

Le Antenne

(Dispensa per il corso di Telecomunicazioni)

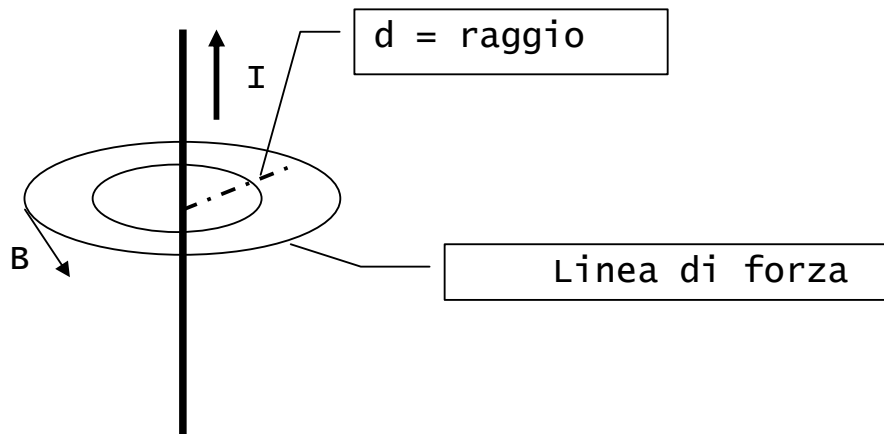
Anno IV della specializzazione Elettronica e Telecomunicazioni

1. Campi elettromagnetici ed onde elettromagnetiche

Dovrebbe essere noto dai corsi di Fisica e di Elettrotecnica che esistono due importanti leggi che consentono di collegare intimamente fenomeni elettrici e fenomeni magnetici.

Faccio riferimento alle ben note legge di Ampere e Legge di Farady. Rivediamole insieme.

Per quanto riguarda la legge di Ampere bisogna fare riferimento al seguente schema.



In questa figura ho schematizzato un conduttore di lunghezza infinita percorso da una corrente I . In tale situazione si osserva la comparsa di un campo magnetico, di induzione B , le cui linee di forza¹ sono delle circonferenze concentriche tra loro e con il conduttore.

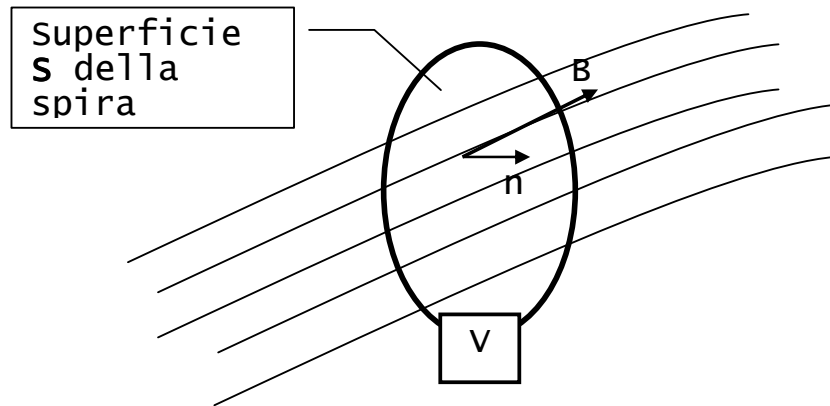
Ebbene la legge di Ampere quantifica questo fenomeno con la relazione:

$$B = \mu \cdot \frac{I}{2\pi d}$$

dove μ è la permeabilità magnetica e d è la distanza dal conduttore. Ovviamente se si vuole il valore del campo magnetico H basta dividere l'espressione di sopra per μ .

¹ Le linee di forza sono quelle curve tangenti alla direzione del vettore B

Comunque ciò che è importante osservare è che una corrente, ovvero un moto di cariche indotto da un campo elettrico, ha generato un campo magnetico. Andiamo ora a vedere cosa dice la legge di Faraday. A tale scopo considera il seguente schema.



Il disegno rappresenta una regione di spazio in cui è presente un campo magnetico di induzione \mathbf{B} . In tale regione è stata posta una spira in modo che essa tagli le linee di forza del campo; su tale spira è inserito un voltmetro. Ora si supponga di muovere la spira, sempre tagliando le linee di forza, oppure si renda il campo variabile nel tempo. La legge di Faraday, in tali condizioni, dà il seguente risultato:

$$e = -\frac{\partial \Phi_B(t)}{\partial t}$$

dove e è la forza elettromotrice rilevata dal voltmetro, $\Phi_B(t)$ è il flusso del vettore \mathbf{B} attraverso la superficie S della spira. A tale proposito il flusso viene così definito:

$$\Phi_B(t) = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS$$

dove \vec{n} è il versore normale alla superficie della spira.

Comunque ciò che conta è che ora un campo magnetico variabile è in grado di produrre un campo elettrico.

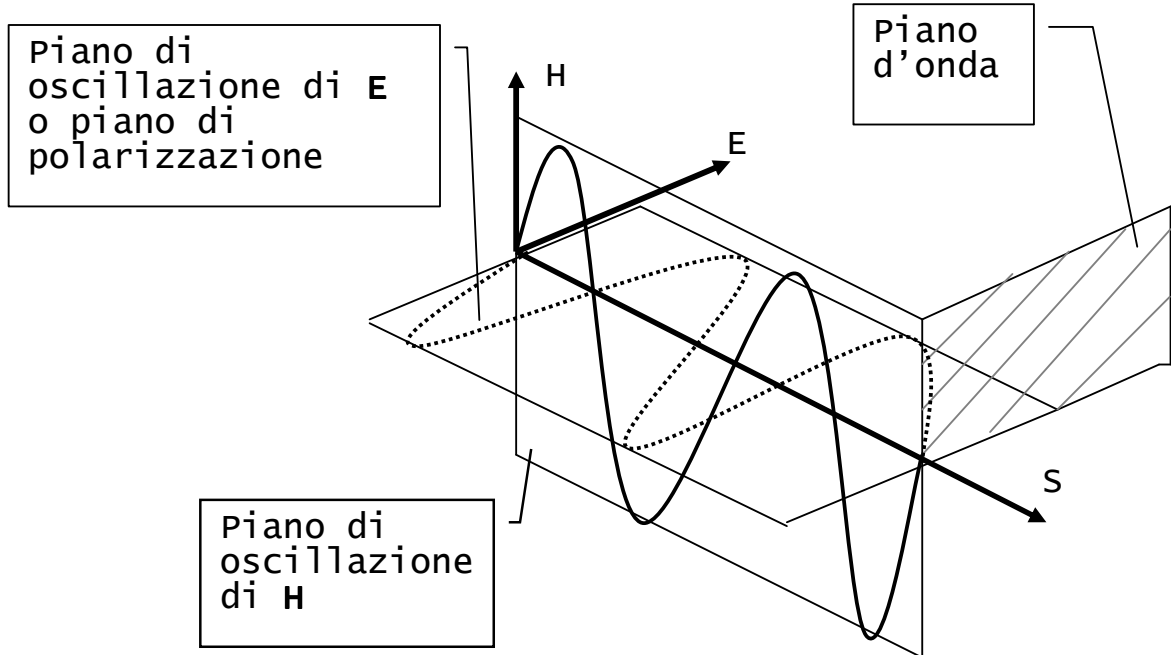
Quindi campo elettrico e campo magnetico sono tra loro intimamente legati; inoltre il moto di cariche è in grado di produrre effetti magnetici che, se variabili, possono produrre ancora effetti elettrici. Si può quindi parlare di fenomeni elettromagnetici.

Il fisico Maxwell ha studiato questi fenomeni elettromagnetici ed ha formalizzato il suo studio nelle famose quattro equazioni del campo elettromagnetico. In particolare, risolvendo tali equazioni, si osserva che il campo elettromagnetico prodotto da una apposita sorgente si propaga nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche.

Tali onde elettromagnetiche, supposte prodotte da una sorgente puntiforme, si propagano in tutte le direzioni espandendosi lungo una simmetria sferica. Supponiamo ora di porci ad una distanza dalla sorgente elettromagnetica che sia sufficientemente elevata da farci supporre di potere operare su una superficie piana.

È quindi possibile, ad una distanza sufficiente, pensare all'onda elettromagnetica non più come un'onda sferica, bensì come onda piana. In tale accezione andiamo a vedere come si presenta l'onda elettromagnetica.

Esaminiamo la figura seguente, essa rappresenta la schematizzazione di un'onda elettromagnetica a sufficiente distanza dalla sorgente a radiofrequenza che la ha prodotta.



L'onda elettromagnetica è quindi costituita da un campo magnetico e da un campo elettrico oscillanti. Tali vettori sono tra loro ortogonali e l'onda si propaga in una direzione ortogonale ad entrambi, o meglio ortogonale al piano definito dai vettori **E** e **H**. Tale piano è detto piano d'onda.

Il piano su cui oscilla il vettore **E** è detto piano di polarizzazione e, come vedremo, ha una rilevanza notevole.

