ricordare che la presenza di una linea (cavo coax) tra lo strumento e l'antenna potrebbe portare a **letture non del tutto attendibili** in quanto come abbiamo visto nella lezione dedicata alle linee di trasmissione se la linea non è terminata esattamente sulla propria impedenza caratteristica i valori che vado a leggere sullo strumento possono essere diversi da quelli reali che presenta l'antenna **tranne il caso in cui la linea abbia una lunghezza elettrica pari ad esattamente un multiplo intero di $\lambda/2$** .*

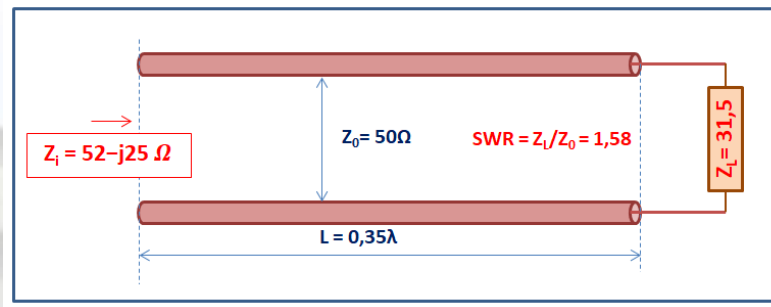
Misure con VNA:

*Lo stesso problema si può presentare anche quando effettuiamo delle misure con un VNA, un errore molto comune è quello di considerare l'antenna «risonante» sulla frequenza per la quale lo strumento ci indica un valore di impedenza privo di componenti reattive (puramente resistivo) **in realtà se siamo in presenza di SWR (anche con valori bassi) l'impedenza misurata al termine della discesa può presentare componenti reattive anche se l'antenna è perfettamente risonante.** IL vantaggio di utilizzare un VNA è che settando opportunamente lo strumento questo può tener conto della lunghezza della linea e fornire misure opportunamente corrette come se lo stesso fosse posto direttamente sull'antenna.*

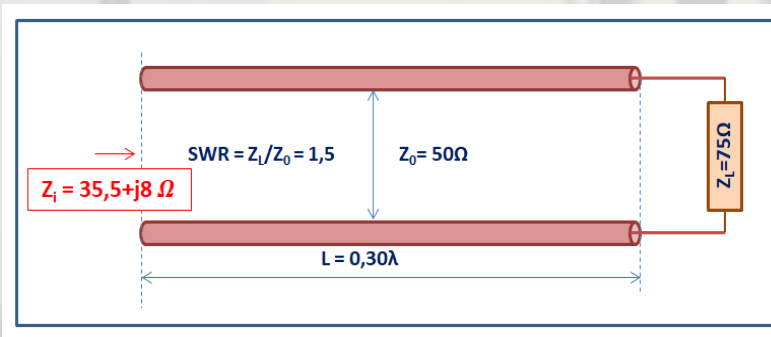
Antenne – Misure sulle antenne

Proviamo a fare qualche esempio pratico:

Nel primo caso stiamo effettuando una misura di impedenza su un'antenna che presenta un **SWR=1,58** e lo strumento è posto al termine di una linea che ha impedenza **$Z_0=50\Omega$** ed è lunga **$0,35\lambda$** , alla risonanza lo strumento misura un'impedenza di **$Z_i=52-j25\Omega$** mentre in realtà l'effettiva impedenza dell'antenna è **$Z_L=31,5\Omega$** puramente resistivi.



Nel secondo caso abbiamo un'antenna con impedenza alla risonanza **$Z_L=75\Omega$** alimentata con una linea **$Z_0=50\Omega$** e lunga **$0,3\lambda$** , che determina un valore di **SWR=1,5** se colleghiamo lo strumento alla linea e effettuiamo la misura leggeremo un valore di impedenza **$Z_i=35,5+j8\Omega$** valore decisamente diverso dalla reale impedenza dell'antenna che è **75Ω**



Antenne

Sulla base di quanto abbiamo visto fino a qui è quindi possibile affermare che le prestazioni di un'antenna dipendono da una molteplicità di fattori.

