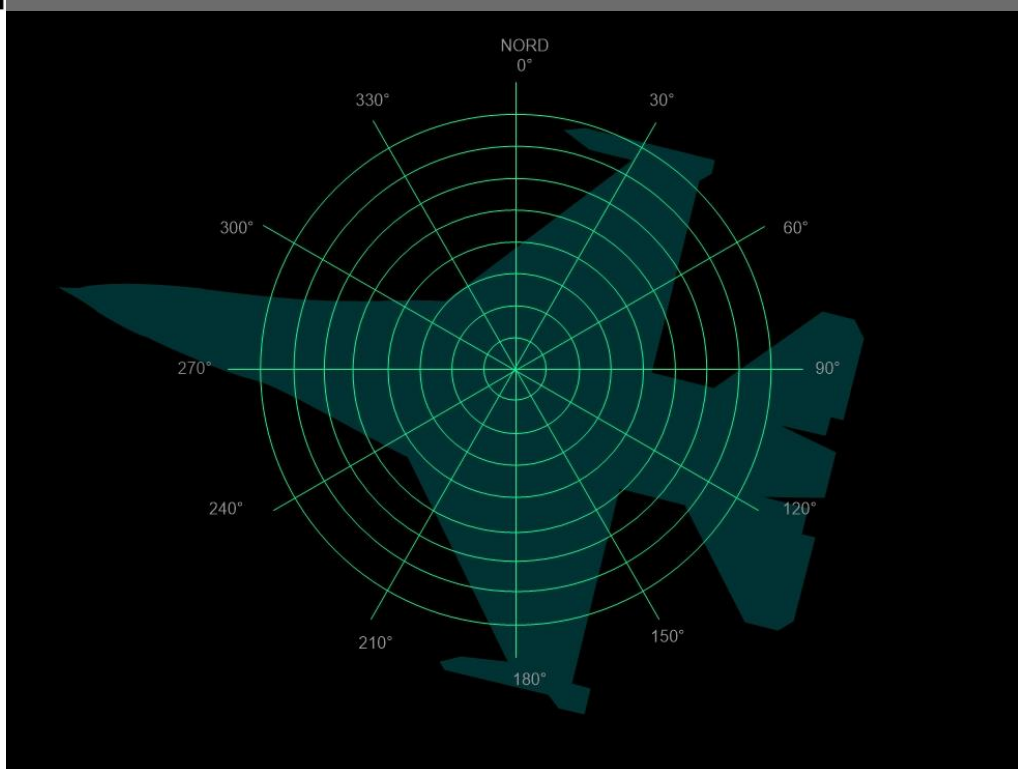


TECLA
SPELGATTI

ELETTROTECNICA, ELETTRONICA E
AUTOMAZIONE



PER LA CLASSE QUINTA DELL'ISTITUTO TECNICO AERONAUTICI
CONDUZIONE DEL MEZZO



Questo testo è distribuito con licenza Common Creative:

<http://creativecommons.org/licenses/>



CC BY-NC-ND Attribuzione - Non commerciale - Non opere derivate

E' permesso scaricare l'opera e condividerla con altri, ma non modificarla ne utilizzarla, interamente o in parte, per scopi commerciali.

PARTE I: I SEGNALI

1 INTRODUZIONE: LE INFORMAZIONI

La parola informazione fa parte del linguaggio comune ed indica un qualcosa che consente di eliminare delle incertezze, di far conoscere delle cose. Chi chiede delle informazioni vuole avere notizie, ad esempio vuole sapere quando parte un treno, quanto costa un CD, se il professore che lo esaminerà è severo o meno. Sono tutte cose che consentono di conoscere qualcosa e quindi di eliminare un dubbio.

La parola informazione deriva dal latino e significare “dare forma”. Un’informazione infatti consente di dare forma a ciò che prima era indefinito.

Ad esempio, uno studente che non sa nulla sull’insegnante che lo esaminerà ha in mente un generico concetto di “commissario d’esame”. Si tratta probabilmente di un’immagine umanoide priva di ogni altra caratteristica. Se gli viene detto che il commissario è un “uomo giovane” il generico concetto di essere umano si modellerà, prenderà una forma, e diventerà un’immagine più definita. Mancano però molte informazioni: ha i capelli? Di che colore? E’ alto? E’ grasso? E’ severo?

Se a queste informazioni aggiungiamo che il commissario è “alto e severo”, l’immagine si modificherà nuovamente a seguito dell’informazione aggiunta.

Le informazioni quindi danno forma ad un qualche cosa, eliminando le incertezze.

1.1 Il processo di comunicazione

L’informazione sta alla base della comunicazione, ma da sola non basta per comunicare qualcosa.

Si pensi, ad esempio, alla comunicazione verbale, cioè alle parole che vengono pronunciate a voce:

La voce è composta da due elementi:

- il suono
- il significato

La differenza tra questi due concetti è molto importante: se sentiamo parlare in cinese, udiamo i suoni, ma non ne comprendiamo il significato. Il significato è dunque l’informazione vera e propria mentre il suono è ciò che consente di portare l’informazione da chi parla a chi ascolta.

Ad esempio, immaginiamo che qualcuno voglia dire ad un’altra persona di alzarsi. Bisogna naturalmente conoscere una lingua comune, ma questo non basta. Una persona muta, pur conoscendo il significato del concetto “alzati” non è in grado di emettere il suono e quindi di inviare l’informazione.

Il suono non è l’unico mezzo per trasmettere messaggi. E’ possibile mandare un messaggio tramite la luce (come facevano una volta i fari del porto) o tramite l’elettricità (ad esempio il telefono). In generale, la grandezza fisica, suono, luce, elettricità, ecc, che trasporta il messaggio viene chiamata **MEZZO DI TRASPORTO**.

Il messaggio da trasmettere dunque si compone di un significato, che è l'informazione vera e propria, e di un mezzo che sostiene il messaggio e lo trasporta fino a destinazione.

L'insieme di queste due cose viene chiamato **SEGNALE**.

SEGNALE = MEZZO DI TRASPORTO + INFORMAZIONE

Il mezzo di trasporto riesce a contenere l'informazione grazie al fatto che può variare: ad esempio con la voce possiamo pronunciare tanti diversi suoni che, combinati secondo una convenzione, ci consentono di dire "ciao" piuttosto che "addio". Le parole vengono sempre articolate in base ad un codice. Ad esempio, il fatto che la parola "tavolo" esprima un certo concetto è una questione di convenzioni, di codice appunto. Per un tedesco la parola "tavolo" non significa nulla mentre la parola "Tisch" (tavolo in tedesco) ha un significato.

UN SEGNALE È DUNQUE COSTITUITO DALLA VARIAZIONE DI UNA GRANDEZZA FISICA (LUMINOSITÀ, CORRENTE ELETTRICA, PRESSIONE) CHE TRASPORTA INFORMAZIONI.

Ma non è finita qui. Il suono ha bisogno di un mezzo materiale per propagarsi: nel vuoto, infatti, non si sente nulla. Per comunicare abbiamo quindi bisogno di un mezzo nel quale far viaggiare le informazioni.

Se il mezzo di trasporto non è adatto al mezzo di trasmissione non è possibile comunicare.

Per capire bene questo concetto immaginiamo di essere naufragati su un'isola deserta e di dover mandare un messaggio di SOS che abbiamo scritto su carta. Un mezzo di trasporto adatto all'oceano è una bottiglia nella quale infilare il messaggio; invece un mezzo di trasporto non adatto è una busta di carta.

Un ulteriore paragone è il seguente: la strada o il fiume possono essere paragonati al mezzo di trasmissione, le automobili o le barche al mezzo di trasporto.

Un sistema di comunicazione si compone quindi di tre elementi:

- **EMETTITORE:** che emette il segnale
- **RICEVITORE:** che riceve il segnale
- **MEZZO DI TRASMISSIONE:** nel quale viaggia il segnale (se ha un mezzo di trasporto adatto).



Quindi per comunicare è dunque necessario passare attraverso una serie di stadi:

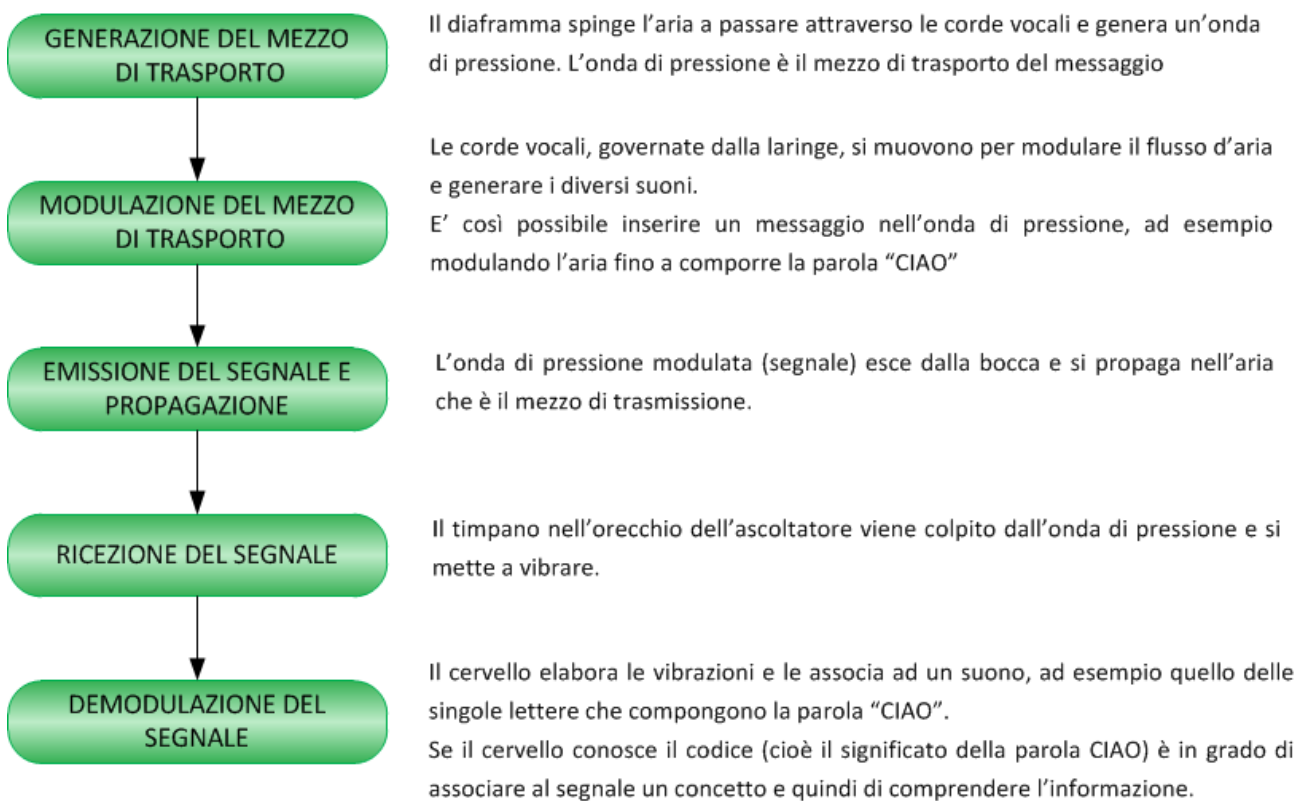
- Generazione del mezzo di trasporto, cioè della grandezza fisica.

- Modulazione del mezzo di trasporto: la grandezza fisica viene fatta variare per inserire l'informazione
- Emissione del segnale e propagazione
- Ricezione del segnale
- Decodifica del segnale
- Analisi del segnale

Le ultime due fasi possono anche essere unite in una sola che prende il nome di demodulazione.

Affinché la comunicazione abbia luogo è necessario che tutte queste fasi avvengano senza errori. Se anche sola una di esse viene a mancare non è possibile comunicare.

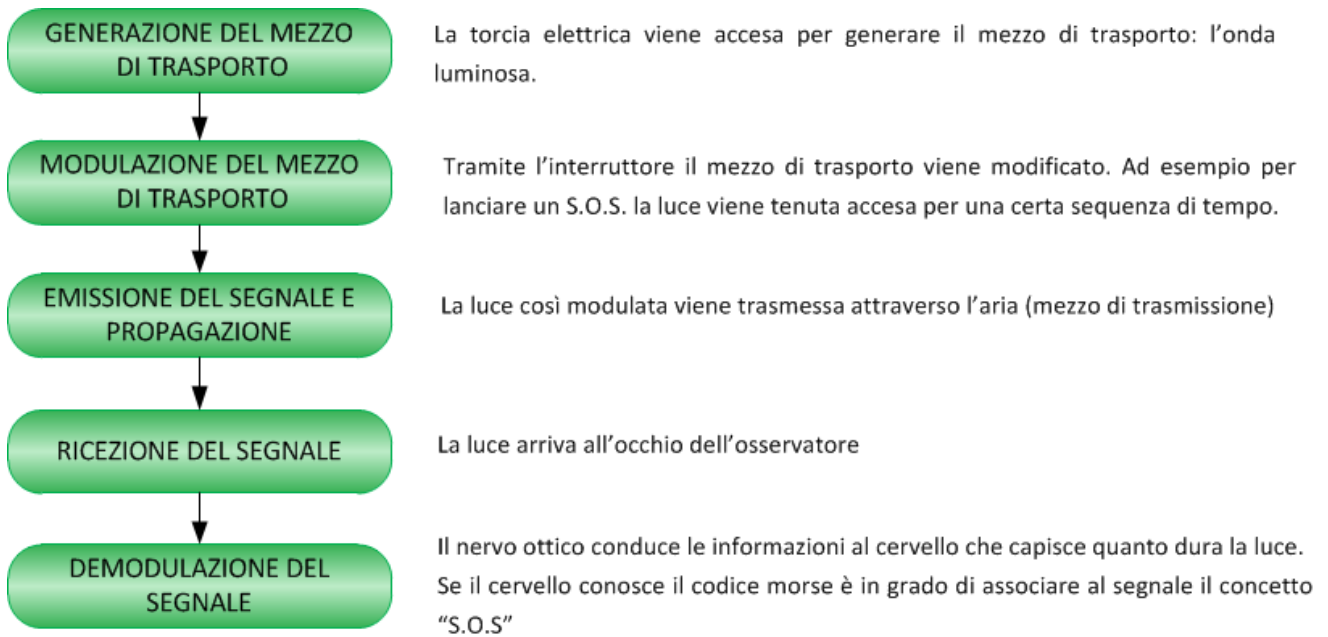
Per capire il significato delle varie fasi analizziamo la comunicazione verbale: vediamo, ad esempio, cosa succede quando una persona saluta un'altra persona con la parola "CIAO".



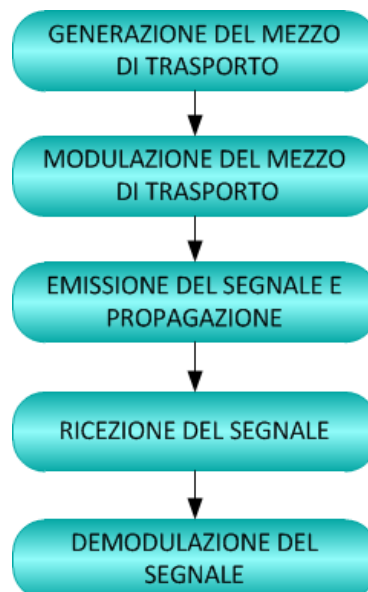
Se una persona è muta non è in grado di generare il mezzo di trasporto (la voce) e quindi la catena si spezza nella fase 1 e la comunicazione non avviene. Viceversa, una persona sorda per una malformazione al timpano non può ricevere il segnale e quindi il processo di comunicazione fallisce nella fase 4.

Infine, se chi ascolta una conversazione non conosce la lingua in cui si sta parlando, il processo di comunicazione fallisce nella fase 6, quella di decodifica. L'ascoltatore, cioè, riceve il messaggio e lo analizza, ma non è in grado di associare ad esso il corretto significato.

Analizziamo ora un altro esempio di comunicazione. Consideriamo il codice morse luminoso e vediamo in cosa consistono le diverse fasi analizzate prima:



Anche in questo caso basta che una delle fasi non sia eseguita correttamente per far fallire il processo di comunicazione. Se la batteria della torcia è scarica e non viene emessa luce, la comunicazione fallisce nella fase 1; se chi guarda il segnale luminoso non conosce il codice morse la comunicazione fallisce nella fase 6. Possiamo quindi riassumere dicendo che la comunicazione avviene in 5 fasi principali:



Naturalmente ognuna di queste fasi è a sua volta composta da altre fasi, a volte molto complesse. Nei prossimi capitoli studieremo queste fasi e i dispositivi che consentono di comunicare a distanza, come la radio, o di fare rilevamenti a distanza, come il radar.

1.2 Classificazione dei segnali

E' possibile comunicare in molti modi diversi. Pensiamo anche solo all'alfabeto morse, al Braille, ai segnali stradali e ai segnali luminosi. In tutti questi casi, nonostante il diverso tipo di segnale, abbiamo sempre un mezzo di trasporto e un'informazione che viene inserita al suo interno tramite un processo che prende il nome di modulazione.

In questo paragrafo studieremo come si possono classificare i diversi segnali.

1.2.1 Mezzo di trasporto

I segnali possono essere classificati in diversi modi. La prima classificazione prende in considerazione il **MEZZO DI TRASPORTO** e divide i segnali in:

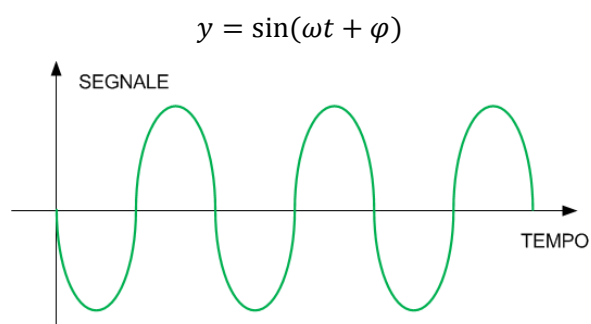
- **SEGNALI SONORI**, cioè il mezzo di trasporto è un'onda di espansione e di compressione.
- **SEGNALI OTTICI**, cioè il loro mezzo di trasporto è un'onda luminosa.
- **SEGNALI ELETTRICI**, cioè il loro mezzo di trasporto è la corrente elettrica
- **SEGNALI ELETTROMAGNETICI**, cioè il loro mezzo di trasporto è un'onda elettromagnetica (in realtà anche la luce è un'onda elettromagnetica, ma viene classificata come un'onda a parte perché si manifesta in modo diverso dalle altre).

Tutti questi tipi di segnale hanno una caratteristica in comune: il loro mezzo di trasporto è un'onda. Nel caso dei segnali sonori abbiamo un'onda di pressione, nel caso dei segnali ottici abbiamo un'onda luminosa, nel caso dei segnali elettrici abbiamo un'onda elettrica e nel caso dei segnali elettromagnetici abbiamo un'onda elettromagnetica.

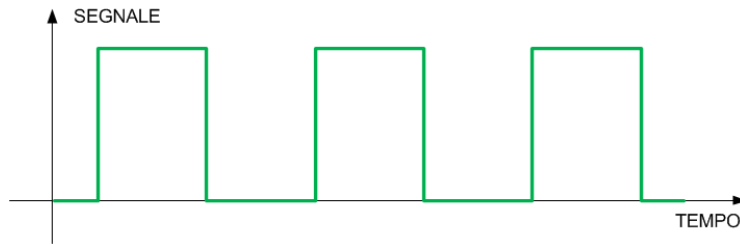
1.2.2 Forma d'onda

Un altro tipo di classificazione è quella che suddivide i segnali in base alla forma dell'onda. Si distingue quindi in:

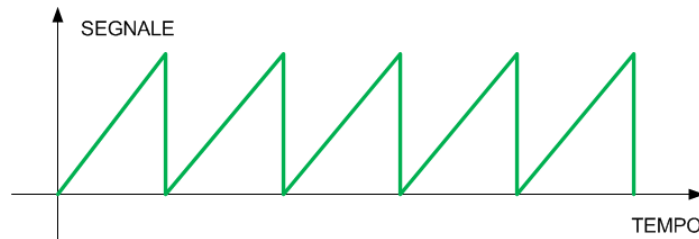
- **SEGNALI SINUSOIDALI**: che possono essere rappresentati con una funzione sinusoidale, come la corrente alternata.



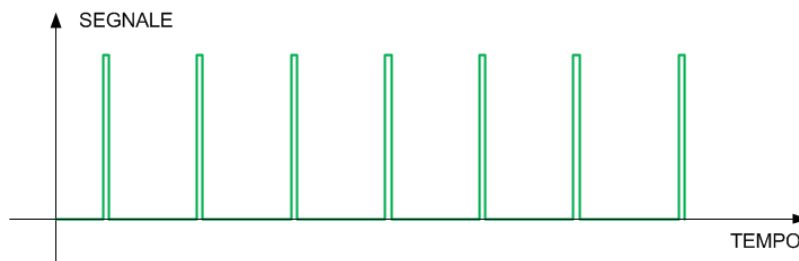
- **SEGNALI AD ONDA QUADRA:** che assumono solo due valori (quello Massimo e quello minimo).



- **SEGNALI AD ONDA TRIANGOLARE:** il cui valore aumenta nel tempo da un minimo ad un Massimo e poi ritorna bruscamente al valore minimo.



- **SEGNALI AD IMPULSI:** anche questo segnale assume solo due valori (il minimo e il Massimo). A differenza dell'onda quadra però un segnale ad impulsi dura molto poco: per la maggior parte del tempo il suo valore è nullo.



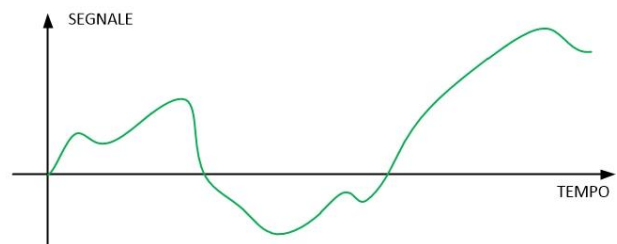
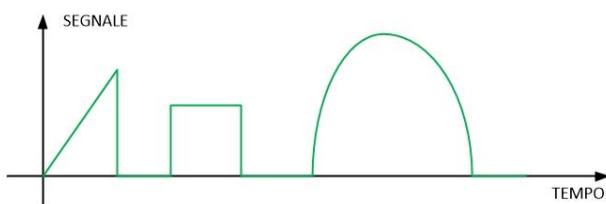
1.2.3 Segnali periodici e aperiodici

I segnali si possono anche classificare in base alla presenza o meno di un periodo.

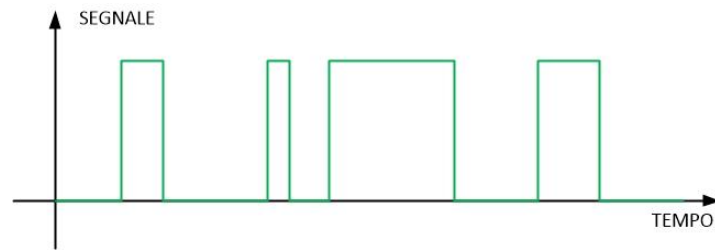
Il periodo è un intervallo di tempo costante (indicato con ΔT) dopo il quale il segnale si ripete, uguale a prima. I valori che riassume dopo ogni periodo devono essere sempre nello stesso ordine.

I segnali che sono rappresentati nel paragrafo precedente sono tutti segnali periodici.

I segnali seguenti sono invece aperiodici: infatti non è possibile trovare un qualcosa che si ripete nei loro valori.



Anche il segnale seguente è aperiodico:



Per essere aperiodico un segnale non deve per forza avere una forma che cambia nel tempo; basta che non sia possibile individuare un intervallo di tempo fisso dopo il quale il segnale si ripete.

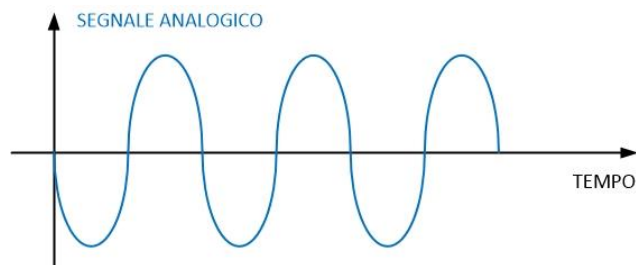
Un importante segnale aperiodico è il rumore nel quale non è mai possibile trovare un qualcosa di costante.

I segnali che vengono utilizzati nelle telecomunicazioni sono segnali sinusoidali periodici.

1.2.4 Segnali analogici e digitali

Un'ulteriore e importantissima classificazione può essere fatta in base al numero di valori assunti dal segnale. Si può distinguere tra:

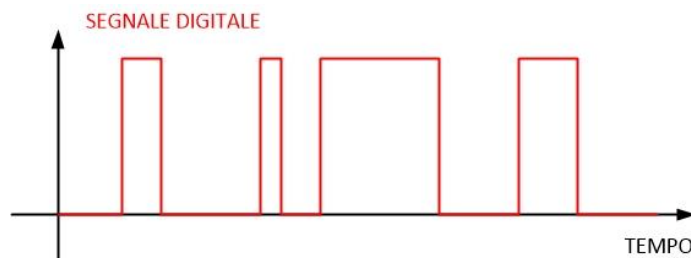
- **SEGNALI ANALOGICI:** che assumono con continuità tutti i valori compresi tra il valore minimo e il valore Massimo.



Per capire il concetto di continuità si può immaginare uno scivolo: non ci sono gradini e ogni punto dello scivolo è continuo con il successivo. Ci si può quindi fermare in un punto qualunque. Un altro esempio sono le lancette del tachimetro dell'automobile. Le lancette si muovono senza scatti, con continuità. Per questo motivo questo strumento è chiamato indicatore analogico.

Allo stesso modo un segnale sinusoidale è analogico perché non ci sono salti.

- **SEGNALI DIGITALI:** che assumono solo un numero finito di valori.



Per capire il concetto si pensi ad una scala. Se si vuole salire un gradino è necessario sollevare il piede di una certa quantità, corrispondente all'alzata del gradino, altrimenti non si sale, anche se si solleva il piede per mille volte. La scala assume solo un numero di valori finito: giù dal gradino/sul gradino; non si può stare a metà.

Gli orologi digitali sono quelli con i numeri, che possono assumere solo un certo numero di valori (1440 = 24 ore per 60 minuti).

Il termine analogico significa “discorso simile”. Questa parola ha la stessa radice di analogia, termine che viene usato più spesso. Un’analogia è una specie di paragone: si può dire ad esempio che c’è un’analogia tra la corrente elettrica e la corrente di un fiume poiché tra i due c’è una corrispondenza.

Quindi un segnale analogico è un segnale che mantiene una corrispondenza con la realtà, che è analogo alla realtà.

Ad esempio, i vecchi dischi di vinile erano analogici: ogni faccia del disco era percorsa da un solco a spirale di profondità differente. La testina percorreva il solco e si alzava o si abbassava a seconda della profondità.

Il segnale di movimento della testina veniva poi trasformato in un segnale audio in maniera direttamente proporzionale: la frequenza del suono era direttamente proporzionale alla profondità del solco, cioè c’era analogia tra queste due grandezze.

I CD o gli mp3 invece sono digitali. Il termine digitale viene da “digit”, che significa cifra. Le cifre sono i simboli usati per indicare quantità (noi usiamo 10 cifre, i numeri da 0 a 9). Le cifre sono dunque in numero finito. Nei moderni dispositivi elettronici le cifre usate sono solo 2: zero e uno. Questo tipo di segnale viene chiamato digitale binario.

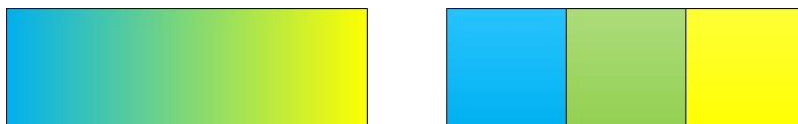
Passaggio da digitale ad analogico.

Per capire come si può passare da digitale ad analogico osserviamo l’immagine di due colori che fumano l’uno nell’altro:



Questo tipo di immagine è analogica: per passare dal blu al giallo il colore attraversa diverse sfumature di verde.

Per passare da digitale ad analogico è necessario suddividere questa striscia colorata in quadratini, ognuno con un colore:



Un segnale digitale ha quindi meno informazioni, ma è più semplice da trasmettere perché può essere inviato come una sequenza finita di dati.

Differenze tra segnali analogici e digitali

La differenza tra segnali analogici e digitali è importantissima. Consideriamo l’immagine di un paesaggio dipinta su una tela e una fotografia su un computer dello stesso paesaggio.

Se ingrandiamo la fotografia sul computer dopo un certo numero di ingrandimenti arriveremo a vedere dei quadratini di un unico colore: quelli sono i pixel dell'immagine. Una fotografia sul computer è infatti formata da un insieme di quadratini molto piccoli (chiamati appunto pixel). Il motivo per cui non li vediamo quando osserviamo l'immagine è che sono piccolissimi e il nostro occhio non è in grado di distinguere due oggetti se essi sono troppo piccoli. Quando ingrandiamo l'immagine però riusciamo a vedere i singoli pixel. Ora immaginiamo di osservare il dipinto con una lente di ingrandimento: per quanto la lente sia potente non riusciremo mai a vedere i pixel perché il dipinto non li ha. Il pittore infatti non deposita il colore in quadratini, ma con una pennellata.

L'immagine al computer è digitale; il dipinto è analogico.

La prima differenza tra analogico e digitale sta dunque nella qualità: un segnale analogico ha più valori e quindi contiene più informazioni. Un segnale digitale è un "approssimazione" di un segnale analogico e quindi avrà certamente una qualità minore.

Se però rendiamo sempre più piccoli i pixel la qualità dell'immagine aumenta: in effetti le moderne macchine fotografiche non hanno nulla da invidiare ad un dipinto... Ad esempio, una macchina fotografica da 20 Megapixel è in grado di fare fotografie che contengono 20 000 000 di pixel.

Un'altra importante differenza può essere compresa considerando la televisione: fino a qualche anno fa il segnale televisivo era analogico.

I due vantaggi del digitale sono:

- il segnale, se è presente, è sempre di ottima qualità. Quando il segnale televisivo era analogico alcuni canali si vedevano male, adesso invece il canale si vede sempre bene; se il segnale è troppo debole per essere visualizzato appare la scritta "segnale debole o assente". Questo si verifica perché il segnale digitale può essere solo in due modi: o c'è o non c'è.
- Con la televisione digitale sono nati molti nuovi canali. Questo è dovuto al fatto che un segnale analogico per essere trasmesso richiede un canale più "grande" di uno digitale. Il termine "grande" è in realtà improprio: un segnale non ha bisogno di uno spazio vero e proprio, ma occupa una certa frequenza. I canali stanno infatti su determinate frequenze. Quando si cambia canale sul televisore si sta semplicemente sincronizzando il ricevitore su una frequenza diversa. Un segnale non ha però una sola frequenza, ma occupa un range di frequenze. Nella comunicazione digitale il range di frequenza necessario per un singolo canale è più piccolo che nella comunicazione analogica.

1.3 I segnali sinusoidali

Il tipo di segnale più utilizzato al giorno d'oggi è l'onda elettromagnetica.

Un'onda elettromagnetica è un segnale di tipo sinusoidale. Abbiamo già visto diverse grandezze con andamento sinusoidale nei corsi passati: la corrente e la tensione alternate sono un esempio di grandezze sinusoidali.

Una grandezza sinusoidale può essere descritta dalla seguente espressione matematica:

$$y = A \cdot \sin(\omega x + \varphi)$$

In essa compaiono le due **VARIABILI** (x e y), una funzione seno e tre parametri fondamentali:

- **AMPIEZZA A**: indica il valore massimo della grandezza che stiamo considerando. In questo caso, trattando una generica espressione matematica, si intende il valore massimo della y .
- **PULSAZIONE** o **VELOCITÀ ANGOLARE** ω : indica la velocità con cui il segnale compie un ciclo completo. Ricordiamo infatti che la sinusoidale deriva dalla rotazione di un vettore nel piano di Gauss.
- **FASE** φ : è l'angolo con cui il vettore inizia a ruotare nel piano di Gauss.

La pulsazione a sua volta nasconde all'interno due grandezze molto importanti: **frequenza** f e **periodo** T :

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

1.3.1 Rappresentazione dei segnali

Nei corsi precedenti abbiamo visto che la corrente e la tensione si possono scrivere matematicamente con una funzione sinusoidale:

$$v(t) = V \sin(\omega t + \varphi)$$

$$i(t) = I \sin(\omega t + \varphi)$$

In queste espressioni possiamo notare come la grandezza considerata (tensione v o corrente i) varia in funzione del tempo. La notazione $v(t)$ indica appunto che la grandezza v varia in funzione del tempo t . Lo stesso vale per la notazione $i(t)$: la grandezza i varia in funzione del tempo t .

Questo significa che stiamo cercando di capire come una grandezza varia man mano che il tempo passa.

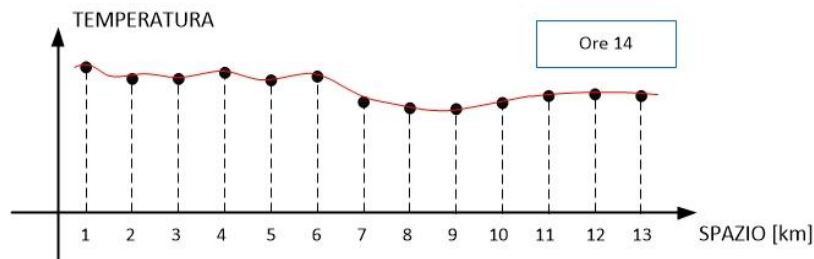
Ma potremmo anche decidere di osservare come varia la grandezza al variare dello spazio percorso.