Di notevole importanza è il vettore **S**, detto vettore di Poynting. Esso è così definito:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

quindi è ortogonale al piano di **E** ed **H**, ci indica la direzione di propagazione, ma, cosa molto importante, il suo modulo fornisce l'energia trasportata per unità di tempo e per superficie d'onda unitaria (1m^2) nella direzione di propagazione. Tale ultimo aspetto è estremamente

importante perché evidenzia il fatto che l'onda elettromagnetica trasporta energia; energia che giungerà a destinazione, subendo anche le vicende di carattere attenuativo del mezzo, manifestando, però, la possibilità di agire a distanza dalla sorgente. Se le onde elettromagnetiche non trasportassero energia non potrebbero avere una concreta applicazione nel campo delle comunicazioni radio.

2. Parametri caratteristici delle onde elettromagnetiche

Dopo avere brevemente esaminato la natura generale delle onde elettromagnetiche andiamo a considerare i loro parametri caratteristici. Cominciamo dalla *velocità di propagazione*. La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto è pari alla velocità della luce, e può essere così calcolata

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

dove $\mu_0 = 1,257 \mu\text{H/m}$ è la permeabilità magnetica del vuoto e $\epsilon_0 = 8,842 \text{pF/m}$ è la costante dielettrica del vuoto. Sostituendo tali valori nella precedente espressione si ottiene

$$c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$$

Altro parametro importante è la *lunghezza d'onda*. Essa può facilmente essere determinata dalla relazione

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

dove f è la frequenza della radiazione elettromagnetica. In particolare esprimendo la frequenza in MHz e utilizzando l'espressione di c si ottiene una formula più comoda

$$\lambda = \frac{300}{f[\text{MHz}]}$$

A questo punto andiamo ad esaminare i parametri energetici. Nella risoluzione delle equazioni di Maxwell si trovano queste due importanti espressioni che dimostrano ancor più il legame tra campo elettrico e campo magnetico in un'onda elettromagnetica

$$E = \mu_0 \cdot H \cdot c$$

$$H = \varepsilon_0 \cdot E \cdot c$$

Pertanto, prendendo la prima espressione e sostituendovi la formula di c si ha

$$E = \mu_0 H \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = H \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

da cui si può scrivere

$$E \sqrt{\varepsilon_0} = H \sqrt{\mu_0} .$$

Quindi, elevando al quadrato e dividendo per due tale equazione, si ha il seguente risultato

$$\frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 .$$

ora il termine a sinistra è l'energia associata alla componente elettrica, mentre il termine a destra è l'energia associata alla componente magnetica. Tale espressione ci dice che i valori dell'energia elettrica e dell'energia magnetica, in un'onda elettromagnetica, coincidono. Quindi per calcolare

l'energia totale trasportata da un'onda elettromagnetica basterà fare

$$W_{TOT} = W_E + W_H = \epsilon_0 E^2 = \mu_0 H^2 .$$

A questo punto rapportando l'energia all'unità di tempo ed alla superficie d'onda unitaria si può passare alla *potenza irradiata*, ovvero al già noto modulo del vettore di Poynting

$$S = \frac{\partial W_{TOT}}{\partial t} .$$

Inoltre l'onda elettromagnetica vede lo spazio libero come una impedenza. Ciò può essere facilmente visto rapportando il campo elettrico al campo magnetico. Infatti, sfruttando la relazione di dualità precedentemente data, si ha per l'impedenza dello spazio libero

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 377\Omega .$$

Tale espressione può essere utilmente sfruttata per avere una formula comoda per il modulo del vettore di Poynting. Infatti

$$S = \frac{1}{2} E \cdot H = \frac{E^2}{2Z_0}$$

da cui si può ricavare **E** come

$$E = \sqrt{2Z_0 S}$$

3. La polarizzazione

Abbiamo già visto precedentemente cosa si intende per piano di polarizzazione di un'onda elettromagnetica. Ebbene la orientazione di tale

piano di polarizzazione determina la polarizzazione dell'onda elettromagnetica.

Si dice che l'onda elettromagnetica è polarizzata orizzontalmente se il piano di polarizzazione è orizzontale, mentre si dice che è polarizzata verticalmente se il piano di polarizzazione è verticale.

Vedremo in seguito che tale polarizzazione dipende dalla posizione orizzontale o verticale, rispettivamente, del dipolo elementare costituente l'antenna. Comunque è importante sottolineare il fatto che una antenna dipolare in posizione verticale riceve onde elettromagnetiche polarizzate verticalmente, ma è insensibile a quelle, di pari frequenza, polarizzate orizzontalmente. Ovviamente vale il contrario per un'antenna dipolare in posizione orizzontale. Tale caratteristica è molto importante nella assegnazione e nella riutilizzazione delle frequenze dei vari canali radio.

4. Propagazione delle onde elettromagnetiche

Supponiamo che un'antenna posta verticalmente sulla superficie terrestre irradi onde elettromagnetiche. È ovvio supporre che tale antenna irradi in tutte le direzioni dello spazio. Però se consideriamo le varie direzioni di irradiazione possiamo fare le seguenti distinzioni.

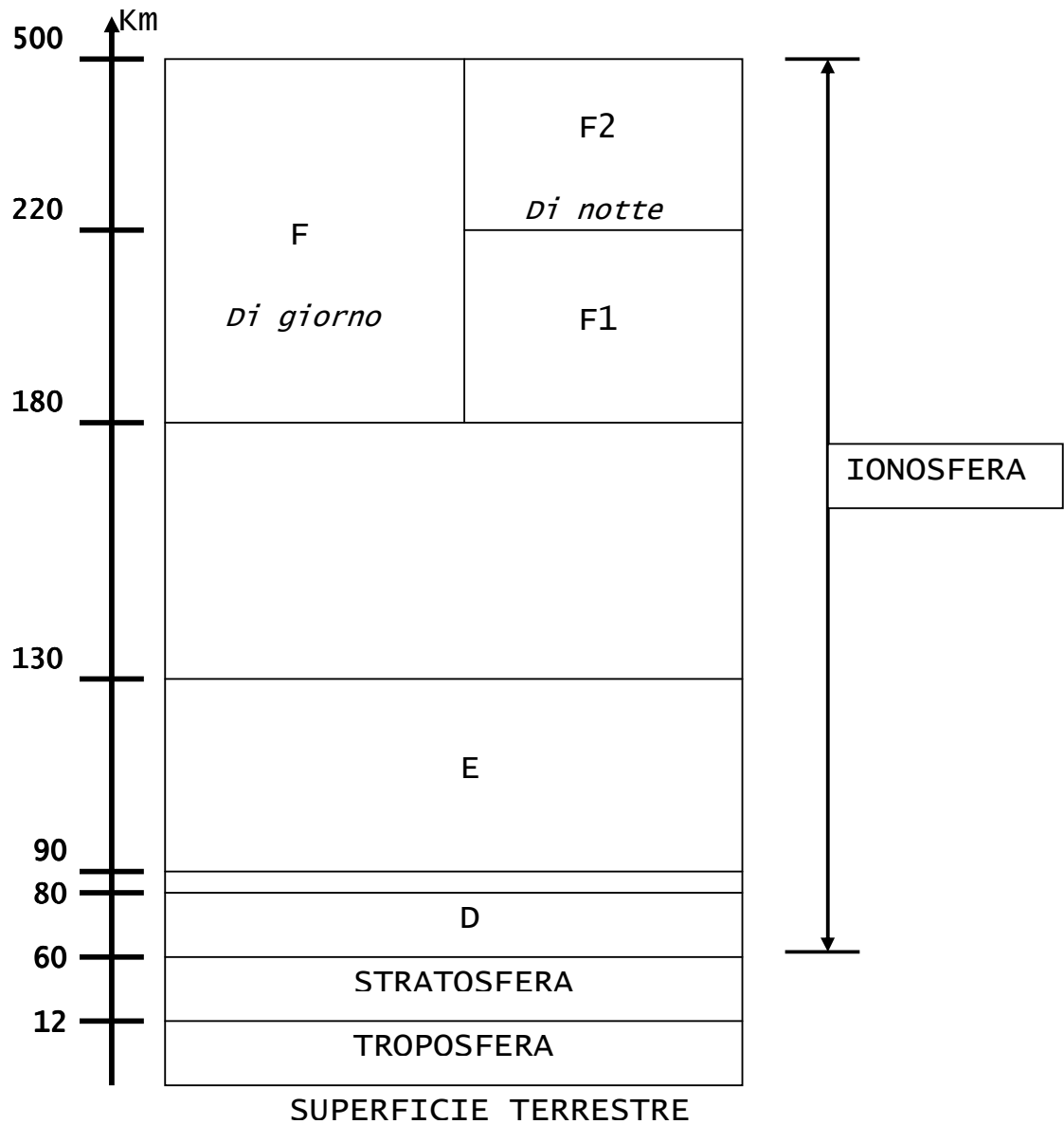
Ci saranno delle onde elettromagnetiche che si propagheranno in maniera radente la superficie terrestre; in tale caso parleremo di **onde superficiali**.

Ci saranno delle onde elettromagnetiche che si propagheranno verso l'alto; in tale caso parleremo di **onde spaziali**.

