



Sezione
di
Pisa

ARI - CRT Toscana
Corso per aspiranti Radioamatori 2025

LEZIONE 20

Antenne

Parte prima

© i5WHC – 17 Settembre 2025



Sezione
di
Pisa

Argomenti della Lezione

- ***Elementi fondamentali***
- ***Antenne caricate e multibanda***
- ***Il lobo di radiazione***

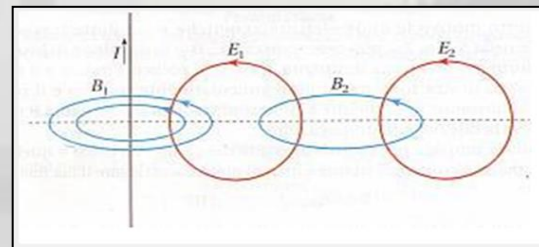
Antenne – elementi fondamentali

Per iniziare un breve richiamo sui «fondamentali»:

Che cosa è l'antenna?

*E' un «**trasduttore**» ovvero un dispositivo che ha la funzione di trasferire **l'energia elettrica** ad alta frequenza, generata dal TX e che percorre la linea di trasmissione, in un **campo elettromagnetico** che si propaga nello spazio circostante e viceversa.*

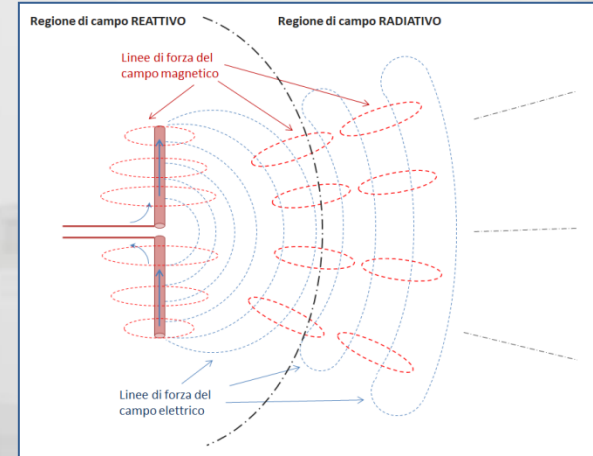
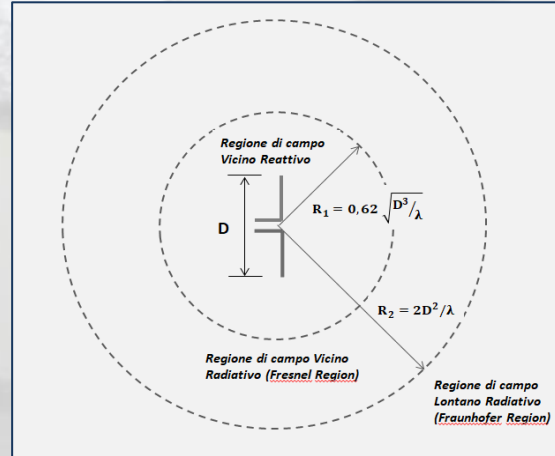
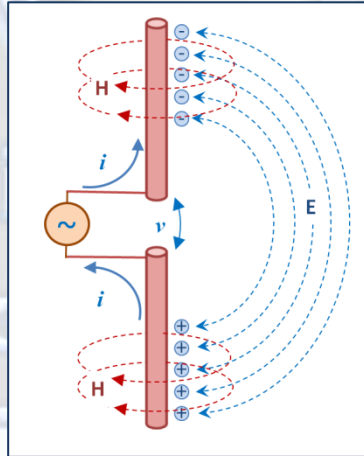
*E' noto infatti che un conduttore percorso da una corrente variabile genera nel suo intorno un **campo elettromagnetico** che si propaga nello spazio circostante così come è noto che un conduttore immerso in un campo elettromagnetico è sede di una **corrente indotta** proporzionale all'intensità del campo stesso.*



Antenne – elementi fondamentali

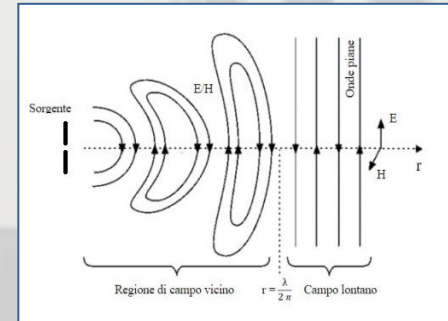
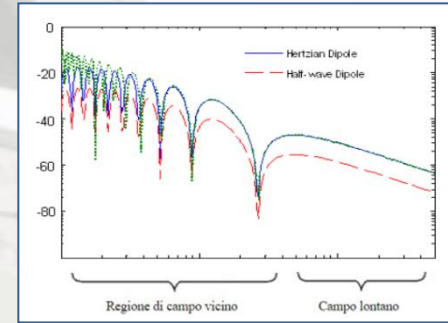
Analogamente a quanto avviene in ogni conduttore, è la corrente RF che percorre l'elemento radiante, a generare il campo elettromagnetico che si propaga linearmente nello spazio circostante, Il meccanismo con cui ciò avviene è estremamente complesso e la sua rappresentazione matematica è data dalle «equazioni di Maxwell».

*A noi interessa solo sapere che **esistono 3 diverse aree in funzione della distanza dall'antenna, in cui il comportamento dei campi è diverso***



Antenne – elementi fondamentali

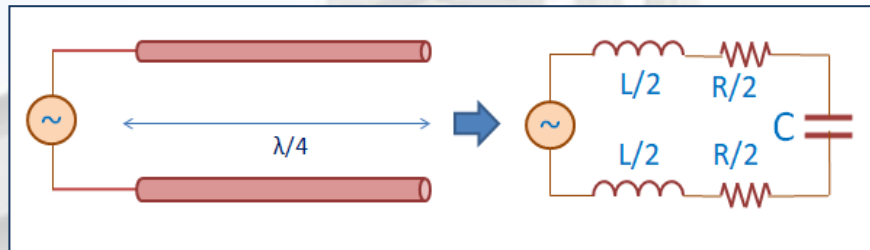
- **Area o regione di Campo Vicino Reattivo (Reactive Near Field)**
L'area si estende nell'immediato intorno dell'elemento radiante fino ad una distanza pari a circa $0,1 \lambda$ - $0,4 \lambda$ in funzione della dimensione fisica dell'antenna. In questa zona il comportamento dei campi è esclusivamente reattivo e i campi E e H non sono tra loro correlati.
- **Area o regione di Campo Vicino Radiativo (Radiative Near Field – Fresnel Region)**
L'area si estende fino a distanze di circa $0,5 \lambda$ – $1,5 \lambda$ in funzione della dimensione fisica dell'antenna stessa. In questa area i campi E e H iniziano ad essere tra loro correlati, il campo complessivo non ha ancora assunto le caratteristiche di un'onda sferica e la sua intensità presenta significative fluttuazioni a causa delle differenze di fase dovute ai contributi provenienti dalle diverse parti dell'antenna.
- **Area o regione di Campo Lontano Radiativo (Radiative Far Field – Fraunhofer Region)**
Questa area si estende a partire dal confine esterno della regione di Fresnel fino all'infinito, i campi E e H in questa area sono totalmente correlati e si propagano radialmente assumendo le caratteristiche di un'onda sferica.



