

LE TRASMISSIONI VIA ETERE

B.Bortelli

Indice

0.1	Trasmissione via etere	2
0.1.1	Le onde elettromagnetiche	2
0.1.2	Le onde radio	5
0.1.3	Modalità di propagazione delle onde radio	7
0.1.4	Le antenne - Caratteristiche generali	7
0.1.5	Il dipolo hertziano	10
0.1.6	Il dipolo marconiano	11
0.1.7	Le antenne Yagi	12
0.1.8	Le antenne paraboliche	12

0.1 Trasmissione via etere

Nelle trasmissioni via etere il vettore è un'onda elettromagnetica nel campo delle onde radio o delle microonde. Nelle trasmissioni via etere esiste e deve essere

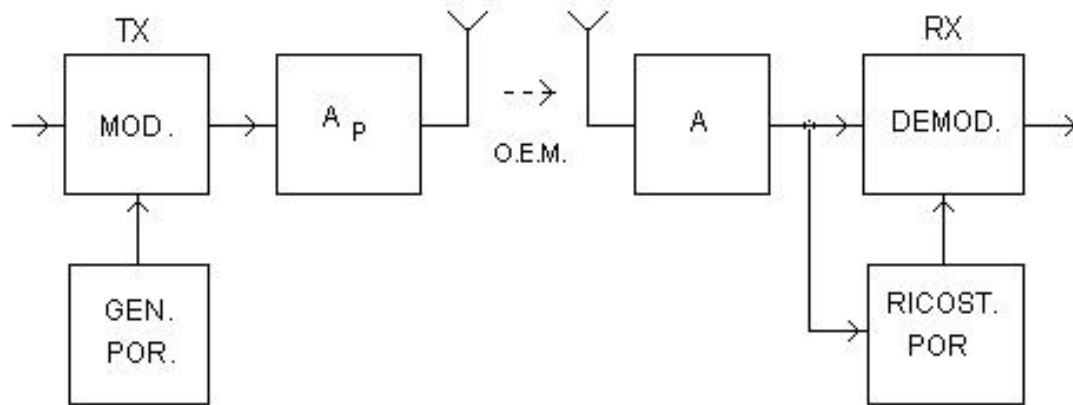


Figura 1: Schema a blocchi della trasmissione via etere

risolto sia il problema della natura, che della frequenza, quindi nel trasmettitore ritroviamo sia il generatore di portante che il dispositivo di uscita, composto da un amplificatore di potenza e da un'antenna, con funzione di attuatore.

L'antenna trasmittente, dal punto di vista elettrico, è equivalente ad un *risuonatore elettrico*, cioè ad un circuito risonante. Essa genera un'onda elettromagnetica con la stessa frequenza con cui è fatta risuonare. La forma e la lunghezza dell'antenna, quindi, sono dimensionate in modo che la stessa entri in risonanza in corrispondenza del valore di frequenza dell'onda elettromagnetica che si desidera generare.

L'onda elettromagnetica, trasmettendosi nell'etere perde via via di intensità, giungendo nei pressi del ricevitore con una intensità di campo molto bassa, ma, se la potenza del trasmettitore è adeguata e la distanza non eccessiva, ancora misurabile.

L'antenna ricevente, simile per forma all'antenna trasmittente ed anch'essa equivalente ad un risonatore elettrico, quando viene investita dal campo elettromagnetico su cui è sintonizzata, entra in risonanza e produce in uscita un segnale elettrico con frequenza pari alla frequenza del campo. Tale segnale viene amplificato e demodulato.

0.1.1 Le onde elettromagnetiche

Le **onde elettromagnetiche**, dette anche *radiazioni elettromagnetiche*, sono costituite da *quanti di energia elettromagnetica raggianti*. Un singolo quanto, chia-

mato anche **fotone**, è formato da un *campo elettrico* e da un *campo magnetico* oscillanti alla medesima frequenza, perpendicolari tra loro, perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda e che si irradiano nello spazio ad una velocità pari alla velocità della luce nel vuoto, o di poco inferiore, se lo spazio stesso non è vuoto.