Esaminando più in particolare tali tipologie propagative si potrebbe osservare che la propagazione per onde superficiale è tipica delle frequenze più basse, ovvero delle radiazioni a lunghezza d'onda molto elevata (metri o decine di metri). Mentre la propagazione per onde spaziali è più tipica per frequenze più elevate, ovvero per lunghezze d'onda al di sotto del metro. Poi si osserva anche che la propagazione per onde spaziali può essere notevolmente interessata da fenomeni di riflessione da parte dell'atmosfera, nonché da fenomeni di attenuazione sempre dovuti all'atmosfera. Si comprende quindi che è necessario esaminare la struttura stratificata dell'atmosfera terrestre per ben comprendere i diversi fenomeni propagativi delle onde elettromagnetiche.

Consideriamo quindi la figura, presente nella successiva pagina, che illustra la struttura stratificata dell'atmosfera terrestre.

Come si può notare l'atmosfera terrestre è strutturata a strati e, per le onde elettromagnetiche, è di particolare importanza quella fascia che va dai 90 ai 500 km di quota, detta ionosfera. Essa è così chiamata in quanto ricca di atomi ionizzati dalla radiazione ultravioletta del sole. Tali ioni si comportano da specchio riflettente per le onde elettromagnetiche di frequenza fino a circa 30MHz. Per frequenze superiori l'atmosfera è perforata dalle onde elettromagnetiche.

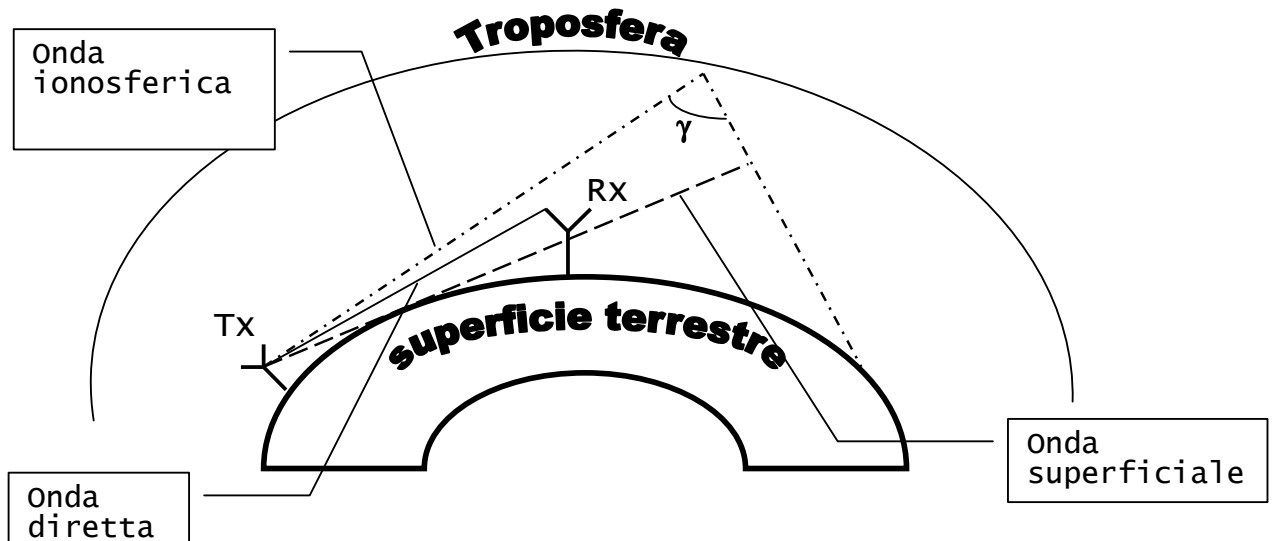


Andando più nel particolare si può osservare che gli strati D (60-80Km) ed E (90-130Km) sono presenti solo durante le ore diurne. Ciò ovviamente riduce la possibilità di riflessione di onde elettromagnetiche sull'atmosfera con conseguente riduzione della gittata stessa della riflessione.

Di notte, invece, gli strati D ed E scompaiono e lo strato F (180-500Km) si suddivide nei due strati adiacenti F1 (180-220Km) e F2 (220-500Km). In tale modo è possibile una notevole gittata, consentendo

collegamenti a notevole distanza per effetto di riflessioni multiple.

Andiamo, infine, ad esaminare un'ultima figura che ci consente di catalogare i vari tipi di propagazione delle onde elettromagnetiche.



Si vede chiaramente che da una antenna possono essere considerate uscenti tre tipi di onde elettromagnetiche:

- **Un'onda superficiale**, ovvero un'onda che segue la superficie terrestre. Questa tipologia di onda è tipica delle trasmissioni ad elevata lunghezza d'onda dove la radioonda segue sostanzialmente la superficie terrestre venendo, però, ostacolata dalle asperità del terreno stesso. Sono usate per collegamenti a breve o a media distanza.
- **Un'onda diretta**, in tale caso l'onda segue la direttrice congiungente l'antenna trasmittente con l'antenna ricevente che sono poste in visibilità ottica. Questa è una situazione tipicamente utilizzata nei ponti radio nel campo delle microonde e consente di realizzare collegamenti a notevole distanza.

- ***Un'onda ionosferica***, in tale caso si sfrutta il fenomeno della riflessione ionosferica. Si è già detto che tale fenomeno è possibile fino a frequenze di circa 30MHz ed è più efficace nelle ore notturne. Purtroppo, a causa dei diversi cammini radio che si vengono ad instaurare, all'antenna ricevente possono giungere diversi segnali tra loro sfasati, generando delle forme di attenuazione casuali. È questo il fenomeno del *fading*.

Si osservi, infine, che l'intersezione tra la direttrice dell'onda superficiale e la direttrice della riflessa troposferica con il minimo angolo γ determina, verso la superficie terrestre, una zona di silenzio radio per le radioonde emesse dalla antenna trasmittente in esame.

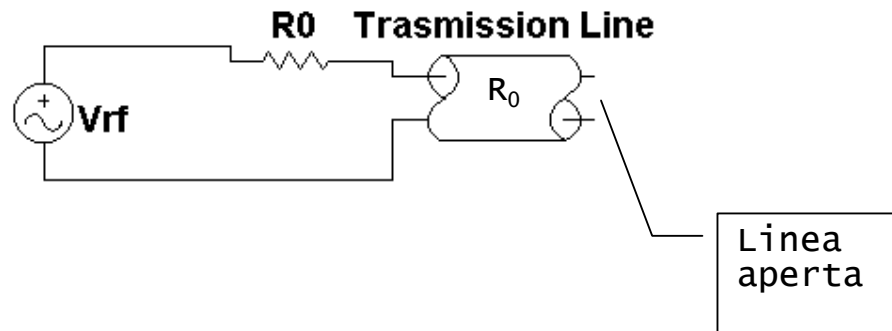
5. Generalità sulle antenne

Le antenne sono dispositivi atti ad irradiare onde elettromagnetiche nello spazio circostante (normalmente in prevalenza in una direzione privilegiata) se alimentate, in condizioni di adattamento, da un generatore a radiofrequenza.

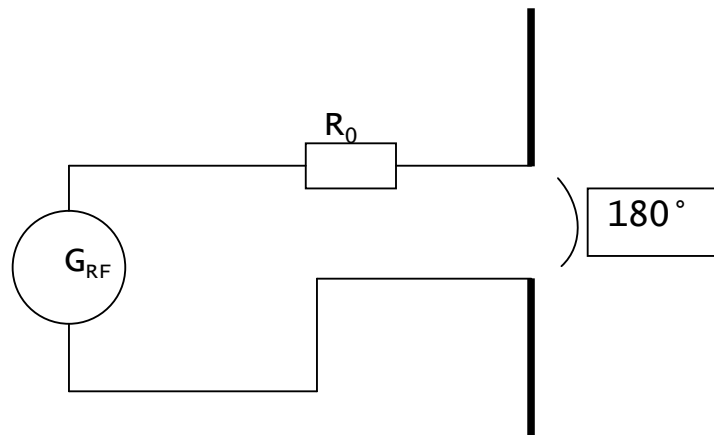
Esse sono anche dispositivi atti a ricevere onde elettromagnetiche se chiuse su di un carico (in adattamento), e su tale carico si localizzerà una tensione a radiofrequenza.

Le prime sono dette antenne trasmittenti, le seconde antenne riceventi; anche se in pratica si vedrà che sono la stessa cosa.

Un'antenna può essere generata a partire da una linea di trasmissione aperta, alimentata da un generatore a radiofrequenza:



a questo punto apro i conduttori costituenti la linea a 180° . Così verrà a generarsi un'antenna.

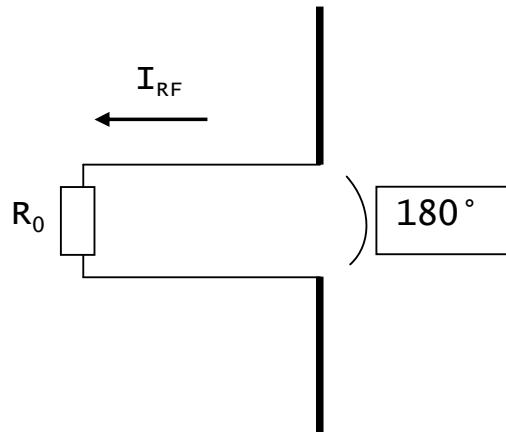


In tale situazione quello che prima era un regime stazionario si è tramutato in un regime progressivo in cui le onde elettromagnetiche si propagano nello spazio circostante.