Infatti in fisica lo spazio e il tempo sono le due grandezze base, senza le quali non è possibile studiare un oggetto. Ogni cosa infatti (penne, persone, libri) esiste in un determinato spazio (perché occupa un certo spazio e non un altro) e per un certo tempo (perché non esisteva prima di un certo momento e ad un certo punto smetterà di esistere perché si trasformerà in qualcosa d'altro).

Per capire bene la differenza tra osservare una grandezza al variare del tempo e osservarla al variare dello spazio immaginiamo di voler capire come varia la temperatura lungo una strada rettilinea.

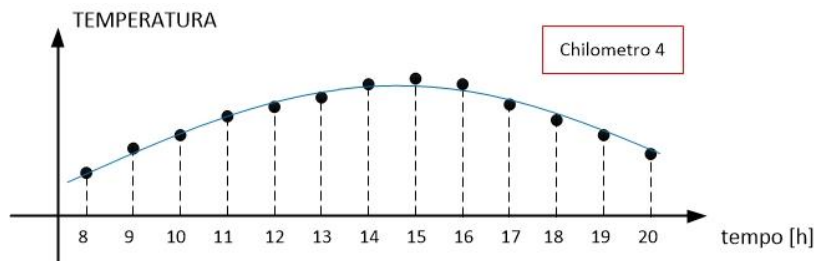
La temperatura cambierà sia in base al punto che sto considerando, sia in base al momento della giornata in cui misuro la temperatura.

Posizioniamo un termometro ad ogni chilometro e registriamo la temperatura che si ha alle ore 14. Su un grafico possiamo indicare la posizione (cioè lo spazio) e la temperatura registrata:



Possiamo dire che la temperatura è stata rappresentata nel **DOMINIO DELLO SPAZIO**.

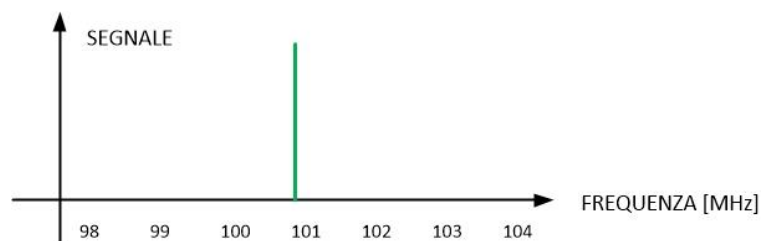
Se invece registriamo la temperatura in uno stesso punto, ad esempio al chilometro 4, nelle diverse ore della giornata otteniamo un altro grafico che mostra sull'asse x il tempo e sull'asse y la temperatura.



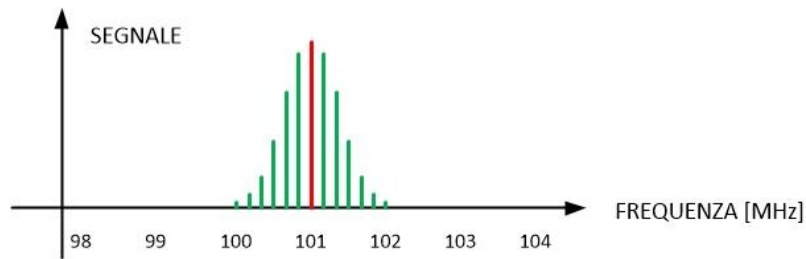
Un grafico di questo tipo mostra dunque la temperatura in funzione del tempo. Possiamo dire che il segnale è rappresentato nel **DOMINIO DEL TEMPO**.

Infine possiamo rappresentare un segnale in funzione della sua frequenza, cioè nel **DOMINIO DELLA FREQUENZA**. La frequenza non è una grandezza base come lo spazio e il tempo, ma è quella che ci consente di stabilire quale canale stiamo utilizzando.

Nei segnali la frequenza solitamente è costante. Ad esempio l'elettrotecnica tratta segnali di tensione e corrente che hanno una frequenza pari a 50 Hz (oppure 60 Hz nel caso in cui si consideri la frequenza di distribuzione della rete americana). La frequenza dell'onda di un radar può arrivare invece a diversi GigaHerz. In teoria ogni segnale ha una sua frequenza, sempre costante, ed è quindi rappresentabile con una linea verticale:

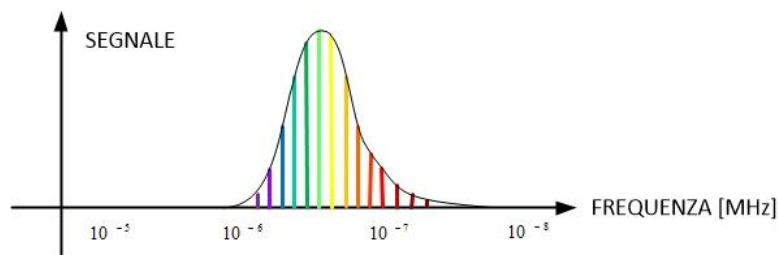


In realtà però i segnali non sono composti da una sola frequenza, ma variano all'interno di un range di frequenze, chiamato **BANDA DI FREQUENZA**. Non sarebbe possibile infatti avere una frequenza unica: pensiamo ad esempio alle frequenze della radio. Ogni canale ha una sua **FREQUENZA PRINCIPALE** (ad esempio 101 MHz), chiamata **FREQUENZA DELLA PORTANTE**, ma viene ricevuto anche per frequenze lievemente inferiori (ad esempio 100,9 MHz) o superiori (ad esempio 101,1 MHz). Naturalmente più ci si allontana dalla frequenza centrale più il segnale si indebolisce.



Una rappresentazione di questo tipo, in cui un segnale è formato da tante bande verticali di diversa frequenza e diversa intensità, è chiamato **SPETTRO**.

Lo spettro più noto è quello elettromagnetico, che classifica i segnali in base alla loro frequenza. Ad esempio, lo spettro della luce visibile è formato da linee verticali di diversa frequenza (a cui corrisponde un certo colore). L'ampiezza maggiore si misura in corrispondenza del colore giallo (che è il colore del sole):



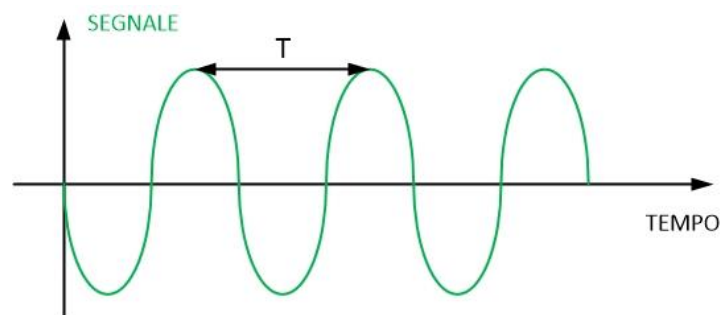
Uno spettro come quello rappresentato prima, in cui le altezze dei segmenti verticali dipendono dall'intensità del segnale (cioè dalla sua ampiezza) viene chiamato **SPETTRO DI AMPIEZZA**.

Se la lunghezza del segmento dipende invece dalla fase del segnale si parla di **SPETTRO DI FASE**.

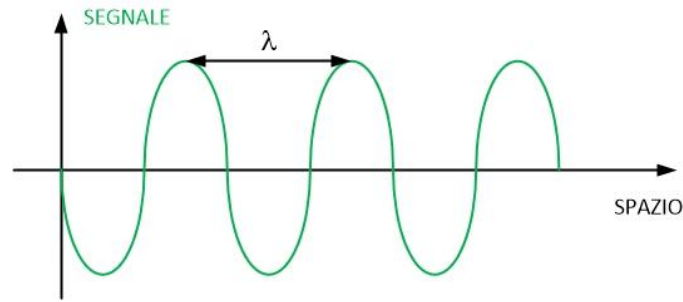
Dunque, quando parliamo di spettro di un segnale ci riferiremo alla rappresentazione delle frequenze che compongono il segnale.

1.3.2 Frequenza, periodo e lunghezza d'onda

Quando un segnale sinusoidale viene rappresentato nel **DOMINIO DEL TEMPO**, sull'asse delle x è possibile leggere direttamente il periodo T , cioè il tempo dopo il quale il segnale riassume tutti i suoi valori:



Se invece rappresentiamo il segnale nel **DOMINIO DELLO SPAZIO** possiamo leggere sull'asse x la lunghezza d'onda, cioè lo spazio che l'onda percorre prima di riassumere tutti i suoi valori:



Il periodo è un tempo e quindi si misura in secondi; la lunghezza d'onda è uno spazio e quindi si misura in metri. Queste due grandezze sono legate dalla formula della velocità:

$$v = \frac{S}{t} \quad v = \frac{\lambda}{T}$$

Se il segnale è un'onda elettromagnetica che viaggia alla velocità della luce c , possiamo scrivere questa relazione come:

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

Dove c è la velocità della luce che vale:

$$c = 299792458 \frac{m}{s} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

La formula che lega lunghezza d'onda e la velocità della luce può anche essere scritta in modo che compaia la frequenza:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \frac{1}{T} = \lambda f$$

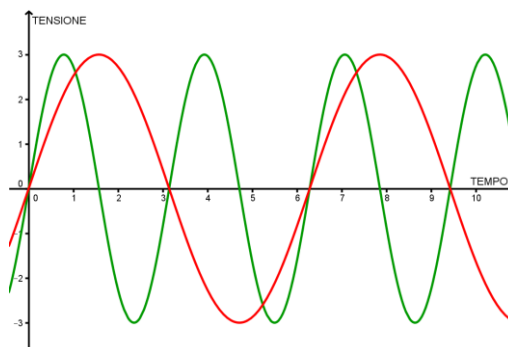
Ovvero:

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

Questa formula è molto importante perché ci mostra che **LA LUNGHEZZA D'ONDA E LA FREQUENZA SONO INVERSAMENTE PROPORZIONALI** e sono legate da una costante, la velocità della luce.

In pratica, utilizzare la frequenza o la lunghezza d'onda per descrivere un fenomeno è la stessa cosa, solo che la frequenza pone l'accento sul numero di oscillazioni, mentre la lunghezza d'onda sullo spazio percorso.

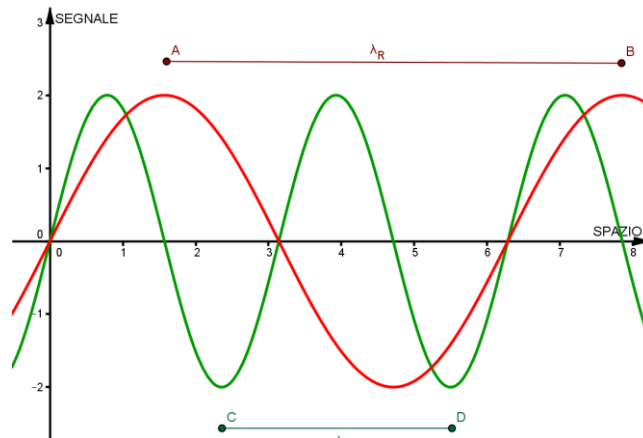
Se si osserva il disegno seguente, in cui sono tracciate due onde che viaggiano alla stessa velocità, si vede come l'onda a tratto continuo abbia un periodo maggiore e quindi una frequenza minore.



L'onda verde (ipotizzando che le due onde abbiano la stessa velocità, e quindi potendo confondere la velocità con il tempo), è più "veloce" di quella rossa: ha una maggiore frequenza:

$$f_{\text{verde}} > f_{\text{rosso}}$$

Per vedere su un grafico la lunghezza d'onda dei due segnali precedenti è necessario disegnarli al variare dello spazio (quindi con la distanza x sull'asse delle ascisse anziché il tempo).



Invece la lunghezza d'onda del segnale rosso è maggiore di quella del segnale verde:

$$\lambda_{\text{rosso}} > \lambda_{\text{verde}}$$

Da quanto abbiamo visto fin'ora si capisce quindi che la lunghezza d'onda è legata alla frequenza:

Frequenza alta \rightarrow Lunghezza d'onda piccola

Frequenza bassa \rightarrow Lunghezza d'onda grande

La frequenza, il periodo e la lunghezza d'onda possono essere ricavate dall'espressione matematica della sinusoide. Come esempio, consideriamo due segnali, chiamati **A** e **B**, rappresentati nel dominio del tempo.

$$A(t) = 2\sin\left(2 \cdot t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$B(t) = \frac{1}{2}\sin\left(3 \cdot t - \frac{\pi}{2}\right)$$

La pulsazione, o velocità angolare, nasconde al suo interno il periodo e la frequenza:

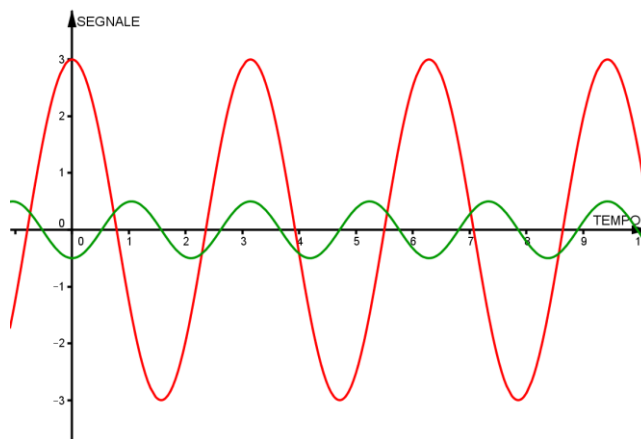
$$\omega = 2\pi f \quad \rightarrow \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$T = \frac{1}{f}$$

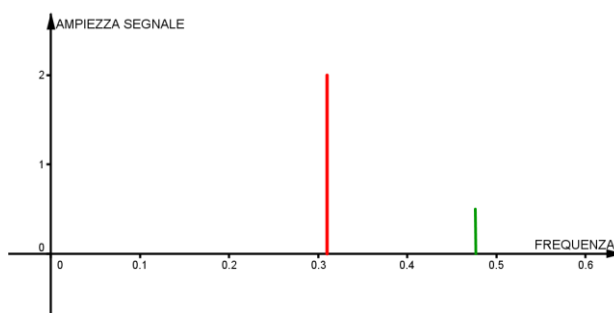
	FREQUENZA	PERIODO	LUNGHEZZA D'ONDA
SEGNALE A	$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \text{ Hz}$	$T = \frac{1}{f} = \pi \text{ s}$	$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{1/\pi}$
SEGNALE B	$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{3}{2\pi} \text{ Hz}$	$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{3} \text{ s}$	$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3/2\pi}$

Ora possiamo rappresentare il segnale nel dominio del tempo e nel dominio e della frequenza:

RAPPRESENTAZIONE NEL DOMINIO DEL TEMPO



SPETTRO DI AMPIEZZA



A questi parametri se ne deve aggiungere un altro molto importante: la **POTENZA DEL SEGNALE**.

La potenza è l'energia contenuta nel segnale. Attenzione a non confondere l'ampiezza con la potenza: l'ampiezza è uno spazio, mentre la potenza è un energia per unità di tempo. Analizzeremo la potenza nei prossimi capitoli.

PARAMETRO	SIMBOLO	UNITA' DI MISURA	DEFINIZIONE
Ampiezza	Lo stesso della grandezza	Quella della grandezza	E' il valore massimo che assume la grandezza durante l'oscillazione.
Fase	φ	Gradi o radianti	E' il valore iniziale della grandezza, ad esempio la tensione all'istante zero.
Frequenza	f	Hertz (Hz)	E' il numero di oscillazioni che compie l'onda in un secondo.
Periodo	T	Secondi (s)	E' il tempo impiegato dall'onda per fare un'oscillazione completa
Lunghezza d'onda	λ	Metri (m)	E' la distanza che intercorre tra due massimi consecutivi dell'onda
Potenza	P	Watt (W)	E' l'energia che il segnale può trasmettere per unità di tempo.

2 LE TELECOMUNICAZIONI

La parola telecomunicazioni indica un particolare tipo di comunicazione che avviene a distanza (dal greco tele = distanza). Esempi di telecomunicazioni sono la televisione, il telefono, la radio, la rete web.

Anche i segnali di fumo con cui comunicavano gli indiani o i segnali acustici che i pastori si lanciavano con i corni da una montagna all'altra sono esempi di comunicazione a distanza; tuttavia essi non vengono comunemente indicati con il termine telecomunicazioni perché il segnale inviato non è di tipo elettromagnetico.

Nelle telecomunicazioni il trasmettitore e il ricevitore sono posti a grande distanza l'uno dall'altro e il mezzo di trasmissione può essere l'aria, un filo elettrico o una fibra ottica.

Per ovvi motivi, nelle applicazioni aeronautiche risulta difficile utilizzare un filo come mezzo di trasmissione e quindi l'unica possibilità è quella di usare come segnale un'onda elettromagnetica e come mezzo di trasmissione l'aria. Vedremo nel prossimo capitolo che in realtà le onde elettromagnetiche non hanno bisogno di aria per propagarsi: pensiamo ad esempio alle onde elettromagnetiche che il sole manda sulla Terra e che ci arrivano dopo aver viaggiato nel vuoto.

2.1 Breve storia delle telecomunicazioni

Il primo dispositivo per la comunicazione a distanza venne costruito nel 1792 da un ingegnere francese: si trattava del primo **TELEGRAFO** che collegava Lilla con Parigi. Per funzionare aveva bisogno di torri poste a 30 km l'una dall'altra e di personale altamente qualificato per farle funzionare. Il telegrafo era in grado di trasmettere a grande distanza impulsi elettrici, che potevano essere convertiti in lettere conoscendo l'apposito codice.

Nei 150 anni successivi il dispositivo venne migliorato sempre di più finché Morse e un suo collaboratore misero a punto una nuova versione del telegrafo che consentiva di registrare i messaggi su carta. Questa versione fu utilizzata per collegare l'America con l'Europa e fino ai primi decenni del 1900 fu il mezzo postale più diffuso e veloce. Al giorno d'oggi rimane una traccia dell'importanza che il telegrafo ha avuto nelle comunicazioni: il simbolo delle poste è PT, acronimo di Poste e Telegrafi.



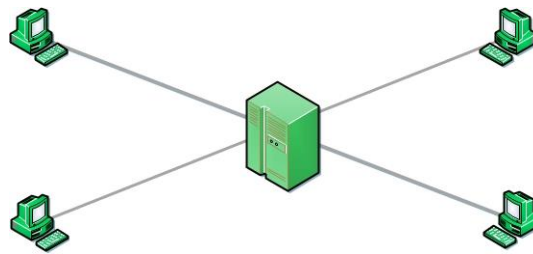
Il primo dispositivo in grado di trasmettere a distanza la voce fu inventato nel 1849 da Meucci e venne chiamato **TELEFONO**.

Questi sistemi di telecomunicazione, sia il telegrafo che il telefono, richiedevano la presenza di fili per collegare il trasmettitore al ricevitore.

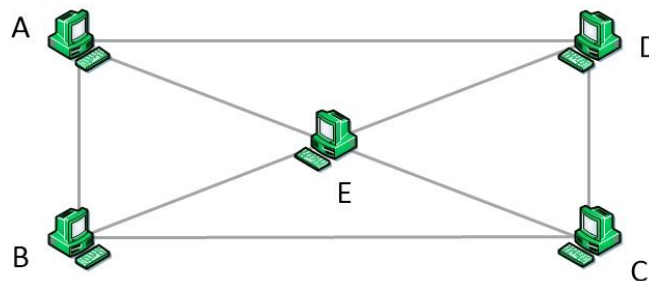
Nel 1901 Marconi fu il primo a trasmettere un segnale elettromagnetico tra il Canada e l'Inghilterra utilizzando l'aria come mezzo di trasmissione. Era nata la **RADIO**. Fu da questo esperimento che prese il via la ricerca per l'identificazione di bersagli tramite l'invio di onde elettromagnetiche, ricerca che avrebbe portato nel giro di poche decine di anni alla creazione dei primi radar.

Nel 1925 Baird trasmise le prime immagini in movimento e grazie alla diffusione dei tubi catodici degli anni successivi la **TELEVISIONE** ebbe presto un rapido sviluppo e si diffuse a macchia d'olio in Europa e in America.

Il passo successivo nelle telecomunicazioni arrivò nel 1940 quando George Stibitz, un ricercatore americano, mise a punto un sistema per inviare dati da un computer all'altro. Questo sistema, che è l'antenato di internet, prevedeva l'utilizzo di un calcolatore centrale, chiamato **MAINFRAME**, e di terminali che non erano in grado di svolgere i calcoli, ma solo di inviare e ricevere dati. La comunicazione doveva quindi passare necessariamente attraverso il computer centrale.



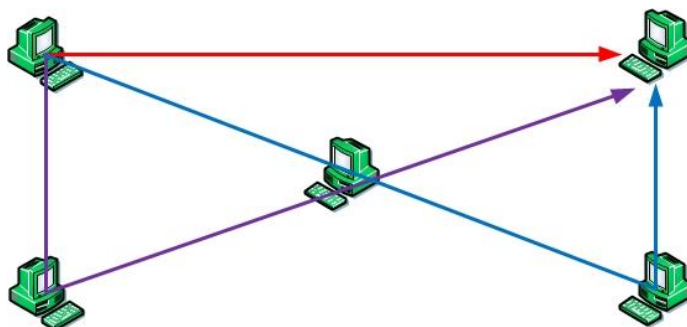
La prima tecnologia **INTERNET** fu messa a punto nel 1969. Le reti internet sono formate da un certo numero di computer, chiamati nodi, interconnessi tra loro. Questi nodi sono in grado di passarsi piccoli gruppi di informazioni, chiamati pacchetti. La rete realizzata nel 1969 aveva 4 nodi e venne chiamata ARPANET.



Grazie ad ARPANET era possibile scambiare informazioni senza passare dal mainframe, con un sistema chiamato **A COMMUTAZIONE DI PACCHETTO**.

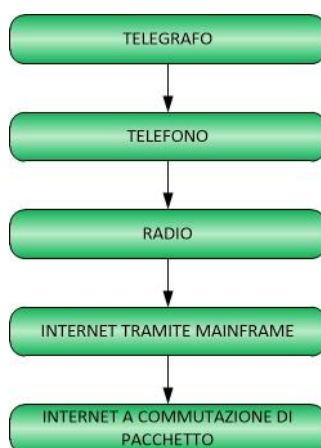
Questo consentiva di aumentare notevolmente la velocità di trasmissione quando più dati stavano viaggiando contemporaneamente. Per capire il concetto si immagini di voler mettere in comunicazione il computer A con il computer D. L'informazione da inviare viene suddivisa in pacchetti più piccoli, ognuno con un indice per poter essere ricomposto una volta giunto a destinazione. I vari pacchetti possono

viaggiare indipendentemente l'uno dall'altro su percorsi diversi e una volta giunti al computer D vengono ricomposti.



Questo garantisce che, se una delle linee fosse sovraccarica, l'informazione possa raggiungere lo stesso il computer di destinazione passando per altri percorsi. Inoltre, scomponendo l'informazione da trasmettere in diversi pacchetti, la velocità aumenta perché i pacchetti più piccoli viaggiano parallelamente su percorsi differenti.

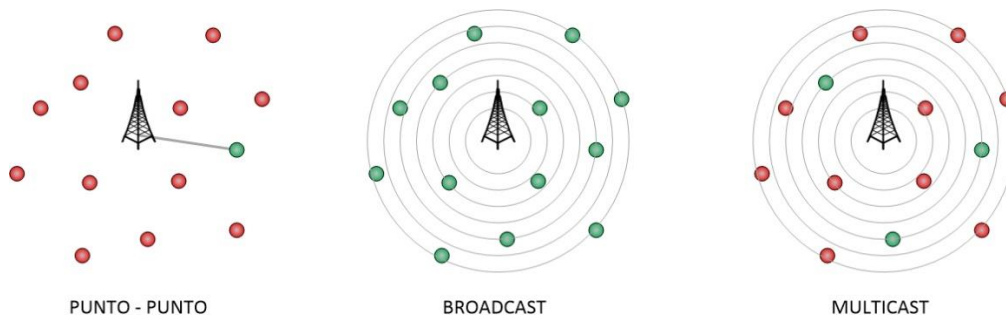
Lo schema seguente mostra le diverse fasi dello sviluppo delle telecomunicazioni:



2.2 Classificazione dei sistemi di telecomunicazione

Un sistema di telecomunicazione si può classificare in base al numero di apparecchiature che ricevono il segnale:

- **COMUNICAZIONE PUNTO-PUNTO:** come quella telefonica, che avviene tra un solo trasmettitore ed un solo ricevitore
- **COMUNICAZIONE MULTICAST:** come quella radio: avviene da una stazione radio base che invia il segnale a molti ricevitori, ma non a tutti. Viene fatta una selezione dei dispositivi che devono ricevere il segnale, che è caratterizzato dall'essere a potenza medio-bassa.
- **COMUNICAZIONE BROADCAST:** che avviene tra un singolo trasmettitore ad alta potenza e tutti i ricevitori connessi. Non c'è selezione sui dispositivi che ricevono il segnale e quest'ultimo è di solito ad alta potenza.



Un'altra classificazione si basa sulla capacità dei dispositivi che compongono il sistema di ricevere e trasmettere allo stesso tempo.

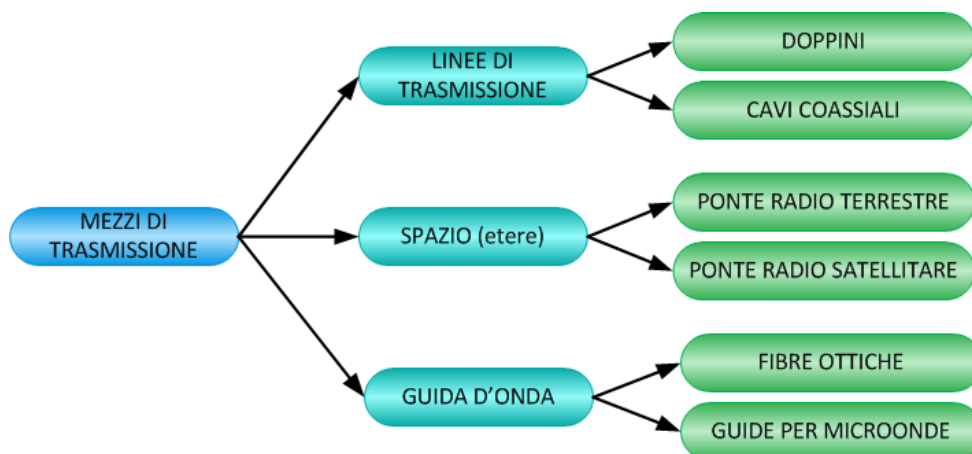
- **SIMPLEX:** cioè a senso unico. Non è prevista la possibilità di rispondere a chi ha trasmesso il segnale. Un esempio di comunicazione broadcast è quella delle televisioni in cui una singola trasmittente manda il segnale televisivo a tutti gli apparecchi riceventi.
- **HALF DUPLEX:** in cui la trasmissione avviene alternativamente nei due sensi, cioè ogni apparecchio prima riceve e poi trasmette. Questo tipo di trasmissione è tipica degli apparati radioamatoriali o dei citizen band, la cosiddetta banda cittadina (CB)
- **FULL DUPLEX:** in cui la trasmissione avviene nei due sensi ed è possibile ricevere e trasmettere contemporaneamente.

I dispositivi bidirezionali che si comportano sia come trasmettitori che come ricevitori vengono ricetrasmittitori. Un telefono cellulare è un esempio di ricetrasmittitore.

2.3 Il mezzo di trasmissione

Abbiamo visto che per essere trasmesso, un segnale richiede un mezzo di trasmissione.

I mezzi di trasmissione si possono dividere in diverse categorie, come mostrato nello schema seguente:

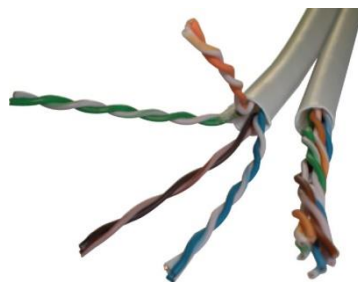


2.3.1 Linee di trasmissione

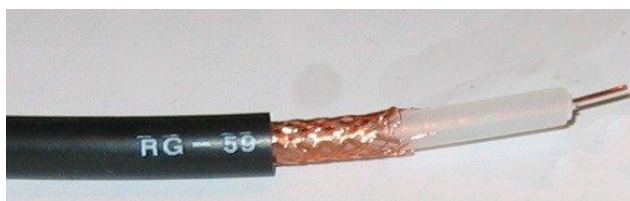
Questo mezzo di trasmissione è costituito da fili conduttori, solitamente di rame, che trasportano segnali sotto forma di corrente elettrica, come quella che abbiamo visto studiando i circuiti in corrente alternata. Non bisogna però confondere i cavi per il trasporto dei dati con i cavi per il trasporto della corrente di alimentazione. Questi ultimi portano energia; i primi invece portano informazioni.

Le linee di trasmissione più utilizzate per l'invio di dati sono di due tipi:

- **DOPPINI:** si tratta di due cavi isolati che corrono paralleli l'uno all'altro o che vengono intrecciati per equilibrare i campi elettromagnetici generati dalla corrente che scorre nei due cavi. Un classico esempio di doppino è quello telefonico o quella dello dei cavi LAN che collegano il computer al modem. I doppini costano poco e sono semplici da installare.



- **CAVI COASSIALI:** sono costituiti da due cavi che corrono l'uno dentro all'altro in modo che i loro assi siano coincidenti. Il cavo centrale, detto anima, è in rame, è circondato da un materiale dielettrico che lo separa dal cavo esterno, detto maglia, in grado di bloccare le interferenze elettromagnetiche.

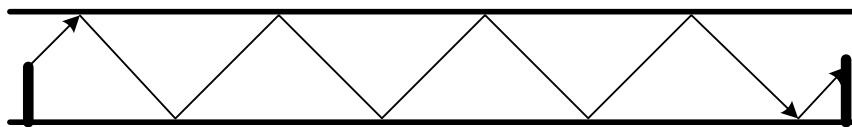


Il vantaggio di questo tipo di collegamento è che il campo elettromagnetico generato dalla corrente elettrica rimane confinato all'interno della guaina esterna, attenuando i fenomeni di dispersione. Questo tipo di cavo non ha il ritorno poiché viene usato per il trasporto dei dati in modo unidirezionale. E' il filo che viene utilizzato per collegare le antenne delle televisioni all'apparecchio televisivo.

2.3.2 Guide D'onda

Le guide d'onda sono dei percorsi realizzati con diversi materiali in cui possono viaggiare le onde elettromagnetiche. In genere si parla di guida d'onda quando si ha a che fare con le microonde. I cavi coassiali infatti non sono adatti alla trasmissione di segnali di grande potenza nel campo delle microonde.

Una guida d'onda è una tubazione a sezione rettangolare o circolare in cui l'onda viaggia grazie a riflessioni successive sulle pareti interne:



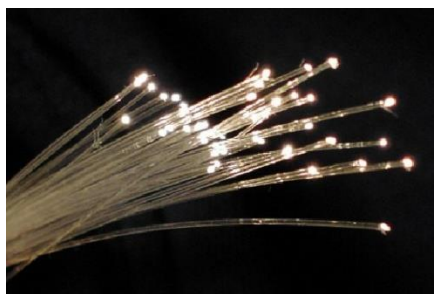
Le guide d'onda si comportano come dei filtri passa alto: lasciano passare solo le frequenze alte (le microonde) tagliando tutto il resto.

Esistono diversi tipi di guida d'onda, a seconda della frequenza e del tipo di onda da trasmettere.

In particolare, un famoso tipo di guide d'onda sono le **FIBRE OTTICHE**. Come dice la parola stessa, servono a trasportare segnali ottici, cioè onde elettromagnetiche nel campo che va dall'ultravioletto all'infrarosso.

Sono costituite da fili di vetro o, più raramente, di plastica e hanno forma cilindrica estremamente sottile.

Quelle usate in telecomunicazioni vengono attraversate da impulsi luminosi nel campo dell'infrarosso, e quindi invisibili all'occhio umano.



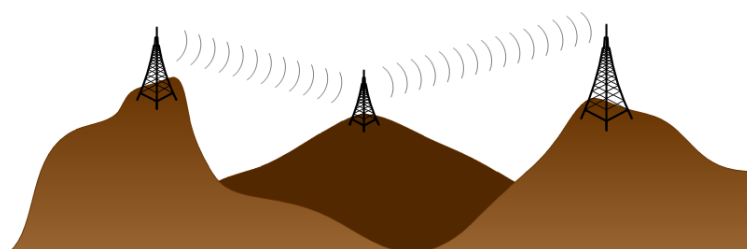
Le fibre ottiche sono in grado di trasferire più informazioni contemporaneamente in una sola fibra, sono insensibili alle interferenze elettromagnetiche, sono leggere ed economiche, hanno bassa attenuazione, cioè il segnale arriva a destinazione senza subire fenomeni di distorsione.

2.3.3 Spazio

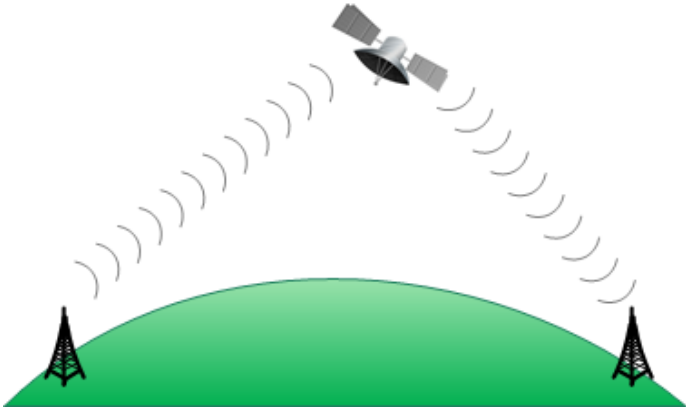
L'etere è in pratica l'aria che ci circonda. Quando si parla di trasmissioni via etere si intende quindi una trasmissione di onde elettromagnetiche che viaggiano nell'aria. Come vedremo nel prossimo capitolo, quando un'onda elettromagnetica attraversa l'atmosfera va incontro a diversi fenomeni di distorsione. E' quindi necessario avere dei ripetitori che ricevono il segnale e lo ritrasmettono dopo avergli restituito ciò che ha perso nel tragitto.