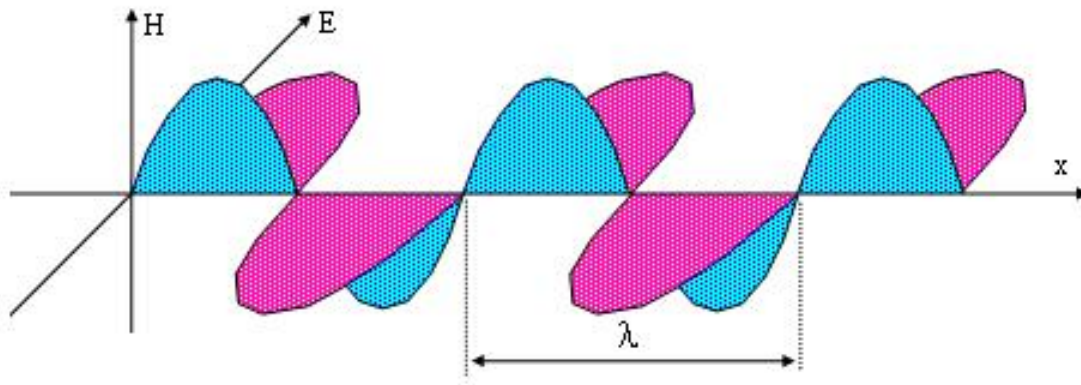


Figura 2: Onda Elettromagnetica

Si chiama **lunghezza d'onda**, λ , della radiazione elettromagnetica, *lo spazio percorso dall'onda nel periodo di ripetizione dei campi elettrico e magnetico*. Il prodotto della lunghezza d'onda per la frequenza di oscillazione dei campi elettrico e magnetico, fornisce la velocità di propagazione effettiva:

$$v = \lambda \cdot f$$

A parità di velocità, lunghezza d'onda e frequenza sono inversamente proporzionali, ovvero quando l'una è grande, l'altra è piccola e all'aumentare dell'una, l'altra diminuisce. Il quanto di energia trasportato dall'onda è, però, direttamente proporzionale alla frequenza:

$$E = h \cdot f$$

Quindi le radiazioni più energetiche sono quelle con frequenza più grande, ovvero con lunghezza d'onda più piccola. Esse, in relazione alla materia attraversata, sono più penetranti ed interagiscono con una superficie minore, la cui dimensione è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda.

Invece, la *densità di potenza*, S irradiata in un dato punto dello spazio, cioè l'*energia elettromagnetica* trasportata attraverso una *superficie unitaria*, in un *tempo unitario*, dai campi elettrico, E , e magnetico, H , è legata ai valori del campo stesso, essendo:

$$S = E_{eff} \cdot H_{eff} = \frac{E \cdot H}{2}$$

Rapportando, poi, i valori di E e di H , si ricava, facendo ad esempio l'analisi dimensionale, che tale rapporto ha le dimensioni di una resistenza, la quale viene chiamata: *resistenza dell'etere* ed ha il valore tipico di 377Ω .

Tutta la gamma delle onde elettromagnetiche è stata suddivisa in fasce con caratteristiche peculiari ordinate per valori di lunghezza d'onda e di frequenza.

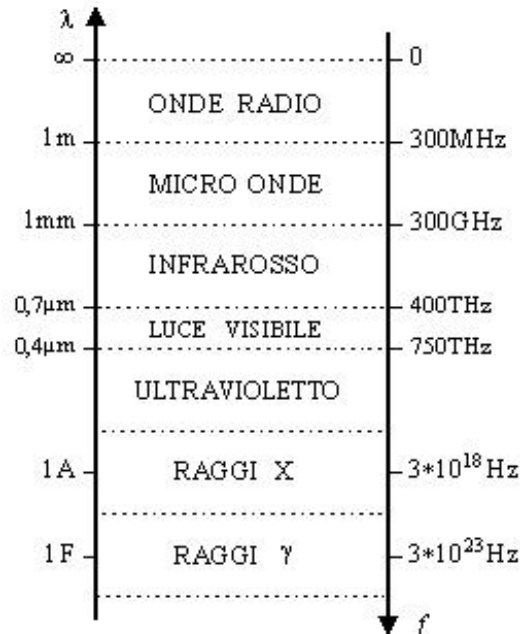


Figura 3: Suddivisione delle OEM per fasce di lunghezza d'onda

- **ONDE RADIO**

La fascia più bassa, meno energetica, è la fascia delle *onde radio*: comprende le onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda superiore a 1metro , ovvero con frequenza fino a 300MHz .