Quindi il dielettrico in cui ha luogo la propagazione del campo elettromagnetico è costituito da tutto lo spazio circostante l'antenna.

Tali considerazioni possono essere applicate anche ad una antenna ricevente, sostituendo il generatore con un carico. Immergendo l'antenna in un campo elettromagnetico, sul carico sarà indotta una forza elettro motrice che si manifesterà come una caduta

di potenziale ed una conseguente corrente RF sul carico.



Ovviamente lavorando a radiofrequenza si può applicare alle antenne così realizzate la teoria delle linee senza perdite.

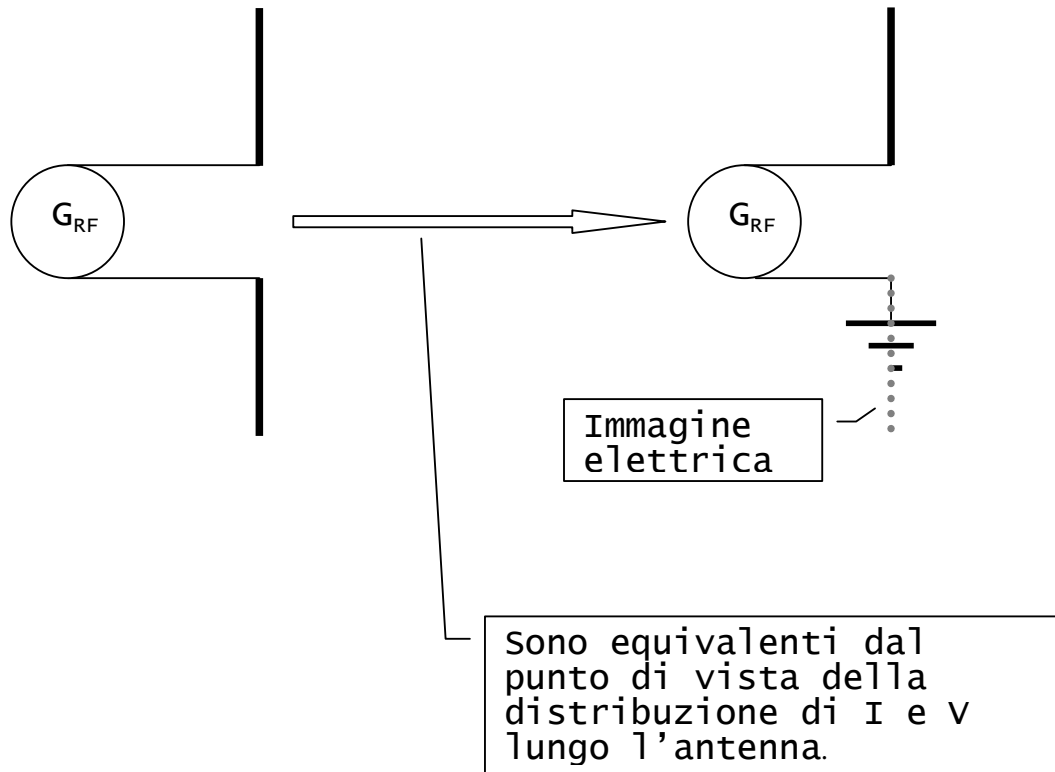
Essendo le antenne dei circuiti a costanti distribuite esse si comporteranno come circuiti risonanti di tipo serie. Saranno quindi in grado di presentare un massimo di corrente in corrispondenza di un massimo valore del campo elettromagnetico ma, non per una sola, ***bensì per più frequenze di risonanza.***

Per le antenne valgono, infine, due principi fondamentali:

- **PRINCIPIO DI RECIPROCITA'**: *le proprietà dedotte per un'antenna ricevente valgono anche per la situazione di antenna trasmittente e viceversa.*
- **PRINCIPIO DELLE IMMAGINI ELETTRICHE**: *considerata una antenna verticale filiforme ed isolata nello spazio, le distribuzioni della tensione e della corrente lungo di essa non cambiano se si sopprime il conduttore inferiore e si collega al suolo il corrispondente*

morsetto del generatore, supposto il suolo un conduttore perfetto.

Osserva allo scopo la figura seguente:



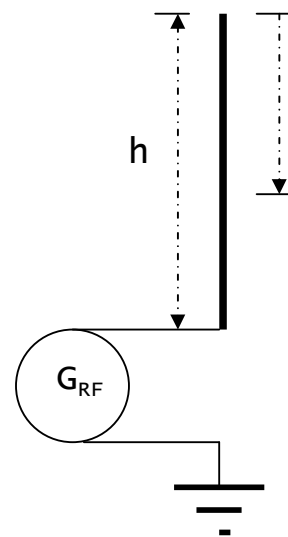
6.11 dipolo marconiano

È costituito da un conduttore rettilineo verticale, di altezza h , con l'estremo inferiore posto a terra tramite il generatore RF.

Essa è assimilabile ad una linea aperta senza perdite. Pertanto nel generico punto a distanza d dalla cima avrà un comportamento puramente reattivo; quindi la sua impedenza sarà

$$Z(d) = -j \cdot R_0 \cdot \cot g\left(2\pi \frac{d}{\lambda}\right)$$

Ovviamente nel punto $d=h$ l'impedenza dovrà essere nulla, essendo posto tale punto virtualmente a terra. Quindi in



tale punto verrà a localizzarsi un *nodo di tensione* ed un *ventre di corrente*.

Essendo la funzione $z(d)$ una cotangente ciò sarà possibile solo se

$$2\pi \frac{h}{\lambda} = n \frac{\pi}{2}$$

dove n è un intero dispari. Di conseguenza si ha la seguente importante relazione per la determinazione della lunghezza di un'antenna marconiana

$$h = n \frac{\lambda}{4}$$

ovvero l'altezza di un dipolo marconiano è pari ad un multiplo dispari di $\lambda/4$. In genere si applica a tale espressione un coefficiente correttivo per tenere conto degli effetti di bordo. Tale parametro, indicato con K_c , è detto coefficiente di velocità ed assume un valore intorno a **0,95**; pertanto l'espressione completa risulta essere

$$h = n \cdot K_c \cdot \frac{\lambda}{4}$$

A questo punto possiamo calcolare le frequenze di risonanza del dipolo marconiano. Infatti, essendo

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

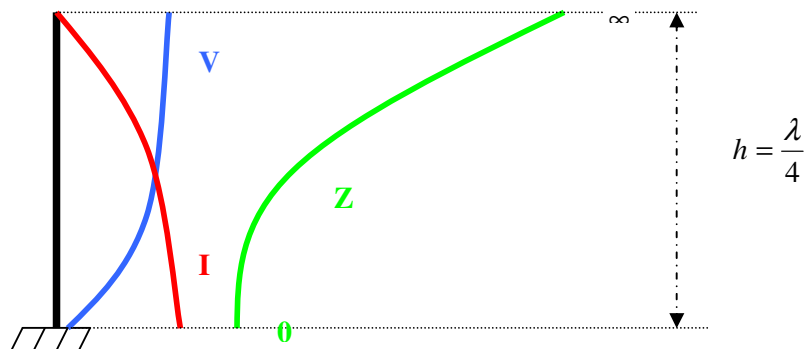
$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{\frac{4h}{n}}$$

ed in definitiva

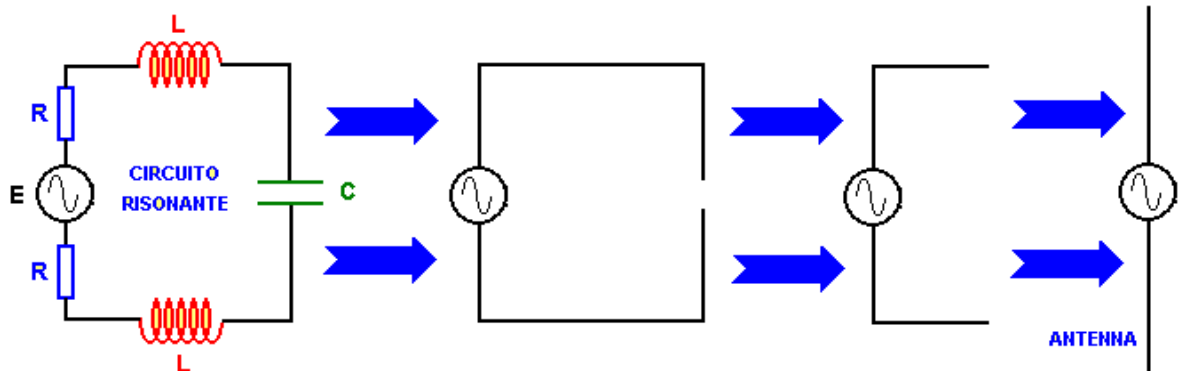
$$f_0 = n \cdot \frac{c}{4h}$$

sempre per n dispari. Se poi si sceglie, come solitamente, $n=1$ si dice che l'antenna risuona in quarto d'onda alla frequenza $f_0 = \frac{c}{4h}$.