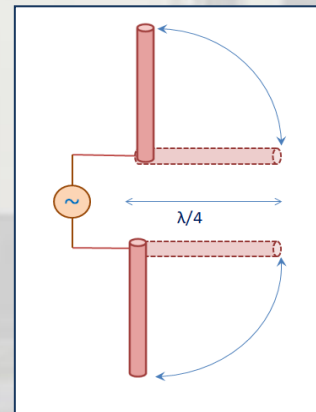
Antenne – elementi fondamentali

Abbiamo detto che l'antenna è un trasduttore che trasforma l'energia elettrica a RF in un campo elettromagnetico che si propaga nello spazio circostante. Vediamo di comprendere meglio come ciò avviene :

Sappiamo dalla teoria delle linee che un tronco di linea lungo $\lambda/4$, aperto all'estremità, si comporta come un circuito risonante «serie».



*Un'antenna è sempre assimilabile ad un circuito risonante «serie» in cui **L e C dipendono dalle dimensioni fisiche dell'elemento radiante e ne determinano la frequenza di risonanza** mentre R , in assenza di perdite, coincide con la «resistenza di radiazione», ma vedremo meglio più avanti questo aspetto*

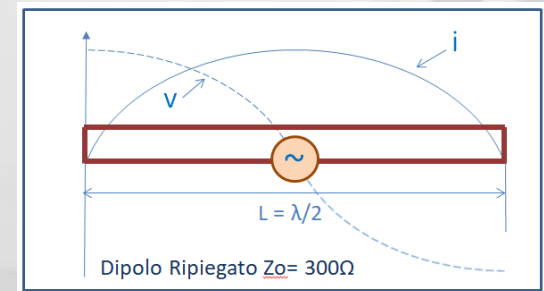
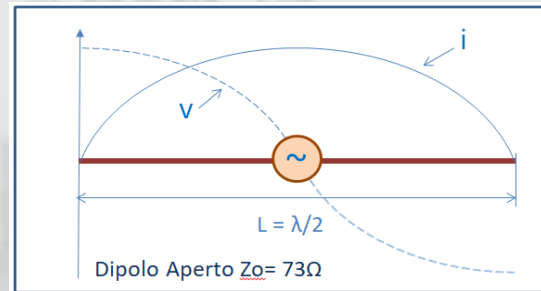
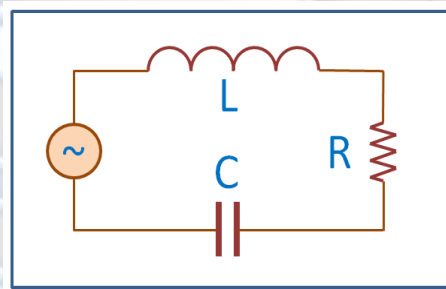


Antenne – elementi fondamentali

Alla risonanza un'antenna alimentata al centro (es. dipolo) si comporta come una linea aperta di lunghezza $\lambda/4$ dove, nel punto di alimentazione, **la corrente i è massima e la tensione v è minima** mentre agli estremi la corrente si annulla e la tensione raggiunge il valore massimo.

Sempre alla risonanza **l'impedenza nel punto di alimentazione è puramente resistiva** e il suo valore è dato dal rapporto tra la tensione V e la corrente I applicate nel punto di alimentazione.

Vedremo meglio in seguito che questo valore non sempre coincide con la «resistenza di radiazione»



Antenne – Resistenza di radiazione

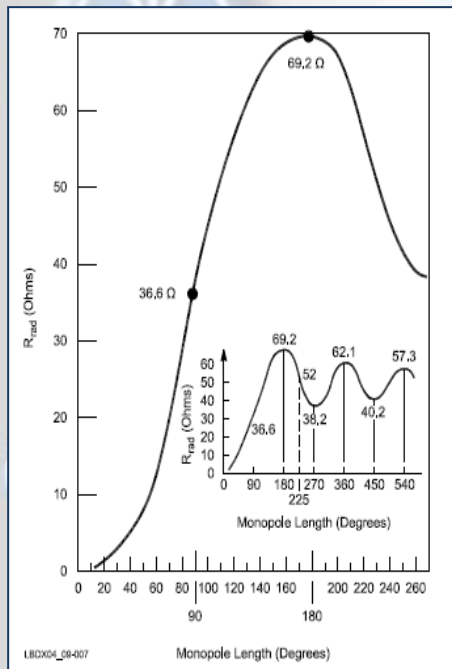
Vediamo adesso di comprendere meglio perché antenne fisicamente diverse, pur lavorando sulla stessa frequenza, possono presentare valori diversi di impedenza nel punto di alimentazione.

Senza entrare negli aspetti teorici del calcolo che sarebbero molto complessi dobbiamo ricordare che la teoria ci dice che la potenza totale irradiata da un'antenna dipende dalle sue dimensioni (l) in rapporto alla lunghezza d'onda (λ) e dalla corrente che la percorre (I) secondo la relazione:

$$P_{ir} = 40\pi^2 \frac{(2l)^2}{\lambda^2} |I|^2$$

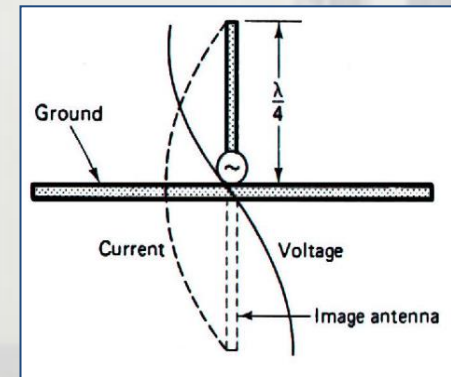
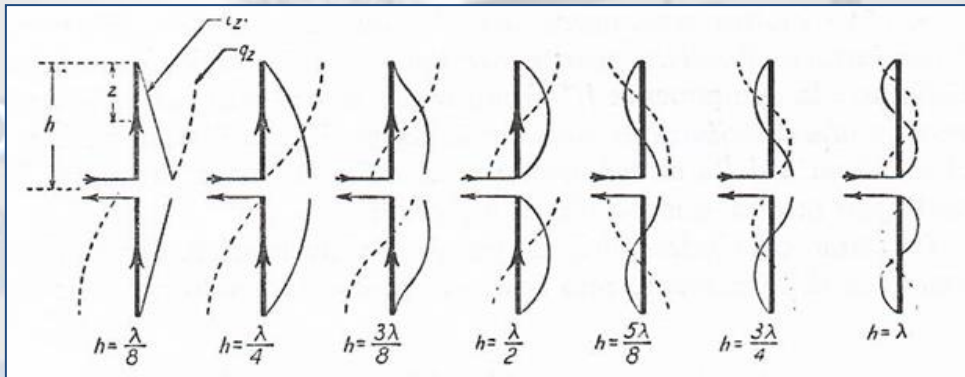
$$P_{ir} = R_{rad} * |I|^2$$

Ne consegue che a parità di potenza irradiata, un'antenna di dimensioni fisiche minori per irradiare la stessa potenza dovrà necessariamente esser percorsa da una corrente maggiore, affinché ciò avvenga è quindi necessario che la resistenza di radiazione sia necessariamente minore. La teoria definisce infatti «Resistenza di Radiazione» di un'antenna il rapporto tra la potenza totale effettivamente irradiata e il quadrato della corrente che percorre l'elemento radiante.



Antenne – Resistenza di radiazione

Il valore di R_{rad} dipende sostanzialmente dalle dimensioni fisiche dell'antenna e dalla conseguente distribuzione della corrente lungo l'elemento radiante
Come già visto la corrente nell'elemento radiante non è costante ma varia da un massimo, in genere coincidente con il punto di alimentazione, fino a scendere a zero agli estremi nel caso di un dipolo $\lambda/2$, peraltro questo comporta che l'energia irradiata dall'antenna, proporzionale al quadrato della corrente, non è uniforme lungo l'elemento ma varia con il variare della corrente lungo l'elemento.