Questo sistema si chiama ponte radio.

Se il ripetitore è situato sulla superficie terrestre, come nel caso delle trasmissioni televisive analogiche, si parla di **PONTE RADIO TERRESTRE**.



Se invece il ripetitore è situato a bordo di un satellite si parla di **PONTE RADIO SATELLITARE**.



3 LE ONDE ELETTROMAGNETICHE

In natura molti fenomeni sono associati ad un'onda: il suono, la luce, i terremoti, i segnali radio, ecc...

E' quindi necessario capire cosa sono le onde, come si classificano e quali sono i fenomeni ad esse associati.

Un'onda si crea quando un oggetto (corda, acqua, aria o anche il vuoto) viene in qualche modo perturbato, cioè viene sottoposto ad una forza che modifica il suo stato di equilibrio.



La perturbazione parte nel punto in cui viene applicata la forza e si propaga nello spazio circostante, all'interno del mezzo.

Ad esempio, se gettiamo un sasso in uno stagno, si originerà un'onda che si propagherà in tutte le direzioni. Per avere un'onda è quindi necessario avere una forza che fornisca l'energia iniziale e un mezzo nel quale l'energia si può propagare.

La cosa che genera l'onda è chiamata **SORGENTE**.

Nel caso del sasso nello stagno la sorgente è il sasso che colpisce l'acqua. Se nello stagno ci fosse una boa, dopo aver lanciato il sasso la vedremmo oscillare in verticale, ma non muoversi nella direzione in cui si stanno propagando le onde.

Questo avviene perché un'onda trasporta energia ma non materia: l'energia viene fornita dall'impatto del sasso con la superficie; una volta trasferita all'acqua l'energia si propaga in direzione radiale (con cerchi concentrici) facendo salire e scendere il livello dell'acqua.

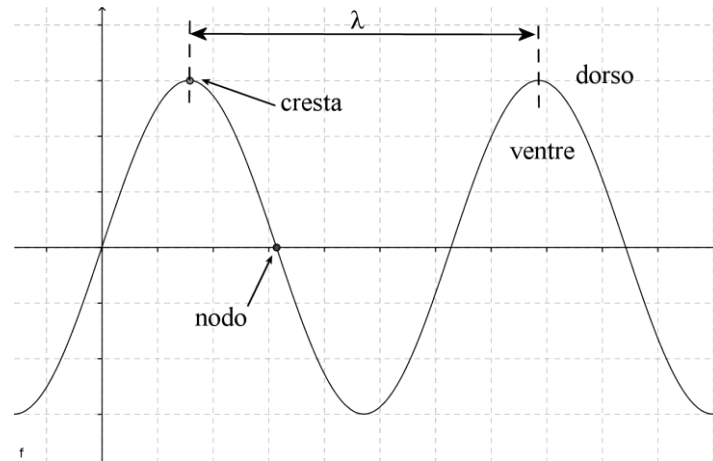
L'ONDA È UNA PERTURBAZIONE CHE TRASPORTA ENERGIA, MA NON MATERIA.

Possiamo vedere un'onda come causata dall'alternanza di due tipi di energia: nel caso delle onde nell'acqua o su una corda le due energie sono quella gravitazionale (che attrae la materia verso il basso) e quella cinetica fornita dalla sorgente della perturbazione (che porta la materia a sollevarsi verso l'alto). Nel caso di un'onda elettromagnetica i due tipi di energia sono quella elettrica e quella magnetica.

Quindi l'onda è una continua trasformazione di energia tra due diversi tipi.

Come si vede dalla figura seguente, nelle onde si possono trovare alcuni punti caratteristici:

- **VENTRE:** la parte concava, che sta sotto all'onda
- **DORSO:** la parte convessa che sta sopra all'onda
- **NODO:** il punto in cui l'oscillazione è nulla.
- **CRESTA:** il punto in cui l'ampiezza dell'oscillazione è massima



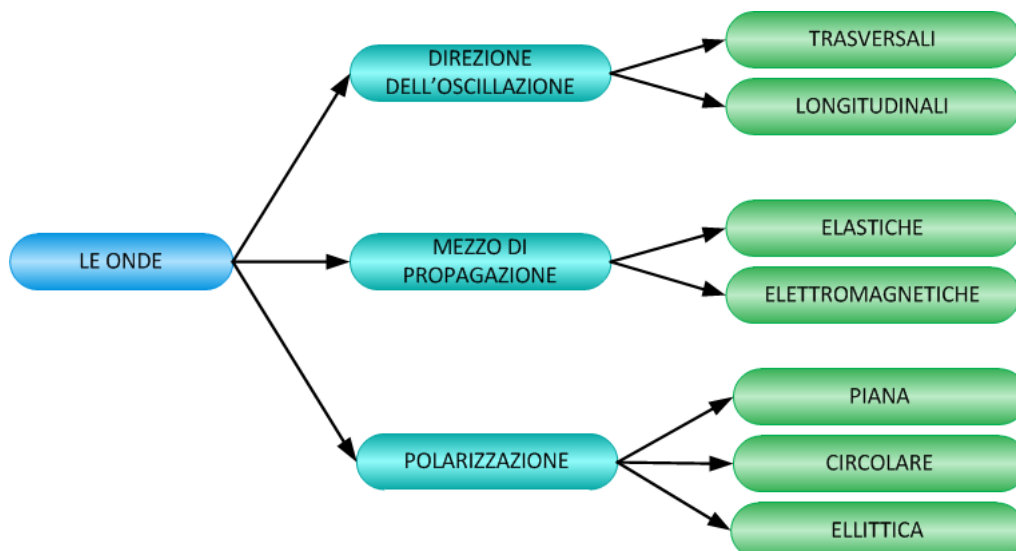
Un'altra grandezza importante è il **FRONTE D'ONDA**. Si chiama fronte d'onda il piano che contiene il punto in cui l'oscillazione è massima.

Si consideri, ad esempio, l'onda del mare. Il fronte d'onda è il piano perpendicolare alla direzione di propagazione, che contiene il punto in cui l'onda è più alta. Il fronte d'onda si sposta in avanti man mano che l'onda avanza.



3.1 La classificazione delle onde

Le onde si possono classificare in diversi modi a seconda dei parametri che si prendono in considerazione:

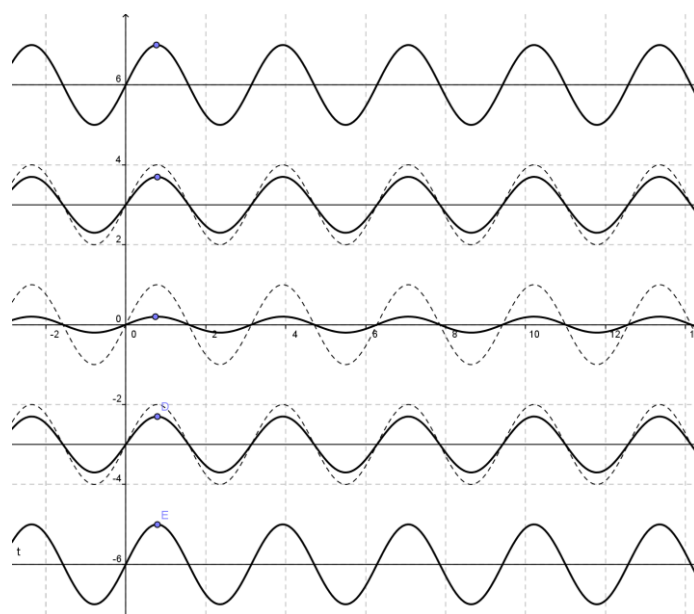


3.1.1 Onde trasversali e onde longitudinali

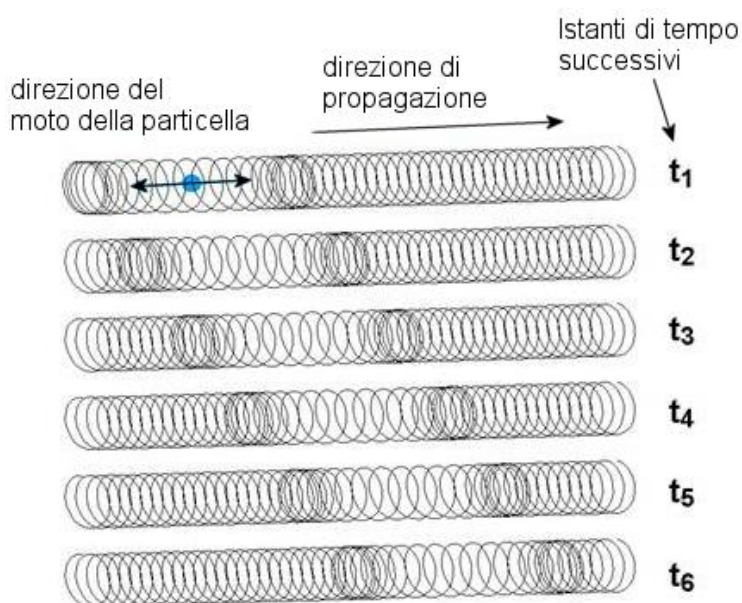
La differenza tra le onde trasversali e le onde longitudinali sta nella direzione in cui oscillano i punti. Quando un'onda viene emessa si propaga in una certa direzione (radiale come quelle in acqua, su una linea come le onde su una corda, ecc...).

I punti del mezzo che trasporta l'onda possono oscillare in due modi:

- in **DIREZIONE TRASVERSALE** a quella in cui si propaga l'onda: come nel caso della boa in uno stagno, che oscilla in verticale mentre l'onda si propaga in orizzontale. Questo tipo di onda si chiama **TRASVERSALE**.



- nella **STESSA DIREZIONE** in cui si propaga l'onda: come nel caso delle onde su una molla. Questo tipo di onde si chiamano onde **LONGITUDINALI**.



3.1.2 Onde elastiche e onde elettromagnetiche

Un'altra distinzione tra le onde si può fare sulla base del mezzo in cui queste si propagano. Le onde si dividono quindi in:

- **ONDE ELASTICHE:** se per la trasmissione di un'onda è necessario avere un mezzo materiale (aria, corda, ecc...)
- **ONDE ELETTROMAGNETICHE:** se le onde non hanno bisogno di un mezzo materiale per propagarsi e possono viaggiare anche nel vuoto.

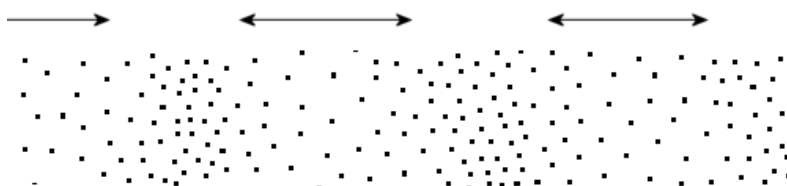
Per capire la differenza tra le due si considerino il suono e la luce. La luce è un'onda elettromagnetica e si propaga anche nel vuoto, tant'è che la luce del Sole arriva sulla Terra attraverso il vuoto dello spazio.

Il suono invece è un'onda elastica e pertanto necessita la presenza di un mezzo materiale.

LE ONDE ELASTICHE

Il suono viene prodotto da una sorgente messa in vibrazione, come la corda di una chitarra. Quindi la sorgente di un suono è sempre un corpo che vibra.

Tali vibrazioni comprimono le molecole di aria che si trovano vicino alla sorgente, aumentando leggermente la pressione atmosferica. Le molecole di aria compressa spingono le molecole vicine e, così facendo, si espandono. Si innesca quindi un processo a catena in cui si alternano zone di espansione e zone di compressione: quando zone di alta pressione si spostano attraverso l'aria, lasciano dietro di sé zone di bassa pressione.



Immaginiamo di sederci su una molecola mentre viene investita dall'onda: la molecola, colpita dall'onda di compressione, va avanti; quando l'onda di compressione è passata, la molecola viene spinta indietro dall'onda di espansione. La molecola sta quindi oscillando nella stessa direzione in cui si propaga l'onda.

Dunque le onde sonore sono onde longitudinali.

Quando queste onde di variazione di pressione raggiungono l'orecchio umano incontrano il timpano.

Il timpano è una membrana che viene spinta verso l'interno quando le onde sono di compressione e verso l'esterno quando sono di rarefazione. Il cervello è in grado di interpretare questi micromovimenti come suoni.

Da quanto detto fin'ora, si può intuire come il suono necessiti, per propagarsi, di un mezzo che si comprima e si espanda. Un mezzo di questo tipo è chiamato mezzo elastico.

In pratica tutti i mezzi materiali, composti cioè da molecole, sono elastici. Il loro grado di elasticità però varia a seconda del mezzo.

Più il materiale è denso, più ci sono molecole da comprimere e da espandere: un mezzo molto denso è anche molto elastico.

Se invece il mezzo è rarefatto, le molecole sono poche e non possono essere compresse ed espanse con facilità. Nel vuoto, in cui le molecole sono completamente assenti, il suono non può propagarsi. Nello spazio infatti non si sente nulla.

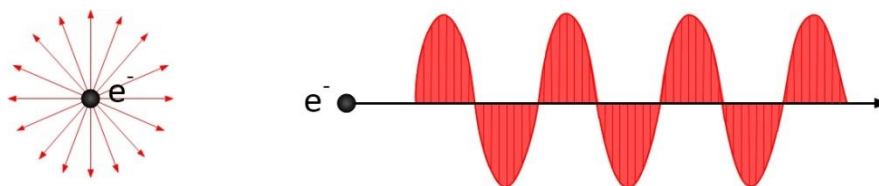
La velocità di propagazione del suono dipende dalla quantità di molecole che sono a disposizione per generare onde di compressione ed espansione. Più il mezzo è denso e più il suono si propaga velocemente. Questo spiega perché nell'acqua o nel cemento il suono viaggia più velocemente, tant'è che è più facile ascoltare una conversazione che avviene in una stanza vicina se si appoggia l'orecchio sulla parete.

Nell'aria la velocità del suono si può considerare costante, nonostante la densità dell'aria in realtà abbia delle variazioni dovute al clima, e vale circa 330 m/s. Nell'acqua invece questa velocità è circa 5 volte maggiore.

LE ONDE ELETTROMAGNETICHE

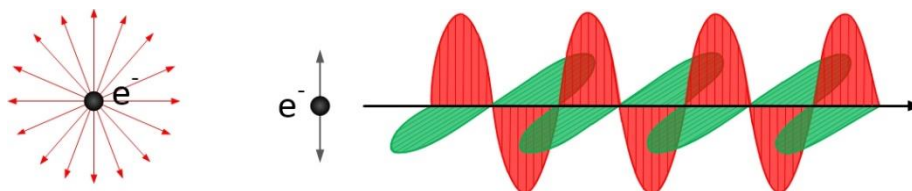
Per quanto riguarda le onde elettromagnetiche, la situazione è completamente diversa.

Consideriamo un elettrone fermo nel vuoto. Esso genera attorno a se un campo elettrico a causa della sua carica elettrica. Il campo elettrico si stacca dall'elettrone e si propaga in una certa direzione sotto forma di onda elettrica:



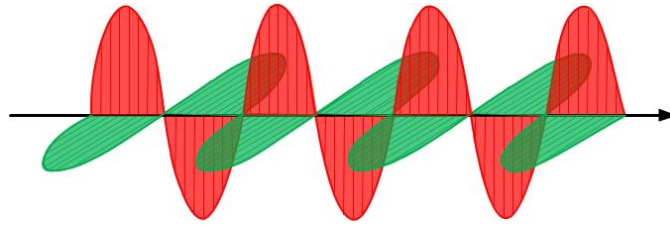
Immaginiamo poi di far oscillare l'elettrone lungo una certa direzione.

L'elettrone può oscillare nel vuoto o su un pezzo di filo: il principio è lo stesso. Quando l'elettrone oscilla il campo elettrico si mette in moto e per il principio di induzione elettromagnetica nasce un campo magnetico, perpendicolare al campo elettrico, che si propaga insieme ad esso:



Quindi il campo elettrico e il campo magnetico nascono associati.

Un'onda elettromagnetica è dunque generata dall'oscillazione di una carica elettrica ed è costituita dall'insieme di un **CAMPO ELETTRICO** e di uno **MAGNETICO** che oscillano su piani perpendicolari tra loro e avanzano lungo la stessa direzione:



Il **CAMPO ELETTRICO** viene di solito indicato con la lettera **E**, mentre il **CAMPO MAGNETICO** viene di solito indicato con la lettera **B**. Quindi un'onda elettromagnetica è composta da due componenti accoppiate: una elettrica e una magnetica.

Le onde elettromagnetiche si trovano in moltissimi campi. Ad esempio abbiamo a che fare con dell'energia elettromagnetica ogni volta in cui si parla di calore o di luce. La luce e il calore sono infatti onde elettromagnetiche.

3.2 Caratteristiche delle onde elettromagnetiche

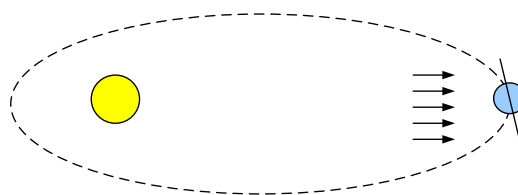
Le onde elettromagnetiche si propagano in un modo particolare.

Nel **VUOTO PERCORRONO GRANDI DISTANZE SENZA PERDERE ENERGIA**; quando incontrano un corpo cedono la loro energia (in parte o tutta).

Pensiamo ad esempio al sole che riscalda la terra con la sua energia elettromagnetica. Nonostante la grande distanza che separa i due corpi celesti, il Sole riesce ad inviare sulla Terra una grande quantità di energia, anche se nessun tratto intermedio di questo tragitto (il vuoto e l'atmosfera) viene riscaldato (quando un aereo vola ad alta quota l'aria esterna, anche in presenza del Sole, è a temperature inferiori a trenta gradi sottozero).

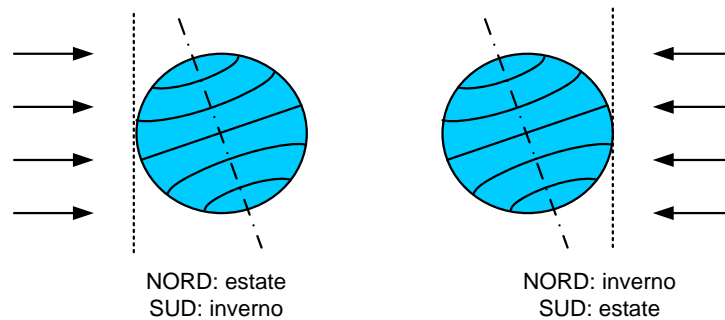
Il suolo invece, quando viene colpito dalla radiazione elettromagnetica, si riscalda e cede questo calore all'aria immediatamente vicina. Questo spiega perché la temperatura diminuisce con la quota.

Il fatto che l'energia posseduta dalle onde elettromagnetiche rimanga pressoché invariata nel suo viaggio attraverso il vuoto spiega come mai nell'emisfero nord sulla Terra faccia più caldo in estate nonostante la Terra si trovi più lontana dal Sole:



A causa dell'inclinazione dell'asse terrestre, l'emisfero nord riceve le onde elettromagnetiche inviate dal Sole con un'angolazione prossima a 90° (sono esattamente 90° sul Tropico del Cancro al solstizio d'estate).

L'energia viene quindi ceduta completamente, mentre in inverno le onde elettromagnetiche arrivano al suolo con un'inclinazione maggiore e cedono meno energia, come mostrato nella figura seguente.



Il calore e la luce possono quindi viaggiare attraverso l'aria e attraverso il vuoto e non è necessario, come invece accade per la corrente elettrica, che ci sia un conduttore.

Questo tipo di trasmissione dell'energia viene chiamato **IRRAGGIAMENTO**.

L'irraggiamento ha la caratteristica di trasmettere energia anche a grandi distanze, cedendola solo quando incontra un corpo materiale.

Abbiamo visto che il Sole è una sorgente elettromagnetica. Quello che consente al Sole di produrre questa gran quantità di onde elettromagnetiche è la reazione di fusione nucleare che avviene al suo interno: un atomo di deuterio e uno di trizio (due isotopi dell'idrogeno) si fondono per dare origine ad un atomo di Elio.

Se osserviamo la reazione rappresentata possiamo notare che:

- l'atomo di deuterio ha un protone e un neutrone (2 particelle in totale);
- l'atomo di trizio ha un protone e due neutroni (3 particelle in totale);
- l'elio invece ha due protoni e due neutroni (4 particelle in totale).



Come si può notare dal disegno, sommando le particelle che compongono i nuclei del deuterio e del trizio si ottengono 5 particelle, mentre l'elio ne ha solo 4. La particella mancante viene convertita in energia elettromagnetica tramite la formula di Einstein: $E = m \cdot c^2$.

Una parte quest'energia viaggia attraverso lo spazio sotto forma di onde elettromagnetiche.

In generale, non è necessaria una reazione di fusione nucleare per ottenere delle onde elettromagnetiche. Qualunque corpo surriscaldato o qualsiasi conduttore attraversato da corrente elettrica produce un'onda elettromagnetica, o meglio, produce tante onde elettromagnetiche di diversa frequenza che si sovrappongono e vengono irradiate nello spazio circostante.

Ogni onda elettromagnetica è caratterizzata dall'aver una certa frequenza principale (e una certa lunghezza d'onda) che dipende dalla temperatura del corpo che emette la radiazione.

Nelle applicazioni si utilizzano indifferentemente la frequenza e la lunghezza d'onda perché è possibile passare dall'una all'altra con un semplice calcolo, sapendo che le onde elettromagnetiche viaggiano alla velocità della luce.

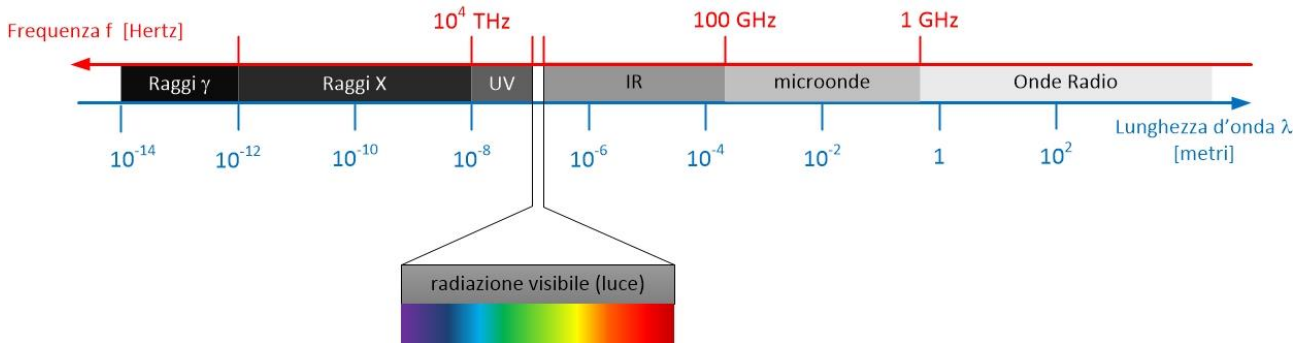
3.2.1 Lo spettro elettromagnetico

Le onde elettromagnetiche sono state divise in base alla frequenza (o alla lunghezza d'onda) in diverse categorie:

- Raggi γ
- Raggi X
- Raggi Ultravioletti (UV)
- Raggi Infrarossi (IR)
- Microonde
- Onde radio (radiofrequenze)

Questi tipi di onde vengono rappresentati su un grafico, chiamato **SPETTRO ELETTROMAGNETICO**, che presenta un asse con le frequenze e le lunghezze d'onda.

La figura seguente mostra lo spettro elettromagnetico, dalle onde più corte (alta frequenza), che sono le più energetiche, fino alle più lunghe.



La lunghezza dell'onda influenza moltissimi fenomeni. Ad esempio, un'onda è in grado di scavalcare un ostacolo che abbia dimensioni inferiori alla sua lunghezza d'onda, mentre viene fermata da ostacoli di dimensioni maggiori. Inoltre, all'aumentare della frequenza aumenta l'energia che l'onda può trasportare e quindi i raggi γ e i raggi X sono quelli che hanno più energia. Essi però percorrono meno spazio prima di attuarsi e quindi arrivano meno lontano delle onde radio.

Nei prossimi paragrafi vedremo in dettaglio come la lunghezza d'onda influenza le proprietà della radiazione.

3.2.2 La polarizzazione delle onde elettromagnetiche

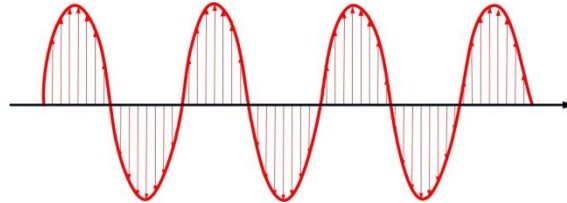
Abbiamo visto che le onde elettromagnetiche sono costituite da un campo elettrico e un campo magnetico che oscillano perpendicolarmente.

Il vettore campo elettrico di un'onda elettromagnetica può oscillare in diversi modi. Il campo magnetico sarà comunque perpendicolare al campo elettrico.

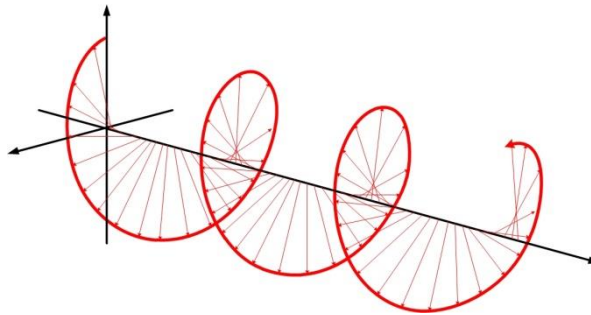
La direzione di oscillazione del vettore campo elettrico è indicata dalla polarizzazione.

Esistono tre tipi di polarizzazione:

- **LINEARE O PIANA:** quando il vettore campo elettrico oscilla su un piano mantenendo costante la propria direzione. L'ampiezza del vettore varia:



- **CIRCOLARE:** quando il vettore campo elettrico ruota su se stesso, in modo da descrivere una circonferenza. In questo caso l'ampiezza è costante, ma varia la direzione.



- **ELLITTICA:** è come la polarizzazione circolare, ma l'oscillazione del vettore campo elettrico varia in ampiezza a seconda della direzione, in modo che la punta del vettore descriva un'ellisse.

3.3 Onde elettromagnetiche e materia

Abbiamo visto che un'onda elettromagnetica si propaga nel vuoto senza praticamente perdere energia finché non incontra della materia. Inoltre nel vuoto il comportamento delle onde elettromagnetiche è indipendente dalla frequenza e quindi dalla lunghezza d'onda.

In questo ambiente, le onde elettromagnetiche si muovono tutte e sempre in linea retta e si propagano tutte alla stessa velocità, quella della luce nel vuoto:

$$c \cong 300\,000\,000 \frac{m}{s}$$

che è una costante universale, cioè vale in qualunque punto dell'universo. Se invece un'onda incontra la materia le cose cambiano. La materia esistente nell'universo è formata dalla combinazione di 92 elementi naturali, uniti in vario modo per formare molecole. Ogni molecola ha delle caratteristiche che la contraddistinguono e che le conferiscono proprietà diverse da quelle delle altre molecole. Una di queste proprietà è il comportamento quando il materiale viene colpito dalle onde elettromagnetiche.

Quando un corpo viene colpito da una radiazione possono verificarsi tre fenomeni:

- l'onda **ATTRAVERSA IL MATERIALE** e prosegue il suo percorso;
- l'onda **VIENE RIFLESSA DAL MATERIALE** e torna indietro;
- l'onda **VIENE ASSORBITA DAL MATERIALE** e bloccata.

Questi tre fenomeni possono avere luogo da soli o insieme agli altri e dipendono non solo dalla natura chimica del materiale, ma anche dalla sua forma.

3.3.1 L'attraversamento di un mezzo materiale

I materiali che permettono alla radiazione elettromagnetica di attraversarli si dicono trasparenti. Un materiale può essere trasparente a certe frequenze e non esserlo ad altre. Si pensi ad esempio al vetro del forno a microonde, che è trasparente alla luce visibile (è possibile vedere all'interno del forno), ma che ferma le microonde.

In realtà nessun materiale è completamente trasparente ad una certa frequenza: una parte dell'onda viene sempre assorbita o riflessa, come vedremo nel prossimo paragrafo.

Quindi, quando un'onda elettromagnetica attraversa un materiale, la radiazione subisce dei disturbi. Questo significa che l'onda in uscita dal materiale attraversato avrà caratteristiche diverse da quelle dell'onda in ingresso. Si dice che l'onda va incontro ad alcuni **FENOMENI DI DISTORSIONE**.

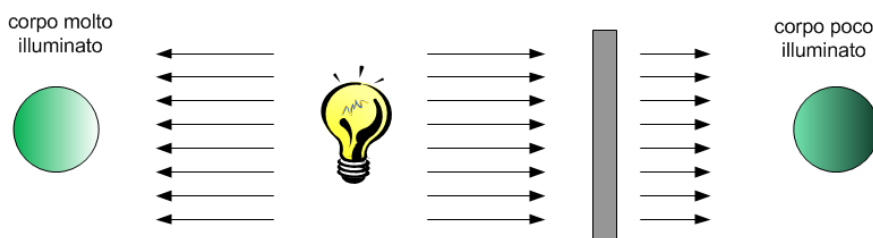
Questi fenomeni di distorsione sono:

- attenuazione
- diffrazione
- diffusione
- rifrazione

ATTENUAZIONE

L'attenuazione è un fenomeno che si verifica ogni volta che un'onda attraversa un mezzo materiale (vetro, aria, acqua, ecc...) e consiste in una perdita di potenza.

Si consideri ad esempio una luce che attraversa un vetro opaco: la luce che oltrepassa il vetro sarà meno intensa di quella che c'era prima del vetro perché una parte dell'energia della radiazione incidente sul vetro viene assorbita dalle molecole.



Un materiale trasparente trattiene solo una piccola parte dell'energia e nella maggior parte delle applicazioni questo effetto può essere trascurato. Si pensi ad esempio alla luce che attraversa un vetro: possiamo dire che il vetro è perfettamente trasparente perché non ci accorgiamo nemmeno della parte di luce bloccata.

Se invece consideriamo un'onda radio che viaggia nell'atmosfera questo fenomeno è rilevante. Le trasmissioni televisive, ad esempio, perdono potenza a causa dell'attraversamento dell'atmosfera e se si vuole che arrivino a grandi distanze è necessario installare dei ripetitori che ricevono il segnale, gli ridanno potenza e lo ritrasmettono.

L'atmosfera terrestre è un mezzo trasparente alla radiazione visibile e alle onde radio ma, poiché contiene molecole, una parte dell'energia della radiazione viene assorbita e determina un'attenuazione del segnale. Inoltre alcune molecole presenti nell'atmosfera fermano certe frequenze e ne lasciano passare altre: si pensi ad esempio all'ozono che ferma la radiazione ultravioletta (i cosiddetti raggi UV-A e UV-B che causano scottature) ma lascia passare la luce visibile.

Ci sono quindi delle frequenze che sono soggette ad attenuazione e altre che invece non subiscono questo fenomeno. Basti pensare che quando il cielo è coperto, la luce è minore, ma la radio e la televisione si ricevono lo stesso.

Questo avviene perché la lunghezza d'onda delle trasmissioni radiotelevisive è indifferente all'umidità presente dell'aria, mentre la luce visibile subisce il fenomeno dell'attenuazione: infatti quando la luce passa attraverso zone a più alta umidità, come le nuvole, si vede un corpo opaco, appunto la nuvola.

In generale le onde di grande lunghezza sono meno soggette all'attenuazione.

Dunque, **L'ATTENUAZIONE È UN FENOMENO DI DISTORSIONE A CUI VANNO INCONTRO LE ONDE ELETTROMAGNETICHE QUANDO ATTRAVERSANO UN MEZZO MATERIALE. CONSISTE NELL'ASSORBIMENTO DI UNA PARTE DELL'ENERGIA ELETTROMAGNETICA TRASPORTATA DALL'ONDA DA PARTE DEL MEZZO IN CUI ESSA SI PROPAGA.**

L'attenuazione dipende dalla lunghezza d'onda del segnale.

DIFFRAZIONE

La diffrazione è un fenomeno di distorsione che avviene quando **UN'ONDA INCONTRA UN OSTACOLO PIÙ PICCOLO DELLA SUA LUNGHEZZA D'ONDA O È COSTRETTA A PASSARE IN UNA FESSURA**, sempre di dimensioni più piccole della sua lunghezza d'onda.

L'onda in questi casi riesce a scavalcare l'ostacolo (o a passare attraverso l'apertura) ma subisce dei fenomeni di distorsione in prossimità dell'ostacolo.

Il fenomeno della diffrazione si incontra comunemente quando la luce esce da una stanza attraverso una porta aperta. La luce riesce ad aggirare gli stipiti della porta per raggiungere parti "nascoste" ma così facendo **SI DIVIDE IN ONDE PIÙ PICCOLE, PERDENDO POTENZA.**



Lo stesso fenomeno si osserva se si mette un bastone nella corrente di un fiume: l'acqua aggira il bastone, ma forma delle onde più piccole in prossimità dell'ostacolo.

DIFFUSIONE

La diffusione è un fenomeno di disturbo che avviene quando **IL MEZZO MATERIALE ATTRAVERSATO DALL'ONDA LA FA DEVIARE IN TANTE DIREZIONI DIVERSE DA QUELLA DI PROVENIENZA.**

Il fenomeno della diffusione si nota molto bene quando si guarda il Sole sott'acqua. La luce del Sole viene distorta ed è fortemente attenuata (ha perso molta potenza). Questo fenomeno è dovuto al fatto che l'onda, colpendo le particelle di acqua "rimbalza in tante direzioni"; è come se l'onda si spezzettasse e suddividesse la propria potenza tra tutte le onde riflesse che quindi risultano poco potenti e vengono subito fermate dall'acqua.