- **MICROONDE**

La fascia successiva è quella delle *microonde*: comprende le onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda da 1m a 1mm , ovvero con frequenza fino a 300GHz . Sono utilizzate soprattutto nelle trasmissioni via satellite, ma anche nei *ponti radio*.

- **INFRAROSSO**

Con lunghezze d'onda inferiori al *millimetro* si entra nell' *infrarosso* , il quale occupa tutto l'intervallo da 1mm a $1\mu\text{m}$, proseguendo oltre fino a

circa $0,7\mu m$, al limite della zona della luce visibile. La radiazione di questa fascia è essenzialmente energia termica, data dal calore emesso dai corpi per irraggiamento.

- **LUCE VISIBILE**

La stretta fascia con lunghezze d'onda che vanno da circa $0,7\mu m$ a circa $0,4\mu m$ corrisponde alla *luce visibile*.

- **ULTRAVIOLETTO**

Segue la fascia dell'*ultravioletto*, il quale comprende tutte le lunghezze d'onda inferiori a $0,4\mu m$, fino all'ordine di grandezza del *nanometro*. I raggi ultravioletti, pericolosi per la vita, sono schermati dalla fascia dell'ozono; in dosi elevate causano ustioni e tumori.

- **RAGGI X**

La fascia successiva, quella dei *raggi X*, è caratterizzata da lunghezze d'onda prossime alle dimensioni degli atomi, espresse in una unità chiamata *Angstrom* ($1 \text{ angstrom} = 10^{-10}m$). I raggi X sono molto pericolosi in quanto interagiscono direttamente con gli atomi e le molecole, spezzando i legami chimici e ionizzando gli atomi. Trovando molteplici applicazioni, dalla spettroscopia, alla medicina.

- **RAGGI γ**

A lunghezze d'onda ancora minori, confrontabili con le dimensioni dei nuclei degli atomi, si entra nella fascia della *radiazione nucleare*, ovvero dei *raggi γ* . L'unità di misura di riferimento dei nuclei è chiamato *Fermi* ($1 \text{ Fermi} = 10^{-15}m$). I raggi γ sono prodotti dal decadimento delle sostanze radioattive e dalle reazioni nucleari. Essi sono estremamente pericolosi per la salute.

Esistono radiazioni con energia superiore a quella dei raggi γ ? La risposta è affermativa. La terra, si sa, è soggetta ad un flusso continuo di materia e di energia proveniente dal cosmo. La parte di radiazione cosmica che rientra nelle onde elettromagnetiche può effettivamente avere energia ancora più grande dei raggi γ e, quindi, lunghezze d'onda minori. In realtà non vi è un limite massimo alla energia della radiazione elettromagnetica.

0.1.2 Le onde radio

Le *onde radio*, corrispondenti alla fascia più bassa delle onde elettromagnetiche, in virtù della loro lunghezza d'onda rilevante vengono generate ed intercettate facilmente con i circuiti radioelettronici. Come vedremo, infatti, le antenne necessarie per generare o per captare le onde radio devono avere dimensioni dello stesso ordine di grandezza della loro lunghezza d'onda e, quindi, le loro dimensioni tendono

a diminuire fortemente all'aumentare della frequenza.
Esse sono ulteriormente suddivise nelle seguenti fasce:

- **LF: low frequency**

Le onde radio con lunghezze d'onda maggiori, con frequenze da 30kHz fino a 300kHz , sono chiamate *LF*, od anche *onde lunghe*, per la loro lunghezza d'onda particolarmente elevata. Per produrre o captare le onde lunghe servono antenne particolarmente lunghe.