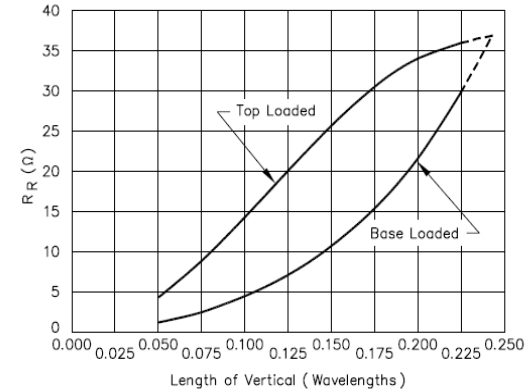


Antenne – Resistenza di radiazione

Senza entrare nella complessità del calcolo si può quindi affermare che il valore della resistenza di radiazione diminuisce drasticamente con il diminuire delle dimensioni fisiche dell'antenna in relazione alla lunghezza d'onda.

A parità di energia irradiata un'antenna "corta" è sempre percorsa da una corrente maggiore a causa del suo minor valore di R_{rad}

Nella pratica elementi radianti che hanno una dimensione inferiore a $1/10 \lambda$ hanno una R_{rad} così bassa da renderli di fatto, come vedremo, pressochè inutilizzabili a causa di un efficienza di radiazione bassissima



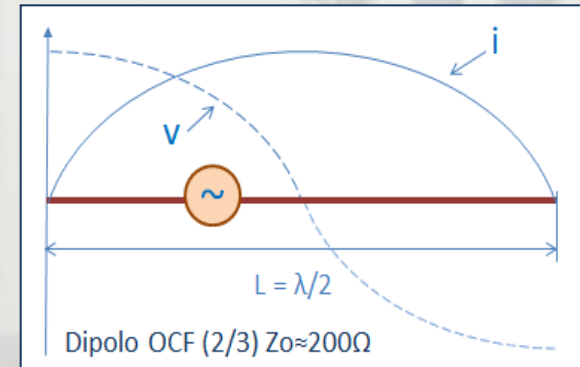
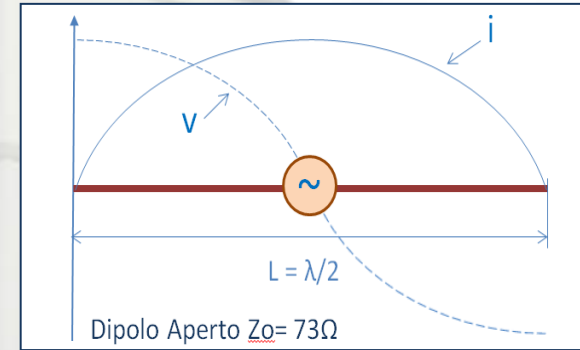
Fonte: ARRL Antenna Book cap.6

Antenne – Resistenza di radiazione

Purtroppo c'è un errore molto comune che viene commesso ed è quello di confondere la «**resistenza di radiazione**» R_{rad} di un'antenna con il valore della sua «**impedenza nel punto di alimentazione**» Z_0 , che come vedremo può presentare anche componenti reattive. L'impedenza nel punto di alimentazione è data dal rapporto tra la tensione RF applicata e la corrente che scorre in quel punto e quindi varia spostando il punto di alimentazione lungo l'elemento (casi tipici i dipoli OCF o le EFHW)

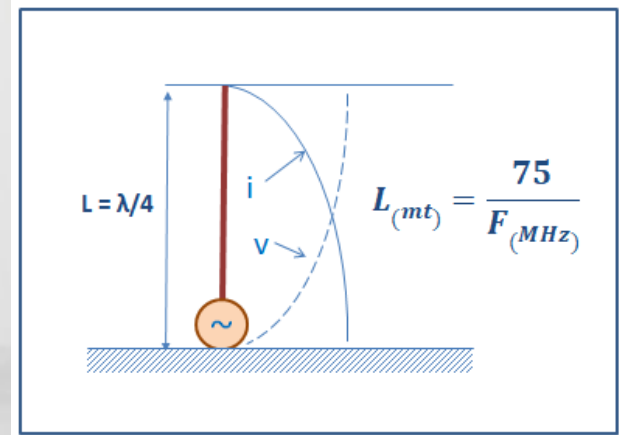
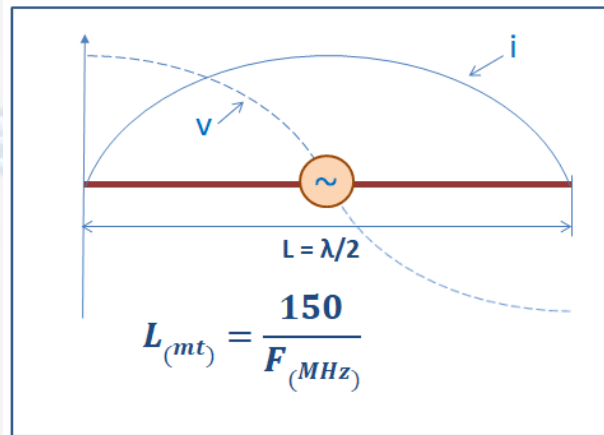
Come vedremo meglio più avanti i due valori coincidono in un unico caso «teorico»:

Alla risonanza quando il punto di alimentazione è posto nel punto di massima corrente e l'antenna è totalmente priva di perdite



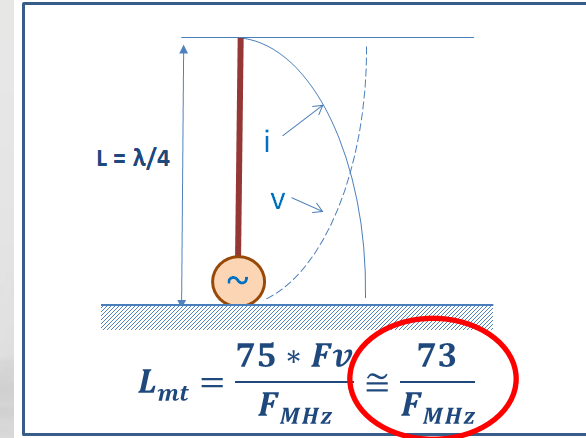
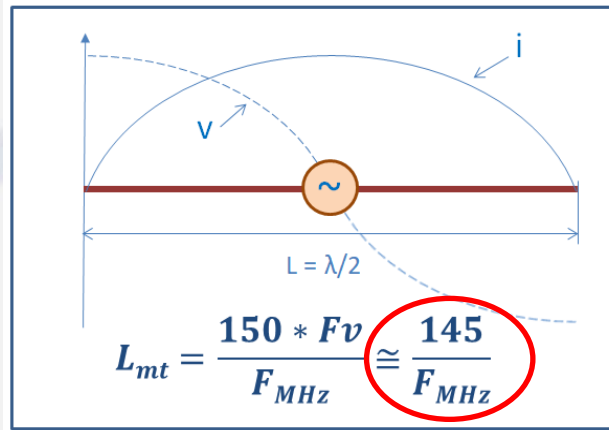
Antenne - dimensioni teoriche e risonanza

Come già detto un elemento radiante, dal punto di vista elettrico, è assimilabile ad un circuito risonante serie e la massima efficienza si ha alla risonanza quando l'impedenza nel punto di alimentazione è priva di componenti reattive (puramente resistiva). Le componenti induttiva (L) e capacitiva (C) dell'elemento radiante dipendono dalle dimensioni fisiche dell'elemento stesso e di conseguenza **vi è una relazione puntuale tra la dimensione «teorica» dell'elemento e la frequenza di risonanza**, ed in particolare dobbiamo sempre ricordare che **aumentando la lunghezza dell'elemento radiante la frequenza di risonanza diminuisce, accorciandolo la frequenza di risonanza aumenta**