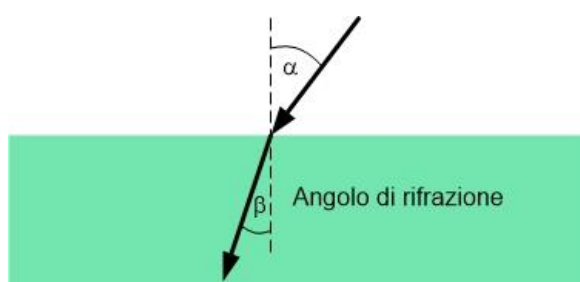
Lo stesso fenomeno avviene nell'atmosfera, anche se in maniera meno evidente. L'alba e il crepuscolo sono dovuti proprio alla diffusione della luce nell'atmosfera. Se non ci fosse l'atmosfera si passerebbe dal giorno alla notte all'improvviso senza avere il crepuscolo.

RIFRAZIONE

La rifrazione è un fenomeno di distorsione che avviene quando **UN'ONDA ATTRAVERSA UN OGGETTO E PROSEGUE IL SUO PERCORSO LUNGO UNA DIREZIONE DIVERSA DA QUELLA DI PROVENIENZA.**

La rifrazione avviene ogni volta che l'onda attraversa una superficie di separazione tra due materiali diversi, ad esempio aria-vetro oppure aria-acqua.

Questo fenomeno si può notare se si osserva una cannuccia in un bicchiere d'acqua: appena sotto l'acqua, la cannuccia sembra piegata poiché la luce cambia direzione quando colpisce la superficie di separazione tra acqua e aria.



Non tutti i materiali modificano la direzione dell'onda elettromagnetica nello stesso modo. Per tener conto di questo diverso comportamento si utilizza un parametro chiamato indice di rifrazione e indicato con la lettera n .

La tabella seguente mostra l'indice di rifrazione per alcuni materiali:

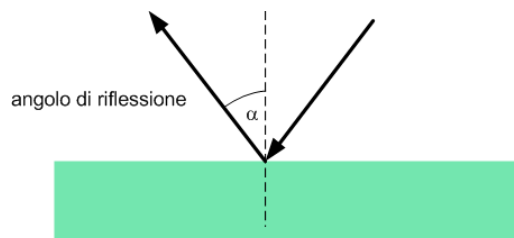
MATERIALE	INDICE DI RIFRAZIONE		MATERIALE	INDICE DI RIFRAZIONE
Aria	1.000294		Azoto	1.000297
Idrogeno	1.000139		Ossigeno	1.000272
Acqua	1.33		Vetro	1.579

3.3.2 La riflessione di un'onda

La riflessione si verifica quando un'onda colpisce una superficie di discontinuità e una parte della sua energia torna indietro con lo stesso angolo con cui ha colpito la superficie.

Alcuni oggetti hanno la capacità di riflettere completamente le onde elettromagnetiche che li colpiscono. E' il caso degli specchi.

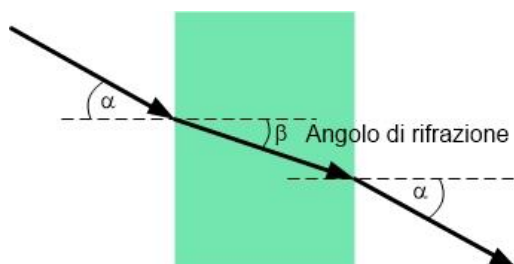
In realtà quasi tutti i materiali riflettono una parte dell'onda incidente e assorbono o lasciano passare la parte restante rifrangendola. La quantità di energia riflessa dipende dal materiale e dalla forma del corpo.



3.3.3 L'assorbimento delle onde

Abbiamo visto che quando un'onda elettromagnetica colpisce un corpo possono accadere diverse cose: una parte dell'onda viene riflessa e torna indietro con lo stesso angolo con cui ha colpito il corpo; un'altra parte entra nel corpo e viene rifratta, cioè prosegue il suo cammino in una direzione diversa da quella di arrivo.

Questa parte di radiazione, una volta attraversato il corpo, uscirà dall'altra parte, cambiando nuovamente direzione a causa della seconda superficie di discontinuità:



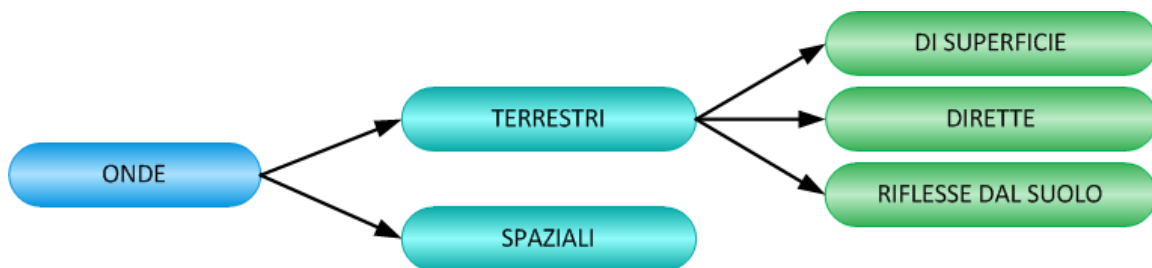
Ci sono corpi però che non permettono alla radiazione di uscire, una volta che essa è entrata. In questo caso si parla di assorbimento dell'onda da parte del corpo.

L'assorbimento è molto importante in campo aeronautico. Si pensi anche solo agli aerei invisibili al radar, come l'F-177 che assorbo la radiazione e non le permettono di tornare indietro.

Parleremo più in dettaglio dell'assorbimento nel capitolo dedicato alla guerra elettronica.

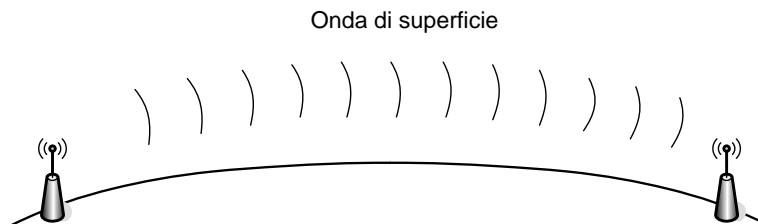
3.4 La propagazione delle onde elettromagnetiche

Abbiamo visto i fenomeni a cui le onde elettromagnetiche sono soggette quando viaggiano nell'atmosfera, ma non abbiamo detto nulla su come viaggiano le onde. I modi in cui le onde si propagano sono molti e variano a seconda della lunghezza d'onda. Possiamo classificare i modi di propagarne secondo lo schema seguente:



3.4.1 Onde terrestri di superficie

Le onde di superficie sono onde che viaggiano vicino al suolo, seguendo la curvatura terrestre anche per grandi distanze.



Il suolo si comporta come un conduttore che permette al campo elettrico di propagarsi lungo il terreno. Allo stesso modo di un filo conduttore, il terreno ha una sua resistività. Maggiore è la resistività del terreno e maggiore sarà l'energia dissipata (e quindi l'attenuazione dell'onda). Viceversa, se il terreno ha una bassa resistività (e quindi conduce molto bene) l'onda percorrerà grandi distanze attenuandosi poco.

L'acqua del mare ha una maggiore conduttività (bassa resistività) e quindi l'onda si attenua meno.

Nel suo percorso l'onda è costretta a scalare colline, fiumi, edifici e tutto quello che incontra sul suo percorso. Affinché l'onda non venga fermata da questi ostacoli è quindi necessario che la sua lunghezza d'onda sia grande (LF, VLF).

Le comunicazioni navali sono spesso effettuate con onde LF o VLF che si propagano sul mare come onde di superficie.

3.4.2 Onde terrestri dirette

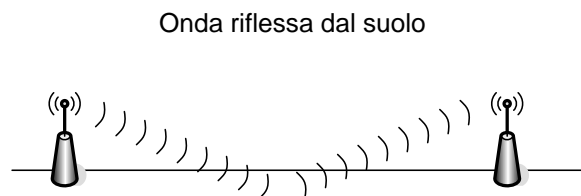
Le onde dirette sono quelle che viaggiano direttamente dal trasmettitore al ricevitore quando questi si trovano a distanza ottica, cioè ad una distanza tale da poter essere visibili l'un l'altro.



È un tipo di trasmissione utilizzata per le onde corte (dalle HF alle SHF), quindi nel campo delle microonde.

3.4.3 Onde terrestri riflesse dal suolo

Quando il trasmettitore e il ricevitore sono posti in luoghi sopraelevati, oltre all'onda diretta è sempre presente un'onda riflessa dal suolo. Quest'onda ha il campo elettrico invertito rispetto a quella incidente e quindi può creare problemi quando arriva al ricevitore e si somma all'onda diretta.



3.4.4 Onde spaziali (o ionosferiche)

Un altro tipo di propagazione molto importante è la cosiddetta riflessione ionosferica. Questo termine fa riferimento al fatto che le onde spaziali si riflettono sulla ionosfera e tornano verso il suolo percorrendo distanza molto maggiori di quelle che percorrerebbero se si propagassero direttamente.

La ionosfera è uno strato dell'atmosfera, che si estende tra 60 e 400 km, in cui l'energia della radiazione solare è in grado di fornire agli elettroni l'energia necessaria a lasciare l'atomo. Si formano quindi degli ioni. Il numero di ioni che si formano dipende dalla densità dell'atmosfera e dall'entità della radiazione che colpisce gli elettroni. Di notte, quando la radiazione solare non è presente, molti elettroni si legano di nuovo agli atomi facendo scendere la concentrazione di ioni; inoltre, negli strati più bassi, la densità dell'atmosfera è maggiore e gli ioni tendono a ricombinarsi con più facilità (uno ione positivo si ricombina con uno negativo per dare una molecola neutra) a causa della maggiore presenza di particelle.

Si vengono così a creare diverse zone all'interno della ionosfera:

Zona D: la più bassa, quella in cui la densità è maggiore e si ha il minor numero di ioni.

Zona E: una zona intermedia

Zona F1 e F2: le zone più alte, in cui la densità è bassa

Al variare della concentrazione di ioni nelle varie zone varia l'indice di rifrazione: in particolare, salendo verso l'alto l'indice diminuisce.

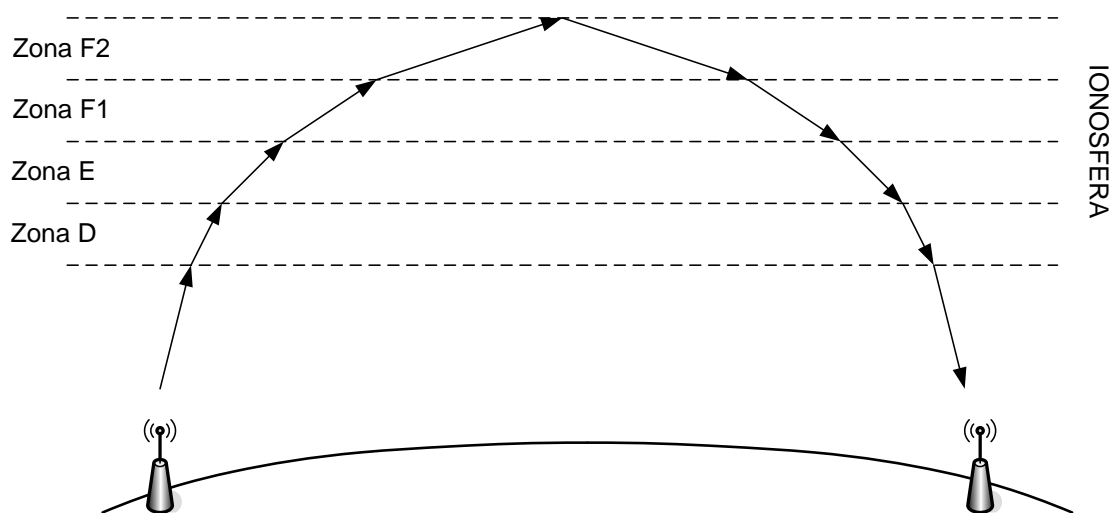
La propagazione dell'onda avviene con questo meccanismo: l'onda viene emessa da un trasmettitore con un certo angolo. Quando l'onda arriva alla ionosfera viene deviata (rifrazione), a causa del cambio di mezzo materiale che agisce come fosse una superficie.

L'onda viaggia nel primo strato della ionosfera senza ulteriori deviazioni, ma quando giunge al secondo strato, viene nuovamente rifratta. L'angolo di rifrazione è però minore di quello del primo strato.

Ad ogni strato successivo l'onda viene rifratta finché l'indice di rifrazione si annulla e l'onda viene completamente riflessa verso il suolo.

L'angolo con cui parte la radiazione dal trasmettitore influenza la distanza a cui il segnale può arrivare: per angoli sempre più grandi l'onda percorre distanze via via maggiori.

Esiste tuttavia un angolo massimo, chiamato angolo critico, superato il quale la radiazione non torna più sulla Terra, ma buca la ionosfera e si perde nello spazio. Da qui deriva il nome di onde spaziali che è dato alle radiazioni che si propagano in questo modo.



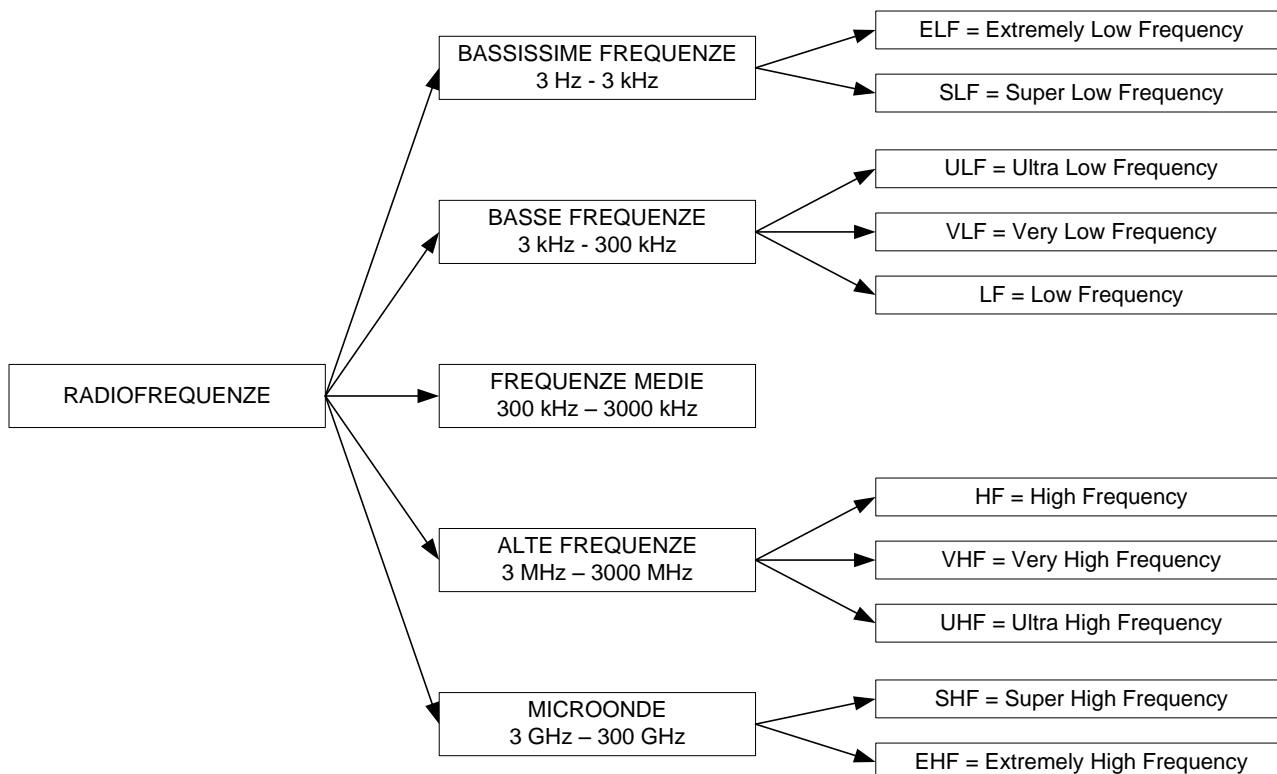
Un altro parametro che influenza la rifrazione e la riflessione dell'onda sugli strati della ionosfera è la sua frequenza.

Se il segnale viene irradiato perpendicolarmente al terreno, l'angolo di riflessione varia in base alla frequenza dell'onda: in particolare, all'aumentare della frequenza aumenta l'angolo di riflessione fino al punto in cui il segnale non torna più sulla Terra.

3.5 Le radiofrequenze

Nello studio delle telecomunicazioni ci interessano le cosiddette radiofrequenze perché è questa parte dello spettro elettromagnetico che viene utilizzata per le comunicazioni radio e per il radar. Studieremo nel capitolo dedicato alle radiocomunicazioni il motivo di tale scelta.

Le radiofrequenze, o frequenze radio, sono ulteriormente suddivise in base alla frequenza, come mostrato nella tabella seguente:



BASSISSIME FREQUENZE

Questa banda di frequenze è in grado di percorrere grandi distanze come onda di superficie. In particolare, le onde ELF vengono utilizzate per le comunicazioni sottomarine, sfruttando l'elevata conduttività dell'acqua.

Queste frequenze sono in grado di penetrare in profondità nell'acqua e nel terreno. In particolare le ULF venivano utilizzate per le comunicazioni in miniera o nelle gallerie.

La corrente alternata utilizzata per uso civile rientra in questa categoria: si tratta di un'onda SLF con frequenza di 50-60 Hz.

BASSE FREQUENZE

Le VLF sono utilizzate dai sottomarini per le comunicazioni quando il sommergibile è vicino alla superficie. Si utilizzano inoltre per le comunicazioni navali di superficie.

Le LF sono utilizzate, anche se con scarsa diffusione, per la radiodiffusione terrestre. Si preferisce tuttavia utilizzare onde più lunghe a causa dei rischi per la salute connessi all'uso di un'onda lunga ad alta potenza.

MEDIE FREQUENZE

Le MF sono le frequenze utilizzate per la radiodiffusione in tutto il mondo. Questo tipo di onde si propagano durante il giorno come onde di superficie e vengono riflesse dalla ionosfera di notte, quando la ionosfera D scompare a causa della ricombinazione degli ioni.

Questo significa che di notte il segnale raggiunge distanze molto maggiori che di giorno, tanto che alcune stazioni radio riducono la potenza del segnale nelle ore notturne. Le MF sono adatte per la trasmissione della voce, ma quando è necessario trasmettere ad alta fedeltà o in stereofonia si preferisce usare onde più corte perché, come vedremo nel prossimo capitolo, sono più adatte ad essere modulate in frequenza.

ALTA FREQUENZA

Queste frequenze vengono utilizzate per la radiodiffusione e per le comunicazioni in campo aeronautico. Questo tipo di onde si propaga come onda spaziale, riflettendosi sulla ionosfera e arrivando così a distanze notevoli. Tuttavia, le onde HF risultano sensibili ai disturbi e quindi, per le comunicazioni a breve distanza, si preferisce utilizzare le VHF e le UHF.

In particolare, le UHF sono quelle utilizzate per le trasmissioni radiotelevisive e nelle reti wireless.

Le UHF sono onde "di confine" nel senso che possono essere considerate onde ad alta frequenza o addirittura rientrare nel campo delle microonde. I forni a microonde, ad esempio, funzionano in questa banda e si propagano direttamente; hanno quindi bisogno che il trasmettitore e il ricevitore siano a vista.

MICROONDE

Questa gamma di frequenze è estremamente importante per il campo di nostro interesse. Le microonde sono utilizzate nei radar, nei ponti radio terrestri e per le comunicazioni satellitari.

Le EHF sono onde così corte da essere chiamate onde millimetriche (millimetrica wave mmW).

3.6 Fenomeni associati alle onde: l'eco e l'effetto doppler

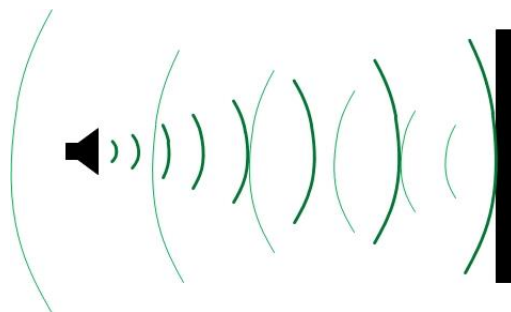
In questo paragrafo studieremo due fenomeni associati alle onde: l'eco e l'effetto doppler. Questi due fenomeni sono estremamente importanti nella radartecnica perché è su di essi che si basa il funzionamento del radar.

L'eco è un fenomeno tipico delle onde acustiche ed è sfruttato dai SONAR. L'effetto doppler invece riguarda tutte le onde, che siano elastiche o elettromagnetiche. E' grazie all'effetto doppler che gli scienziati hanno potuto stabilire che l'universo si sta espandendo.

Sull'effetto doppler è anche basato un particolare tipo di RADAR, chiamato appunto radar-doppler che viene utilizzato dagli autovelox della polizia.

3.6.1 L'eco

L'eco è un fenomeno che si verifica quando un'onda sonora urta contro un ostacolo e torna indietro con lo stesso angolo con cui ha urtato l'oggetto. Il suono viene percepito dall'ascoltatore sia nel momento in cui viene emesso, sia nel momento in cui ritorna verso l'ascoltatore dopo essere rimbalzato contro l'ostacolo.



L'eco è un fenomeno molto simile al rimbombo, che si ha quando il suono si riflette sulle pareti di una stanza vuota.

La differenza tra eco e rimbombo sta nel fatto che l'eco è percepito come un suono completamente separato da quello principale, mentre il rimbombo è percepito come un suono unico, amplificato e lievemente distorto.

Quindi il verificarsi dell'eco è legato alla capacità dell'orecchio umano di separare due suoni in successione, capacità che prende il nome di "potere separatore".

Per gli esseri umani, il potere separatore è di circa 0,1 secondi. Quindi due suoni che vengono emessi a meno di 0,1 secondi l'uno dall'altro vengono percepiti come un suono unico.

Poiché il suono nell'aria viaggia sempre alla stessa velocità, il tempo impiegato a raggiungere l'ostacolo e a tornare indietro dipende solo dalla distanza che separa la sorgente e l'ostacolo.

Il suono in 0,1 secondi percorre circa 34 metri, quindi se l'ostacolo dista dalla sorgente meno di 17 metri (che tra andata e ritorno fanno 34 metri) il suono riflesso è percepito come rimbombo.

Se invece l'ostacolo è più lontano di 17 metri l'onda di ritorno viene percepita come un altro suono e quindi come eco.

Il fenomeno dell'eco consente ai pipistrelli di orientarsi al buio: i pipistrelli emettono ultrasuoni, cioè suoni alla frequenza di circa 120 GHz che si riflettono contro i bersaglio e tornano indietro verso il pipistrello.

Un'altra applicazione di questo fenomeno fisico si trova nel SONAR (acronimo di Sound Navigation and Ranging), un dispositivo che misura le distanze sottomarine. Il principio fisico su cui si basa il SONAR è analogo a quello del RADAR che sarà studiato approfonditamente nei capitoli successivi; la differenza tra i due sta nel fatto che il SONAR utilizza onde sonore, mentre il RADAR utilizza onde elettromagnetiche.

3.6.2 L'effetto doppler

L'effetto Doppler è un fenomeno che si verifica quando si ascolta un suono che si sta avvicinando o si sta allontanando.

Se ascoltiamo un'ambulanza che si sta avvicinando sentiamo che il suono della sirena diventa sempre più acuto, mentre quando l'ambulanza si sta allontanando il suono diventa sempre più grave.

Il motivo di questo comportamento sta in una apparente variazione della frequenza dell'onda, causata dall'allontanamento o dall'avvicinamento della sorgente del suono dall'ascoltatore.

La variazione è solo apparente perché in realtà il suono emesso ha sempre la stessa frequenza: infatti chi è a bordo dell'ambulanza sente il suono della sirena sempre nello stesso modo.

Ma come si genera l'effetto Doppler?

Dobbiamo innanzi tutto distinguere tre casi:

- Osservatore fermo rispetto alla sorgente
- Osservatore in allontanamento rispetto alla sorgente
- Osservatore in avvicinamento rispetto alla sorgente

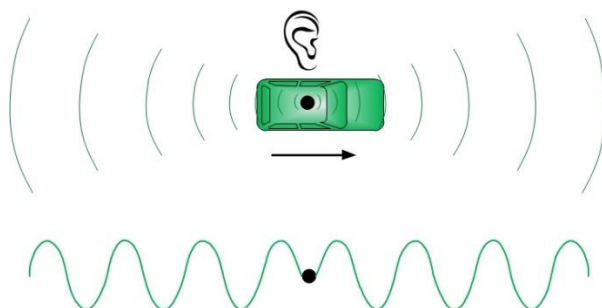
OSSERVATORE FERMO

Consideriamo una persona ferma rispetto ad una sorgente sonora, ad esempio una persona che sta viaggiando su un'ambulanza ed è quindi ferma rispetto alla sirena che sta emettendo il suono.

L'orecchio dell'ascoltatore percepisce il suono con una frequenza uguale a quella effettiva dell'onda:

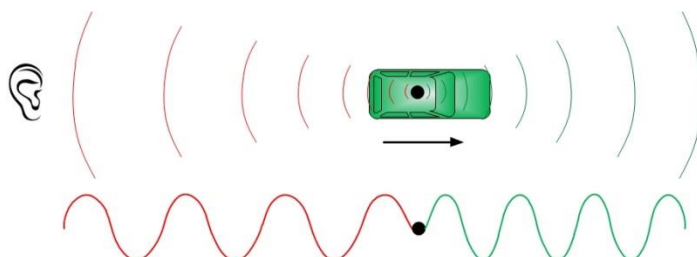
$$f_{\text{ascoltatore}} = f_{\text{reale}}$$

In questo caso non c'è effetto doppler.



OSSERVATORE IN ALLONTANAMENTO

Consideriamo un'ambulanza che si sta allontanando dall'ascoltatore. Il ragionamento che faremo vale anche se l'ambulanza è ferma e l'ascoltatore si sta allontanando.



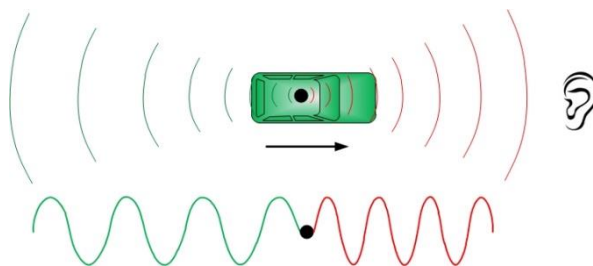
In questo caso è come se la persona stesse “scappando” dall’onda. I fronti d’onda arriveranno all’ascoltatore con un ritardo, rispetto a quello che succederebbe se l’osservatore fosse fermo rispetto alla sorgente. Di conseguenza la frequenza percepita dall’ascoltatore sarà minore. E’ come se l’onda si allungasse per raggiungere l’ascoltatore. Si ha quindi:

$$T_{\text{ascoltatore}} > T_{\text{reale}}$$

$$f_{\text{ascoltatore}} < f_{\text{reale}}$$

OSSERVATORE IN AVVICINAMENTO

Consideriamo un’ambulanza che si sta avvicinando all’ascoltatore. Anche in questo caso il ragionamento che faremo vale anche se l’ambulanza è ferma e l’ascoltatore si sta avvicinando.



In questo caso è come se la persona stesse “correndo incontro” all’onda. I fronti d’onda arriveranno all’osservatore prima di quanto farebbero se l’osservatore fosse fermo. Di conseguenza la frequenza percepita dall’ascoltatore sarà maggiore. E’ come se l’onda si accorciasse, schiacciata dall’ascoltatore. Si ha quindi:

$$T_{\text{ascoltatore}} < T_{\text{reale}}$$

$$f_{\text{ascoltatore}} > f_{\text{reale}}$$

PARTE III: GENERAZIONE E MANIPOLAZIONE DEI SEGNALI

4 GENERAZIONE DELLE ONDE: GLI OSCILLATORI

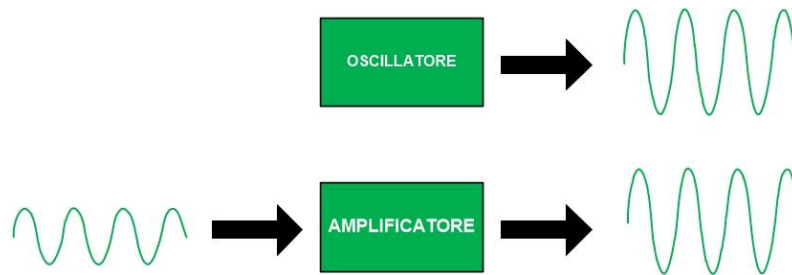
In questa seconda sezione studieremo come si genera e come si modifica un segnale.

Cominciamo a vedere, in questo capitolo, come si produce un segnale.

Per generare un segnale è necessario un dispositivo chiamato **OSCILLATORE**. Esistono diversi tipi di oscillatori, alcuni dei quali fanno uso dei transistor. Noi però ci occuperemo solo di un particolare tipo di oscillatore, in grado di creare un'onda elettromagnetica ad alta potenza: il **MAGNETRON**.

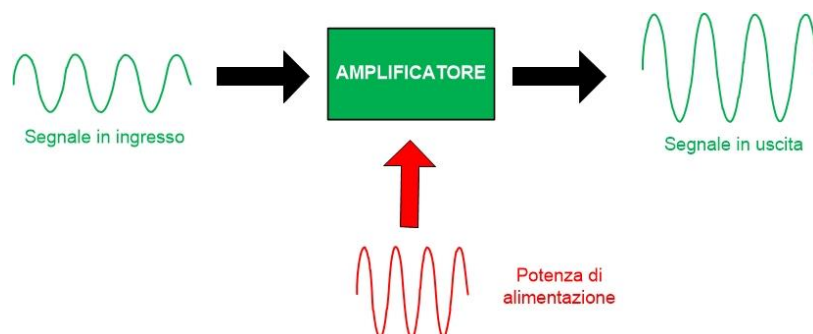
4.1 Amplificatori e oscillatori

Sia gli oscillatori che gli amplificatori sono capaci di dare in uscita un segnale ad alta potenza. La differenza tra i due sta nel fatto che un oscillatore non ha un ingresso: esso produce il segnale da se. Un amplificatore invece è un dispositivo capace di aumentare l'ampiezza del segnale in ingresso:



Affinchè si possa parlare di amplificatore è fondamentale che l'energia utilizzata per amplificare il segnale sia presa da un fonte esterna e non convertita da un'altra forma di energia dello stesso segnale.

Per capire la differenza si pensi a cosa succede in un trasformatore elevatore: la bobina dell'avvolgimento primario riceve in ingresso una certa tensione e genera un campo elettromagnetico che investe la bobina dell'avvolgimento secondario; ai capi di quest'ultimo si genera una tensione maggiore che nel primario, ma a discapito della corrente, che si riduce. La potenza rimane però invariata (se non si considerano le perdite). L'amplificatore invece aumenta veramente la potenza del segnale perché l'energia che gli viene fornita è presa da una sorgente esterna.



Uno dei principali parametri di un amplificatore è il guadagno.

Il guadagno è definito come il rapporto tra la potenza del segnale in uscita e la potenza del segnale in ingresso:

$$G = \frac{P_{uscita}}{P_{ingresso}}$$

Bisogna fare attenzione a cosa si intende con “segnale di ingresso”. L’amplificatore infatti ha due ingressi: il segnale da amplificare e la potenza di alimentazione. Nel guadagno non si tiene conto della potenza di alimentazione: se lo facessimo staremmo calcolando il rendimento

$$\eta = \frac{P_{uscita}}{P_{ingresso} + P_{alimentazione}}$$

Come si vede dalla formula, sia il guadagno che il rendimento sono numeri adimensionali essendo il rapporto tra due grandezze uguali. Nel rendimento, essendo il denominatore sempre maggiore del numeratore, avremo come risultato un numero minore di 1 (per il secondo principio della termodinamica il rendimento non può infatti essere maggiore di 1):

$$\eta < 1$$

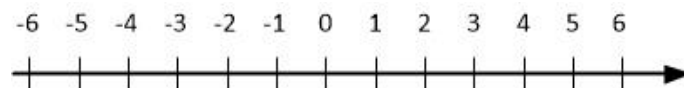
Invece nel caso del guadagno, poichè non stiamo considerando la potenza di alimentazione, il denominatore risulta più piccolo del numeratore e quindi il guadagno sarà sempre un numero maggiore di 1:

$$G > 1$$

4.2 Il deciBel

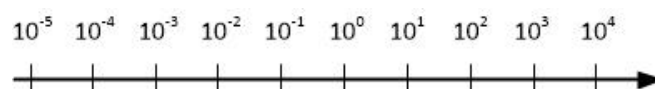
Il deciBel è un sottomultiplo del Bel, un’unità di misura non ufficiale, che cioè non appartiene al Sistema Internazionale. A differenza delle altre unità di misura, viene utilizzata in scala logaritmica. A tal proposito è necessario fare un piccolo richiamo alla matematica.

Le unità del sistema internazionale sono unità in scala lineare. Si dice lineare un fenomeno che può essere rappresentato su una linea numerica equispaziata, cioè tra due unità su di essa c’è sempre la stessa distanza:

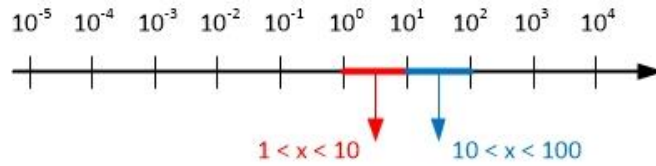


Una scala di questo tipo si chiama **LINEARE**.