In tale situazione ecco come si presenterà il diagramma della tensione e della corrente.

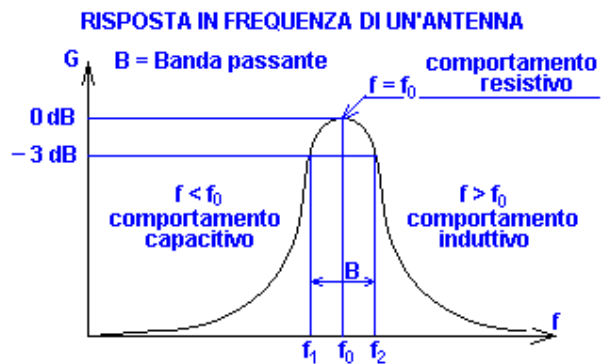


Abbiamo anche già detto che l'antenna si comporta come un circuito risonante, come può intuirsi dalle modifiche indicate nella sequenze seguenti ove, partendo da un circuito RLC serie a componenti discreti (costanti concentrate), si va sempre riducendo il valore dell'induttanza, della capacità e della resistenza localizzate nel circuito fino ad ottenere un circuito a componenti distribuite che corrisponde ad un'antenna.



Da un punto di vista elettrico, dunque, l'antenna è un'impedenza di tipo RLC e come tale è vista dal generatore.

La sua risposta in frequenza corrisponde a quella di ogni circuito risonante serie ed ha comportamento di tipo resistivo in corrispondenza del centro della curva, ohmico - capacitivo per frequenze inferiori, ohmico - induttivo per frequenze superiori.



All'interno della banda passante, il comportamento dell'antenna può essere assimilato con buona approssimazione, a quello di una resistenza e il suo valore è detto *resistenza di antenna*, di cui si dirà di seguito.

In sintesi l'antenna si comporta come un circuito oscillante *aperto*, cioè a differenza di uno *chiuso*, ovvero a costanti concentrate, si ha che:

- a. *la corrente in un dato istante non ha lo stesso valore in tutti i punti del circuito, ma varia da punto a punto;*
- b. *la condizione di risonanza non è unica, ma si hanno infinite frequenze di risonanza;*
- c. *il campo elettromagnetico non è confinato all'interno del circuito, ma si irradia nel dielettrico circostante.*

Proprio da questa ultima proprietà si deve dedurre che il generatore dovrà sempre fornire una certa potenza attiva per sopperire quella che il dipolo irradia nello spazio. **Pertanto nel nodo di tensione alla base della antenna la tensione non può essere**

nulla, ma vi deve essere necessariamente un minimo diverso da zero.

Detta allora P_T la potenza irradiata e I_V il valore efficace della corrente nel ventre di corrente si definisce Resistenza di Radiazione dell'Antenna la seguente espressione

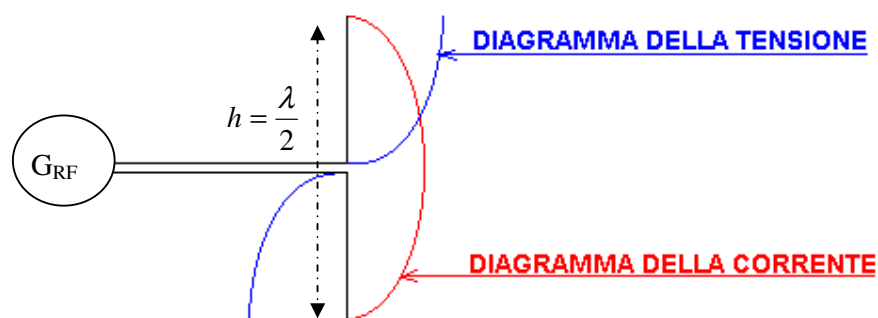
$$R_r = \frac{P_T}{I_V^2}$$

che per il dipolo marconiano in quarto d'onda è costante e vale $R_r=36,5\Omega$.

7.11 dipolo hertziano

Il dipolo hertziano si ottiene da quello marconiano sostituendo con un conduttore lungo $\frac{\lambda}{4}$ l'immagine elettrica dell'antenna marconiana.

Si ottiene, quindi, un dipolo lungo $\frac{\lambda}{2}$ con gli estremi isolati e alimentato al centro, sul ventre di corrente:



Ripetendo analoghe considerazioni sulla potenza irradiata P_T si deve dedurre che quella del dipolo hertziano è doppia di quello marconiano, quindi si avrà che $R_{r(\frac{\lambda}{2})} = 73\Omega$. Si può infine osservare che il dipolo hertziano può essere disposto sia

orizzontalmente, e a ciò corrisponderà una polarizzazione d'onda orizzontale, che verticalmente, e a ciò corrisponderà una polarizzazione d'onda verticale. In tale modo si determinano le due distinte polarizzazioni dell'onda elettromagnetica irradiata e che, come si sa, devono essere coincidenti tra antenna trasmittente ed antenna ricevente.

8. Rendimento e potenza irradiata

Precedentemente abbiamo definito la resistenza di radiazione di un dipolo giustificandola con il fatto che esso irradia potenza nello spazio circostante, potenza che ovviamente deve essere fornita dal generatore.

Ora è evidente che, essendo l'antenna costituita da elementi conduttori e quindi dotati di una propria resistività, non tutta la potenza fornita dal generatore sarà irradiata, pur essendo in adattamento. Vi saranno quindi delle perdite; pertanto è possibile definire un rendimento d'antenna come

$$\eta_a = \frac{P_T}{P_a}$$

dove P_T è la potenza irradiata e P_a è quella fornita dal generatore a radiofrequenza.

Chiamando R_p la resistenza che tiene conto delle perdite si avrà

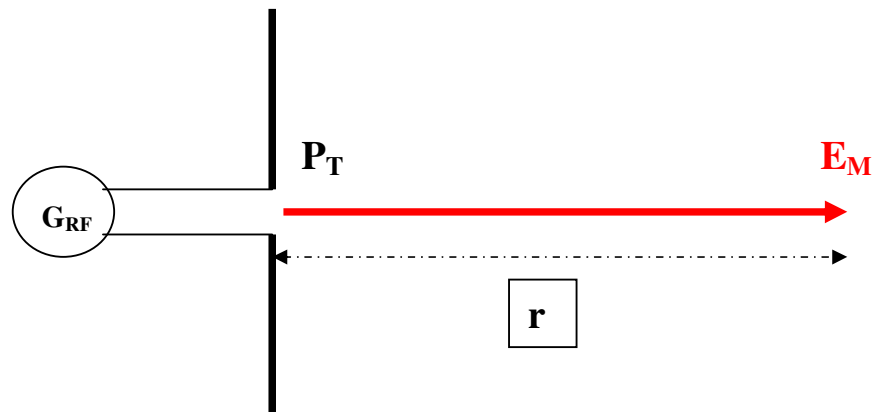
$$P_T = R_r \cdot I_V^2 \quad \text{e} \quad P_a = (R_r + R_p) \cdot I_V^2$$

e quindi

$$\eta_a = \frac{R_r \cdot I_V^2}{(R_r + R_p) \cdot I_V^2} = \frac{1}{1 + \frac{R_p}{R_r}}$$

Inoltre considerando la direzione di massima radiazione di una antenna è possibile ricavare delle relazioni che legano i valori della potenza irradiata P_T con il campo elettrico E_M presente ad una distanza r dall'antenna, nella direzione di massima radiazione.

Consideriamo il seguente schema:



si ha che

$$P_T = \frac{2\pi \cdot r^2}{R_0 \cdot G} \cdot E_M^2$$

e

$$E_M = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{60 \cdot G \cdot P_T}$$

dove $R_0=377\Omega$ e dove compare il guadagno dell'antenna G di cui si dirà nel prossimo paragrafo.

9. Guadagno di un'antenna

Le antenne non irradiano energia elettromagnetica con la stessa intensità nelle varie direzioni circostanti. Ovvero esse presentano delle direzioni preferenziali in cui mostrano una maggiore attitudine a concentrare l'energia elettromagnetica irradiata, se sono trasmettenti, e a ricevere un segnale radio, se sono riceventi.

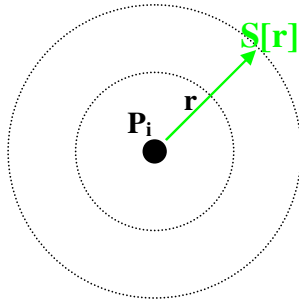
Considerando per pura semplicità una antenna trasmittente è possibile tracciare, in un sistema cartesiano a tre dimensioni, un diagramma che evidenzia tale attitudine; tale diagramma è il solido di radiazione. Sezionando il solido di radiazione con dei piani passanti per il centro dell'antenna si ottengono i diagrammi di radiazione. I valori riportati in tali diagrammi sono i diversi valori del guadagno di antenna nelle varie direzioni.

