

# HamWeb - Antenne: il dipolo

Finora abbiamo visto alcuni importanti argomenti riguardo le antenne in generale; ora entriamo un po' più nel vivo della faccenda, cominciando a vedere le antenne quelle vere, insomma quelle fatte di materia solida, cominciando con la più importante di tutte (per noi): il dipolo.

## Antenna elementare

Prima di affrontare il dipolo lungo, conviene soffermarci un momento su suo ingrediente principale: l'antenna corta, più propriamente detta *elementare*. Di un filo conduttore, teso nel vuoto e molto lungo, che supponiamo percorso da una corrente a radiofrequenza, prendiamo in considerazione un pezzetto molto corto: così corto rispetto alla lunghezza d'onda che l'intensità di corrente su di esso sia praticamente uguale in tutti i punti. Questo pezzetto di filo, che è ovviamente un'antenna, produce intorno a sé un campo elettromagnetico ('campo em' per chi si fosse posto all'ascolto soltanto ora); le linee di forza del campo elettrico sono (localmente) parallele al filo, mentre le linee del campo magnetico sono cerchi concentrici. Nello spazio libero, il campo magnetico ed il campo elettrico sono perpendicolari tra loro ed alla direzione di propagazione; quest'ultima sarà dunque rivolta radialmente rispetto al filo. Il fronte dell'onda prodotta ha quindi una forma cilindrica, il cui raggio s'allarga nel tempo (ovviamente, alla velocità della luce).

## Antenne di lunghezza finita

Il campo prodotto da un filo di lunghezza non trascurabile è costituito dalla somma dei singoli campi elementari prodotti da ciascuno degli infiniti pezzetti di lunghezza infinitesima (ovvero, 'praticamente zero ma non proprio'); nel linguaggio della domenica, si direbbe che è l'integrale, calcolato lungo la linea del radiatore, dei campi elementari. Il risultato di questo calcolo è un campo magnetico ancora concentrico al filo, accompagnato da un campo elettrico le cui linee giacciono sul piano del dipolo e si curvano e riuniscono ai suoi estremi, mentre la direzione di propagazione in ogni punto è sempre uscente dal centro del dipolo stesso.

Il dipolo tutto intero *non può* avere corrente costante in tutti i punti: all'estremo non alimentato, la corrente è zero per forza, perché la carica non può uscire dal filo ed andarsene per i fatti suoi; questo è un punto fermo del nostro ragionamento e vale per qualsiasi lunghezza dell'antenna (ma, in realtà, è solo un'approssimazione, non fosse altro che per il potere delle punte di disperdere parte della carica elettrica che vi si accumula).

Dal punto di alimentazione all'estremo dell'antenna, la corrente andrà digradando in maniera graduale e regolare (i matematici direbbero 'continua') fino ad arrivare a zero; si può dimostrare che lungo l'antenna la distribuzione della corrente, che è associata al valore del campo magnetico, segue un andamento *quasi* sinusoidale; poiché il campo elettrico è associato al campo magnetico con uno sfasamento di un quarto di periodo, e la tensione è associata al campo elettrico, la tensione lungo l'antenna segue lo stesso andamento della corrente ma, come sopra, è sfasata di un quarto di periodo (attenzione: stiamo semplificando all'estremo!). Perciò, dove la corrente è massima la tensione è minima, e viceversa.

## La resistenza di radiazione

La resistenza di radiazione di un dipolo dipende dalla sua lunghezza elettrica in rapporto alla lunghezza d'onda effettiva; quando questo rapporto è molto piccolo, la resistenza di radiazione è anch'essa molto piccola, e cresce in maniera continua all'aumentare della lunghezza fino a valori di qualche centinaio di ohm.

Il motivo di ciò sta nel fatto che, se si mantiene costante la corrente di alimentazione del dipolo, all'aumentare della lunghezza cresce la potenza totale irradiata, in quanto ogni tratto di filo irradia il suo campo che va a sommarsi al totale; la crescita non è però lineare, anche perché, come vedremo nel seguito, la corrente in un dipolo reale non è uguale in tutti i punti.