Antenne - dimensioni teoriche e risonanza

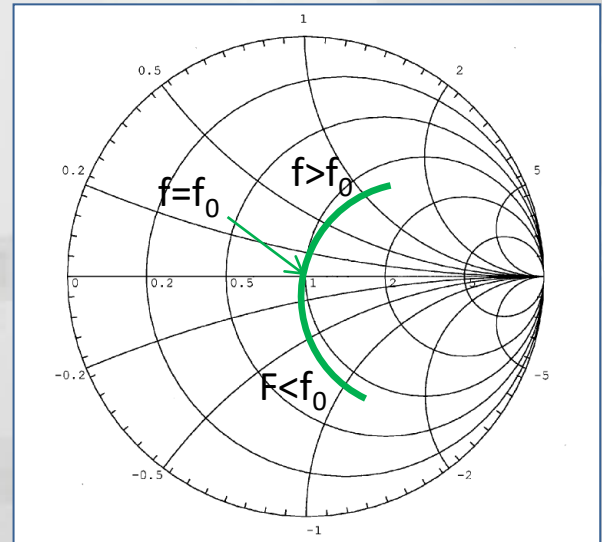
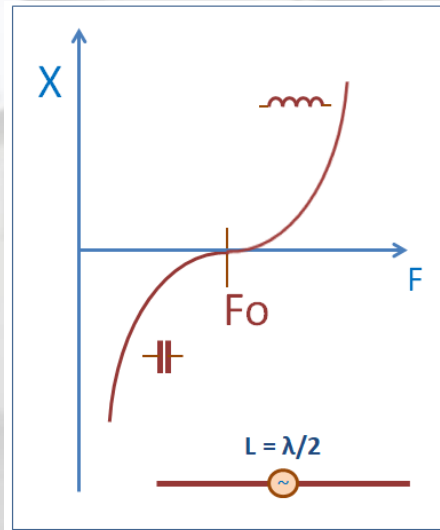
Come sempre però dobbiamo tenere conto della differenza tra teoria e pratica. Nella pratica la lunghezza dell'elemento radiante è sempre leggermente inferiore rispetto alla lunghezza teorica in quanto si deve tenere conto di un fattore correttivo (F_v fattore di velocità) tipico del materiale con cui è costruito l'elemento e del rapporto tra lunghezza e diametro dell'elemento stesso (rapporto di finezza). **I valori medi di F_v sono compresi tra 0,95 e 0,98.** Di conseguenza le lunghezze reali saranno leggermente minori di quelle teoriche:



Antenne – elementi fondamentali

E' bene ricordare che *se ci spostiamo dalla frequenza di risonanza, analogamente ad un circuito risonante, la nostra antenna presenterà nel punto di alimentazione un'impedenza Z_0 che non sarà più puramente resistiva ma inizierà a presentare una componente reattiva assumendo la forma $Z_0 = R + jX$, componente che sarà di tipo capacitivo ($-jX$) per frequenze inferiori a f_0 e di tipo induttivo ($+jX$) per frequenze superiori. Anche la componente resistiva andrà lentamente ad aumentare per frequenze superiori e a diminuire per frequenze inferiori.*

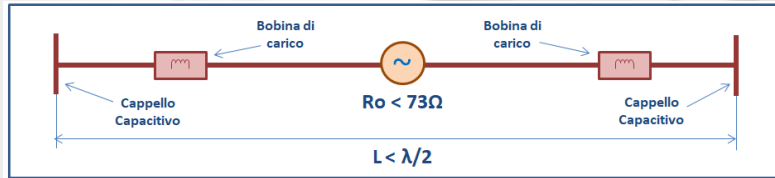
Questo comportamento è ben evidenziato in forma grafica dalla rappresentazione su carta di Smith rappresentazione che si può facilmente ottenere con impiego di un VNA, rappresentazione che se opportunamente interpretata può fornire molte utili informazioni



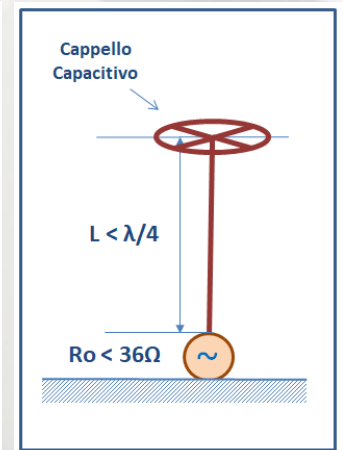
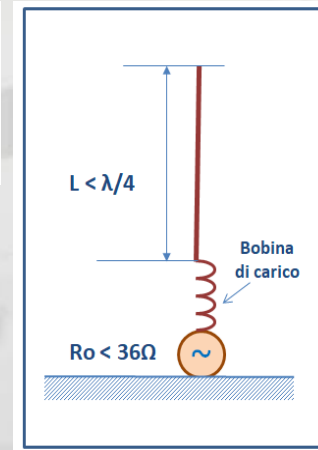
Antenne caricate

*Dobbiamo sempre tenere in conto che se l'antenna non lavora alla risonanza la sua impedenza può avere, come abbiamo visto, **componenti reattive che devono essere in qualche modo eliminate per ottenere il massimo trasferimento di potenza rf erogata dal TX.***

Il caso tipico è quello delle antenne «caricate» dove la componente reattiva viene annullata con l'impiego di una bobina di carico o di un «cappello capacitivo».



*Sempre nell'ottica di ottenere il massimo trasferimento di potenza, può essere necessario prevedere un dispositivo di adattamento, (stub, haipin, ecc...) **laddove il valore dell'impedenza che l'antenna presenta nel punto di alimentazione fosse diverso da quello della linea di discesa (cavo coax).***

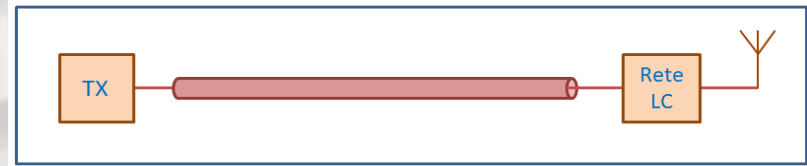


Antenne caricate

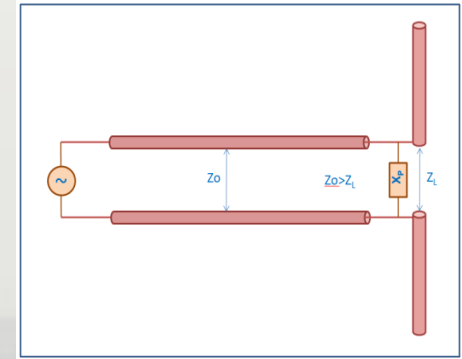
Per i motivi che abbiamo visto nella lezione relativa alle linee è bene ricordare che l'eventuale adattamento di impedenza, se necessario, è opportuno che sia effettuato direttamente sul punto di alimentazione dell'antenna anche se, in certe condizioni, il disadattamento può non essere così determinante sull'efficienza di radiazione.

In alcuni casi un metodo abbastanza semplice per realizzare l'adattamento di impedenza è quello di porre in «parallelo» al punto di alimentazione una reattanza induttiva X_p di opportuno valore, metodo che prende il nome di «STUB» (mozzicone) o «HAIRPIN» (forcella), metodo utilizzabile solo quando l'impedenza da adattare è minore di quella della linea.