Invece una scala logaritmica è una linea graduata in cui tra uno spazio e il successivo non ci sono lo stesso numero di unità. In particolare i numeri che compaiono sulla scala sono gli esponenti di una potenza in base 10:

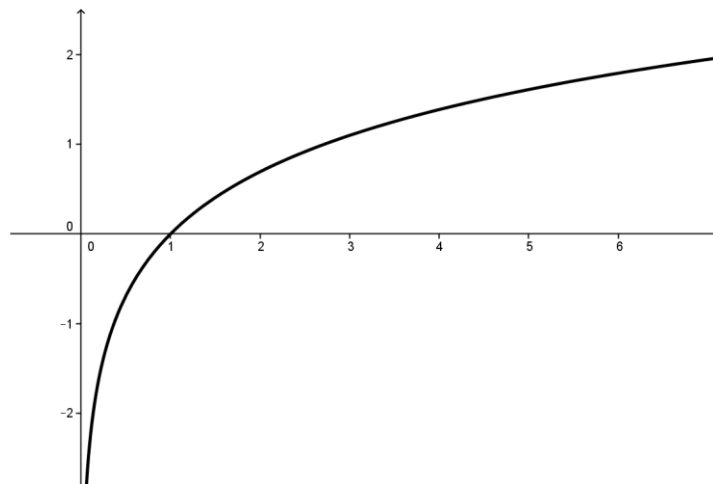


Tra il numero $10^0 = 1$ e l'unità successiva $10^1 = 10$ ci sono **9 numeri interi**. Tra il numero $10^1 = 10$ e l'unità successiva $10^2 = 100$ ci sono **99 numeri interi**.

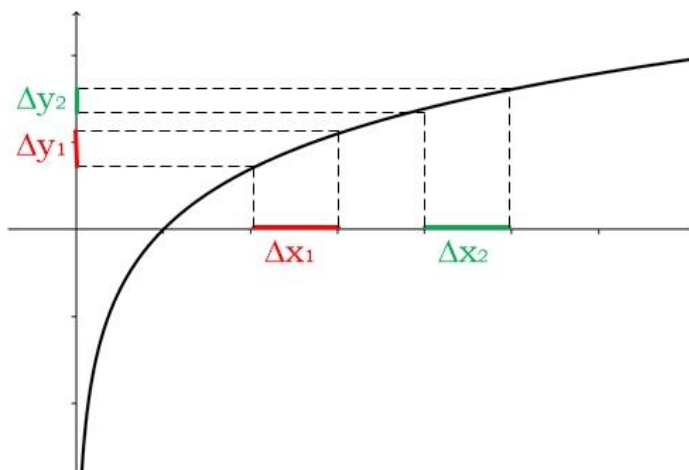


L'utilizzo di una scala logaritmica ci permette di indicare sulla stessa linea cose molto piccole (come gli atomi che hanno un raggio dell'ordine di 10^{-12} metri e l'altezza delle montagne che è dell'ordine di 10^4 metri).

Questa scala si chiama logaritmica perché il grafico che meglio rappresenta il suo andamento è quello del logaritmo:



Man mano che i Δx diventano più grandi, il corrispondente Δy diminuisce:



Per fare in modo che una grandezza lineare diventi logaritmica bisogna inserirla all'interno di una funzione logaritmo. Ad esempio possiamo scrivere il guadagno come:

$$G = \log_{10} \left(\frac{P_U}{P_I} \right)$$

Il risultato del logaritmo è il guadagno e si misura in Bel.

Poiché il Bel è un unità piccola si usa un suo multiplo, il deciBel (dB):

$$1dB = 10 B$$

Il deciBel è usato, oltre che per il guadagno, per indicare l'intensità del suono. In particolare è il rapporto tra la pressione dell'onda che genera il suono in esame e la pressione dell'onda che genera un suono appena udibile dall'orecchio umano:

$$\frac{p_{suono}}{p_{udibile}} = \frac{p_S}{p_0}$$

Questo rapporto viene passato al logaritmo, cioè inserito all'interno di una funzione logaritmica in base 10. In questo modo si ottiene il Bel:

$$\log_{10} \left(\frac{p_S}{p_0} \right)$$

Il deciBel sarà:

$$10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_S}{p_0} \right)$$

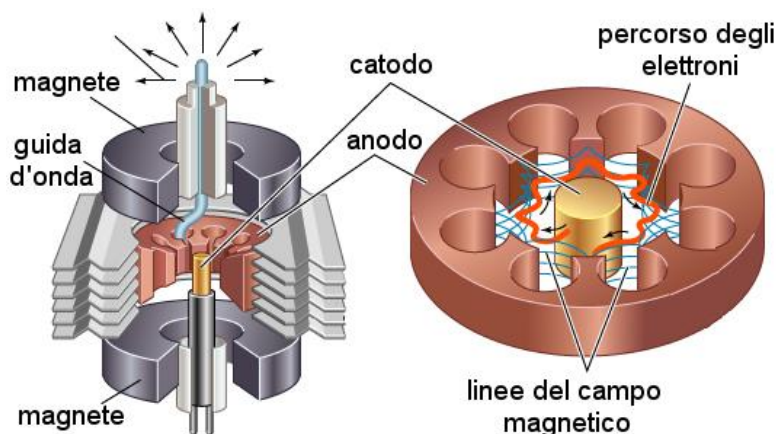
In radartecnica il deciBel è usato tipicamente come unità di misura dei rapporti di potenze.

4.3 Il Magnetron

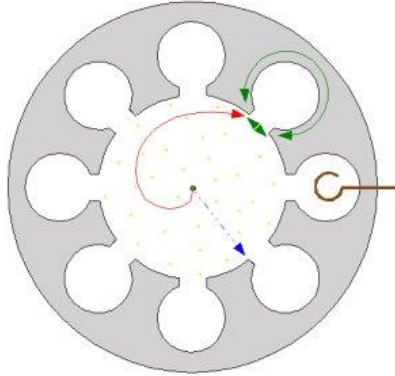
Il magnetron è un dispositivo in grado di generare un'onda elettromagnetica ad alta potenza e di convogliarla, tramite una guida d'onda, verso un'antenna (o in una camera apposita nel caso si tratti di un forno a microonde).

Il magnetron è essenzialmente costituito da:

- un **DISCO** carico negativamente **TERMINANTE IN ALCUNE CAVITÀ**. Questo disco si comporta quindi come un **ANODO (-)**;
- un **FILO**, posto al centro dell'anodo, nel quale **SCORRE CORRENTE ELETTRICA** e che **EMETTE ELETTRONI** per effetto termoionico. Il filo si comporta quindi come un **CATODO (+)**;
- due **MAGNETI PERMANENTI**, posto ai lati dell'anodo, che generano un campo elettromagnetico.
- una **GUIDA D'ONDA** che serve a convogliare l'onda elettromagnetica generata dal magnetron nelle cavità verso l'antenna.

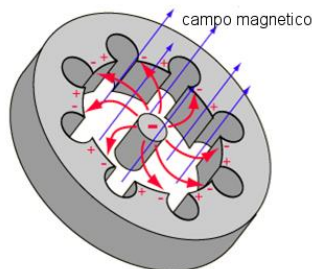


Nel filo che funge da catodo scorre corrente elettrica e, per effetto termoionico (come quello delle lampadine) vengono emessi elettroni. Questi elettroni tenderebbero ad allontanarsi dal filo (lungo la linea blu), se non fosse per la presenza del campo magnetico. Il campo magnetico devia la loro traiettoria e li fa muovere a spirale (lungo la linea rossa).

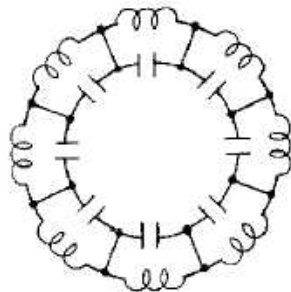


Arrivati alle cavità, gli elettroni cominciano a vibrare, aumentando la loro energia (un po' come accade quando il suono vibra all'interno della cassa risonante di una chitarra). Si produce così un campo elettromagnetico ad alta frequenza.

Il campo elettromagnetico viene poi convogliato verso l'esterno tramite la guida d'onda.



Ogni cavità può essere schematizzata come un circuito risonante parallelo, formato da un condensatore e da un induttore.



La frequenza di risonanza di ogni cavità si può calcolare conoscendo il valore dell'induttore e del condensatore.

La condizione di risonanza si ottiene quando l'energia dell'induttore (reattanza induttiva) è uguale all'energia del condensatore (reattanza capacitiva).

$$X_C = X_L$$

Le due reattanze hanno le seguenti espressioni:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L$$

Ricordando che $\omega = 2\pi f$, possiamo scrivere:

$$\frac{1}{2\pi f C} = 2\pi f L$$

Ora basta esplicitare la frequenza:

$$1 = 4\pi^2 f^2 LC \quad \rightarrow \quad f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

E infine si ottiene la frequenza di risonanza:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

5 LA MODULAZIONE

Abbiamo visto come viene generata un'onda elettromagnetica e come le viene conferita la potenza adatta ad essere trasmessa. A questo punto l'onda è pronta per essere inviata, ma ancora non contiene l'informazione. Se venisse irradiata così com'è, chi la riceve non sarebbe in grado di ricavarne alcunché. E' un po' come ricevere il segnale di una radiolina quando nessuno sta parlando.

IL PROCESSO CON CUI VENGONO INSERITE LE INFORMAZIONI ALL'INTERNO DEL SEGNALE VIENE CHIAMATO MODULAZIONE.

La modulazione è quindi un insieme di tecniche che consentono di modificare un segnale da trasmettere a distanza al fine di ottenere due cose:

- il segnale deve avere le caratteristiche adatte per essere trasmesso in un particolare canale di comunicazione;
- Il segnale deve mantenere invariata l'informazione che deve trasportare.

Tutti i segnali per telecomunicazioni vengono modulati prima della loro trasmissione.

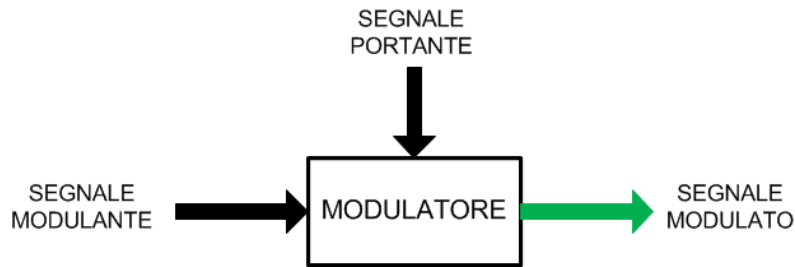
La modulazione è necessaria per diversi motivi:

- Spesso il segnale da trasmettere ha una **FREQUENZA** che **NON** è **ADATTA AL CANALE DI COMUNICAZIONE** scelto. Si pensi, ad esempio, alla voce umana. La banda udibile della voce umana si aggira sui 5 kHz. Si tratta di una frequenza molto bassa, se si considera che i canali radio vanno da 88 a 108 MHz (addirittura due ordini di grandezza differenti).
Se la voce venisse trasmessa così com'è servirebbero delle antenne enormi per farle percorrere la distanza necessaria, come studieremo nel capitolo dedicato alle antenne.
- I segnali non possono essere trasmessi tutti alla stessa frequenza: è necessario che **OGNI TRASMISSIONE** avvenga **SU UN PROPRIO CANALE**, altrimenti chi ascolta una trasmissione non riuscirebbe a distinguerla dalle altre.
- Per poter trasmettere informazioni private è necessario che le trasmissioni possano avvenire su **LINEE RISERVATE**, magari che necessitino di **UN CODICE** per potersi sintonizzare su quella frequenza.

5.1 Segnale portante e segnale modulante

Per i nostri scopi possiamo immaginare che il dispositivo che consente di effettuare la modulazione di un segnale sia una specie di scatola nera che ci fa passare dal segnale senza informazione al segnale con l'informazione.

Osservando lo schema seguente si può notare come siano necessari due segnali in ingresso per poterne avere uno solo in uscita. Analizziamo questi tre segnali separatamente, iniziando da quello in uscita.



SEGNALE MODULATO

Il segnale in uscita è quello pronto per la trasmissione ed avendo già subito il processo di modulazione si chiama segnale modulato.

Il segnale modulato ha una frequenza più elevata di quella del segnale originale. Si pensi anche solo alla voce umana che deva passare da 5 kHz ad almeno 88 MHz (88000 kHz).

Inoltre questo segnale contiene l'informazione originale, informazione che può essere estratta dal segnale quando questo raggiunge il ricevitore.

SEGNALE MODULANTE

Questo segnale è quello originale, che contiene l'informazione iniziale.

Restando all'esempio della trasmissione della voce umana, il segnale modulante è la voce campionata con un microfono. La frequenza del segnale modulante è di solito bassa.

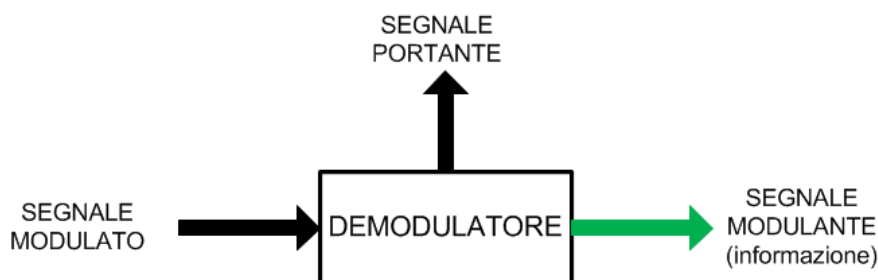
SEGNALE PORTANTE

Il segnale portante è uno dei più importanti e dei più difficili da comprendere. La parola portante fa riferimento alla funzione di questo segnale: esso deve "portare" a destinazione l'informazione e quindi deve avere le caratteristiche necessarie per viaggiare nel mezzo di trasmissione (frequenza e potenza opportune).

Immaginiamo ad esempio di voler trasmettere la voce umana via radio sul canale 90 MHz. Poiché il segnale deve viaggiare in quel canale, la frequenza della portante dovrà essere proprio di 90 MHz. Inoltre la portante dovrà avere una potenza sufficientemente alta da raggiungere il ricevitore.

La portante è quindi un segnale ad alta potenza con frequenza più alta del segnale originale (in questo esempio la voce umana).

In ricezione avviene l'esatto opposto ed è necessario un dispositivo che ricavi l'informazione originale dal segnale modulato. Questo dispositivo si chiama demodulatore.



Il segnale modulato, che ha attraversato il canale di trasmissione, viene demodulato dal demodulatore, restituendo il segnale modulante originario che contiene l'informazione.

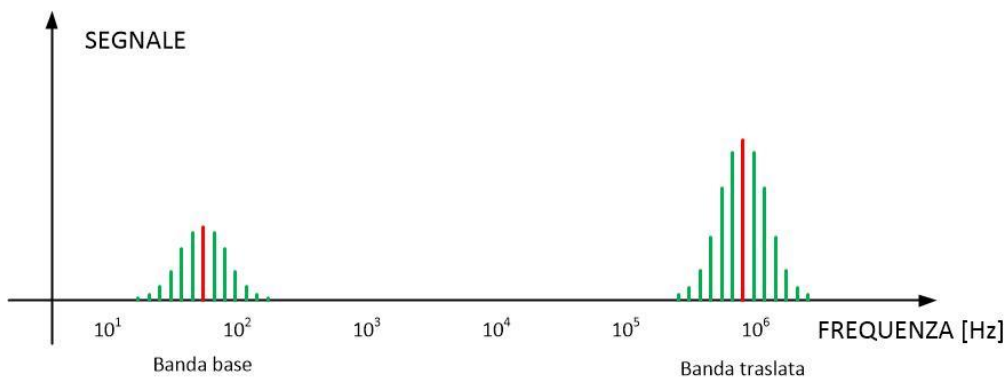
5.2 La banda di frequenza

Abbiamo visto che il segnale modulante (quello di partenza) in genere ha una frequenza inferiore a quella del segnale modulato (quello in uscita dal modulatore, che viene poi trasmesso).

Finora abbiamo ipotizzato che ogni segnale sinusoidale avesse una sua ben precisa frequenza, ricavabile dalla sua equazione matematica attraverso la pulsazione ω .

In realtà questo non è corretto, o almeno non lo è sempre. La frequenza di un segnale non è mai costante ma varia all'interno di un piccolo range, chiamato **BANDA DI FREQUENZA**.

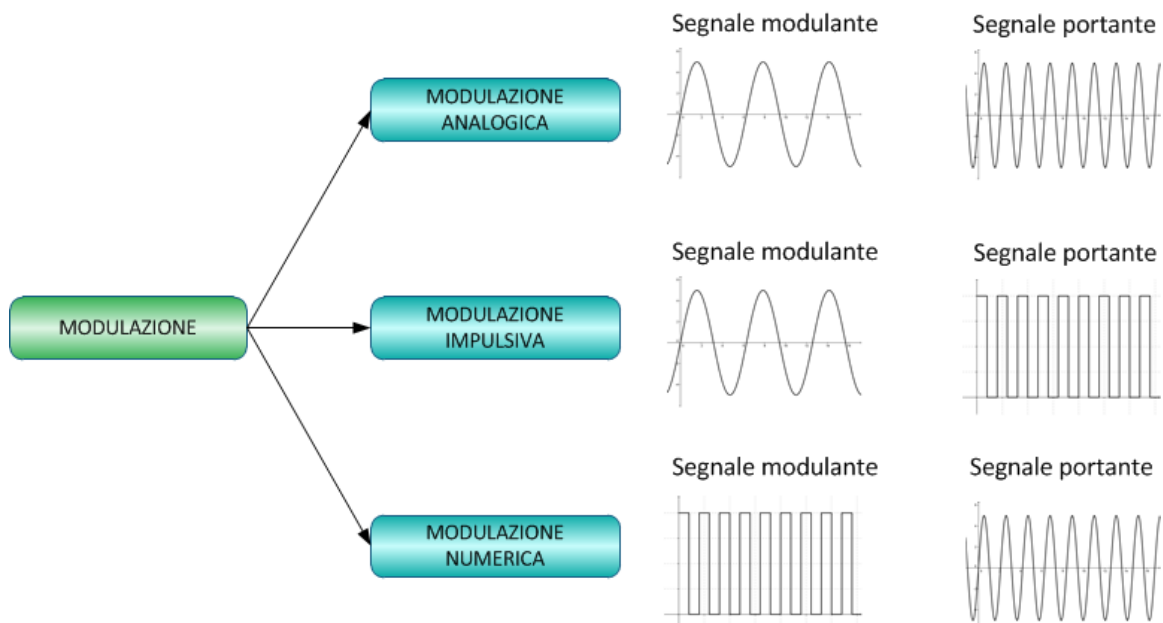
La banda di frequenza del segnale modulante (quello originale) viene chiamata banda base. La banda di frequenza occupata dal segnale modulato (quello in uscita) è chiamata banda traslata.



5.3 Tipi di modulazione

Esistono diversi tipi di modulazione, alcuni semplici da comprendere, altri molto complicati.

E' possibile classificare le modulazioni in base alla forma d'onda del segnale portante e del segnale modulante, come riportato nello schema seguente:



Le modulazioni analogiche utilizzano due segnali analogici; quelle impulsive utilizzano una portante digitale e una modulante analogica. Infine le modulazioni numeriche utilizzano una portante sinusoidale e una modulante digitale.

In questo corso ci limiteremo allo studio della modulazione analogica.

Un'altra classificazione può essere fatta in base alla grandezza della portante che viene modificata.

Consideriamo per semplicità un segnale sinusoidale:

$$\text{segnale} = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Possiamo notare che i parametri che compaiono nell'espressione sono 3:

- Ampiezza
- Frequenza (nascosta nella pulsazione)
- Fase

Poiché per modulare un segnale è necessario variarlo, è possibile agire su uno di questi tre parametri. Di solito, per semplicità, si varia uno dei tre parametri lasciando invariati gli altri due. Le modulazioni possono quindi essere classificate come nello schema che segue:



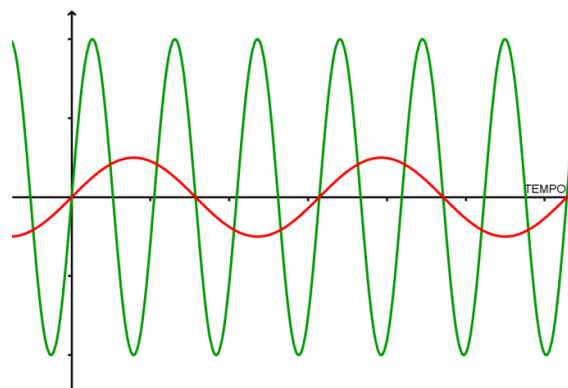
5.3.1 La modulazione di ampiezza

La modulazione d'ampiezza consiste nel variare l'ampiezza del segnale portante in base alle caratteristiche del segnale modulante.

Per capire il concetto di modulazione d'ampiezza procederemo graficamente. Si consideri il grafico seguente che rappresenta due segnali sinusoidali: quello verde, con frequenza maggiore, è il **SEGNALE PORTANTE**, quello rosso, con frequenza minore, è il **SEGNALE MODULANTE**.

$$\text{segnale portante} \quad v_P = V_P \cdot \sin(\omega_P \cdot t)$$

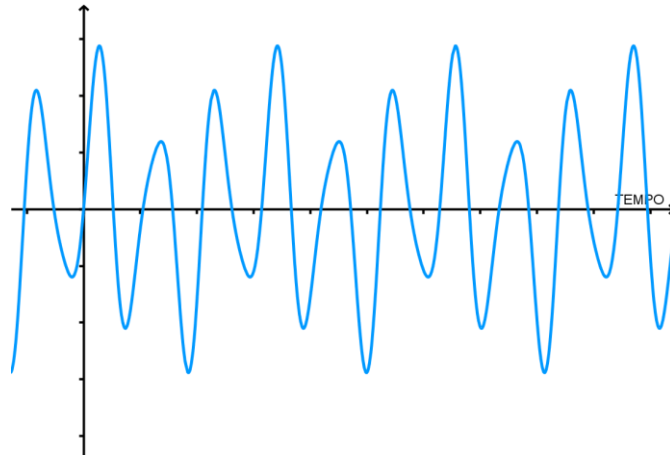
$$\text{segnale modulante} \quad v_M = V_M \cdot \sin(\omega_M \cdot t)$$



Nella modulazione l'ampiezza del segnale portante V_p viene fatta variare sommandole una componente che deriva dal segnale modulante.

Quello che si ottiene prende il nome di segnale modulato:

$$v = V \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

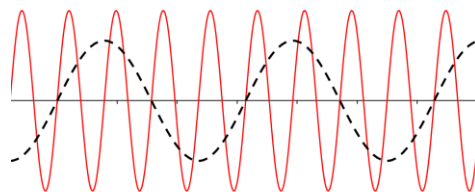


Come si può vedere dal grafico, l'ampiezza del segnale modulato varia. Matematicamente, l'ampiezza del segnale modulato vale:

$$V = V_p + K \cdot v_M$$

Dove V è l'ampiezza del segnale modulato, V_p è l'ampiezza della portante, v_M è l'espressione del segnale modulante [$v_M = V_M \sin(\omega t)$] e K è un coefficiente chiamato **COEFFICIENTE DEL MODULATORE**.

Il termine K è molto importante perché fa variare la forma d'onda del segnale modulato, come si può vedere dai grafici seguenti:



$K=1$



$K=2$



Un altro parametro importante nella modulazione è il rapporto tra l'ampiezza del segnale modulante e l'ampiezza del segnale portante:

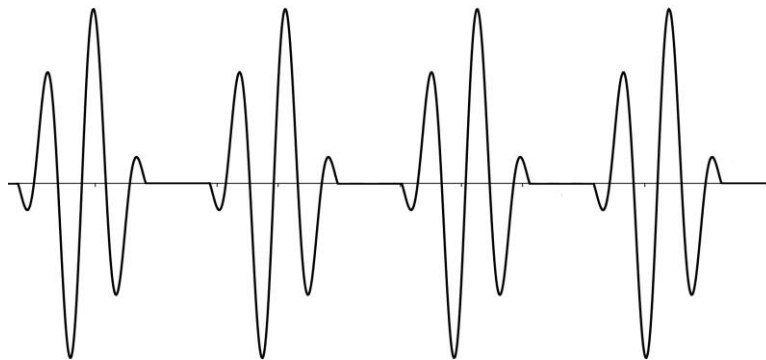
$$m = K \frac{V_M}{V_P}$$

Il termine m prende il nome di **INDICE DI MODULAZIONE** o coefficiente di modulazione (da non confondere con il coefficiente del modulatore).

Se si ipotizza per semplicità che K sia pari a 1 si ha:

$$m = \frac{V_M}{V_P}$$

Questo rapporto ha un valore compreso tra 0 e 1, poiché l'ampiezza della portante deve sempre essere maggiore dell'ampiezza della modulante. Se $m > 1$ significa che in certi tratti il segnale modulante e il segnale portante saranno in opposizione di fase e si annulleranno:

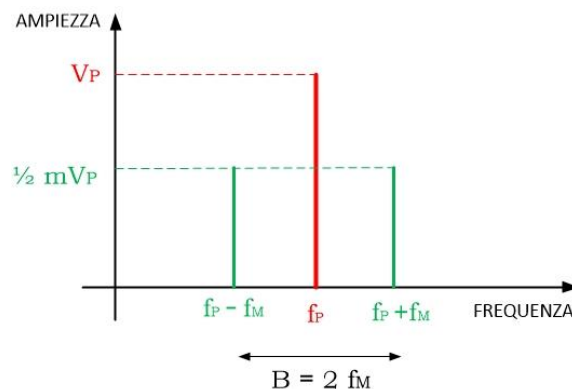


Un segnale che viene modulato con un indice di modulazione superiore a 1 si dice **SOVRAMODULATO**. Di solito la modulazione prevede un indice di modulazione:

$$m \cong 0,3 \div 0,4$$

Quando $m = 0$ significa che non c'è modulazione o perché K è nullo o perché è nulla l'ampiezza del segnale modulante e quindi non c'è alcuna informazione da trasmettere.

Se rappresentiamo lo spettro di ampiezza del segnale modulato otteniamo il grafico seguente:



Osservando il grafico precedente si può notare che lo spettro di ampiezza del segnale modulato è composto da tre frequenze:

- **Frequenza f_P** pari a quella del **segnale portante**.

- **Frequenza laterale inferiore:** $f_P - f_M$ che rappresenta il limite inferiore della banda di frequenza occupata dal segnale.
- **Frequenza laterale superiore:** $f_P + f_M$ che rappresenta il limite superiore della banda di frequenza occupata dal segnale.

L'intervallo di frequenza compreso tra le componenti laterali rappresenta la banda traslata di cui abbiamo parlato nel paragrafo precedente. Essa larghezza:

$$B = 2f_M$$

Poiché per trasmettere un segnale è necessaria grande potenza, al fine di ridurre i costi della trasmissione si possono adottare alcuni metodi che consistono nel togliere dal segnale modulato la componente del segnale portante. Si dice che questa componente viene soppressa e si parla di modulazione d'ampiezza con soppressione della portante.

5.3.2 La modulazione di frequenza

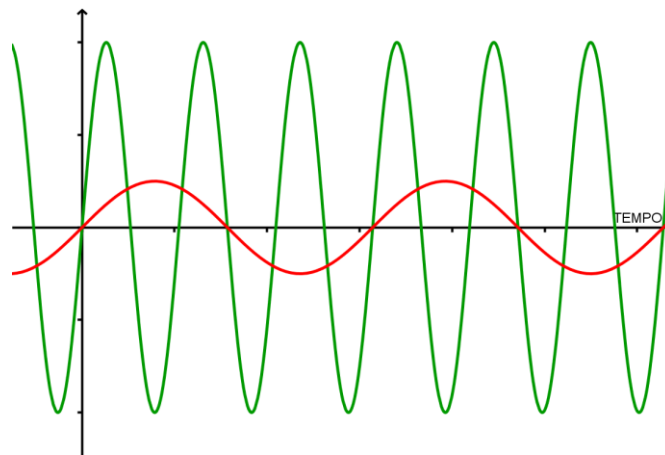
Modulare un segnale in frequenza significa variare la frequenza della portante rispetto alle caratteristiche del segnale modulante.

Procediamo nello stesso modo con cui abbiamo studiato la modulazione di ampiezza.

Consideriamo due generici segnali, portante e modulante:

segnale portante $v_P = V_P \cdot \sin(\omega_P \cdot t)$

segnale modulante $v_M = V_M \cdot \sin(\omega_M \cdot t)$



La frequenza dei due segnali è nascosta all'interno della pulsazione: $\omega = 2\pi f$.

Per modulare in frequenza è necessario sostituire alla pulsazione del segnale portante un'espressione che contiene il segnale modulante:

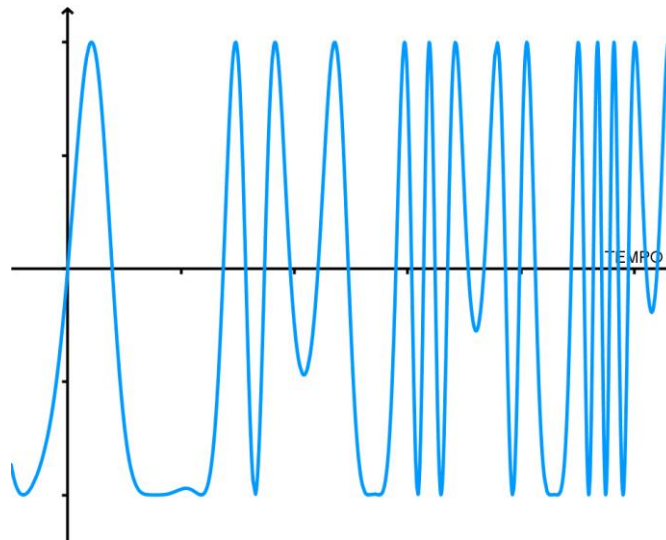
$$\omega = \omega_P + K \cdot v_M$$

Anche per la modulazione in frequenza **K** è una costante che prende il nome di **COEFFICIENTE DEL MODULATORE**.

Otteniamo così il segnale modulato:

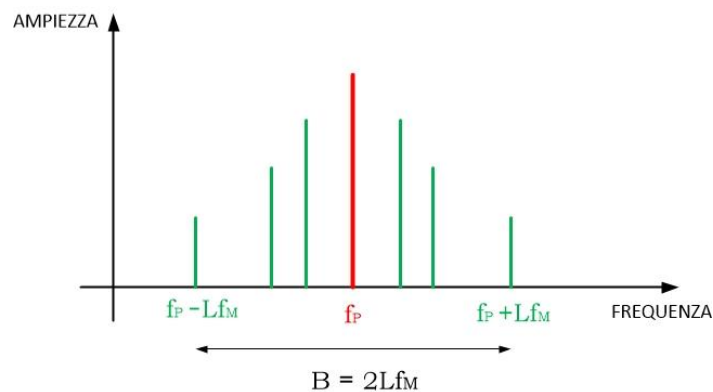
$$v = V \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Rappresentato graficamente questo segnale si presenta come nel digramma seguente:



Come si può notare osservando il grafico, la frequenza varia continuamente.

E' importante notare una cosa: il segnale modulato deve rimanere all'interno del canale di frequenza assegnato; questo vuol dire che la variazione di frequenza dovuta alla modulazione deve essere molto piccola. A causa della variazione di frequenza dovuta alla modulazione, la banda occupata dal segnale modulato è più lunga di quella di un segnale modulato in ampiezza:



Nel grafico possiamo notare che sono aumentate le componenti laterali del segnale. Il numero di componenti laterali per parte viene indicato con la lettera L e da questa grandezza dipende la larghezza della banda, indicata con la lettera B:

$$B = 2Lf_M$$

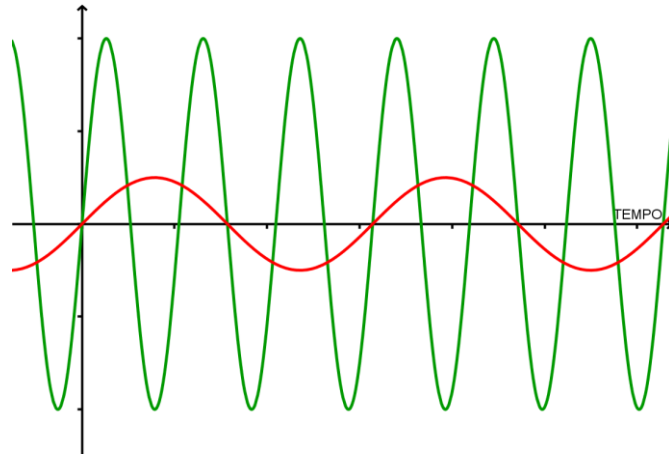
5.3.3 La modulazione di fase

Nella modulazione di fase viene variato l'angolo di fase della portante in base all'espressione della modulante.