L'andamento di questa resistenza, data la complessità del relativo calcolo, è riportato normalmente in grafici (ad esempio, lo si può trovare nell'ARRL Handbook, ma anche in quasi tutti i manuali di settore). La resistenza di radiazione non va comunque confusa con l'*impedenza* del dipolo al punto di alimentazione, che dipende, oltre che da questa, anche dalle componenti reattive e *dalla posizione* del punto di alimentazione (che può essere scelto ad arbitrio in un punto qualsiasi del dipolo, anche se per comodità spesso si sceglie il centro).

## Il fattore di velocità

Naturalmente, quando si parla di un quarto d'onda, si intende la distanza lungo la quale effettivamente l'onda compie un'oscillazione pari ad un quarto di periodo: questa lunghezza perciò dipende dalla velocità di propagazione dell'onda intorno al dipolo. Sento quello, laggiù in fondo, che dice: "Ma come, non l'abbiamo messo nel vuoto?". Sì, l'abbiamo messo nel vuoto, ma almeno una cosa in questo vuoto c'è: il filo!

La velocità dell'onda quindi dipende in primo luogo dalle caratteristiche fisiche del filo, che ha una permeabilità magnetica ed una costante dielettrica, come ogni sostanza che si rispetti; ma anche dalla sua verniciatura, dal suo isolamento eccetera; inoltre, le antenne reali sono messe sui tetti, quindi anche la tegola vuole la sua parte...

In conclusione, se l'antenna è abbastanza distante dal tetto, il campo em viaggia ad una velocità che va dal 92% al 98% circa di quella nel vuoto, come si è già visto in precedenza.

## Il dipolo a mezz'onda

Un caso particolare della struttura fin qui descritta è costituito da un'antenna lunga esattamente mezza onda: in questo caso, la corrente è nulla ad entrambi gli estremi, mentre è *massima* al centro, e contemporaneamente la tensione è massima agli estremi e minima al centro: questa struttura

presenta quindi al suo centro la minima impedenza possibile: si può dimostrare che essa vale la resistenza di radiazione vale (circa) 72 W , più una certa componente reattiva, originata dal fatto che una certa frazione dell'energia viene immagazzinata localmente intorno al dipolo.

Questa componente dipende da vari fattori, fra cui i principali sono il diametro del conduttore, che ne determina l'autoinduttanza per unità di lunghezza, e la sua capacità verso terra. Complessivamente, questa reattanza (che si può calcolare ad esempio con l'incasinatissimo integrale di Hallèn) vale circa 60 W , per un'antenna fatta di filo sottile rispetto alla lunghezza, ma può essere parecchio superiore quando il filo invece abbia diametro rilevante (ad esempio, nel caso di un tubo).

### Comportamento fuori frequenza

Ovviamente, la frequenza per la quale il dipolo è lungo esattamente mezz'onda è una sola; quando ci si allontana da questa frequenza centrale, ciò che appare è la comparsa di un'ulteriore componente reattiva, che è di natura capacitiva quando l'antenna è troppo corta, cioè quando la frequenza è più bassa di quella centrale, e di natura induttiva quando l'antenna è troppo lunga, cioè la frequenza è più alta di quella centrale. Per inciso, ad una certa frequenza, vicina a quella di risonanza, la reattanza propria e la reattanza introdotta dal disallineamento di frequenza si compensano, così che l'antenna presenta impedenza puramente resistiva: questa condizione viene chiamata spesso (ma non del tutto propriamente) *risonanza* dell'antenna.

Vale la pena di osservare che la resistenza di radiazione varia molto più lentamente della reattanza, ragion per cui, in un campo di frequenze abbastanza esteso intorno a quella centrale, è sufficiente compensare quest'ultima con una reattanza variabile in serie per riottenere un'impedenza prossima ai 72 W .