L'impiego dello STUB o del HAIRPIN determina una leggera diminuzione della frequenza di risonanza dell'antenna che quindi deve poi essere riadattata

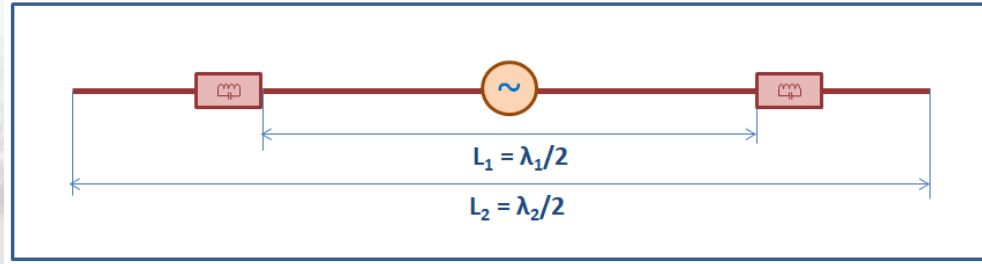


$$X_P = Z_0 \sqrt{\frac{Z_L}{Z_0 - Z_L}}$$



Antenne Multibanda

*E' altresì possibile realizzare antenne che possano operare su più frequenze (antenne multibanda) attraverso l'impiego di opportune «Trappole» che altro non sono che **circuiti risonanti parallelo** dimensionati opportunamente per interrompere elettricamente l'elemento radiante ad una determinata frequenza.*

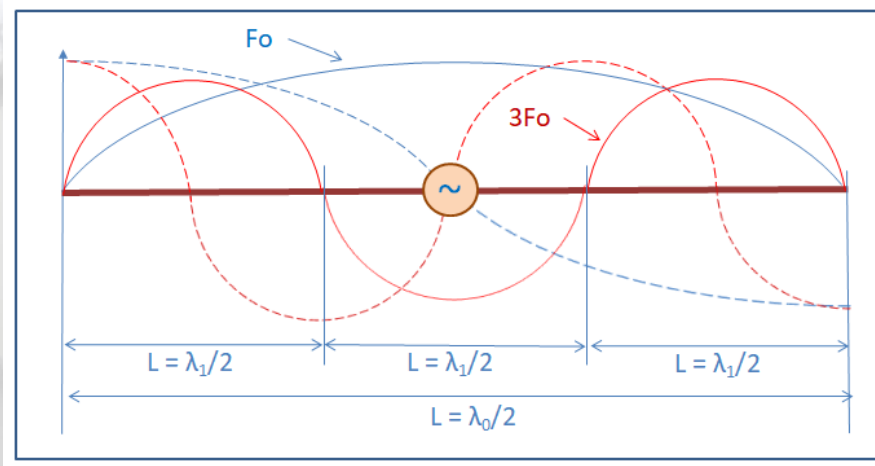


Alla frequenza F_1 (frequenza di risonanza della trappola) il dipolo si comporta come se la sua lunghezza fisica fosse L_1 , mentre per frequenze diverse da F_1 il dipolo si comporta come se la sua lunghezza fisica fosse L_2 .

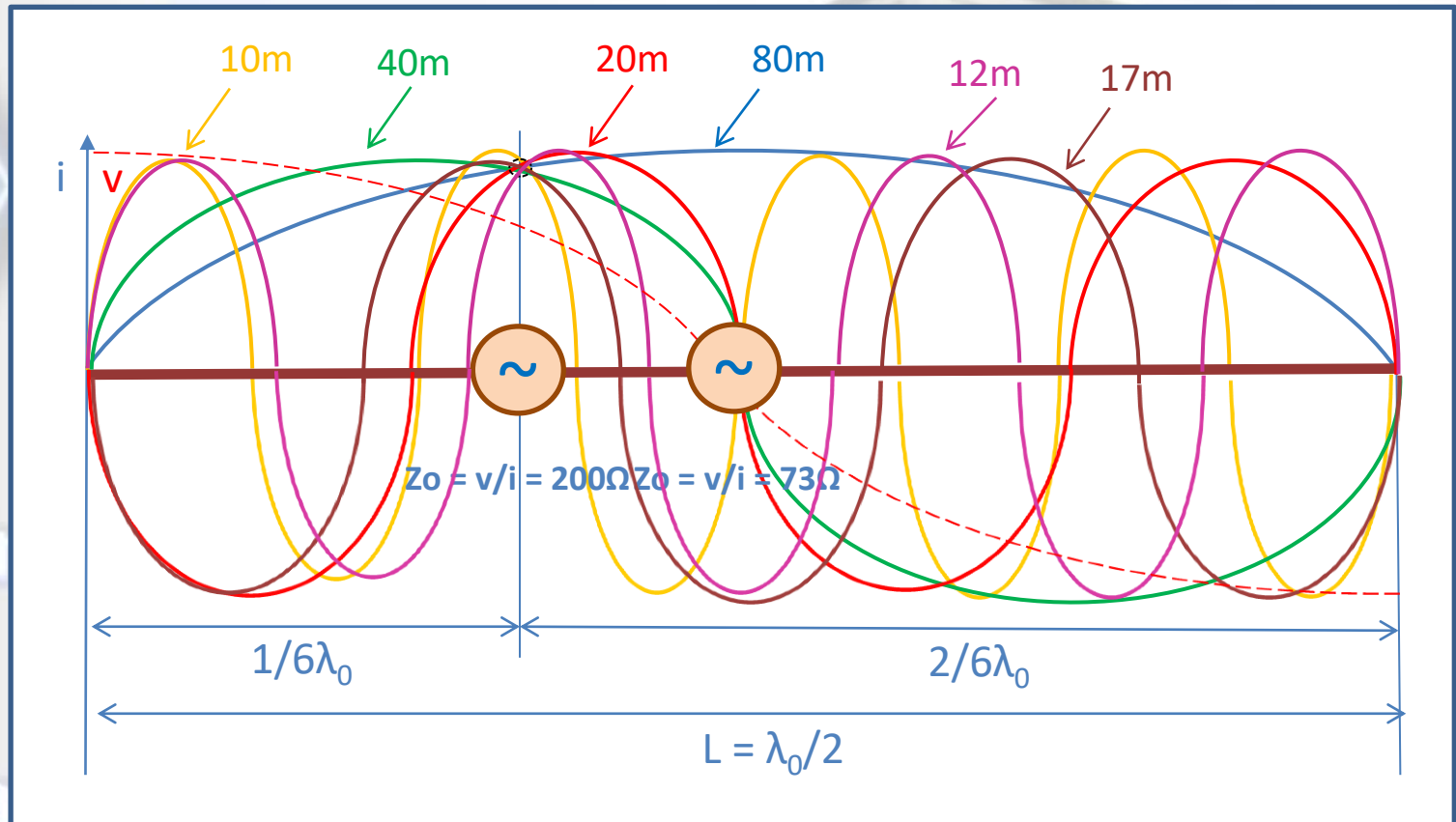
Ovviamente in questo secondo caso la lunghezza elettrica deve tener anche conto del contributo dovuto alla reattanza residua delle trappole.