- **MF: medium frequency**

Da 300kHz fino a 3MHz si hanno invece le *onde medie*, *MF*. All'interno delle onde medie c'è la gamma di frequenze che in Italia è utilizzata per le trasmissioni radio *AM*, in modulazione di ampiezza, la quale va da circa 520kHz a circa 1620kHz . Per le *OM* si usano tipicamente antenne costituite da un filo conduttore avvolto a spirale, con diametro della spirale di qualche decina di centimetri, di solito collegato ad un avvolgimento su nucleo di ferrite. **HF: high frequency**

Da 3MHz fino a 30MHz si hanno le onde corte, *HF*. Sono utilizzate nelle comunicazioni amatoriali ed in ponti radio a frequenze radio. Le *HF* vengono di solito captate con un'antenna a stilo.

- **VHF: very high frequency**

Da 30MHz a 300MHz si ha la fascia delle *VHF*, all'interno della quale c'è la gamma delle trasmissioni radio *FM*, in modulazione di frequenza (da 88 a 108MHz) ed i canali utilizzati nelle trasmissioni televisive *VHF*, dal canale *A* al canale *H1*. In questa fascia si utilizzano le antenne a stilo, soprattutto nella gamma per le trasmissioni *FM*, e, per i canali televisivi, le antenne Yagi.

- **MICROONDE**

Sopra i 300MHz si entra nel campo delle *microonde*, diviso in tre gamme: *UHF: ultra high frequency*, fino a 3GHz , utilizzata per le trasmissioni televisive *UHF*, per le trasmissioni con telefono cellulare, per le trasmissioni *wireless*, ecc. Per questa gamma vengono utilizzate, per le trasmissioni televisive, le antenne Yagi o logperiodiche, mentre per le trasmissioni satellitari, le antenne paraboliche. Infatti alle frequenze di qualche *gigaHz*, caratteristiche delle trasmissioni *wireless*, la lunghezza d'onda è, quindi, la dimensione dell'antenna, è di una *decina* di *cm*, o meno, per cui l'elemento captante viene inserito nel fuoco di una parabola, allo scopo di intercettare e concentrare una maggiore intensità di campo.

SHF super high frequency, fino a 30GHz ;

EHF: extremely high frequency, fino a 300GHz .

0.1.3 Modalità di propagazione delle onde radio

Le onde radio si propagano in modo rettilineo, come la luce, e quindi sono in grado di raggiungere il ricevitore se questo si trova in linea con il trasmettitore, una modalità di trasmissione detta *modalità ottica*.

Le onde radio di frequenza elevata, le onde corte, e le microonde si propagano solo in modalità ottica. Pertanto nei ponti radio ad alta frequenza bisogna che l'antenna trasmittente e quella ricevente siano in vista l'una dell'altra.

Le onde radio, però, in particolare nelle fasce delle onde lunghe e delle onde medie, si possono propagare anche per *riflessione* tra strati diversi dell'atmosfera, ad esempio tra la stratosfera e la ionosfera. Infatti essendo la loro lunghezza d'onda particolarmente elevata, esse vedono ciascun strato dell'atmosfera come un'unica immensa struttura, con una netta superficie di separazione, avente un indice di riflessione, leggermente diverso da strato a strato. Tali onde, pertanto, sono in grado di raggiungere il ricevitore anche se lo stesso non è in linea con il trasmettitore. Questa modalità di trasmissione può essere sfruttata, però, solo nei sistemi che utilizzano basse frequenze radio, come le trasmissioni in onde lunghe.

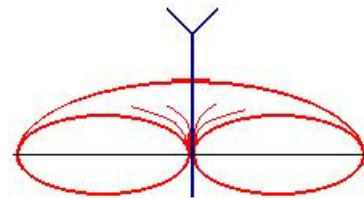
Invece, nelle trasmissioni a frequenze elevate, le ripetute riflessioni, su ostacoli fissi o mobili, introducendo echi, hanno l'effetto di *interferire* nelle trasmissioni stesse e di rendere il canale via etere un canale *disturbato*.