Vedremo ora che tale guadagno è, in un certo senso, una proprietà geometrica del diagramma di radiazione, ma è anche la capacità di concentrare la potenza fornita all'antenna dal generatore in una direzione piuttosto che in un'altra.

Comunque, per comprendere al meglio il concetto di guadagno di un'antenna è necessario definire *l'antenna ideale isotropa*.

ANTENNA IDEALE ISOTROPA: *è quella antenna ideale che irradia equamente in tutte le direzioni dello spazio.*

Essa è considerata puntiforme e la densità di potenza irradiata può essere così schematizzata:



essendo P_i la potenza fornita alla antenna ideale isotropa, la densità di potenza a distanza r da essa sarà

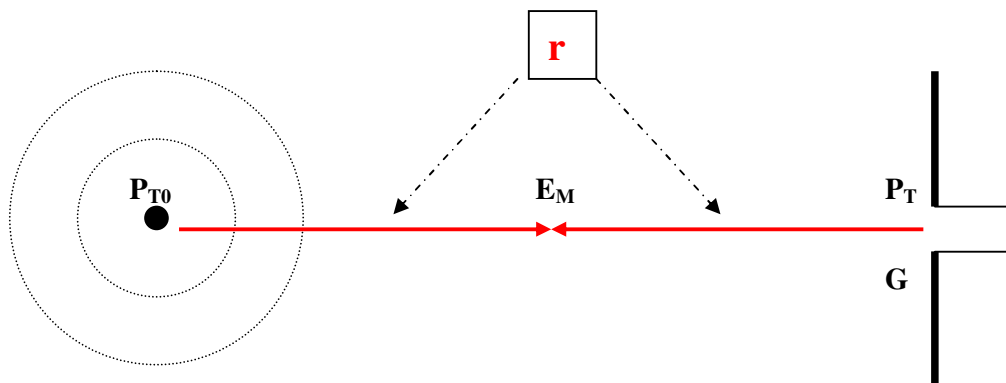
$$S(r) = \frac{P_i}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

dove $4 \cdot \pi \cdot r^2$ è la superficie di una sfera di raggio r .

Chiaramente tale antenna ha, per definizione, **guadagno $G=1$ in qualunque direzione.**

Tale antenna ha, dunque, la caratteristica di irradiare in ogni direzione con la stessa intensità ed ha, quindi, come solido di radiazione una sfera che, in una rappresentazione piana, diventa un cerchio.

A questo punto osserviamo il seguente disegno, da esso è molto semplice comprendere il concetto di guadagno d'antenna.



Il guadagno della nostra antenna, a destra nella figura, è definito come:

$$G = \frac{P_{T0}}{P_T}$$

ovvero il rapporto tra la potenza P_{T0} che dovrebbe irradiare una antenna isotropa e la potenza P_T irradiata dalla nostra antenna perché la prima

produca, a distanza r , lo stesso valore di campo elettrico prodotto dalla seconda alla stessa distanza.

Quindi che un'antenna abbia un guadagno $G > 1$ non vuol dire che amplifica, ma che ha una direzione preferenziale in cui concentra la maggior parte dell'energia elettromagnetica irradiata.

Inoltre per una antenna reale alimentata con una potenza P_a e dotata di guadagno G e rendimento η_a si può parlare di **Potenza Effettivamente Irradiata nella direzione di Massima Radiazione**. Tale potenza è calcolabile come

$$P_{ei} = G \cdot P_T = G \cdot \eta_a \cdot P_a$$

Prende poi il nome di **Resistenza di Radiazione Efficace** il prodotto di R_r per il guadagno G , ovvero:

$$R_{re} = R_r \cdot G$$

e visto che si dimostra che per i dipoli elementari (cioè i dipoli marconiano ed hertziano) tale valore è costante e dato da

$$R_{re} = \frac{R_0}{\pi} = \frac{377}{\pi} \cong 120\Omega$$

si deducono i seguenti valori per i guadagni dei dipoli marconiani ed hertziani:

$$G_{\frac{\lambda}{4}} = \frac{R_{re}}{R_{r(\frac{\lambda}{4})}} = \frac{120}{36,5} \cong 3,3 \quad (\text{dipolo marconiano})$$

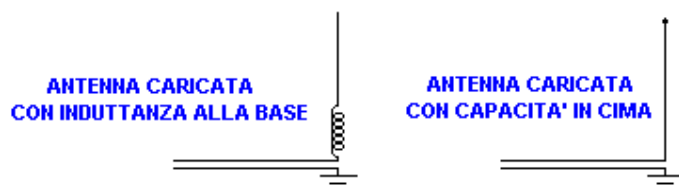
$$G_{\frac{\lambda}{2}} = \frac{R_{re}}{R_{r\frac{\lambda}{2}}} = \frac{120}{73} \cong 1,65 \quad (\text{dipolo hertziano}).$$

10. *Dipoli caricati*

Talora la lunghezza di un'antenna calcolata secondo $\frac{\lambda}{4}$, ovvero $\frac{\lambda}{2}$, risulta eccessiva in quanto scomoda da montare ad esempio su di un autoveicolo, in questo caso è possibile *accorciarla*, ma bisogna *adattarla*, infatti l'antenna ha comportamento resistivo puro soltanto se lunga $\frac{\lambda}{4}$ (o $\frac{\lambda}{2}$), raccorciata, invece, mostra impedenza di tipo ohmico capacitivo.

L'adattamento si realizza con l'inserzione, alla base della stessa, e quindi in serie, di un'induttanza di valore eguale ed opposto a quello della capacità introdotta con l'accorciamento in modo da neutralizzarne gli effetti.

Adesso però, seppure risulta adattata, l'antenna non viene utilizzata con il massimo delle prestazioni né in trasmissione né in ricezione, questo perché



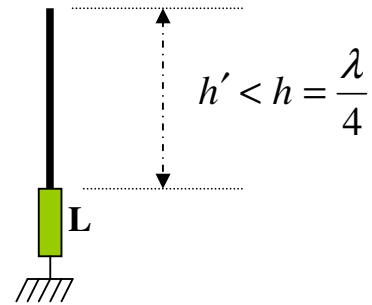
l'elemento

introdotto non è a costanti distribuite, ma a costanti concentrate e quindi non irradia; perciò questa modifica va effettuata solo in caso di effettiva necessità.

Ma vediamo come si procede. Sostanzialmente è necessario effettuare un **allungamento elettrico** dell'antenna che è stata accorciata per motivi di

spazio. Lo scopo di tale allungamento elettrico è di riportare l'antenna a risuonare correttamente.

Consideriamo lo schema a lato. Come si vede l'antenna è stata accorciata con l'introduzione di una induttanza L alla base. Di conseguenza l'altezza fisica h' è ora inferiore di quella elettrica h a cui, però, deve risuonare. Pertanto è necessario dimensionare L per il corretto adattamento. Ciò può essere fatto utilizzando la seguente espressione



$$L = \frac{Z_0}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \cot g\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{h'}{\lambda}\right)$$

dove h' è l'altezza fisica desiderata, ovviamente minore di $\frac{\lambda}{4}$, Z_0 è l'impedenza caratteristica della linea costituente l'antenna e $f = \frac{c}{\lambda}$ è chiaramente la frequenza di accordo.

11. *Lunghezza efficace di un'antenna dipolare*

Per le antenne dipolari viene definito un particolare parametro detto **lunghezza efficace**, misurato in metri.

Esso, indicato come l_e , rappresenta la lunghezza che dovrebbe avere l'antenna, nella direzione di massima radiazione, perché la f.e.m. indotta (V_M) dal campo elettromagnetico (E_M) presente fosse uniformemente distribuita su tutta l'antenna stessa.

Pertanto, noto il valore di l_e , potrei scrivere

$$V_M = E_M \cdot l_e$$

dove E_M è l'intensità massima del campo elettrico inducente nella direzione di massima radiazione, e V_M è la f.e.m. indotta nell'antenna orientata in tale direzione. Per calcolare il valore di l_e , per una generica struttura dipolare, si può usare la relazione

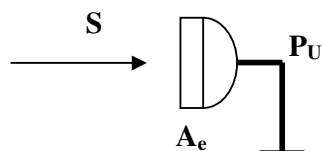
$$l_e = \lambda \cdot \sqrt{\frac{R_{re}}{\pi \cdot R_0}}$$

dove R_{re} è la già nota resistenza di radiazione efficace. A questo punto, noto che per i dipoli marconiani ed hertziani vale la relazione semplificata $R_{re} = \frac{R_0}{\pi}$, si ha per essi la seguente espressione di calcolo

$$l_e = \frac{\lambda}{\pi} \text{ (dipoli hertziani o marconiani).}$$

12. Area equivalente di un'antenna

Un parametro molto importante, in particolare per le antenne riceventi, è l'AREA EQUIVALENTE. Essa è definita come: *la superficie effettiva di captazione dell'antenna*. Supponiamo di avere un'antenna orientata nella direzione di massima



captazione e siano: P_U la potenza disponibile all'uscita dell'antenna, S la densità di potenza

presente al suo ingresso (ovvero il modulo del vettore di Poynting).

vale allora la seguente definizione matematica di area equivalente A_e ed il suo legame con il guadagno d'antenna G :

$$A_e = \frac{P_U}{S} = \frac{\lambda^2 \cdot G}{4 \cdot \pi} \quad [\text{m}^2].$$

Appare evidente che, nota l'area equivalente di un'antenna, è facile determinare la potenza da essa ricevuta, se orientata nella direzione di massima radiazione. Infatti ricordando che

$S = \frac{E_M^2}{2 \cdot R_0}$ si può facilmente dedurre la seguente espressione per la potenza ricevuta:

$$P_U = A_e \cdot S = \frac{A_e \cdot E_M^2}{2 \cdot R_0}.$$

Infine si può osservare che, essendo $A_e = \frac{\lambda^2 \cdot G}{4 \cdot \pi}$, le antenne che operano a frequenze molto elevate, ovvero a λ molto piccole, presentano piccoli valori di area equivalente. Quindi per cercare di elevarne il valore, incrementando così le proprietà captative, è bene che abbiano un guadagno molto elevato, ovvero che siano **molto direttive**.