Vi sarebbero per la verità anche altri aspetti da valutare ma che esulano dallo scopo di questo corso, vorrei però comunque farne un accenno.

Per il DX in HF ed in particolare sulle bande più basse, vi è una sostanziale differenza tra le caratteristiche ottimali di un sistema d'antenna in TX rispetto ad un sistema d'antenna ottimale in RX

In TX la condizione ottimale è quella che permette di concentrare la maggiore quantità di energia nella fascia ottimale dell'angolo di radiazione (0° - 20°)

In RX l'esigenza è invece quella di ottenere il migliore rapporto segnale/rumore

Non sempre questi due aspetti coincidono

Antenne

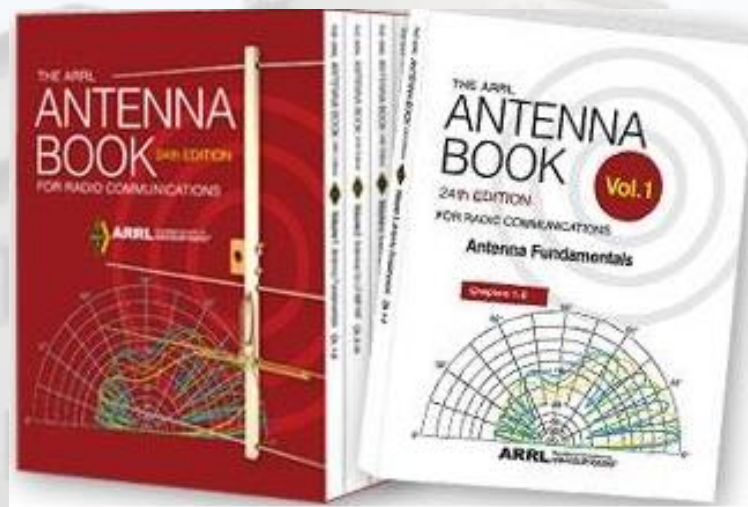
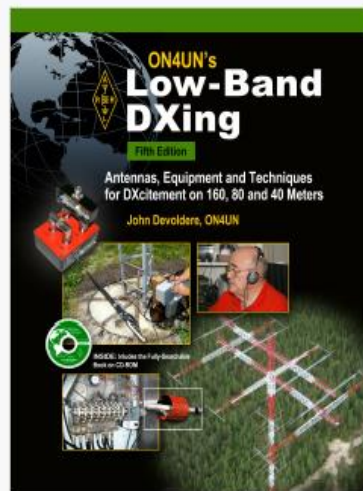
*Come abbiamo visto in TX è possibile aumentare la quantità di energia irradiata in una certa direzione modificando il lobo di radiazione possiamo quindi affermare che **un'antenna con un maggiore guadagno produrrà sicuramente un incremento di energia irradiata.***

E' noto che in HF e soprattutto sulle bande più basse il rumore prevalente è quello «esterno», rumore che sovrasta il livello di rumore interno del ricevitore fino ad oltre 50-60dB di conseguenza in RX l'aumento generalizzato di guadagno dell'antenna porterebbe ad un incremento sia del segnale utile ma anche del rumore in ingresso senza che questo porti un apprezzabile miglioramento del rapporto S/N

*L'unica strategia che può portare ad un incremento del S/N è quella di disporre di un sistema di antenna in cui la conformazione del lobo di radiazione sia tale da presentare un massimo nella direzione del segnale utile e una marcata attenuazione in tutte le altre direzioni **indipendentemente dal guadagno effettivo dell'antenna stessa.***

Antenne

Per concludere consiglio a chi fosse interessato ad approfondire l'argomento «Antenne» la lettura di due ottimi testi editi da ARRL:





Sezione
di
Pisa

***Grazie
per l'attenzione***

www.aripisa.it