Antenne Multibanda

Oltre che attraverso l'uso di trappole, è possibile utilizzare una stessa antenna su più frequenze anche sfruttando la caratteristica della «**risonanza in armonica**». Infatti come abbiamo già visto nel caso delle linee, anche per le antenne l'andamento della tensione e della corrente e, di conseguenza, dell'impedenza si ripete ad ogni multiplo dispari di $\lambda/2$, questo comporta quindi che la stessa antenna, oltre che sulla sua frequenza «fondamentale» F_0 , possa essere impiegata anche sulle sue «armoniche» dispari ($3F_0 - 5F_0 \dots$)



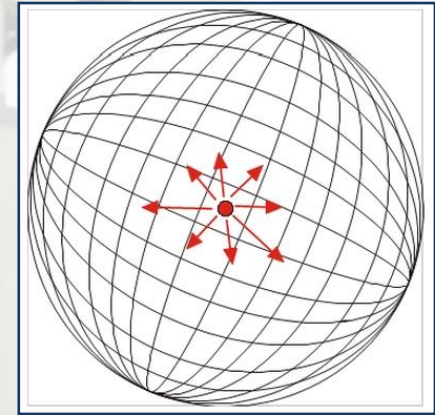
Antenne Multibanda – Il dipolo OCF



Antenne – Lobo di Radiazione

Nello studio teorico delle antenne si usa sempre come riferimento il radiatore «isotropico» ovvero una antenna «teorica» in cui l'intensità del campo EM emesso è uniforme in tutte le direzioni.

Per comprendere meglio questo concetto pensiamo ad una lampadina posta al centro di una sfera e che illumina con intensità uniforme la superficie della sfera stessa.



Inoltre lo studio del comportamento di un'antenna è sempre riferito al caso teorico in cui l'antenna sia posta in un ambiente definito «spazio libero» cioè privo di possibili «interferenze elettromagnetiche» con altri oggetti. Vedremo adesso che in realtà non è mai così a partire dall'effetto dovuto alla presenza del terreno o di superfici conduttrici in prossimità dell'antenna

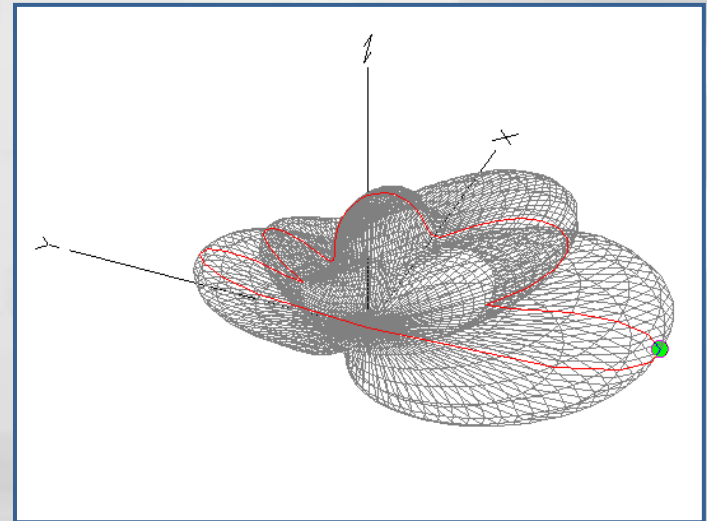
Antenne – Lobo di Radiazione

E' noto che qualsiasi antenna, sulla base delle sue caratteristiche fisiche, ma soprattutto, come vedremo, sulla base dell'ambiente e della posizione in cui viene posta, presenta aree e direzioni in cui l'intensità del campo emesso è diversa.

*La rappresentazione grafica dell'intensità del campo emesso da un'antenna, è raffigurata nello spazio da un grafico tridimensionale che prende il nome di «**solido o lobo di radiazione**»*

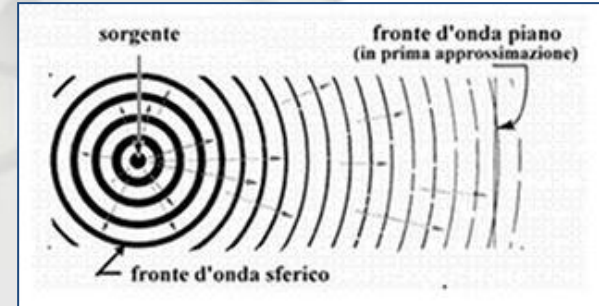
*Per semplicità di rappresentazione il lobo di radiazione viene più spesso rappresentato in forma «piana» rappresentando le sezioni del solido sul piano orizzontale (**Azimuth Plot**) o sul piano verticale (**Elevation Plot**) a seconda delle esigenze, si parla in questo caso di lobo orizzontale o lobo verticale.*

Ma vediamo adesso come si forma il lobo di radiazione.



Antenne – Lobo di Radiazione

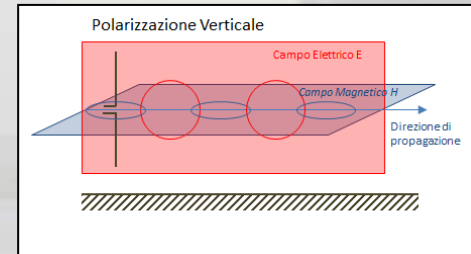
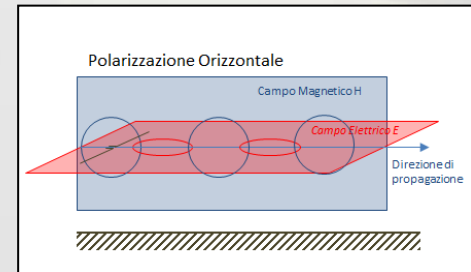
Lo studio dei campi EM emessi da una antenna ci dice che ad una certa distanza dall'antenna (area di campo lontano - Fraunhofer Region) la stessa può essere considerata come una sorgente «puntiforme» e il campo elettromagnetico **emesso ha le caratteristiche di un'onda piana** che si propaga linearmente nello spazio in assenza di elementi che ne possano alterare il percorso



Come abbiamo visto in una precedente lezione, in funzione della posizione che l'elemento radiante assume rispetto al terreno i campi EM generati possono avere differente «**polarizzazione**», Il campo EM emesso da un'antenna **presenta sempre la componente di campo elettrico E sullo stesso piano su cui giace l'elemento radiante per cui :**

Si parla di «**polarizzazione orizzontale**» quando l'elemento radiante è orizzontale e quindi la componente di «**campo elettrico E**» si propaga **parallelamente al terreno**.

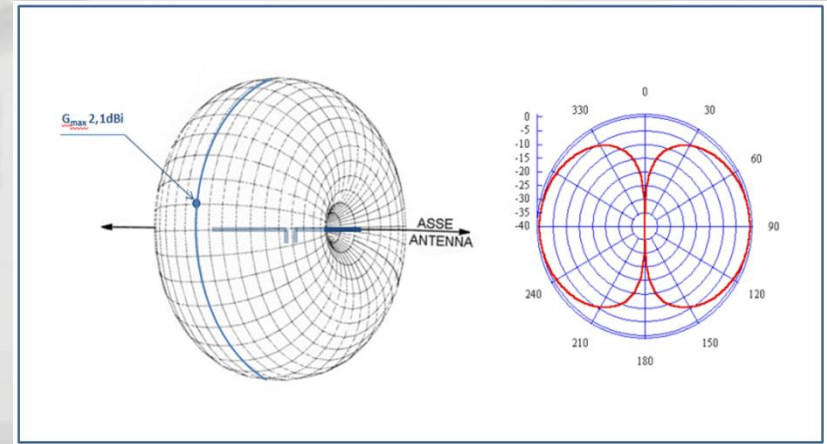
Si parla di «**polarizzazione verticale**» quando l'elemento radiante è verticale e quindi la componente di «**campo elettrico E**» si propaga **perpendicolarmente al terreno**.