0.1.4 Le antenne - Caratteristiche generali

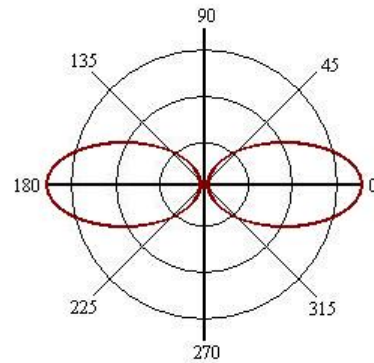
Come abbiamo già detto *l'antenna è un dispositivo capace di emettere oppure captare le onde radio*.

Si chiama *solido di radiazione* una figura in tre dimensioni, che indica le modalità di irraggiamento di un'antenna.

Esso si presenta come una superficie solida, che racchiude l'antenna, e nei cui punti vi è la medesima intensità di campo.

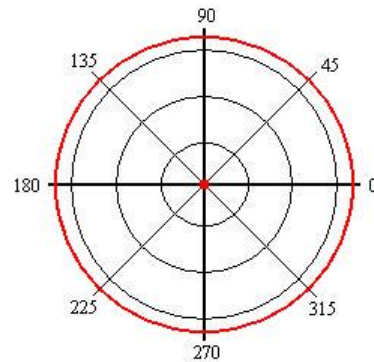


Al lato pratico, anziché a tutto il solido di irradiazione, si fa riferimento ad una sua sezione, la quale costituisce un più agevole *diagramma di radiazione* in due dimensioni, che di solito viene tracciato più volte a differenti altezze dal suolo.



Si chiama *radiatore isotropico* un'antenna ideale che irradia il campo elettromagnetico con la medesima intensità in tutte le direzioni.

Il radiatore isotropico è caratterizzato da un solido di radiazione uniforme, le cui superfici di equintensità sono delle superfici perfettamente sferiche. Questa caratteristica è poco utile, in particolare nei ponti radio, in quanto l'energia elettromagnetica dovrebbe essere convogliata solo verso il ricevitore e non dispersa in tutte le direzioni.



Se indichiamo con P_i la potenza di campo irradiata dall'antenna, alla distanza d la potenza irradiata si distribuisce uniformemente su una superficie sferica, data da $4\pi d^2$, producendo una densità di campo, S , data dal rapporto tra potenza irradiata e la superficie stessa:

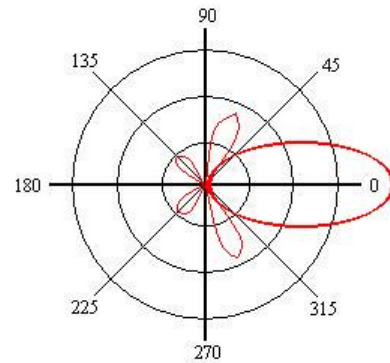
$$S = \frac{P_i}{4\pi d^2}$$

Nelle antenne reali, invece, la densità di campo cambia, a volte anche drasticamente, in funzione della direzione verso la quale l'antenna è puntata.

Tra le antenne reali, si chiama *antenna direttiva* un'antenna capace di concentrare ed irradiare il campo elettromagnetico in una direzione particolare, denominata *direzione di puntamento*.

L'antenna direttiva è caratterizzata da un solido di radiazione con un lobo accentuato nella direzione di irraggiamento.

La *direttività* permette alle antenne reali di irradiare alla medesima distanza con la medesima intensità di campo, impegnando solo una frazione della potenza richiesta ad un radiatore isotropico. Si dice anche che l'antenna direttiva *guadagna* rispetto ad radiatore isotropico.