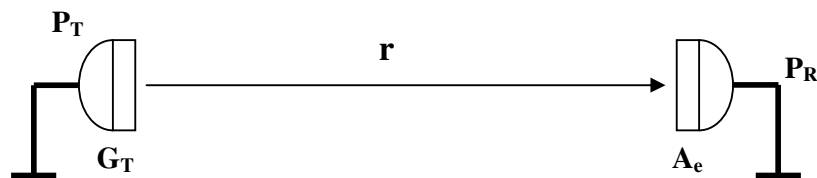
Anche l'antenna ideale isotropa possiede un'area equivalente. Essa si ottiene dalla formula

generale ponendo $G=1$, pertanto per l'antenna ideale isotropa si ha $A_{e0} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}$.

13. Formula fondamentale della propagazione radio

Supponiamo di considerare un radiocollegamento direttivo in visibilità ottica, ovvero con le antenne orientate frontalmente e poste nella direzione di massima propagazione.

Dovremo quindi considerare una antenna trasmittente ed una antenna ricevente disposte come indicato di seguito:



Si supponga di conoscere, per l'antenna trasmittente, i valori di G_T e di P_T ; mentre per l'antenna ricevente è noto il valore di A_e .

Si vuole trovare una relazione che consenta di ricavare direttamente il valore della potenza ricevuta P_R . Allo scopo possiamo ragionare nel seguente modo.

Se l'antenna trasmittente fosse quella isotropa essa produrrebbe, a distanza r , una densità di potenza data da $S_0 = \frac{P_T}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$. Ma essendo un'antenna direttiva, quindi dotata di un guadagno $G_T > 1$, alla stessa distanza produrrà una densità di potenza superiore e data da

$S = \frac{G_T \cdot P_T}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$. Di conseguenza la potenza ricevuta può essere calcolata come

$$P_R = S \cdot A_e = \frac{G_T \cdot P_T \cdot A_e}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

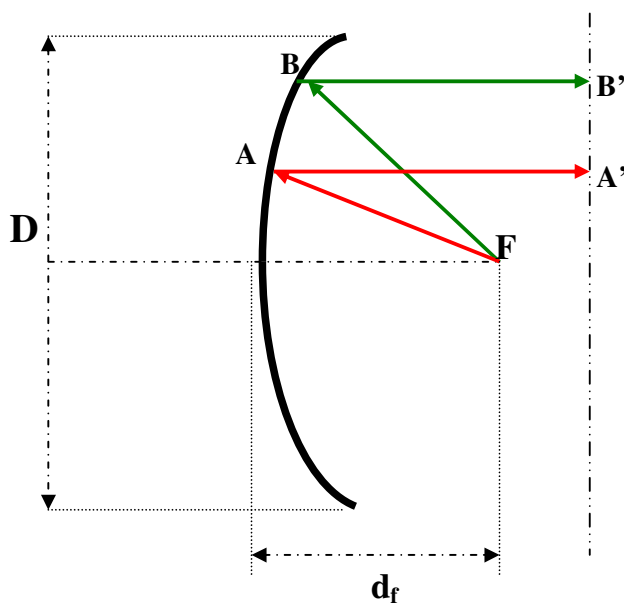
tale espressione è detta *formula fondamentale della propagazione radio*.

Inoltre ricavando il rapporto $\frac{P_T}{P_R}$ si ha

$$\frac{P_T}{P_R} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{G_T \cdot A_e}$$

che è l'espressione della **Attenuazione Disponibile** del radiocollegamento sempre nella direzione di massima propagazione.

14. Antenne a riflettore parabolico



Sono costituite da un disco, detto *riflettore*, che è una sezione di paraboloide di diametro D . Nel fuoco F di tale paraboloide è posta la vera antenna detta *illuminatore*. La vista in sezione di tale struttura radiante è illustrata di lato; è possibile anche

osservare il perché si utilizza una superficie riflettente parabolica. Per proprietà della parabola, se si considera una retta perpendicolare all'asse focale e posta frontalmente alla parabola stessa (come si vede in figura), per tutti i raggi uscenti dal fuoco vale la seguente proprietà geometrica

$$\overline{FA} + \overline{AA'} = \overline{FB} + \overline{BB'}$$

Pertanto tutti i raggi uscenti dall'illuminatore saranno presenti in fase, dopo la riflessione, su un piano parallelo al disco riflettore. Ma la stessa cosa accade per i raggi entranti che, dopo la riflessione sul disco parabolico, saranno concentrati in fase nell'illuminatore.

Quindi l'antenna a riflettore parabolico ha la capacità di trasformare una emissione sferica in una emissione piana, inoltre ha la caratteristica di concentrare enormemente il fascio ricevuto, cosa questa molto importante per elevare l'area equivalente; e come si sa questa è una caratteristica fondamentale per un'antenna che deve operare ad altissime frequenze.

Il parametro d_f è invece la *distanza focale* e di esso si dirà in seguito.

Per queste antenne, per una data frequenza di lavoro, il guadagno ottenibile è proporzionale al diametro D . Inoltre tali antenne, appartenenti alla categoria delle *antenne*

superficiali presentano una efficienza costante e pari a 0,5.

L'efficienza di una **antenna superficiale** è data dalla seguente relazione

$$\eta_a = \frac{A_e}{A_c}$$

dove A_e è la nota area equivalente, mentre A_c è l'area geometrica della superficie riflettente, che nel nostro caso vale

$$A_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4} .$$

Quindi visto che $A_e = \eta_a \cdot A_c$ sostituendo le note relazioni si ha

$$\frac{\lambda^2 \cdot G}{4 \cdot \pi} = \eta_a \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

e da questa l'espressione generale del guadagno di un'antenna a riflettore parabolico

$$G = \eta_a \cdot \frac{\pi^2 \cdot D^2}{\lambda^2} .$$

Ma a questo punto ponendo le approssimazione, valide nella maggior parte dei casi, $\eta_a=0,5$ e $\pi^2 \approx 10$ si ha la nota formula approssimata

$$G \cong \frac{5 \cdot D^2}{\lambda^2} .$$

15. Note pratiche sulle antenne a riflettore parabolico

Si vogliono qui fornire alcune indicazioni pratiche circa la realizzazione della struttura di un'antenna a riflettore parabolico.

Per il progetto di una tale struttura radiante

molto importante appare il rapporto $\frac{d_f}{D}$, cioè il rapporto tra la distanza focale ed il diametro della superficie riflettente.

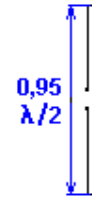
- Se il rapporto $\frac{d_f}{D}$ è grande allora succede che una parte della radiazione non viene riflessa, ma supera il bordo del riflettore. In tale caso si verifica il fenomeno dello *SPILL OVER* con conseguente dispersione di segnale e minore concentrazione del fascio.
- Se il rapporto $\frac{d_f}{D}$ è piccolo, quindi l'illuminatore è troppo all'interno della struttura parabolica, allora solo una parte della superficie riflettente è utilizzata; ciò provoca una riduzione dell'efficienza d'antenna.
- In genere, scelto un valore ottimale per il rapporto $\frac{d_f}{D}$, viene posto sul bordo del paraboloide un colletto schermante cilindrico, detto *RADOME*; lo scopo è quello di limitare il fenomeno dello spill over.
- La bocca dell'antenna spesso viene chiusa con un materiale plastico telato trasparente

alle radio onde; ciò è fatto per proteggere la struttura interna dagli agenti atmosferici.

16. **Una panoramica sulle varie tipologie di antenne**

Il **dipolo ripiegato**, indicato in figura a destra, ha resistenza di radiazione di 300Ω ; guadagno di 1,65; maggiore larghezza di banda dell'antenna hertziana, ed è usato nei trasmettitori per radio, televisione, cellulari, spesso organizzato in cortine.