Antenne – Lobo di Radiazione

Nella realtà il campo emesso da un'antenna anche trascurando l'effetto dell'ambiente circostante (ovvero anche nello spazio libero) **non è mai uniforme in tutte le direzioni**. Come già anticipato, nello studio teorico del comportamento di un'antenna «reale» si considera sempre che l'antenna stessa sia posta nello «**spazio libero**» e la valutazione dell'intensità del campo emesso è di norma riferita al «**radiatore isotropico**»

Nel caso di un dipolo posto **nello spazio libero** la rappresentazione nello spazio dell'intensità del campo emesso assume la forma di un toroide e la massima intensità del campo coincide con il piano perpendicolare all'asse del dipolo stesso e in questa direzione l'intensità del campo è maggiore di 2,1dB rispetto al radiatore isotropico, ovvero come si usa dire **il dipolo ha, nello spazio libero, un guadagno massimo di 2,1 dBi**



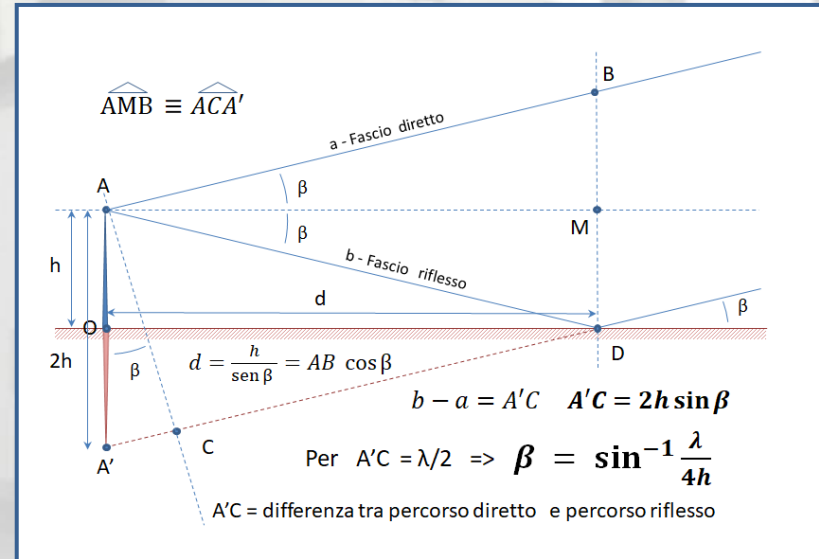
Antenne – Lobo di Radiazione

Nella realtà, dal punto di vista di un corrispondente posto a grande distanza dalla nostra antenna, il segnale ricevuto risulterà sempre dalla composizione di più fasci, un «**fascio diretto**» (a) e un «**fascio riflesso**» dal terreno (b).

La differenza nella lunghezza dei percorsi dei due fasci determina una differenza di fase in base alla quale le due componenti possono sommarsi o sottrarsi, questo effetto è noto in letteratura tecnica con il termine di «**Ground Gain**».

Le due componenti si sommeranno quando la differenza di percorso (segmento A'C) risulta essere tale per cui le componenti stesse risultano in fase

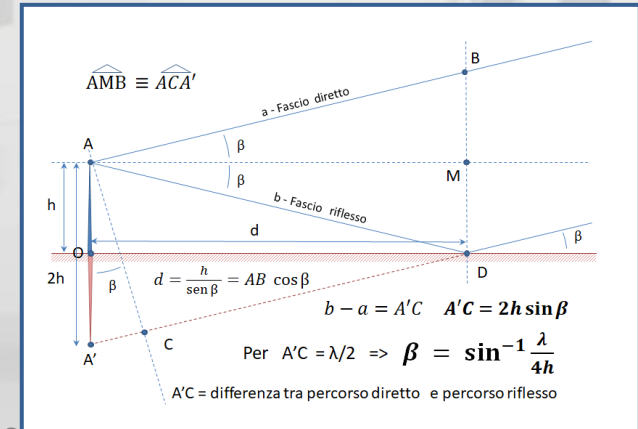
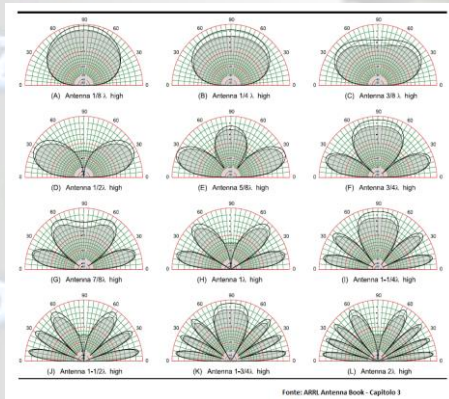
Poichè la differenza nella lunghezza dei due percorsi varia in funzione dell'altezza da terra «**h**» dell'antenna e dell'angolo di take-off « **β** », il valore del campo totale risultante dalla composizione vettoriale dei due fasci varierà in funzione dell'angolo di radiazione e dell'altezza da terra della nostra antenna



Antenne – Lobo di Radiazione

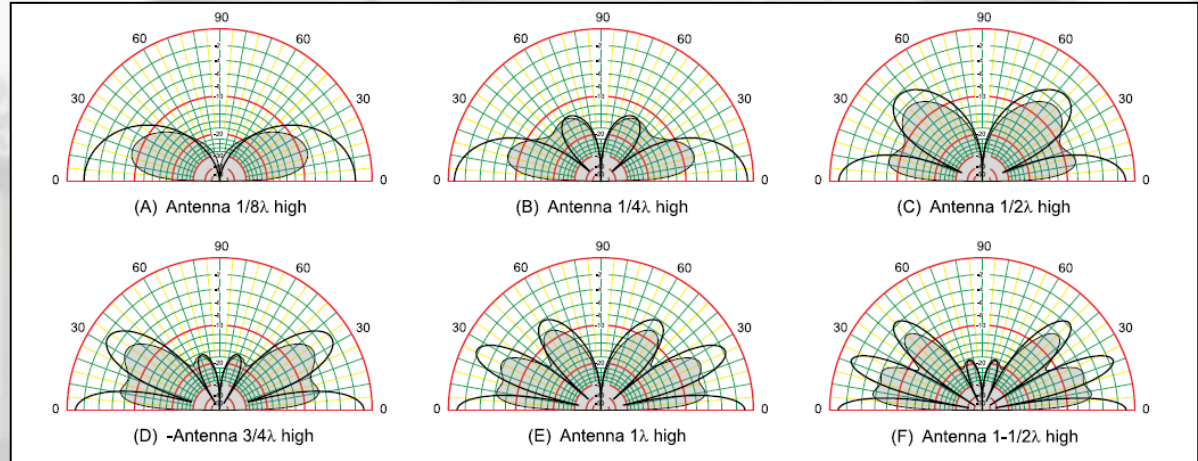
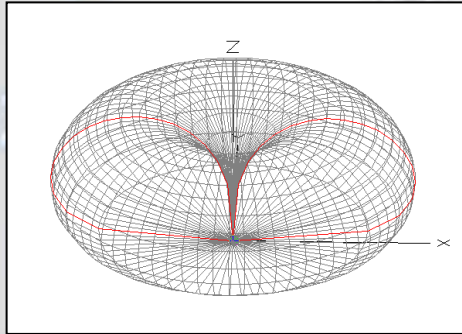
In funzione della differenza di fase tra le due componenti (fascio diretto e fascio riflesso) il campo complessivo può incrementarsi **fino a +6dB** rispetto al guadagno teorico dell'antenna nello spazio libero, quando i campi sono perfettamente in fase (Ground gain), e **scendere di anche -20dB** quando i campi sono in opposizione di fase.