Consideriamo di nuovo i due segnali:

$$\text{segnale portante} \quad v_P = V_P \cdot \sin(\omega_P \cdot t + \varphi_P)$$

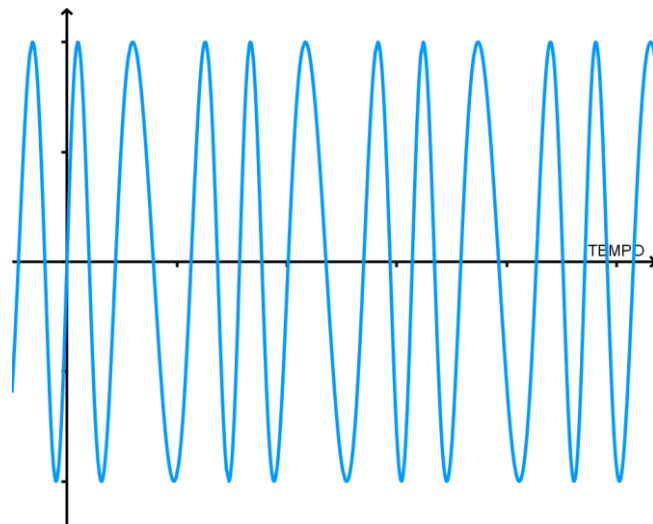
$$\text{segnale modulante} \quad v_M = V_M \cdot \sin(\omega_M \cdot t)$$



Il segnale modulato si ottiene variando la fase del segnale. Il segnale modulato avrà quindi la fase seguente:

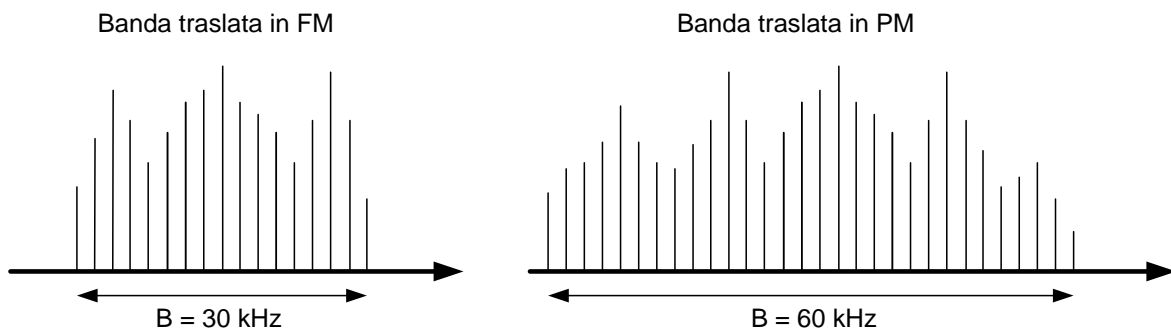
$$\varphi = \omega_p t + K v_M$$

Graficamente si ottiene la seguente sinusoide:



Si può notare subito una somiglianza con la modulazione di frequenza. In effetti un segnale modulato in fase è praticamente identico ad un segnale modulato in frequenza. Questo succede perché variando la fase varia anche la frequenza.

Anche lo spettro di ampiezza di un segnale modulato in fase è simile a quello di un segnale modulato in frequenza. La differenza tra i due sta nella larghezza di banda, maggiore nella modulazione di fase a parità di segnale:



5.4 Confronto tra i tipi di modulazione

Cominciamo il confronto tra la potenza richiesta per la trasmissione di un segnale modulato in ampiezza e un segnale modulato in frequenza o in fase.

La potenza di trasmissione vale:

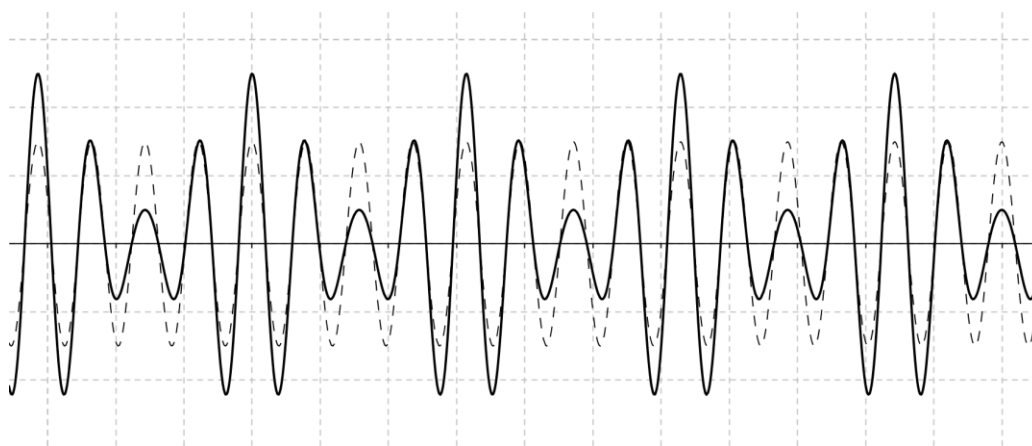
$$P = \frac{V^2}{2R}$$

Dove V è l'ampiezza del segnale.

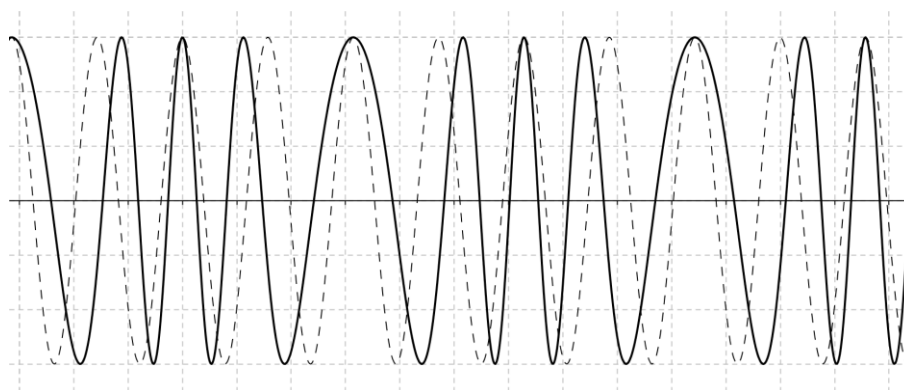
Questo significa che la potenza di trasmissione dipende dall'ampiezza del segnale. Per trasmettere il segnale portante senza l'informazione è quindi necessaria una potenza di:

$$P = \frac{V_p^2}{2R}$$

Nella modulazione di ampiezza, l'ampiezza del segnale modulato è maggiore dell'ampiezza del segnale portante e quindi è richiesta più potenza, come si può vedere dal grafico seguente:



Nella modulazione di frequenza o di fase l'ampiezza del segnale portante è uguale all'ampiezza del segnale modulato e quindi non è necessario un surplus di potenza, come si vede dal grafico seguente:



6 LE ANTENNE

Abbiamo visto come si origina un segnale e come viene adattato al canale di trasmissione utilizzato. Ora studieremo come si fa a trasformare il segnale in un campo elettromagnetico e ad irradiarlo nello spazio. Il dispositivo che consente di fare tutto questo si chiama antenna.

Le antenne sono quindi apparecchi in grado di convertire un segnale elettrico modulato in onde elettromagnetiche ed irradiarle nello spazio circostante o, viceversa, di ricevere un'onda elettromagnetica convertirla in un segnale elettrico.

Ogni antenna può funzionare indifferentemente come trasmittente o ricevente, poichè un'antenna mantiene le medesime proprietà se utilizzata, a parità di frequenza, come trasmettitore o come ricevitore.

In pratica però si utilizzano due distinte di antenne per i casi di trasmissione e di ricezione.

La differenza tra le due è nelle dimensioni dell'antenna e nelle potenze in gioco.

Le antenne trasmittenti (ad esempio quelle delle emittenti televisive) sono grandi e costose, poichè devono essere in grado di irradiare notevole potenza; le antenne riceventi (ad esempio quelle delle televisioni domestiche) invece devono essere di dimensioni e costo limitato e lavorano con livelli di potenza modestissimi.

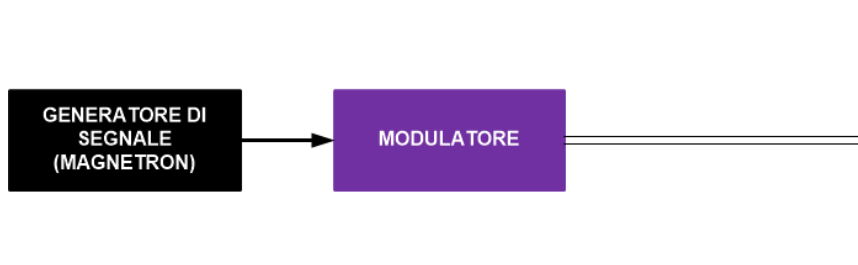
6.1 Principio di funzionamento delle antenne

Abbiamo visto che per trasmettere un segnale è necessario avere:

- un **GENERATORE (OSCILLATORE)** che produce un segnale sinusoidale, eventualmente modulato per contenere l'informazione da trasmettere, ad esempio la voce umana o una serie di dati.
- una **LINEA A RADIOFREQUENZA** che trasporta il segnale dal luogo dove questo è prodotto fino all'antenna trasmittente.
- un'**ANTENNA TRASMITTENTE** che converte il segnale elettrico in segnale elettromagnetico e lo irradia nello spazio circostante.

Ora dobbiamo capire come funziona l'antenna.

Nella sua forma più rudimentale, l'antenna è costituita da due fili conduttori paralleli con i due estremi isolati che terminano con due steli, chiamati **DIPOLI**.



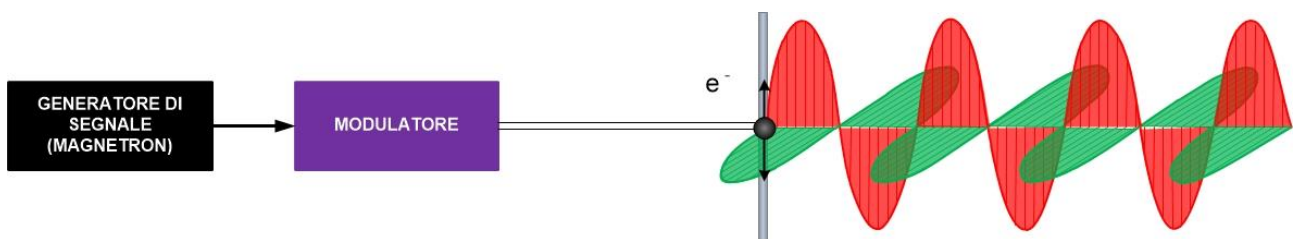
La linea di collegamento a radiofrequenza serve perché di solito il segnale è prodotto in un luogo distante dall'antenna trasmittente, che in genere si trova sul tetto di un edificio o in cima ad una torre costruita appositamente per ospitare l'antenna.

Un dipolo elettrico non è altro che un conduttore in cui le cariche possono oscillare percorrendo lo stelo in tutta la sua lunghezza:



Come abbiamo visto nel capitolo delle onde elettromagnetiche, una carica elettrica (in questo caso le cariche elettriche del segnale che arriva all'antenna) oscillando genera un'onda elettromagnetica.

Lo stelo quindi consente agli elettroni di oscillare e creare il campo magnetico che dall'antenna si irradia nello spazio circostante.



Affinché un dipolo elettrico possa essere usato come antenna deve però avere una certa lunghezza.

La lunghezza del dipolo è un parametro legato alla frequenza del segnale e determina quali frequenze l'antenna può ricevere o trasmettere nella maniera migliore.

Affinché l'onda elettromagnetica che viene generata dall'oscillazione della carica elettrica arrivi il più lontano possibile deve avere una grande potenza; per questo motivo si deve fare in modo che l'antenna funzioni in risonanza. Abbiamo infatti visto che alla frequenza di risonanza l'ampiezza dell'oscillazione è massima.

Poiché esistono diversi modi di risonanza, il dipolo può avere varie lunghezze; la cosa che conta è che all'interno del dipolo siano contenute un numero intero di semionde:



Per un'antenna convenzionale, generalmente la lunghezza del dipolo deve essere la metà della lunghezza d'onda del segnale:

$$\text{lunghezza dipolo} = \frac{\lambda}{2}$$

In queste condizioni l'onda elettromagnetica è in risonanza e la sua ampiezza (e quindi la sua potenza) è massima.

A questo punto il campo elettromagnetico può viaggiare nello spazio e raggiungere grandi distanze poiché l'onda è ad alta potenza.

La necessità di avere un dipolo lungo la metà della lunghezza d'onda spiega perché vengono utilizzate le alte frequenze (VHF e UHF) per le trasmissioni radio e per il radar: a queste frequenze corrispondono piccole lunghezze d'onda e le antenne possono essere lunghe poche decine di centimetri.

Per quanto riguarda le antenne riceventi, il principio fisico su cui si basa il loro funzionamento è analogo: un conduttore investito da un campo elettromagnetico vede nascere una corrente indotta con le stesse caratteristiche del campo elettromagnetico.

6.1.1 L'antenna come circuito risonante serie

il dipolo dell'antenna ha una capacità, un induttanza e una resistività. Tuttavia, quando funziona in condizioni di risonanza si comporta come se fosse un dispositivo puramente resistivo.

Può quindi essere visto come una resistenza che dissipa la potenza fornita dal generatore.

Ricordando la formula della potenza:

$$P = V \cdot I \quad \rightarrow \quad V = \frac{P}{I}$$

E la legge di Ohm:

$$V = R \cdot I \quad \rightarrow \quad R = \frac{V}{I}$$

Se si uniscono le due formule sostituendo la prima nella seconda si ottiene una formula che mostra il valore di questa resistenza in funzione della potenza irradiata:

$$R_{\text{radiazione}} = \frac{P_{\text{irradiata}}}{i^2}$$

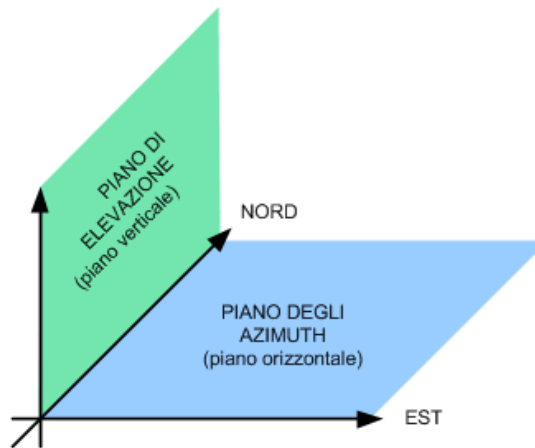
Questa resistenza prende il nome di **RESISTENZA DI RADIAZIONE**.

6.2 Il solido di radiazione

Le antenne non irradiano il segnale elettromagnetico in maniera omogenea nelle varie direzioni. A parte il fatto che la potenza si attenua man mano che ci si allontana dall'antenna a causa della presenza dell'atmosfera, il fatto che il dipolo sia finito determina una differenza nell'intensità del campo magnetico, esattamente come succede ad un magnete le cui linee di campo si ripiegano su se stesse in prossimità dei poli.



Per capire questo concetto è utile considerare l'antenna al centro di un sistema di riferimento spaziale a tre dimensioni, in cui i tre assi x, y e z corrispondono alle 3 direzioni dello spazio: asse nord-sud, asse est-ovest, quota.



Il piano individuato dall'asse sud-nord e dall'asse est-ovest si chiama **PIANO DEGLI AZIMUTH** ed è praticamente il piano tangente alla superficie terrestre nel punto in cui si trova l'antenna.

Il piano individuato dall'asse sud-nord e dall'asse della quota si chiama **PIANO DI ELEVAZIONE**.

Questi due piani sono molto importanti per lo studio del radar.

Le antenne non possono irradiare il segnale in maniera uniforme nelle tre direzioni. Solo in teoria si può immaginare un'antenna che mandi un segnale uniforme nello spazio. Questo tipo di antenna teorica è chiamata **ANTENNA ISOTROPA**.

L'antenna isotropa non esiste, ma ci sarà utile per fare un confronto con le antenne reali.

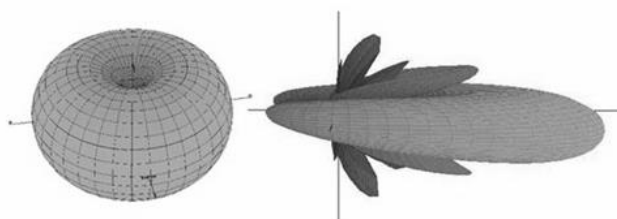
Per rappresentare nello spazio la potenza che un'antenna irradia nelle varie direzioni si usa il cosiddetto diagramma di radiazione.

Immaginiamo di avere un'antenna e di misurare la potenza che irradia tutto attorno ad essa, ad una certa distanza.

Poiché il segnale non è irradiato con la stessa intensità nelle diverse direzioni, misureremo una potenza diversa in ogni punto.

Si immagini ora di disegnare dei vettori che partono dall'antenna, lunghi quanto la potenza misurata.

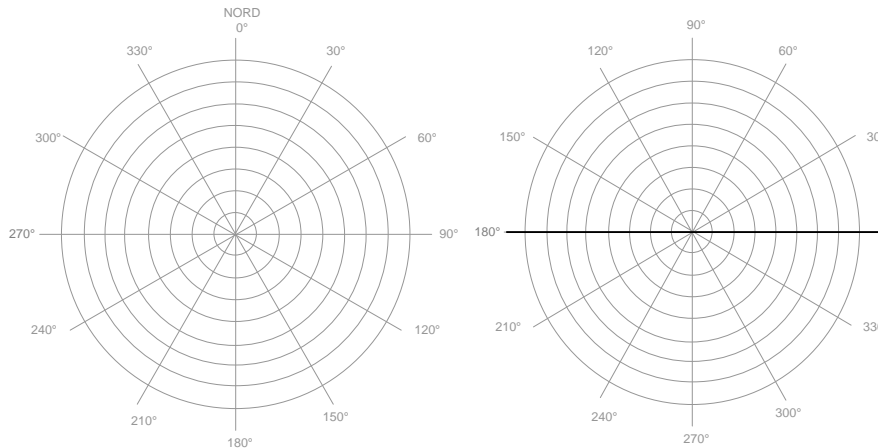
Le punte di questi vettori individuano una superficie chiusa. Questa superficie è il solido di radiazione. La figura seguente mostra due esempi di solidi di radiazione.



Ogni antenna ha un proprio solido di radiazione ed osservandone la forma è possibile capire di che tipo di antenna si tratta.

Per comodità, al posto di usare questa rappresentazione tridimensionale si utilizzano le proiezioni della superficie sul piano orizzontale e su quello verticale.

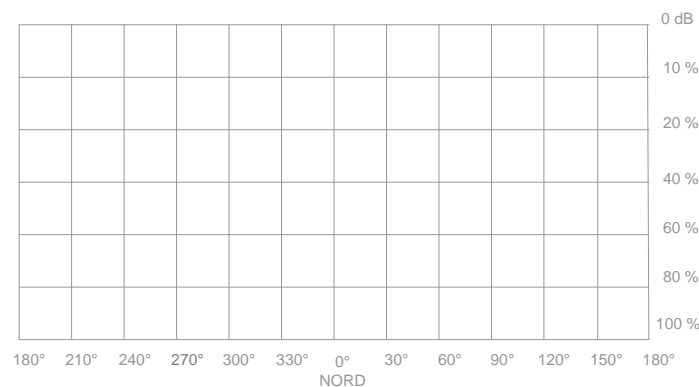
Queste rappresentazioni piane si chiamano diagrammi di radiazione nel piano verticale e nel piano orizzontale. Il diagramma nel piano orizzontale viene spesso disegnato su una circonferenza graduata che rappresenta il piano della navigazione, con lo zero posto sul nord. Anche il piano verticale viene spesso rappresentato su una circonferenza, solo che l'asse orizzontale rappresenta la linea del terreno.



Questo tipo di rappresentazione viene chiamata diagramma di radiazione in coordinate polari.

Sulle linee che partono a raggiera dal centro si può leggere la potenza del segnale irradiato in Decibel.

Con questa rappresentazione però, non è immediato leggere la potenza. Si usa allora un altro tipo di diagramma che presenta la stessa cosa, ma in coordinate cartesiane:



In coordinate cartesiane risulta molto più facile leggere la potenza del segnale.

L'asse delle x coincide con il centro del diagramma polare, quindi l'antenna è posizionata sull'asse x.

Bisogna immaginare il piano come una proiezione piana del diagramma polare, un po' come una carta geografica è una proiezione della sfera terrestre.

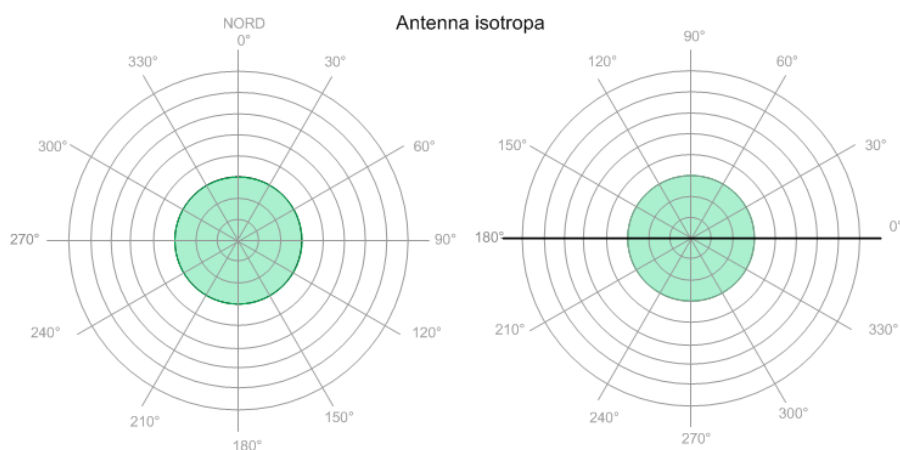
Come si può notare dalla figura precedente, la potenza è scritta in percentuale. Questa percentuale rappresenta la potenza residua: il segnale infatti, partito con il 100% della potenza, diventa sempre più debole man mano che ci si allontana dall'antenna fino ad annullarsi. Il diagramma finisce quindi con una potenza di 0 dB.

6.2.1 La forma del diagramma di radiazione

Abbiamo detto che le antenne non possono propagare il segnale con la stessa intensità in tutte le direzioni. Si pensi anche solo al fatto che l'antenna ha un supporto che la sostiene e questo interferirà col segnale. Si può però ipotizzare che esista un'antenna ideale che irradia il segnale in modo uniforme. Questa antenna è chiamata **ANTENNA ISOTROPA**. Poiché la potenza irradiata in ogni direzione è costante, il suo solido di radiazione è una sfera:



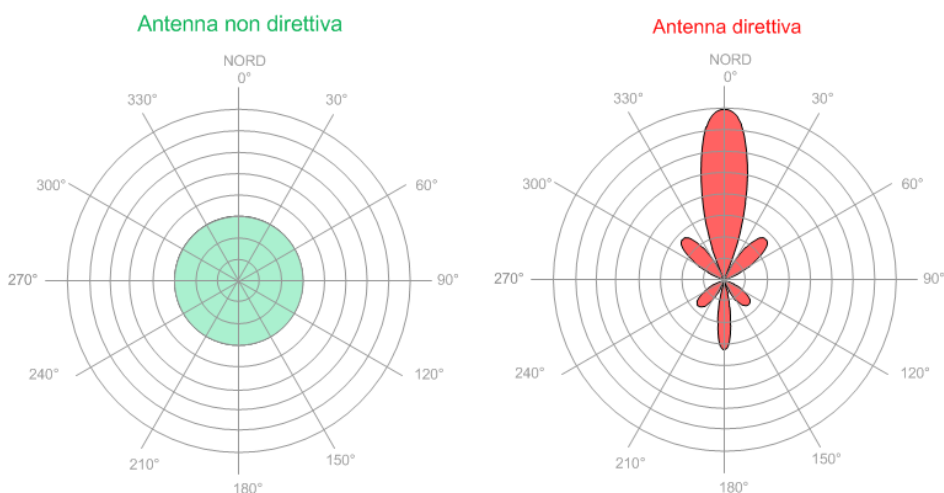
Quando viene proiettata sui due piani, la sfera diventa una circonferenza; quindi il diagramma di radiazione dell'antenna isotropa risulta essere il seguente:



Le antenne si dividono in due grandi categorie:

- **ANTENNE NON DIRETTIVE:** sono quelle in cui il segnale si propaga in tutte le direzioni. Sono anche chiamate antenne omnidirezionali.
- **ANTENNE DIRETTIVE:** sono quelle in cui il segnale si propaga principalmente in una direzione.

Per capire la differenza tra le due, osserviamo i diagrammi di radiazione nel piano degli azimuth:



Il primo si riferisce ad un'antenna omnidirezionale ed è una circonferenza, il secondo invece si riferisce ad un'antenna direttiva.

Come si può vedere, il diagramma di un'antenna direttiva ha un lobo più grande degli altri che prende il nome di lobo principale (in inglese main lobe). Il lobo principale rappresenta la direzione in cui l'antenna irradia o riceve principalmente. Ci sono poi dei lobi più piccoli, chiamati lobi secondari (in inglese side lobe) che sono delle dispersioni del segnale che sarebbe bene ridurre al minimo.

Possiamo quindi riconoscere le antenne direttive da quelle omnidirezionali guardando la forma del diagramma di radiazione nel piano degli Azimuth: le antenne omnidirezionali hanno un diagramma di radiazione circolare nel piano degli azimuth.

6.3 I parametri delle antenne

Per studiare le antenne è necessario definire alcuni parametri che tengono conto delle proprietà delle antenne. I parametri che prenderemo in considerazione sono i seguenti:

- Guadagno
- Angolo di apertura
- Area d'intercettazione
- Rapporto lobo principale/lobo posteriore
- Rendimento

6.3.1 Guadagno d'antenna

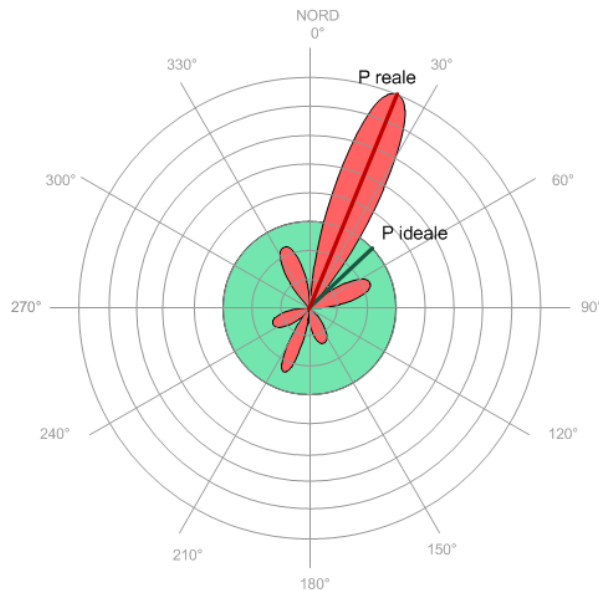
Il guadagno dell'antenna serve a misurare la capacità di un'antenna di focalizzare l'energia del segnale in una sola direzione. Il guadagno è un numero adimensionale che a volte viene espresso in decibel.

Questo numero deriva da un rapporto tra due potenze:

$$\text{Guadagno} = \frac{\text{Potenza irradiata dall'antenna nella direzione di massima propagazione}}{\text{Potenza che irradierebbe la stessa antenna se fosse isotropa}}$$

Graficamente possiamo valutare il guadagno confrontando i vettori del diagramma di radiazione dell'antenna isotropa e dell'antenna in questione. Consideriamo due antenne, una isotropica e l'altra reale.

Di seguito è rappresentato il diagramma di radiazione nel piano degli azimuth di queste due antenne: la circonferenza verde rappresenta il diagramma di radiazione dell'antenna isotropa (**antenna ideale**), mentre il diagramma più chiaro si riferisce all'antenna in esame (**antenna reale**).



Le due linee più spesse rappresentano i vettori della potenza per le due antenne; quello rosso rappresenta la **potenza dell'antenna reale nella direzione di massima propagazione**, mentre quello verde rappresenta la **potenza irradiata dall'antenna ideale**, uguale in ogni direzione.

Mettendo a rapporto queste due potenze vediamo che il guadagno, che indicheremo con G , è un numero maggiore di 1:

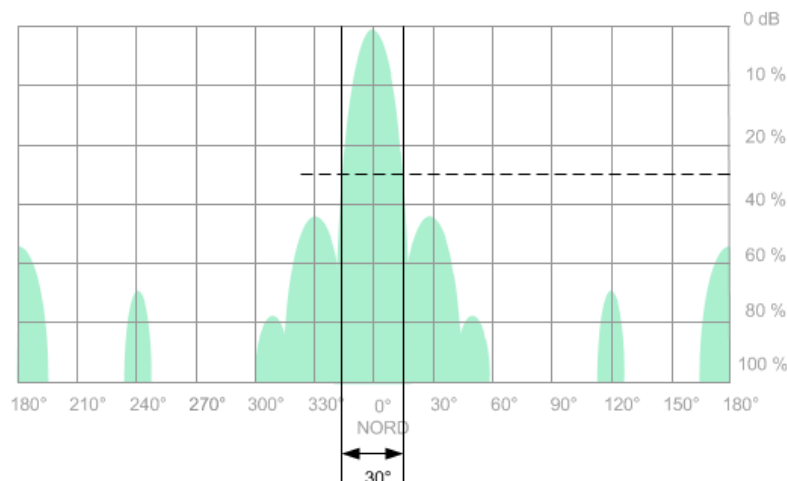
$$G = \frac{P_{reale}}{P_{ideale}} > 1$$

Il guadagno è un numero adimensionale, cioè non ha un'unità di misura poiché deriva da una divisione tra due grandezze uguali.

6.3.2 Angolo di apertura

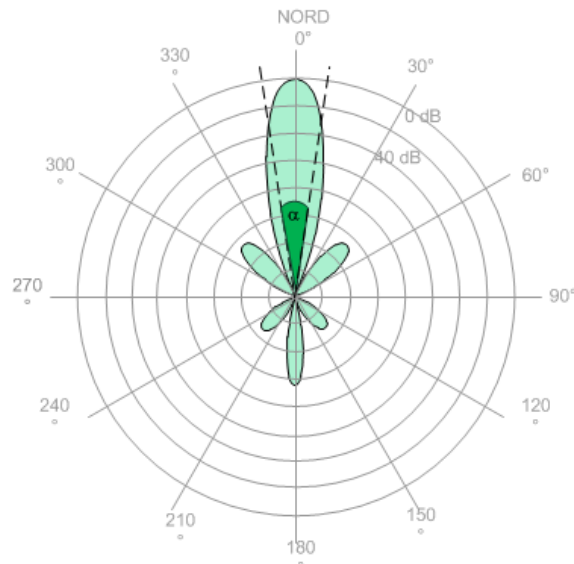
L'angolo di apertura, come dice la parola stessa, è quell'angolo (chiamato α) che indica quanto è ampio il lobo principale. Un angolo di apertura piccolo corrisponde ad un'antenna molto direzionale.

Osserviamo l'immagine seguente che rappresenta il diagramma di radiazione su piano cartesiano di un'antenna direttiva:



L'angolo di apertura si legge sull'asse x, dove ci sono i gradi, in corrispondenza delle rette che tagliano il lobo principale nei punti in cui la potenza irradiata si è ridotta del 30% rispetto alla potenza massima.

Se invece consideriamo un diagramma polare, l'angolo di apertura è quello mostrato di seguito: quello compreso tra due rette che partono dall'origine e intersecano il lobo principale in due punti, corrispondenti ad una potenza residua del 30%.



6.3.3 Area d'intercettazione

Per capire questo parametro bisogna tenere conto del fatto che un'antenna trasmittente irradia tutta la potenza che le viene fornita, ma un'antenna ricevente non riceve tutta la potenza presente nello spazio.

In pratica ogni antenna è capace di elaborare una certa densità di potenza presente nello spazio attorno ad essa, cioè una quantità di energia per metro quadro. Se l'antenna scansiona un'area maggiore, la potenza acquisita aumenta.

L'area d'intercettazione serve per stabilire la capacità di un'antenna di raccogliere potenza da un segnale in arrivo.

L'area d'intercettazione dipende dal guadagno. Un'antenna isotropa ha un'area d'intercettazione pari a:

$$A_{iso} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

mentre l'area d'intercettazione di un'antenna qualsiasi vale:

$$A = G \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

dove G è il guadagno dell'antenna e λ è la lunghezza d'onda del segnale irradiato.

Da questa espressione si capisce che all'aumentare del guadagno l'area di intercettazione aumenta.

Quando la lunghezza d'onda è grande si possono anche usare antenne con piccolo guadagno, cioè antenne omnidirezionali, ma quando si utilizzano onde ad alta frequenza (come le microonde usate per i radar) se si

vuole avere un'area d'intercettazione accettabile è necessario utilizzare antenne con un grande guadagno, cioè antenne fortemente direttive.

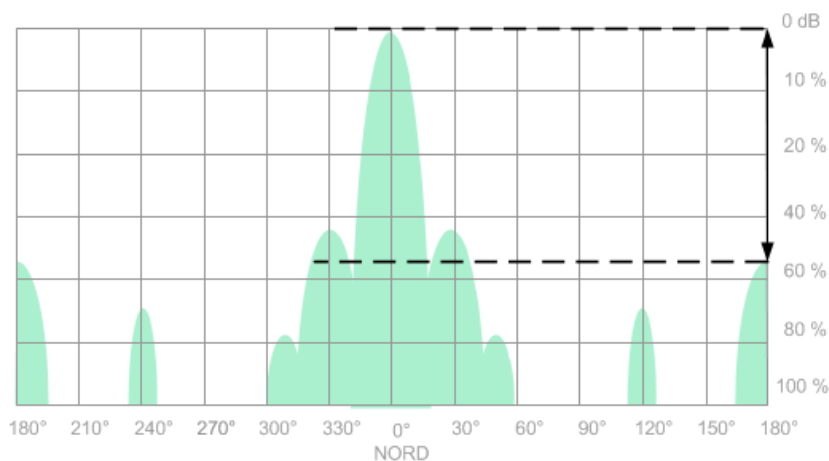
6.3.4 Rapporto lobo principale-lobo posteriore

Questo parametro (in inglese front to back ratio, FBR) è molto importante da un'idea di quanto un'antenna direttiva convogli bene l'energia nella direzione desiderata.

Si tratta di un rapporto tra la potenza irradiata nella direzione principale e quella irradiata nella direzione opposta:

$$FBR = \frac{\text{Potenza lobo principale}}{\text{Potenza lobo posteriore}}$$

Sul diagramma in coordinate cartesiane, all'aumentare di questo rapporto aumenta la distanza tra i lobo principale e il lobo posteriore:



6.3.5 Rendimento

Anche le antenne, come tutti i dispositivi elettrici, per funzionare necessitano di un'alimentazione; le verrà quindi fornita una certa potenza P_{in} che l'antenna utilizzerà per irradiare nello spazio un'onda elettromagnetica.

Come tutte le macchine, anche l'antenna deve sottostare alle leggi fisiche che regolano la trasformazione dell'energia da una forma all'altra: non tutta l'energia fornita può essere convertita in lavoro utile; ci sarà sempre una parte di potenza fornita che va sprecata.