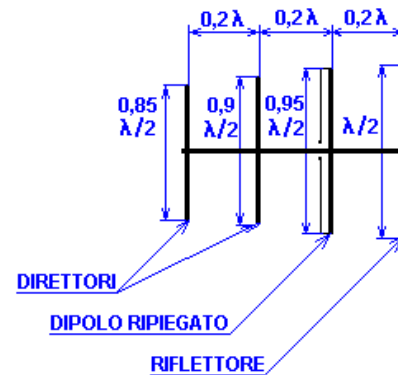
DIPOLO RIPIEGATO



L'antenna **Yagi - Uda**, indicata in figura, è costituita da un dipolo ripiegato che funge da ricevitore; da uno stilo che funge da riflettore; da alcuni stili che fungono da direttori; la sua

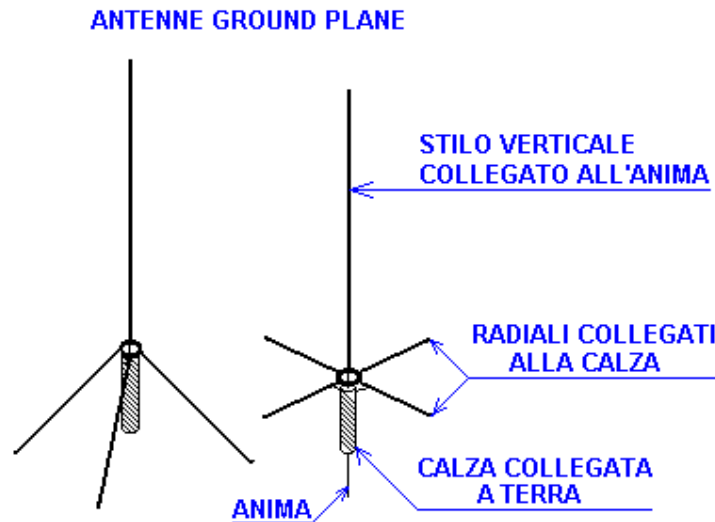
direttività ed il suo guadagno sono esaltati dal numero di direttori aggiunti, fino però al limite di una quindicina, perché oltre, un ulteriore aumento riduce il guadagno a causa del loro assorbimento di energia elettromagnetica. E' usata come antenna ricevente per la banda televisiva VHF.

ANTENNA YAGI - UDA



Le antenne **ground plane** sostituiscono la superficie riflettente del terreno utilizzata

dall'antenna Marconi, con una schiera di radiali e vengono usate dai CB e dai radioamatori.

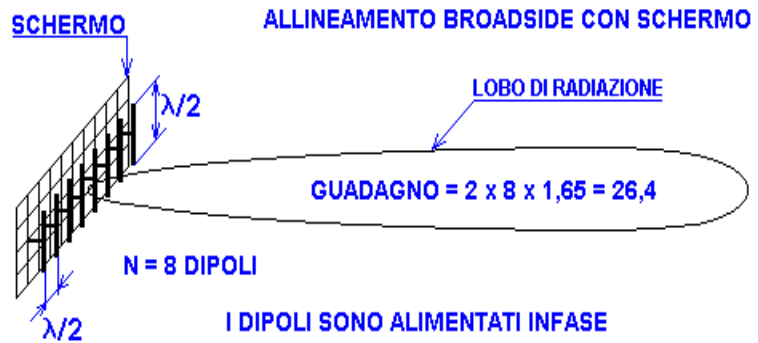


Un' antenna verticale a stilo ha un diagramma di radiazione che nel piano orizzontale è una circonferenza e pertanto irradia in tutte le direzioni del piano orizzontale.

Non è così per le antenne direttive le quali manifestano una direzione preferenziale di trasmissione, come ad esempio l'antenna **Yagi** costituita da più dipoli allineati.

E' possibile costituire quindi sistemi di antenne a stilo organizzate in allineamenti paralleli e complanari allo scopo di aumentarne la direttività, concentrando la maggior parte della loro energia elettromagnetica emessa, in una direzione, o in alcune direzioni preferenziali.

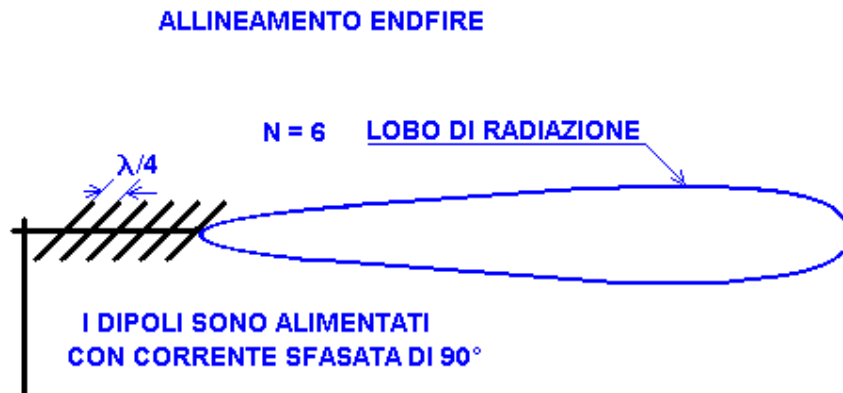
Sono detti **broadside** gli allineamenti di N dipoli a mezz'onda, eccitati in fase, nei quali



l'emissione ha luogo perpendicolarmente al piano delle antenne, distanti $\frac{\lambda}{2}$ fra loro ed in numero pari.

In questi allineamenti, il campo totale è N volte più intenso di quello di un solo dipolo. Inoltre la presenza di uno schermo produce un ulteriore fattore di moltiplicazione per due del guadagno (*vedi figura sopra*).

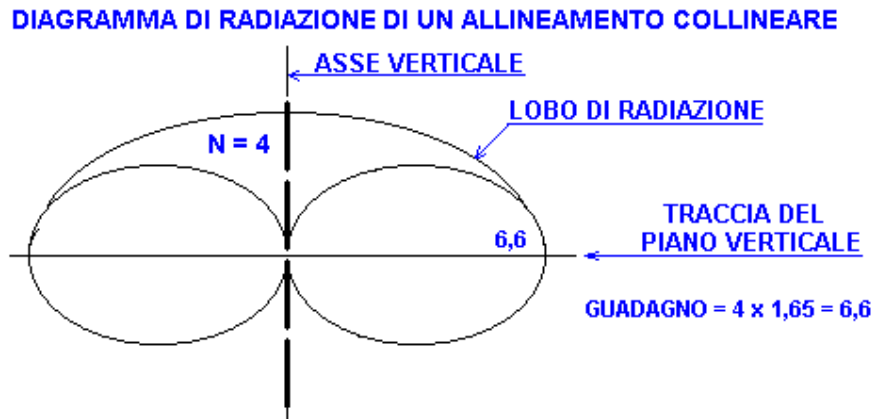
Sono detti **endfire**, gli allineamenti nei quali l'emissione ha luogo lungo l'asse dei dipoli.



Appartengono a questa categoria, le antenne Yagi, anche se vengono usate in ricezione.

Sono detti **collineari** gli allineamenti nei quali n dipoli a mezz'onda sono posti tutti su

una stessa retta ed in questo caso il diagramma

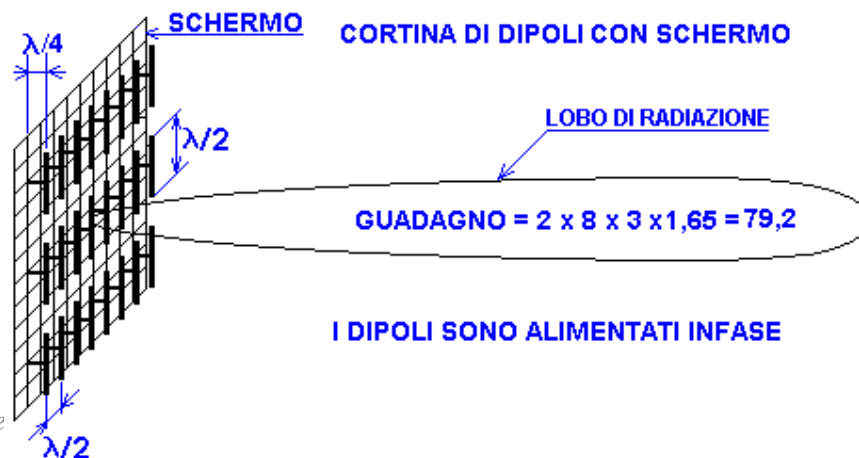


d'irradiazione è di forma circolare, cioè lo stesso di quello di una sola antenna, però n volte più intenso.

Sono usate nei ripetitori radiotelevisivi.

Le cortine di antenne sono poi costituite da allineamenti **broadside** e **collineari** insieme, quindi da n righe e N colonne di antenne ed il guadagno è uguale a $G = 1,65 \cdot n \cdot N$.

Se si vuole raddoppiare ulteriormente l'intensità del campo, si può mettere uno schermo costituito da una rete metallica dietro la cortina di dipoli e parallelamente ad essa, a



distanza $\frac{\lambda}{4}$.

Le cortine di antenne con schermo sono state usate come antenne trasmettenti per i primi radar perché molto direttive.