Più precisamente, considerati un'antenna reale ed un radiatore isotropico, che irradiano la stessa potenza P_i , si definisce *guadagno d'antenna*, G , il rapporto tra la densità di potenza S prodotta dall'antenna reale nel punto del solido di radiazione in cui l'irraggiamento è massimo, e la densità di potenza, S_{iso} , prodotta dal radiatore isotropico nello stesso punto:

$$G = \frac{S}{S_{iso}} \quad G(dB) = 10 \log \frac{S}{S_{iso}}$$

La conoscenza del guadagno d'antenna ci permette di determinare la densità di potenza nel punto in cui si trova l'antenna ricevente:

$$S = S_{iso} \cdot G = 4\pi d^2 \cdot P_i \cdot G$$

Le antenne riceventi, per il principio di reversibilità, hanno le stesse caratteristiche delle antenne trasmettenti, potendo esse stesse essere direttive ed avere un proprio solido di radiazione e un guadagno d'antenna. Per esse acquista importanza anche il concetto di *area efficace*, definita come *la superficie che deve attraversare il campo elettromagnetico incidente, perchè lo stesso venga captato dall'antenna*.

La conoscenza dell'area efficace, A_{eff} diventa cruciale per determinare la *potenza di segnale*, P_r , ricevuta, avendosi:

$$P_r = S \cdot A_{eff}$$

L'area efficace dipende dal quadrato della lunghezza d'onda del campo elettromagnetico trasmesso e dal guadagno d'antenna, secondo la seguente relazione:

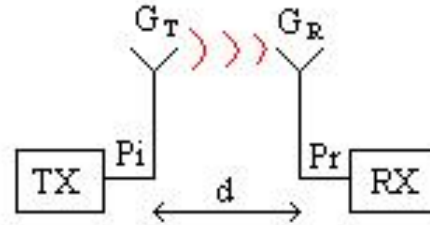
$$A_{eff} = G_r \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Ne consegue che: *all'aumentare della frequenza della radiazione elettromagnetica, l'area efficace di un'antenna diminuisce e quindi diminuisce anche la sua capacità*

captante.

Siamo ora in grado di scrivere la *formula fondamentale delle trasmissioni via etere.*

A tale scopo effettuiamo un ponte radio con un trasmettitore caratterizzato da una potenza incidente, P_i , ed un'antenna trasmittente avente guadagno, G_t , ed un ricevitore, posto alla distanza d e caratterizzato da un'antenna ricevente con guadagno, G_r ed una potenza ricevuta, P_r .



Per quanto detto, avremo:

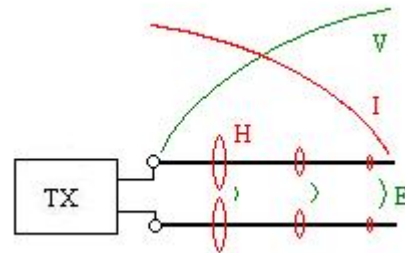
$$\frac{P_r}{P_i} = G_i \cdot G_r \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

L'espressione è fondamentale per il dimensionamento del ponte radio, consentendo di dimensionare le antenne ed in particolare l'antenna ricevente, in funzione della densità di campo presente e delle potenze, quella irradiata dal trasmettitore e quella ricevuta.

0.1.5 Il dipolo hertziano

Per ottenere un'antenna si parte da uno spezzone di *linea elettrica* in $\frac{\lambda}{4}$, con uscita aperta.

Come noto esso opera in regime di *onda stazionaria*, presentando in uscita, un *ventre* di tensione ed un *nodo* di corrente. Essendo, però, la sua lunghezza pari esattamente a mezza lunghezza d'onda, il suo comportamento in entrata è diametralmente opposto, presentando un *nodo* di tensione ed un *ventre* di corrente.



Pertanto la corrente assorbita dal generatore è massima, mentre la tensione è pressoché nulla, è quindi il suo comportamento elettrico è equivalente a quello di un *circuito risonante serie*, caratterizzato da una frequenza di risonanza data da:

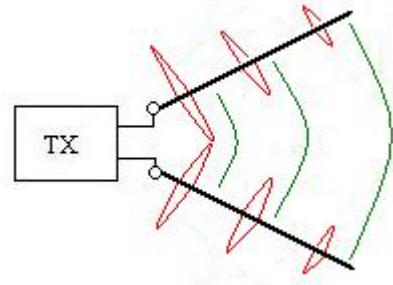
$$f_r = \frac{c}{\lambda}$$

La corrente circolante nei conduttori, come sappiamo, genera nello spazio ad essa circostante un *campo magnetico*, con intensità ad essa proporzionale, e, quindi,

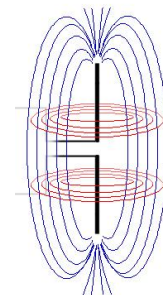
massima dal lato dell'entrata, mentre il potenziale produce un corrispondente *campo elettrico*.