Il rendimento misura appunto la capacità di convertire la potenza fornita in energia utile.

Matematicamente, si tratta di un rapporto fra due grandezze:

- la potenza irradiata dall'antenna nello spazio
- la potenza di alimentazione, quella fornita all'antenna dal generatore

$$\eta = \frac{P_{IRR}}{P_{AL}}$$

Poiché la potenza irradiata sarà sempre minore di quella fornita, il rendimento sarà un numero minore di 1.

Il rendimento può essere espresso in due modi:

- come numero compreso tra 0 e 1
- come percentuale, moltiplicando per 100 il numero tra 0 e 1.

Ad esempio, un antenna che irradia la metà della potenza che le viene fornita avrà un rendimento pari a:

$$\eta = 0,5 = 50\%$$

In pratica il rendimento tiene conto delle perdite dell'antenna. Più il rendimento è alto, più l'antenna è buona perché riesce ad utilizzare quasi tutta la potenza che le viene fornita.

Nel campo delle frequenze alte (VHF e UHF si possono ottenere rendimenti fra il 75% e il 95%.

6.4 Le antenne non direttive

Abbiamo detto che le antenne non direttive irradiano in maniera uniforme in ogni direzione.

In realtà questo non è vero perché l'unica antenna che irradia davvero in maniera omnidirezionale è l'antenna isotropa che è solo un'antenna teorica, una pietra di paragone con cui confrontare le altre antenne.

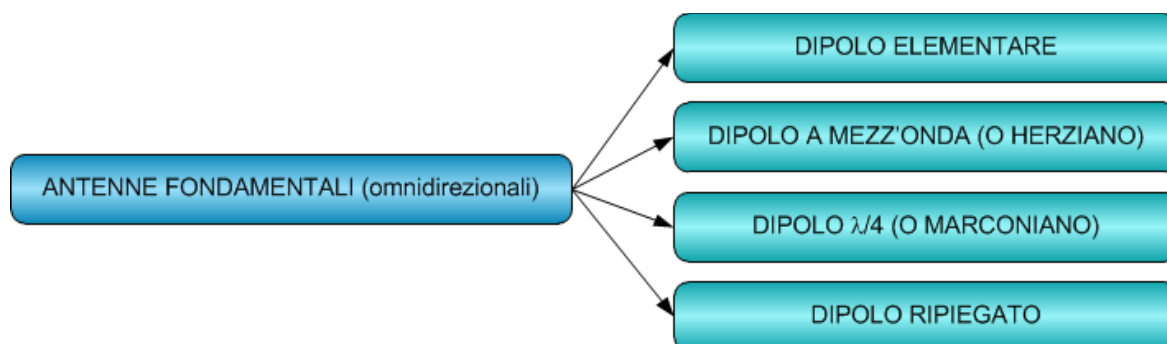
Le antenne omnidirezionali hanno effettivamente un diagramma di radiazione circolare, ma solo nel piano degli azimuth.

Nel piano di elevazione il diagramma è tutt'altro che circolare, come vedremo nei prossimi paragrafi.

L'antenna fondamentale, quella costituita da uno stelo collegato ad un generatore è un'antenna omnidirezionale. Un'onda infatti, a meno di essere costretta da una guida d'onda, si propaga in tutte le direzioni, con intensità diversa, ma pur sempre in tutte le direzioni.

Questo significa che in realtà le antenne fondamentali sono tutte omnidirezionali e che per ottenere un antenna direttiva è necessario utilizzare un antenna omnidirezionale e mettere in atto una serie di accorgimenti per guidare l'onda nella direzione desiderata.

Le antenne fondamentali, tutte omnidirezionali, sono 4, come mostrato dallo schema seguente:



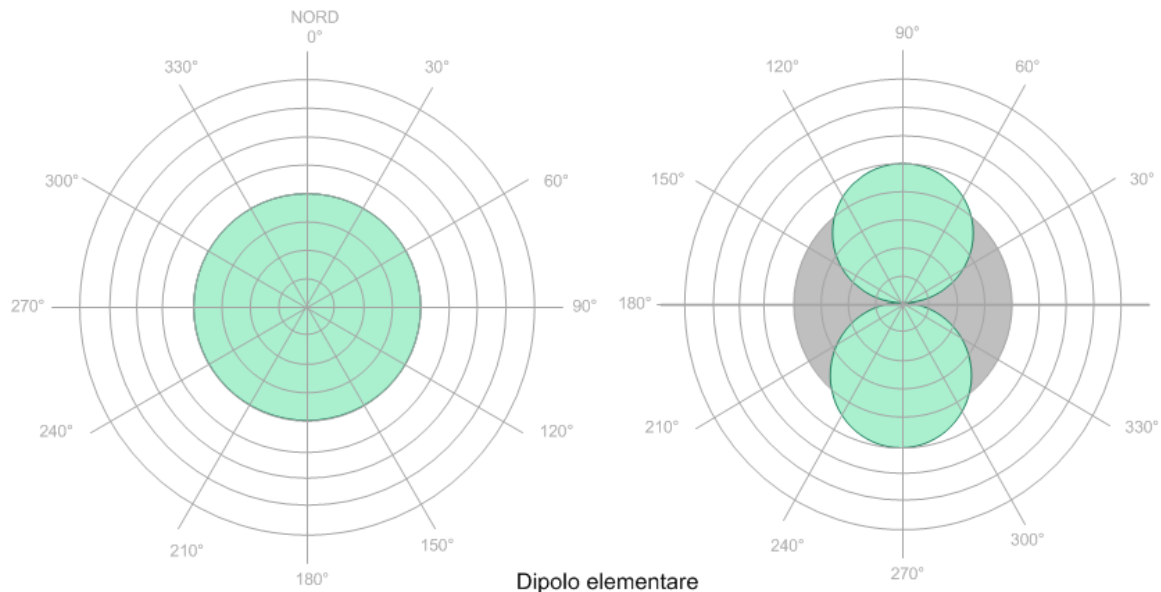
6.4.1 Dipolo elementare

Il dipolo elementare è la più semplice antenna che si possa immaginare. E' costituita da un unico stelo, di lunghezza molto minore della lunghezza d'onda del segnale.

Questo dipolo non viene mai utilizzato, ma è utile studiarlo perché ci fa capire cosa cambia tra un'antenna isotropa e una reale, per quanto semplificata.

Il guadagno del dipolo elementare è pari 1,5.

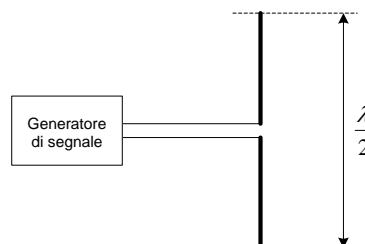
Il suo diagramma di radiazione è il seguente:



6.4.2 Antenna Hertziana o dipolo a mezz'onda

Hertz, lo scienziato da cui ha preso il nome l'unità di misura della frequenza, fu l'inventore della prima antenna, utilizzata tutt'ora.

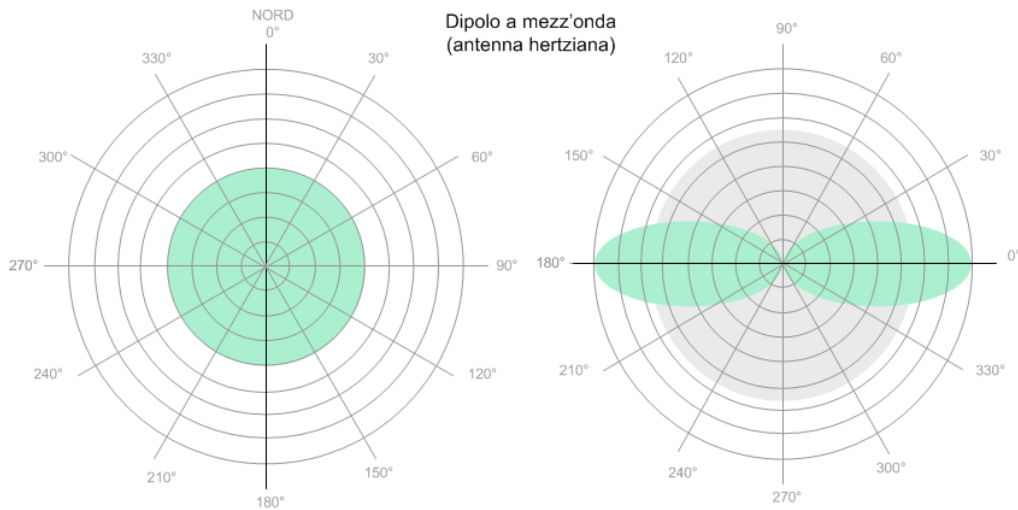
L'antenna ha la forma mostrata nella figura seguente: si presenta come due conduttori terminanti in due steli.



La lunghezza di ognuno dei due dipoli elettrici è di $\frac{\lambda}{4}$, quindi la lunghezza totale dell'antenna è di $\frac{\lambda}{2}$, dove λ è la lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica.

Questo tipo di antenna viene anche chiamata a dipolo a mezz'onda perché i due dipoli sono lunghi la metà dell'onda.

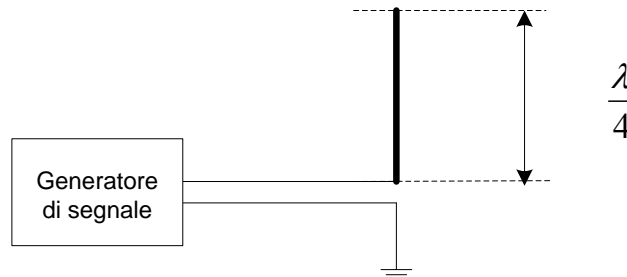
Il guadagno dell'antenna hertziana è pari a 1,65 e la resistenza di radiazione è $R = 73 \Omega$.



6.4.3 Dipolo $\lambda/4$ o antenna Marconiana

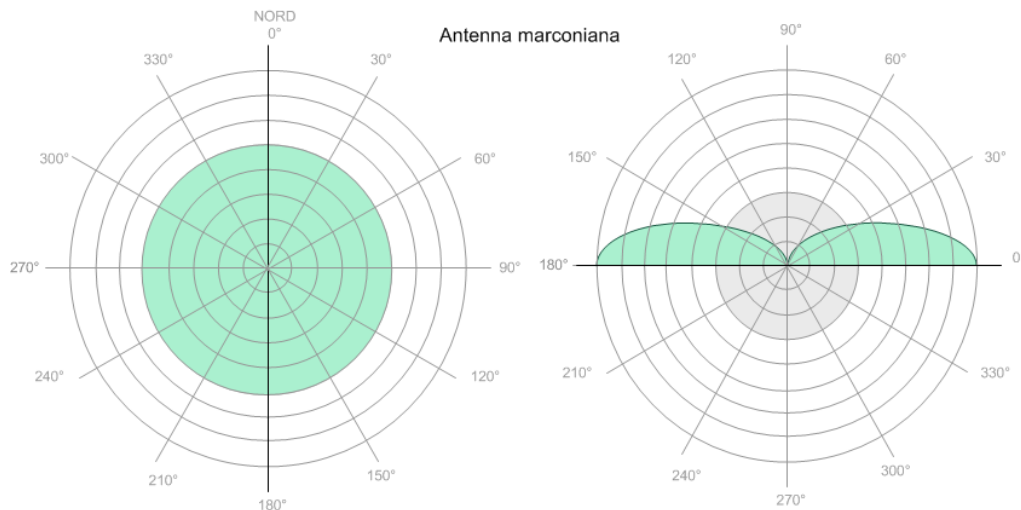
L'antenna marconiana prende il nome da Guglielmo Marconi. Ha un solo dipolo elettrico lungo $\frac{\lambda}{4}$, collegato al generatore di segnale. L'altro dipolo è di solito collegato al terreno.

Lo schema di questo tipo di antenna è rappresentato nella figura seguente:



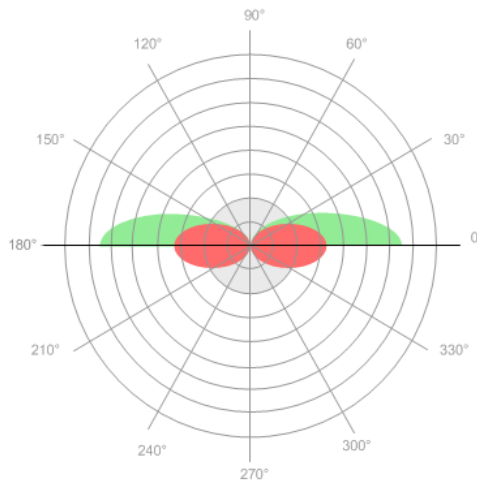
L'antenna marconiana è più direttiva dell'antenna hertziana, tant'è che il suo guadagno è pari 3,3.

I diagrammi di radiazione per l'antenna marconiana sono rappresentati di seguito:



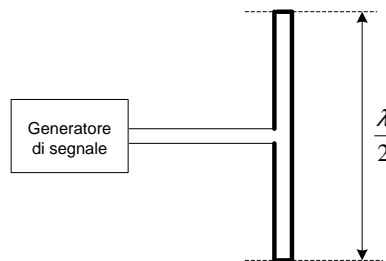
Il diagramma del piano degli azimuth è sempre una circonferenza.

Nella figura seguente è rappresentato un confronto nel piano verticale tra l'antenna isotropa, l'antenna hertziana e quella marconiana.



6.4.4 Dipolo ripiegato

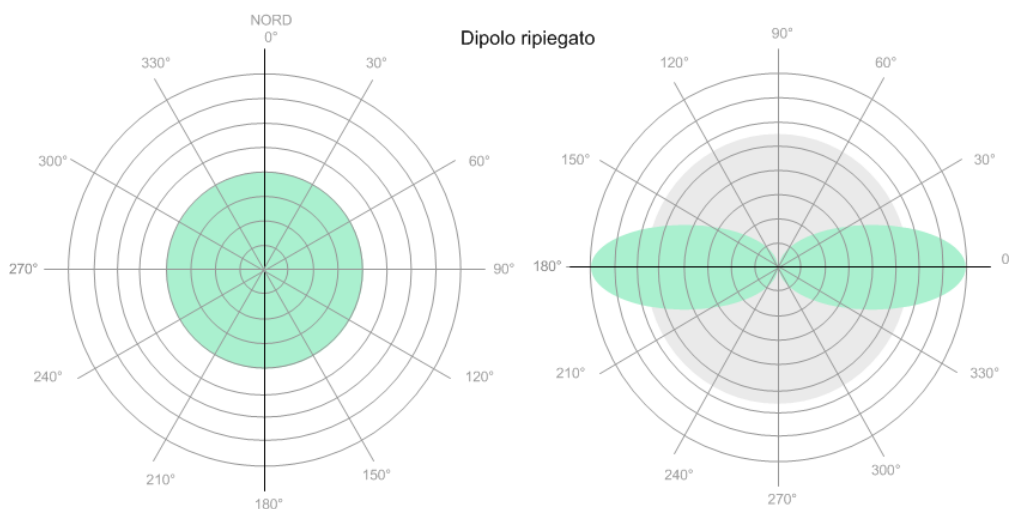
Questa antenna è costituita da un conduttore ripiegato su se stesso, come mostrato nella figura seguente:



La lunghezza complessiva dell'antenna è $\lambda/2$ e poiché i due fili conduttori sono molto vicini, è come se si trattasse di un unico conduttore.

La selettività di quest'antenna è minore e quindi la banda di ricezione aumenta: è un'antenna a banda larga. Proprio per questa sua caratteristica è un'antenna adatta alla ricezione ed è utilizzata, insieme ad altri componenti, per la realizzazione di antenne riceventi per trasmissioni televisive.

Il diagramma di radiazione è analogo a quello dell'antenna hertziana:



6.5 Le antenne direttive

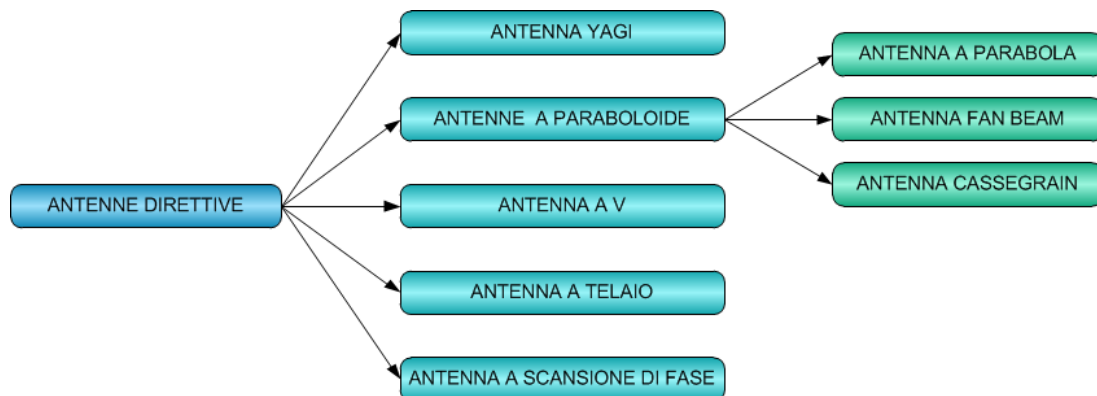
Le antenne direttive sono antenne in cui la potenza viene indirizzata in una sola direzione. Sono quindi antenne con un guadagno molto alto. Vedremo studiando il radar che la direttività dell'antenna è uno dei parametri più importanti da prendere in considerazione.

Prima di studiare nel dettaglio i vari tipi di antenne, bisogna aver chiari un paio di concetti:

- sarebbe bene che l'antenna non avesse lobi secondari; soprattutto bisognerebbe eliminare il lobo posteriore. Purtroppo questo non è possibile;
- si può ridurre l'ampiezza dei lobi secondari, ma questi non verranno mai eliminati del tutto.

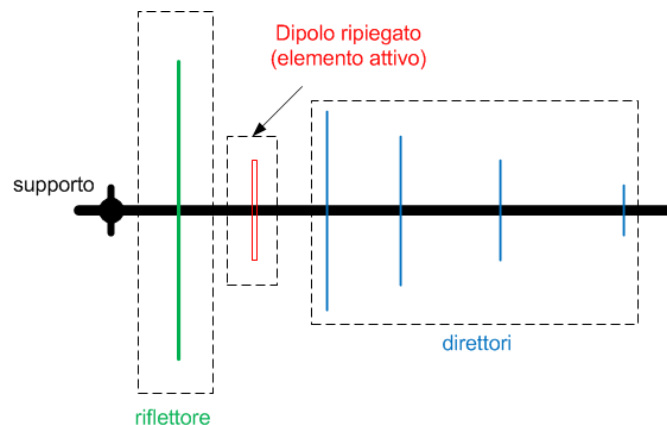
Le antenne direttive sono sempre formate da due tipi di elementi: attivi e passivi. Gli elementi attivi sono quelli che ricevono o emettono l'onda elettromagnetica e in pratica sono dei dipoli omnidirezionali. Gli elementi passivi servono per rendere l'antenna direzionale.

Le antenne direttive sono di diversi tipi. In questo corso analizzeremo le principali:



6.5.1 Antenna Yagi

L'antenna Yagi prende il nome dal suo inventore, il giapponese professor Yagi. E' una delle antenne più utilizzate nel mondo poiché è facile da realizzare e consente di ricevere a banda larga poiché impiega come elemento attivo un dipolo ripiegato. L'antenna Yagi si presenta con la classica forma a "lisca di pesce" che si vede sui tetti degli edifici. Lo schema di quest'antenna è riportato di seguito:

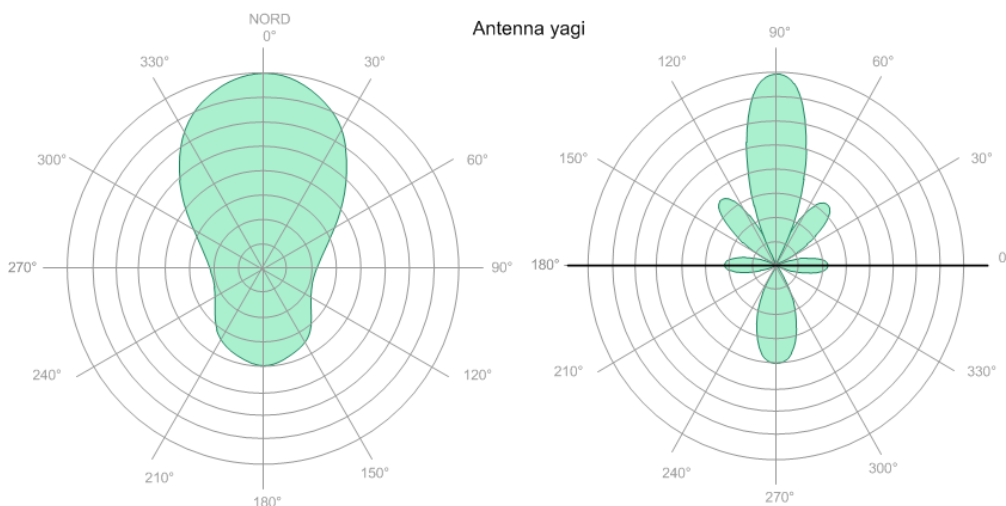


Come si può vedere dallo schema, l'antenna Yagi è costituita da tre elementi:

- **DIPOLO RIPIEGATO:** è l'elemento attivo che trasforma il segnale in un'onda elettromagnetica da irradiare nello spazio.
- **RIFLETTORE:** questo elemento serve a riflettere in avanti l'onda elettromagnetica generata dal dipolo ripiegato in modo da rendere più piccolo il lobo posteriore. Il riflettore non è però in grado di eliminare il lobo posteriore, come possono fare invece altri tipi di antenna. Il riflettore, per riflettere più potenza possibile ha una lunghezza maggiore degli altri elementi.
- **DIRETTORI:** i direttori sono degli steli passivi, nel senso che non sono alimentati dalla corrente del segnale. Questi steli servono per aumentare la direttività dell'antenna: la loro presenza riduce l'angolo di apertura dell'antenna. La presenza dei direttori ha però un effetto secondario non gradito: all'aumentare del numero degli elementi passivi, la banda di risposta in frequenza dell'antenna si riduce.



I diagrammi di radiazione dell'antenna Yagi sono entrambi direttivi, come si vede dall'immagine seguente:



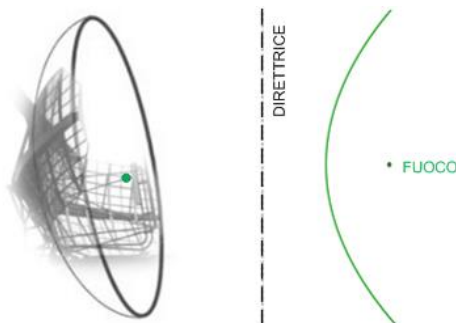
6.5.2 Antenne a paraboloide

Le antenne a paraboloide sono una famiglia di antenne che comprende le comuni antenne a parabola per la ricezione dei canali satellitari, le antenne per la trasmissione dei segnali radiotelevisivi e anche le antenne per la trasmissione di segnali nello spazio.

La caratteristica di queste antenne è quella di possedere un riflettore che ha la forma di una superficie paraboloidale.

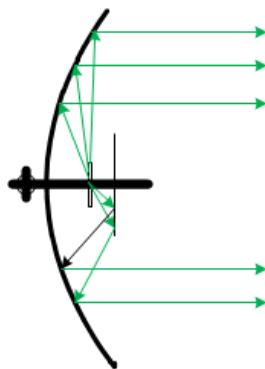
Il paraboloide è una figura che si ottiene facendo ruotare una parabola attorno al proprio asse. Come la figura piana, anche la superficie tridimensionale ha alcune importanti proprietà.

Anche il paraboloide ha un fuoco e, come la parabola, i punti che stanno sulla sua superficie sono equidistanti dal fuoco e dalla direttrice, come mostrato nella figura seguente:



Un'antenna a parabola è costituita da una superficie metallica riflettente che nel fuoco ha un dipolo lungo $\lambda/2$ e davanti al dipolo ha un dipolo riflettore.

La particolarità di una superficie parabolica riflettente è che riflette i raggi in direzione perpendicolare al proprio asse, come mostrato nella figura seguente.



Il segnale irradiato nello spazio dal dipolo si disperderebbe in tutte le direzioni se non ci fosse la parabola dietro di esso: la parabola riflette il segnale e in questo modo non c'è dispersione di potenza.

Inoltre il riflettore, posto davanti al dipolo, fa sì che nulla del segnale venga inviato in una direzione non perpendicolare all'asse).

In ricezione è la stessa cosa. Il segnale arriva perpendicolare all'asse della parabola e viene riflesso sul dipolo.

6.5.3 Antenna a parabola

L'antenna a parabola è utilizzata quando è necessario ricevere segnali di modesta potenza che giungono da molto lontano, come i segnali trasmessi dai satelliti televisivi. L'insieme del dipolo e del riflettore, che nelle

antenne a parabola per la ricezione del segnale televisivo ha la forma di un microfono posto davanti alla parabola, si chiama illuminatore.



In un antenna a parabola l'angolo d'apertura dipende sia dalla lunghezza d'onda del segnale che dal diametro della parabola.

La formula che lega queste tre grandezze è:

$$\alpha = 70 \frac{\lambda}{D}$$

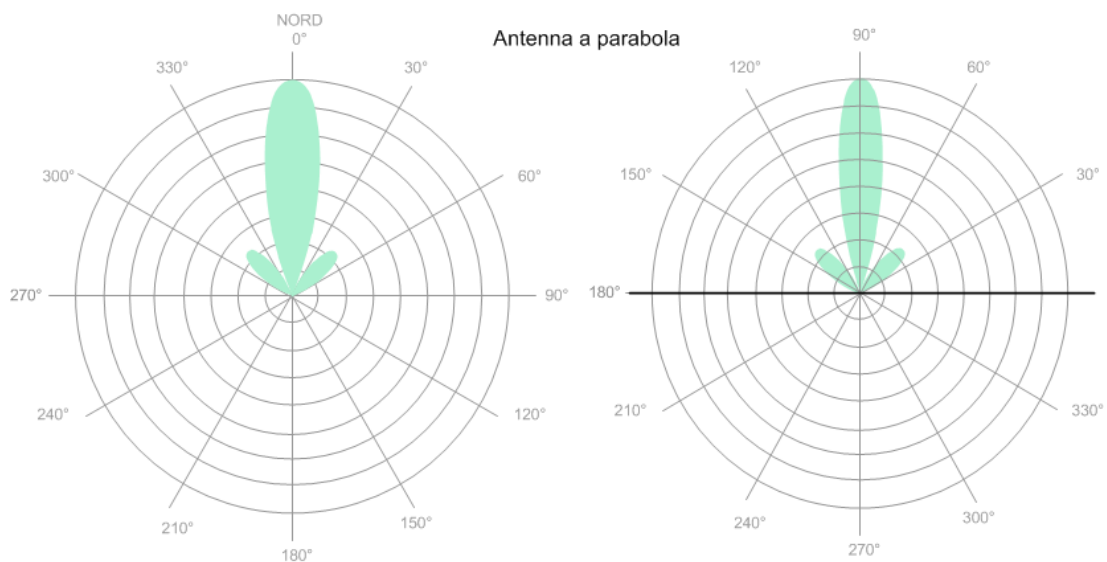
dove D è il diametro della parabola.

Come si può notare dalla formula, all'aumentare del diametro l'angolo di apertura dell'antenna diminuisce: questo significa che per avere un fascio di radiazione fortemente direttivo è necessario avere antenne di grande diametro.

Il guadagno è molto elevato e anch'esso dipende dal diametro, oltre che dalla lunghezza d'onda:

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

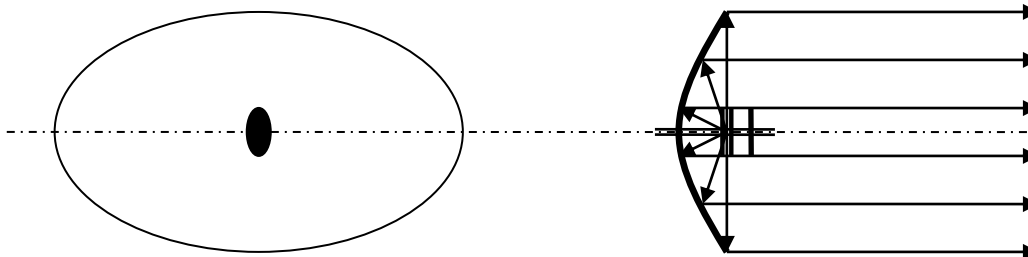
Il diagramma di radiazione di un'antenna a parabola è il seguente:



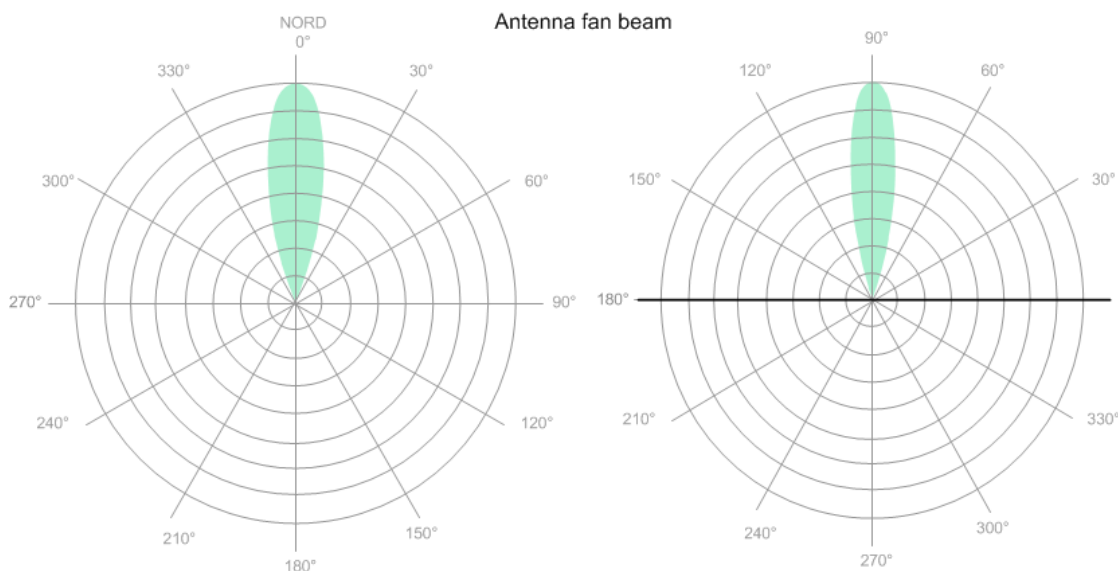
6.5.4 Antenna fan-beam

E' un antenna a paraboloido, cioè è costituita da superfici simili a quelle della parabola.

Questa antenna però, vista di fronte, è di forma ovale. Questo consente di avere una maggiore direttività, eliminando quasi completamente i lobi secondari.



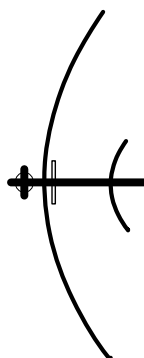
I diagrammi di radiazione dell'antenna fan-beam hanno questa forma:



6.5.5 Antenna cassegrain

L'antenna Cassegrain nacque come un telescopio con due specchi riflettenti e venne poi modificato per essere utilizzato come antenna.

Nell'antenna Cassegrain ci sono due specchi: uno concavo, principale, e uno convesso, secondario, posto dove c'è il riflettore nelle antenne a parabola.

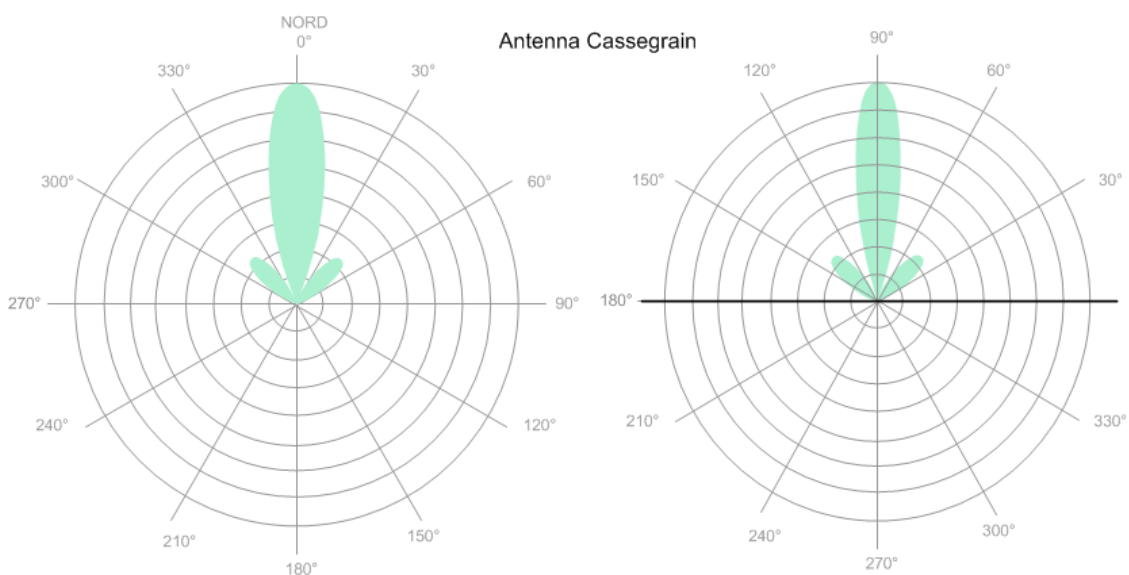


La differenza con gli altri paraboloidi è che il dipolo attivo non è posto nel fuoco, ma in prossimità del primo specchio.



Lo svantaggio di questo tipo di antenna è che lo specchio convesso richiede dei supporti per essere sostenuto e i supporti rovinano il fascio.