### Lobi di radiazione del dipolo

Il lobo di radiazione del dipolo è dotato di notevoli simmetrie: prima di tutto, esso è un solido di rotazione intorno all'asse del filo; vale a dire, se ad esempio pongo il filo in verticale e gli giro intorno a distanza costante, il comportamento che vedo è lo stesso lungo tutta la circonferenza percorsa. Inoltre si ha un'altra importante simmetria rispetto al piano assiale del dipolo, cioè a quel piano che passa per il centro ed è perpendicolare al filo; vale a dire, se metto il dipolo in orizzontale e mi sposto in uguale misura a destra o a sinistra rispetto al centro, vedo lo stesso campo.

L'irradiazione del dipolo è massima lungo il piano assiale, perché qui si sommano in fase i contributi dei due bracci, mentre è zero nella direzione del filo; in sostanza, il solido di radiazione è una specie ciambella lungo il cui asse è infilato il dipolo, e la sua sezione (cioè la superficie che si vede tagliando verticalmente a metà la ciambella) è a forma di otto.

### Guadagno del dipolo e lunghezza efficace

Poiché il dipolo non irradia lungo il suo asse, per la già citata legge della coperta (vedi [guadagno e direttività](#)) la potenza deve essere concentrata altrove, in particolare sul piano assiale dove il campo è massimo. Si ha quindi un certo guadagno rispetto all'antenna isotropica; questo guadagno vale 1,67 in potenza, ovvero 2,2 dB.

Al guadagno è legata la lunghezza efficace dell'antenna, che è la lunghezza che dovrebbe avere un'antenna percorsa da corrente uniforme per produrre la stessa intensità di campo, ed è notevolmente inferiore alla lunghezza reale perché le componenti estreme dell'antenna, che sono percorse da correnti molto modeste, contribuiscono proporzionalmente poco alla potenza irradiata.

### Dipoli accorciati (detti anche 'caricati')

Consideriamo un braccio di un ordinario dipolo e prendiamo su di esso due punti separati da una certa distanza; tra i due punti ci sarà una certa tensione, ed inoltre in ciascuno dei due punti scorre una certa corrente. Possiamo ora pensare di sostituire il tratto di antenna compreso tra i due punti con un induttore a costanti concentrate che, percorso dalla corrente a radiofrequenza, imponga ai suoi capi la stessa tensione che si avrebbe con il tratto di antenna al suo posto.

La distribuzione di tensione in questo caso ha un 'salto', ma l'effetto è che la tensione oltre l'induttore non è cambiata, perciò, se l'antenna era risonante, continua ad esserlo pur essendo stata accorciata. Naturalmente, c'è un prezzo da pagare; i fenomeni che si verificano sono vari:

- il tratto di antenna eliminato, non essendoci più, non può contribuire al campo totale irradiato, motivo per cui la resistenza di radiazione si abbassa (parecchio); questo effetto è tanto più marcato quanto più l'induttore è posto in prossimità dei punti di massimo della corrente (che di solito coincidono con il punto di alimentazione al centro del dipolo);
- questo comporta non solo una diversa impedenza dell'antenna, ma specialmente una minore efficienza, perché le perdite dell'antenna non sono modificate di molto dall'accorciamento, ma in cambio sono sostanzialmente peggiorate dall'aggiunta dell'induttore;
- la corrente all'ingresso ed all'uscita dell'induttore è necessariamente uguale (mentre prima variava gradualmente); perciò il campo varia bruscamente intorno all'induttore di compensazione e viene deformato il lobo di radiazione.

Per questi motivi, le antenne accorciate vengono prese in considerazione solo quando le condizioni oggettive non permettono assolutamente l'uso di antenne di lunghezza normale (ad esempio, frequenze molto basse o mezzi mobili), mentre non sono assolutamente consigliabili quando si possa scegliere una diversa alternativa.

### Il dipolo come linea di trasmissione non uniforme

Un'ultima nota finale può aiutare a capire alcuni fenomeni tipici del dipolo, fornendo anche alcuni spunti per il calcolo delle antenne di lunghezze 'strane'; esso può infatti essere considerato come una linea bifilare non uniforme aperta, in cui la distanza tra i conduttori varia