Allontanando progressivamente i due conduttori, i campi si disperdono nell'etere con massima intensità nella direzione perpendicolare ai conduttori.

Se percorsi da corrente, i due conduttori acquistano la capacità di ricevere e trasmettere onde elettromagnetiche, nelle direzioni ad essi perpendicolari, alla medesima frequenza di risonanza.



Continuando ad allontanare i conduttori, fino a disporli in direzioni opposte, realizziamo la struttura di base di un'antenna, denominata: *dipolo hertziano* in $\frac{\lambda}{2}$, costituita da due conduttori metallici, (alluminio, o acciaio, o rame, ecc), orientati in direzioni diametralmente opposte, per una lunghezza complessiva pari a $\frac{\lambda}{2}$.



Il dipolo hertziano non è un radiatore isotropico, dato che il suo solido di radiazione ha un massimo nelle direzioni ad esso perpendicolari, ma disperde comunque il campo a 360°. Dato che lunghezza d'onda e frequenza sono inversamente proporzionali, anche la lunghezza del dipolo hertziano decresce con la frequenza, essendo particolarmente elevata per le *LF* e per le *MF*.

0.1.6 Il dipolo marconiano

Disponendo i due bracci del dipolo hertziano in senso verticale, se si dispone di un buon *piano di terra*, il conduttore inferiore può essere agevolmente sostituito dal piano di terra stesso.

In questo modo l'antenna si riduce ad uno *stilo*, costituito da un singolo conduttore di lunghezza $\frac{\lambda}{4}$, denominato *dipolo marconiano* in $\frac{\lambda}{4}$.



Sono dipoli marconiani le *antenne a stilo*, ad esempio quelle montate sulle auto. Esse irradiano con massima densità di campo nella direzione della linea di terra.

Operano bene nel campo delle HF , ma possono essere utilizzate anche in gamme di frequenza maggiore.

0.1.7 Le antenne Yagi

Per ottenere un'antenna direttiva vengono disposti nella direzione di ricezione, degli spezzoni di conduttore, denominati *direttori*, davanti al dipolo hertziano. Essi sono leggermente più corti e a distanze pari a circa $0,2\lambda$. Allo stesso modo, dietro al dipolo viene inserito un ulteriore spezzone di conduttore, leggermente più lungo, il quale funge da riflettore. Ciascun spezzone intercetta una parte del campo e la riflette verso il dipolo, in modo che il campo totale sul dipolo venga intensificato attraverso interferenza costruttiva.

Sono realizzate in questo modo le antenne Yagi per la ricezione delle trasmissioni televisive nelle bande VHF ed UHF .

Una variante delle antenne Yagi è costituita dalle antenne logperiodiche, nelle quali i direttori hanno lunghezze decrescenti all'aumentare della distanza dal dipolo. Esse son antenne a larga banda, capaci di ricevere l'intera gamma UHF , anziché un singolo canale, in quanto, al variare della frequenza, varia l'elemento direttore che entra in risonanza.



0.1.8 Le antenne paraboliche

Alle frequenze nel campo delle microonde, le lunghezze d'onda sono particolarmente piccole, per cui, anche se è semplice realizzare le antenne, queste sono caratterizzate da una superficie di intercettazione molto piccola e quindi producono una potenza molto bassa. Per ovviare al problema l'antenna vera e propria, l'illuminatore, viene montata sul fuoco di una parabola.



La parabola consente di intercettare il campo che investe la sua superficie e lo concentra, intensificandolo, nel fuoco, dove viene captato dall'illuminatore. Per evitare che l'illuminatore copra una parte del campo, spesso lo stesso si trova in posizione spostata rispetto al centro ed allora la forma dell'antenna è sagomata secondo una curva leggermente diversa.