Nel caso di un'antenna con «**polarizzazione orizzontale**», a causa dell'inversione di fase che si determina nella riflessione a terra, le due componenti si sommeranno quando la differenza tra i percorsi sarà uguale a $\lambda/2$ e in questo caso ciò avviene per $\beta = \sin^{-1} \frac{\lambda}{4h}$ questo comporta che la forma del lobo **si modificherà significativamente in funzione dell'altezza da terra a cui l'antenna è installata**



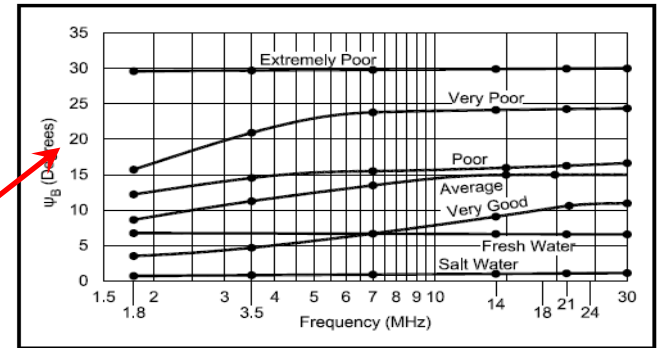
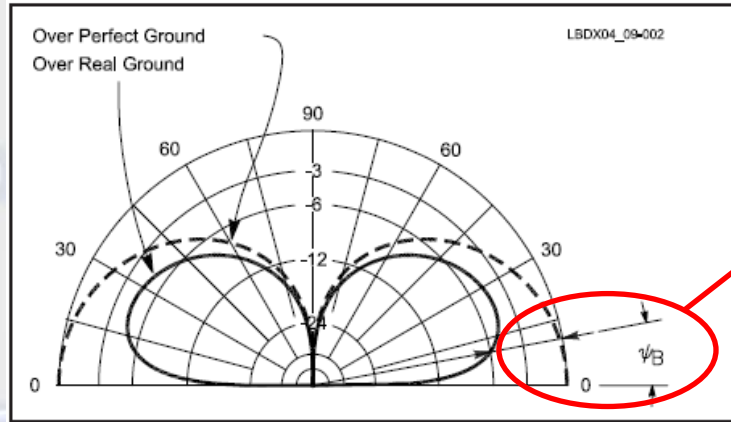
Antenne – Lobo di Radiazione

Se consideriamo invece un'antenna «verticale» possiamo notare che il lobo di radiazione è diverso, un'antenna verticale irradia uniformemente sul piano orizzontale mentre sul piano verticale il lobo risulta essere schiacciato in basso. La radiazione sul piano verticale è pressoché nulla per angoli superiori a 50° - 60°



Antenne – Lobo di Radiazione

Ciò avviene in conseguenza del fatto che un fascio con polarizzazione verticale, diversamente da quello orizzontale, **non subisce l'inversione di fase nella riflessione a terra**, ne consegue che le componenti, diretta e riflessa, avranno la stessa fase già per altezze da terra prossime a zero, per questo motivo **un'antenna a «polarizzazione verticale» presenta un lobo con basso angolo di radiazione anche quando posta a terra**. Per contro il lobo di radiazione dell'antenna verticale sarà maggiormente influenzato dalle caratteristiche dielettriche del terreno.



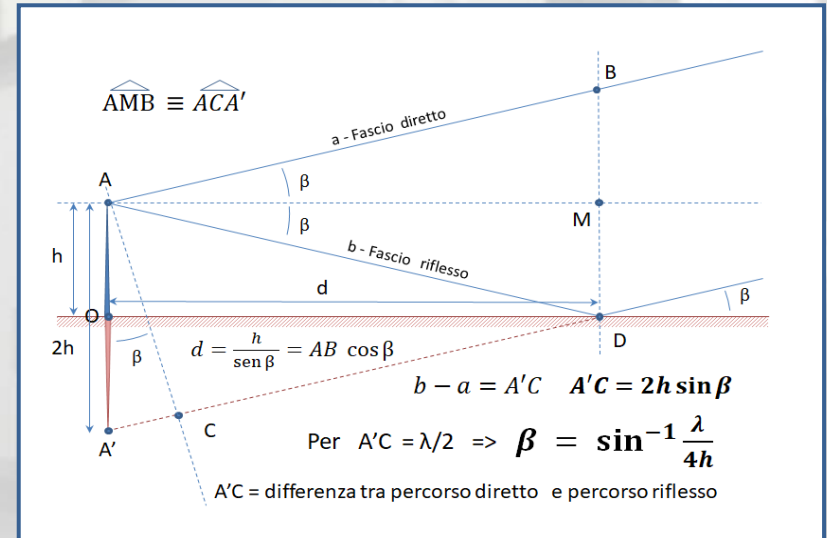
Fonte: ON4UN Low Band Dxing - Cap.9

Antenne – Lobo di Radiazione

Come vedremo in dettaglio nella prossima lezione, l'effetto prodotto dal terreno è del tutto analogo a quello che si determina in un'antenna «direttiva» dove la concentrazione dell'energia irradiata avviene con lo stesso meccanismo attraverso il quale **più elementi radianti, siano essi «attivi» come nel caso degli Array o «passivi» come nel caso delle Yagi o dei riflettori parabolici, generano fasci con fase diversa la cui combinazione determina l'effetto di direttività.**

Non è un caso infatti che il fascio generato dalla riflessione sul terreno possa essere considerato come se fosse generato da una seconda **antenna «immagine»** posta nel punto A' del disegno.

Modificando opportunamente la fase del segnale emesso dalle due antenne si può modificare la direzione del lobo di massima radiazione ottenuto dalla combinazione dei fasci. Su questo principio si basa il funzionamento di un array o di una yagi

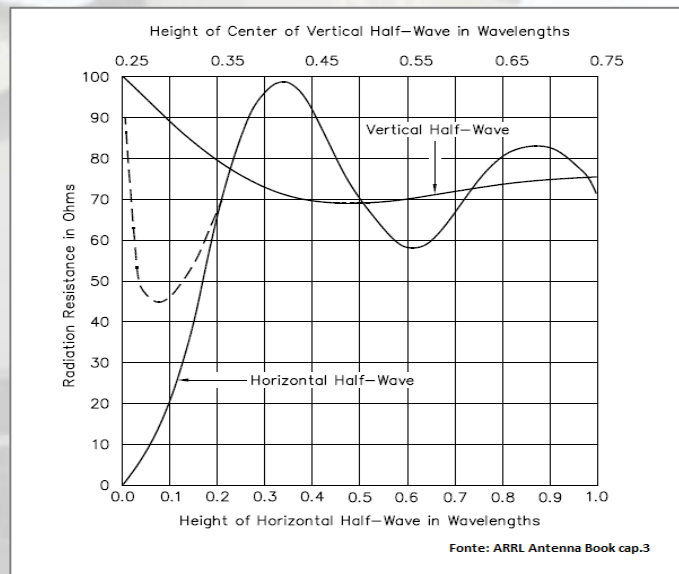


Antenne - Effetto del terreno

La presenza del terreno o di una superficie conduttrice in prossimità dell'antenna non ha effetto solo sul lobo di radiazione della nostra antenna **ma può modificare anche significativamente il valore dell'impedenza nel punto di alimentazione** e l'efficienza di radiazione dell'antenna stessa argomento che affronteremo nella prossima lezione.

Il grafico a lato ci mostra l'andamento dell'impedenza nel punto di alimentazione per un dipolo sia verticale che orizzontale posto a differenti altezze da terra.

Nel caso di un dipolo orizzontale, quando l'altezza scende sotto $0,2\lambda$ l'effetto dovuto alle perdite nel terreno diventa significativo e, come vedremo meglio nella prossima lezione, va a sommarsi al valore della resistenza di radiazione (linea tratteggiata) causando una rapida riduzione dell'efficienza di radiazione





Sezione
di
Pisa

***Grazie
per l'attenzione***