I diagrammi di radiazione di un'antenna Cassegrain sono come quelli dell'antenna a parabola:

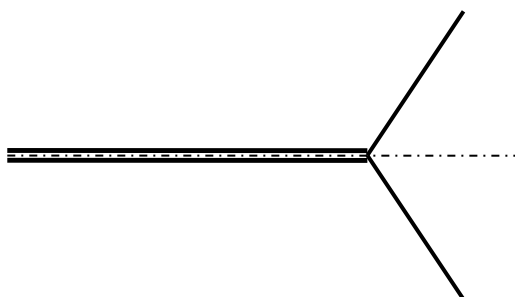


6.5.6 Antenna a V

E' costituita da due steli conduttori disposti a V, come in figura.

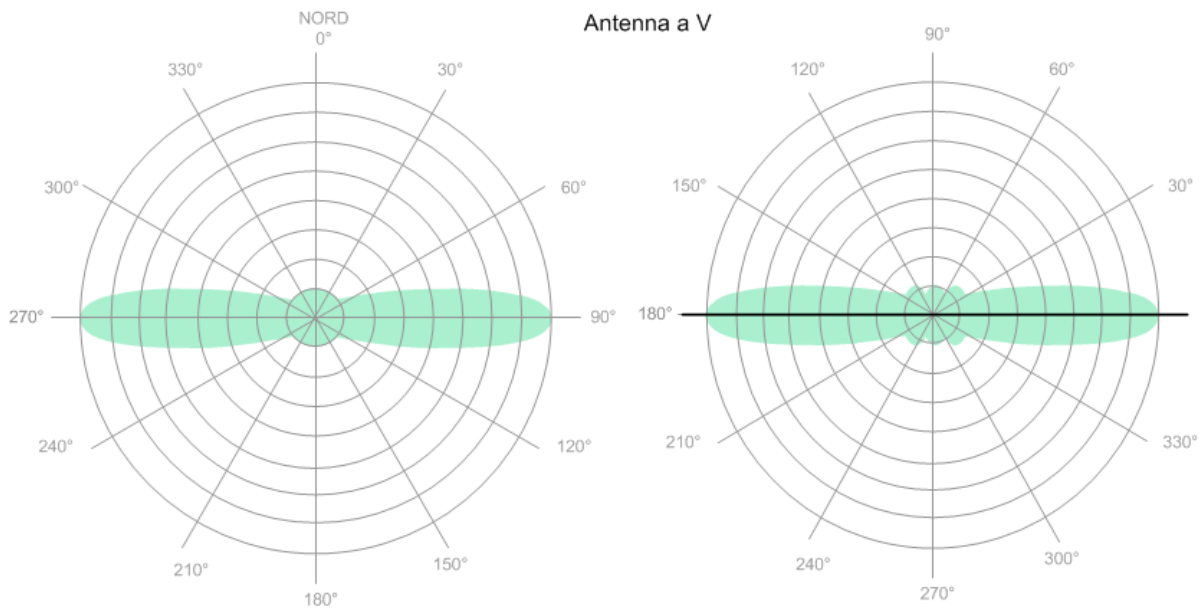
E' un antenna che, nella sua forma base, irradia in due direzioni: quella frontale e quella posteriore.

Se osserviamo il diagramma di radiazione vediamo che quest'antenna è fortemente direttiva, ma presenta un rapporto tra la potenza del lobo principale e quello posteriore (FBR) pari a 1, cioè i due lobi irradiano la stessa energia.



La particolarità di quest'antenna è che gli steli sono lunghi 10λ .

Come vedremo studiando la strumentazione di bordo, le antenne a V sono utilizzate quando è necessario definire la direzione, ma non il verso del fascio.



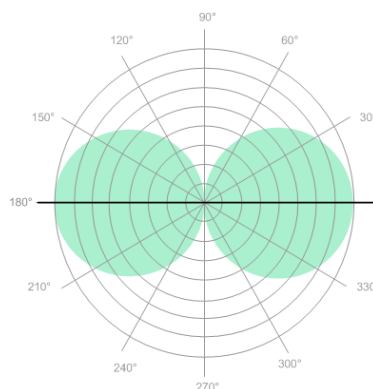
6.5.7 Antenna a telaio

L'antenna a telaio è costituita da un conduttore avvolto su se stesso per formare una spira, come rappresentato in figura.

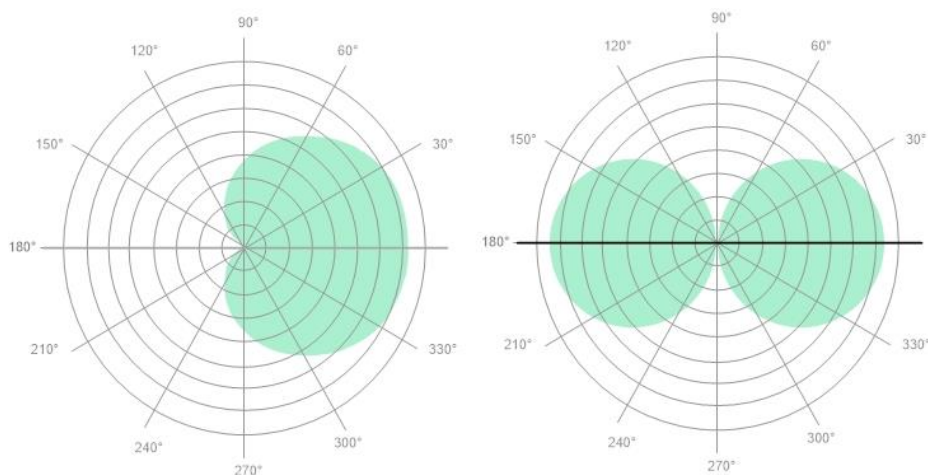


Quest'antenna in genere è posta verticalmente e ruota su stessa. E' utilizzata nei radiogoniometri, di cui parleremo più approfonditamente nel capitolo dedicato agli ausili alla navigazione.

Per ora basta sapere che le antenne a telaio hanno un diagramma di radiazione costituito da due cerchi. Quindi non sono antenne direttive, anzi, hanno le caratteristiche delle antenne omnidirezionali.



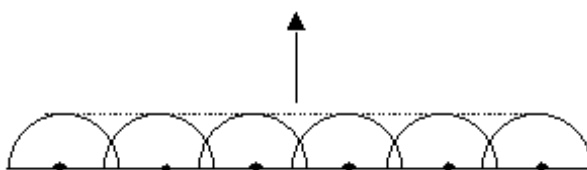
Le antenne a telaio si trovano di solito insieme ad un'antenna marconiana. In questo modo il segnale viene propagato in un modo particolare. Il diagramma di radiazione, a causa della sua forma, prende il nome di cardioide:



6.5.8 Antenna a scansione di fase

Le antenne a scansione di fase sono composte da una serie di dipoli radianti, ciascuno collegato ad un phase shifter, cioè ad un dispositivo in grado di variare la fase del segnale emesso e avere così tanti segnali, uno vicino all'altro. Il fascio è ottenuto modificando la fase del segnale emesso da ciascun elemento, tramite un processo simile alla modulazione di fase.

I fronti dei segnali dei singoli radiatori si combinano tramite un'interferenza costruttiva per formare un'onda piana che si propaga in direzione normale al piano del radiatore.



Questo comporta un notevole vantaggio: l'onda è piana e quindi può scansionare un'area più vasta rispetto ad un fascio; poiché ogni elemento radiante ha una fase diversa, in base all'eco è possibile stabilire la posizione del bersaglio nel piano.

PARTE IV: TELECOMUNICAZIONI E TELERILEVAMENTO

7 IL RADAR

Il termine RADAR è un acronimo inglese della frase **Radio Detection And Ranging**, che significa radiorilevamento e determinazione della distanza a mezzo di onde radio.

Il radar è uno strumento di telerilevamento (cioè rilevamento a distanza) che utilizza onde elettromagnetiche ad alta frequenza (microonde) per rilevare la presenza di oggetti a distanza e, in alcuni casi, la loro velocità.

I sistemi di telerilevamento si dividono in due categorie:

- **SISTEMI PASSIVI**: che rilevano segnali già presenti, ad esempio, una stazione per le comunicazioni radio in territorio nemico può essere rilevata da un aereo spia che “sente” le onde elettromagnetiche emesse dalla stazione.
- **SISTEMI ATTIVI**: che emettono essi stessi un segnale e ne rilevano l’eco. Ad esempio, il radar di acquisizione su un aereo da combattimento emette onde elettromagnetiche e rileva l’eco prodotto dalla riflessione delle onde sul bersaglio.

Il radar è un sistema di rilevamento attivo, cioè emette un segnale e sente l’eco del segnale che lui stesso ha prodotto.

7.1 Classificazione dei radar

Esistono diverse classificazioni dei radar, in base a cosa si intende studiare. Vediamo qui le principali.

7.1.1 Numero di antenne

In base al numero di antenne impiegate i radar si dividono in:

- **MONOSTATICI**, cioè hanno il trasmettitore ed il ricevitore fisicamente uniti in un unico apparato.
- **BISTATICI O MULTISTATICI**, in cui vi sono un trasmettitore ed uno o più ricevitori fisicamente separati.

7.1.2 Mobilità del sistema

Il radar può essere inoltre fisso o mobile, a seconda della piattaforma su cui è collocato. Consideriamo ad esempio un radar terrestre, cioè un radar studiato per operare al suolo (non su un aereo o su una nave). Possiamo trovare radar fissi, negli aeroporti che hanno una torre di controllo; oppure possiamo trovare radar mobili, montati su mezzi militari, ad esempio quelli che si spostano con l’esercito in territorio nemico.

7.1.3 Attività del bersaglio

I radar possono essere classificati in due tipi in base al fatto che il bersaglio sia attivo o passivo:

- **RADAR PRIMARIO:** il bersaglio è passivo, cioè riflette l'onda elettromagnetica senza elaborarla.
- **radar secondario:** il bersaglio è attivo, cioè un apparato a bordo del velivolo, chiamato trasponder, riceve il segnale inviato dal radar (codificato in sistema binario), lo elabora e lo ritrasmette (sempre in sistema binario).

7.1.4 Funzione del radar

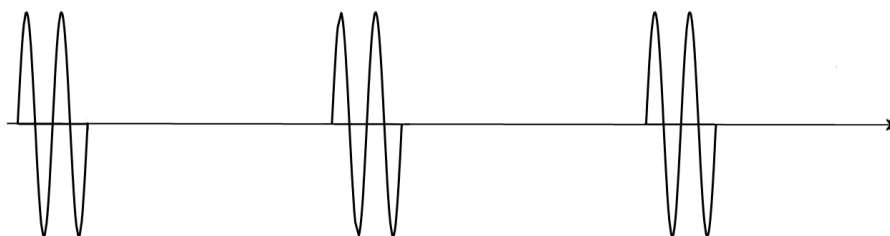
In base alla funzione svolta I radar si possono classificare in:

- **RADAR DI SORVEGLIANZA:** ad esempio quelli che si trovano negli aeroporti
- **RADAR DI INSEGUIMENTO:** ad esempio quelli che si trovano nei missili a guida radar o sugli aerei da combattimento nel sistema di acquisizione e puntamento del bersaglio
- **RADAR** ad altissima risoluzione **PER FORMAZIONE DI IMMAGINI:** ad esempio i radar montati sugli aerei spia per la mappatura del territorio nemico.
- **RADAR ALTIMETRI:** ad esempio quelli montati sui satelliti, in grado di fornire l'altezza del aeromobile.
- **RADAR METEOROLOGICI:** ad esempio quelli nelle stazioni meteorologiche, in grado di rivelare nubi, temporali, ecc...

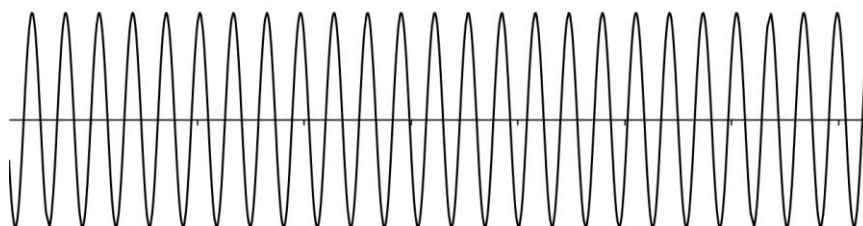
7.1.5 Tipo di onda utilizzata

In base alla forma dell'onda si distinguono:

- **RADAR AD IMPULSI:** in cui l'onda che colpisce il bersaglio è costituita da brevi impulsi



- **AD ONDA CONTINUA:** in cui l'onda emessa non si interrompe mai.



Studieremo questi due tipi di radar separatamente perché il loro funzionamento è alquanto diverso.

7.1.6 Le frequenze impiegate dai radar

In genere il radar opera nella banda delle microonde, segnali elettromagnetici con frequenza maggiore di 1 GHz. Esistono però diversi tipi di radar, che impiegano lunghezze d'onda diverse.

In linea di principio è bene ricordare che un oggetto è in grado di fermare (e quindi far rimbalzare) un'onda che ha una lunghezza d'onda più piccola della sua dimensione caratteristica.

Quindi per intercettare un'oggetto con un radar è necessario che la lunghezza dell'onda sia minore delle dimensioni del bersaglio.

ONDE CORTE (HF)

Venivano usate nei primi radar grazie alla capacità di riflettersi sulla ionosfera e raggiungere distanze elevate. Questo tipo di onda è però in grado di rilevare solo bersagli estremamente grandi, come le navi.

ONDE CORTISSIME VHF E UHF

È un range di frequenza abbastanza usato nei radar perché le potenze sviluppate da queste onde sono elevate e quindi la portata aumenta, come vedremo quando parleremo dell'equazione del radar.

A queste frequenze i sistemi stealth non sono molto efficaci e quindi questi radar vengono usati soprattutto per l'avvistamento ma non per seguire il bersaglio in quanto bruschi cambi di direzione possono portare ad errori.

Inoltre i fenomeni meteorologici non vengono rilevati perché le gocce d'acqua presenti nell'atmosfera sono troppo piccole. Quindi non c'è rischio di acquisire un falso bersaglio a causa di fattori atmosferici.

BANDA L (1-2 GHz)

Questa è la cosiddetta banda delle microonde. Permette di acquisire bersagli molto piccoli e ha delle buone prestazioni anche se il bersaglio cambia improvvisamente direzione.

Questo tipo di radar è in grado di rilevare la pioggia, ma il segnale riflesso dalle precipitazioni è piccolo rispetto a quello del bersaglio e quindi la probabilità di errore è ridotta al minimo.

Questo tipo di radar è utilizzato per la sorveglianza aerea a grande distanza (fino a 400 km).

BANDA S (2-4 GHz)

Rispetto alla banda L, la risoluzione angolare (cioè la precisione con cui si identifica la posizione di un oggetto) è migliore. La portata del radar è minore e quindi viene usato come radar primario, per la sorveglianza di aree di manovra terminali.

Alcuni radar meteo operano in questa banda di frequenza.

BANDA C (4-8 GHz)

Viene usato per applicazioni di sorveglianza a breve e medio raggio o per i radar d'inseguimento.

I radar meteo usati in Europa lavorano in questa banda di frequenze.

BANDA X (8-12 GHz)

Grazie alla piccola lunghezza d'onda, in questa banda si possono realizzare apparecchi di dimensioni, costo e peso ridotti, ideali per applicazioni mobili.

Il problema di questi radar è la pioggia.

Infatti la lunghezza d'onda è abbastanza piccola da consentire di rilevare le gocce d'acqua.

BANDA K, KU E KA (12.5 – 40 GHz)

Con onde così corte la pioggia diventa un fattore fortemente limitante, ma il vantaggio è che si possono realizzare antenne con fasci molto stretti.

Questa banda viene quindi utilizzata per il controllo dettagliato della superficie aeroportuale o come radar nel sistema avionico del velivolo (ad esempio per l'individuazione di missili in avvicinamento).

7.2 Storia del radar

I primi esperimenti sulla riflessione di onde elettromagnetiche da parte di corpi metallici furono effettuati nel 1885 da Heinrich Herz, con onde di frequenza pari a 450 MHz.

Il primo radar della storia risale però al 30 aprile 1904, quando Christian Hulsmeyer depositò il brevetto per un sistema di rilevamento della presenza di navi tramite onde elettromagnetiche.

La prima dimostrazione ebbe luogo a Colonia, sempre nel 1904, utilizzando un radar bistatico che lavorava con onde della lunghezza di mezzo metro.

In quell'occasione venne individuata una nave ad un paio di chilometri di distanza.

Fu Marconi il primo a ipotizzare l'impiego del radar come strumento per la sicurezza della navigazione.

Ma, come per molte innovazioni tecnologiche, la spinta che permise di costruire e utilizzare praticamente il radar, venne da esigenze belliche.

Nel XX secolo il concetto di guerra era radicalmente cambiato rispetto ai secoli precedenti. Una volta erano fondamentali la metallurgia per le armi bianche, poi la meccanica, per le armi da fuoco, e la chimica per la polvere da sparo.

Durante gli anni 30 invece apparve chiaro come la minaccia dei bombardieri fosse difficilmente contrastabile senza un sistema in grado di individuarli in anticipo, a distanza.

Questo problema era particolarmente in Inghilterra, dove i bombardamenti tedeschi erano il pericolo principale. E infatti furono gli inglesi a disporre per primi di un sistema radar efficiente, denominato Chain Home, che fu utilizzato durante tutta la seconda guerra mondiale.

Anche in Italia negli anni 30 cominciarono i primi esperimenti per la realizzazione di un sistema di difesa, denominato Gufo.

Il sistema Gufo era un apparecchiatura Radar, operante con onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda pari a 70 cm, in grado di individuare bersagli fino a 12 km, quando veniva utilizzato per il rilevamento delle navi, e fino a 80 km, quando era impiegato per il rilevamento degli aerei.

Le prime immagini radar prodotte da un velivolo furono realizzate solo l'8 Giugno 1953 da un gruppo dell'Università dell'Illinois.

Il primo progetto non militare per produrre immagini radar venne realizzato nel 1968 quando la provincia centro-americana di Darien fu completamente ripresa attraverso una coltre di nubi.

Oggi il radar viene utilizzato in maniera massiccia in ambito aeronautico, navale, di sorveglianza del territorio e di misurazione della distanza tra due punti.

IL RADAR AD IMPULSI

Il radar si basa sul principio che un'onda elettromagnetica, quando colpisce un oggetto, viene riflessa nella stessa direzione da cui è arrivata.

Misurando il tempo t che passa tra l'emissione dell'onda e il suo ritorno, e conoscendo la velocità delle onde elettromagnetiche (che è pari alla velocità della luce c), possiamo trovare la distanza d tra il trasmettitore e l'oggetto che è stato colpito dall'onda:

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

D'ora in poi chiameremo bersaglio l'oggetto che viene individuato dal radar.

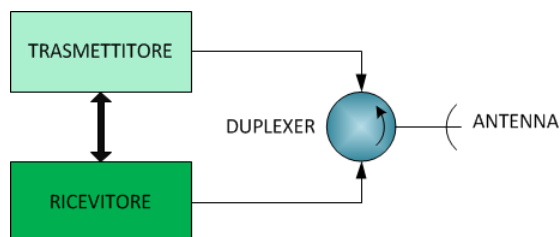
7.3 Componenti del radar ad impulsi

Per capire bene da quali elementi è costituito un radar e come funziona, bisogna distinguere tra radar monostatici e radar bistatici.

7.3.1 Radar monostatico

Un radar monostatico è costituito fondamentalmente da tre elementi:

- un generatore di segnale elettromagnetico (trasmettente), collegato ad un'antenna
- un ricevitore di segnale elettromagnetico, collegato alla stessa antenna.
- un dispositivo, chiamato Duplexer, in grado di far funzionare alternativamente il generatore e il ricevitore (come un dispositivo half duplex)



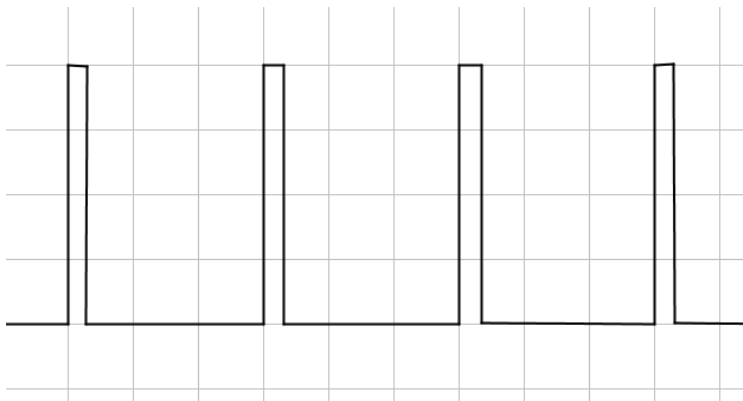
IL TRASMETTITORE

All'interno del blocco trasmettitore ci sono tre dispositivi che servono per creare il segnale da trasmettere:

- Generatore di impulsi

- Oscillatore magnetron
- Modulatore

Il generatore di impulsi produce un segnale impulsivo molto breve, ad esempio il segnale rappresentato nella figura seguente:

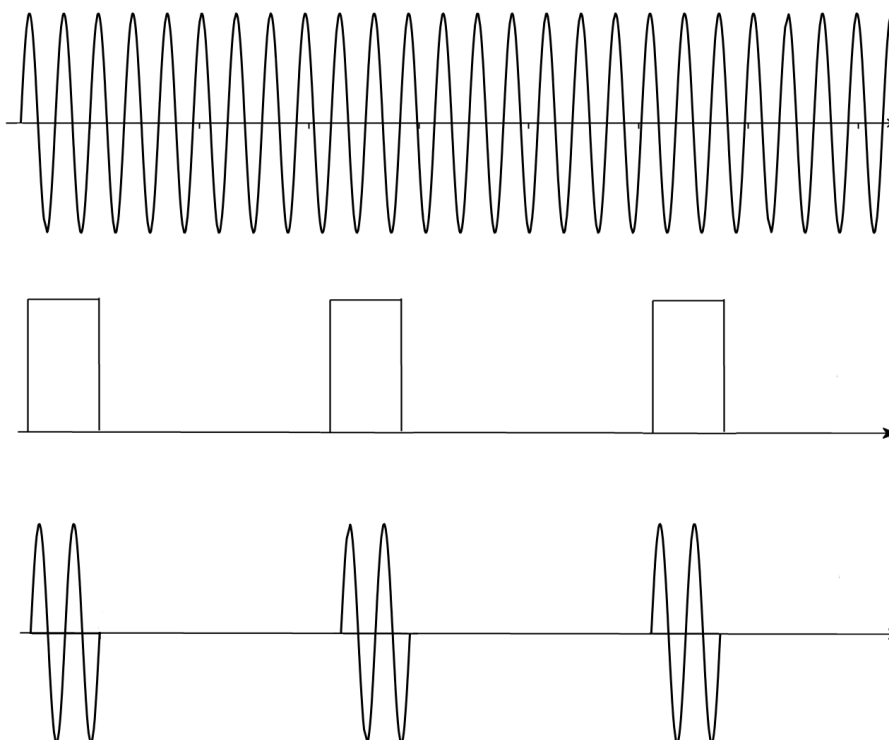


Il tempo in cui il segnale non è nulla è dell'ordine dei microsecondi, mentre la fase in cui non viene emesso nulla dura fino a qualche secondo.

Questo segnale, che chiameremo segnale pilota, interagisce con un oscillatore (il magnetron), anch'esso all'interno del blocco trasmittente.

Un oscillatore, come sappiamo, è in grado di produrre un segnale sinusoidale continuo.

Tuttavia, quando si trova accoppiato con il segnale pilota, l'oscillatore non è più libero di emettere il segnale che ha prodotto in maniera continuativa, ma solo durante la fase in cui il segnale pilota non è nullo. Per capire come ciò avvenga, possiamo immaginare che il segnale pilota sia come una porta, che si apre per brevi periodi, a intervalli regolari, lasciando uscire il segnale elettrico. Si ottiene così un segnale ad impulsi.



Il generatore di impulsi ha un ruolo fondamentale per quanto riguarda la cosiddetta “portata strumentale” del radar, cioè la massima e la minima distanza che un oggetto può avere per essere rilevato dal radar.

Il generatore di impulsi, infatti, è una specie di orologio, che scandisce il tempo di invio e di ricezione degli impulsi.

Quando il segnale pilota non è nullo, il radar funziona come un’antenna trasmittente; quando il segnale pilota è nullo, il radar funziona come un’antenna ricevente.

IL RICEVITORE

Abbiamo visto che a determinati intervalli regolari un trasmettitore emette un impulso a radiofrequenza, che viene trasmesso nello spazio tramite un’antenna.

Se c’è un bersaglio, l’impulso trasmesso viene riflesso verso il ricevitore.

Il ricevitore contiene due dispositivi:

- il demodulatore
- l’elaboratore

Il demodulatore riceve il segnale e separa il segnale portante da quello modulante. Quest’ultimo viene inviato ad un elaboratore che analizza il segnale per ricavarne le informazioni necessarie e calcola le grandezze da presentare all’operatore radar.

Il ricevitore del radar, in genere, è un antenna ricevente chiamata supereterodina.

Vediamo rapidamente come è fatta quest’antenna e quali caratteristiche presenta.

Quando vogliamo ricevere un segnale con un’antenna, sintonizziamo il ricevitore sulla frequenza del segnale portante e poi lo demoduliamo per ottenere il segnale di partenza.

La particolarità del ricevitore supereterodina è che la frequenza del segnale portante viene convertita in una frequenza fissa, detta frequenza intermedia o media frequenza, solitamente del valore di 470 kHz.

Il vantaggio di questo tipo di antenna è che quando il segnale della portante cambia, il ricevitore resta comunque sintonizzato sulla frequenza intermedia. Quindi si possono ricevere segnali diversi, distinguendoli, senza che interferiscano tra loro, anche se la loro frequenza varia di pochi kHz.

IL DUPLEXER

Il duplexer è il dispositivo che differenzia il radar bistatico da quello monostatico.

Il problema di un radar monostatico è infatti costituito dalla presenza di una sola antenna che deve lavorare sia come trasmittente che come ricevente.

Serve quindi un dispositivo che faccia da commutatore.

Questo dispositivo agisce come uno scambio ferroviario: quando siamo nella fase di trasmissione del segnale, il duplexer esclude il ricevitore e fa passare solo i segnali provenienti dal trasmettitore.

Nella fase di ritorno, il duplexer lavora al contrario: esclude il trasmettitore e lascia passare il segnale in arrivo mandandolo verso il ricevitore.

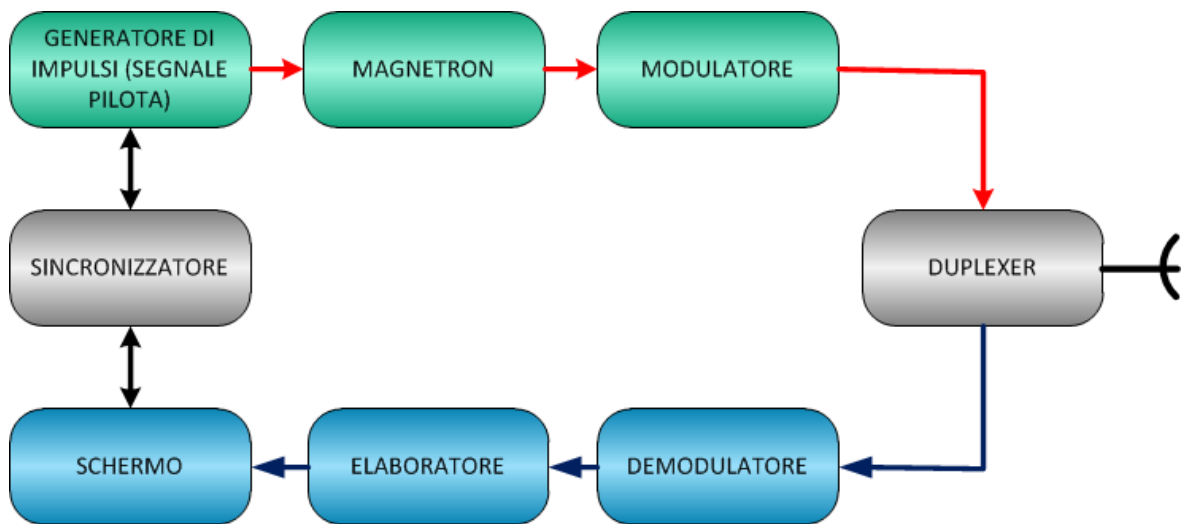
Un'antenna trasmittente deve essere potente, deve elaborare un segnale ad alta potenza per trasmetterlo nello spazio e farlo arrivare il più lontano possibile.

L'eco di ritorno è invece un segnale estremamente debole e quindi sarà difficile per un'antenna ricevere un segnale di fondo a bassa potenza: è necessaria un'antenna molto sensibile.

Potenza e sensibilità sono due caratteristiche difficili da conciliare. E' come chiedere ad un fabbro, le cui mani sono molto forti, di giocare a shangai...

La tecnologia attuale consente di realizzare antenne abbastanza potenti da trasmettere nello spazio il segnale ad alta potenza e abbastanza sensibili da ricevere eco debolissimi.

Per questo scopo il duplexer è fondamentale. I delicati stumenti del blocco ricevente verrebbero distrutti dalla potenza del segnale emesso se il duplexer non li isolasse correttamente.

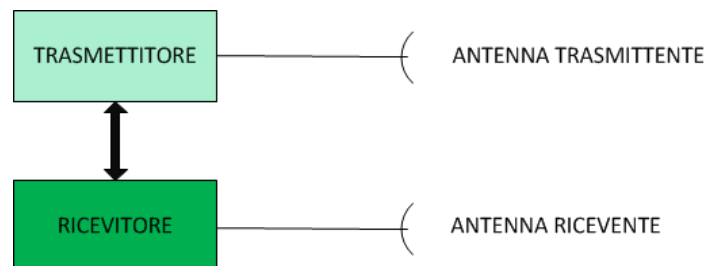


Come si può vedere dallo schema a blocchi, il generatore di impulsi (che segna il tempo del radar) è sincronizzato con lo schermo. In questo modo i risultati vengono presentati all'operatore in tempo reale e sempre aggiornati.

7.3.2 Radar Bistatico

Un radar bistatico è costituito fondamentalmente da due elementi:

- un generatore di segnale elettromagnetico (trasmittente), collegato ad un'antenna
- un ricevitore di segnale elettromagnetico, collegato ad un'altra antenna.



Un radar bistatico non ha bisogno del duplexer poiché ha due diverse antenne che svolgono al funzione di trasmettitore e ricevitore.

I primi radar erano di tipo bistatico. Questo tipo di radar infatti è meno critico dell'altro, pur presentando qualche inconveniente.

Il radar bistatico richiede infatti una triangolazione per determinare la posizione del bersaglio poiché il punto di invio del segnale e quello di ricezione non coincidono.

7.4 I tipi di antenne usate nei radar

L'antenna di un radar deve essere fortemente direttiva, per lo meno nel piano orizzontale, per poter stabilire con certezza la posizione del bersaglio rispetto al radar. Nei prossimi paragrafi vedremo infatti come la direttività dell'antenna influenza le prestazioni del radar e la sua capacità di distinguere tra diversi bersagli.

La direttività dell'antenna pone però un problema: se l'antenna è immobile, sarà possibile rilevare bersagli che provengono da una sola direzione.

Per ovviare a questo problema ci sono due metodi:

- usare una antenna rotante che faccia variare la posizione del fascio nel piano degli azimuth.
- usare diverse antenne, orientate in diverse direzioni.

Al giorno d'oggi si tende a non utilizzare un solo tipo di antenna, ma più antenne collegate tra loro. Si parla infatti di sistemi radar.

Si può anche utilizzare un'antenna omdirezionale per la trasmissione del segnale, ma il limite di questo sistema è che le antenne omnidirezionali disperdono energia in tutte le direzioni per identificare un singolo bersaglio. L'energia riflessa, che ritorna al radar, sarà solo una piccolissima parte di quella irradiata.

E questo ci riporta al problema di avere un apparato trasmittente che invii grande potenza e un apparato ricevente in grado di "sentire" potenze piccolissime.

Le antenne che si usano nei sistemi radar si dividono in due principali categorie:

- Antenne a riflettore parabolico
- Antenne a scansione di fase (Phased Array)

7.4.1 Antenne a riflettore parabolico

Sono le antenne a parabola che abbiamo visto nel capitolo precedente e possono essere simmetriche (la parabola vera e propria) o allungate (fan beam).



Il primo tipo presenta un fascio di scansione molto sottile sia nel piano orizzontale che verticale. Sono usate quando si vuole avere una rappresentazione tridimensionale molto precisa del bersaglio.

Il tipo fan beam produce un fascio molto sottile in una direzione, ma piuttosto largo nell'altra.

7.4.2 Antenne a scansione di fase

Questa antenna è costituita da una serie di radiatori (dipoli in grado di irradiare nello spazio un'onda elettromagnetica) disposti su una superficie piana ed alimentati in fase, cioè con segnali tutti in fase tra loro.

In questo modo, i fronti dei segnali dei singoli radiatori si combinano a formare un'onda piana che si propaga in direzione normale al piano del radiatore.



7.5 Calcolo della posizione

L'antenna del radar in genere ha un guadagno di 40-50 dB.

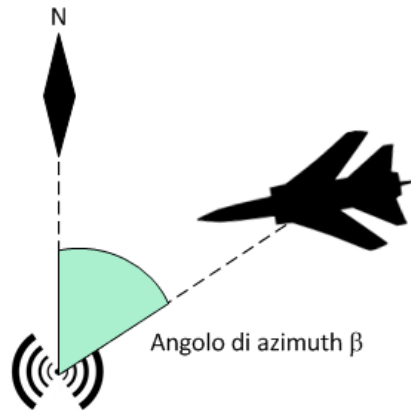
Se si confronta questo valore con il guadagno di un'antenna marconiana, pari a 3,3 dB, ci si rende subito conto di quanto l'antenna sia fortemente direttiva.

La direttività dell'antenna, e quindi la capacità di inviare il segnale in una sola direzione, è fondamentale per determinare la posizione del bersaglio.

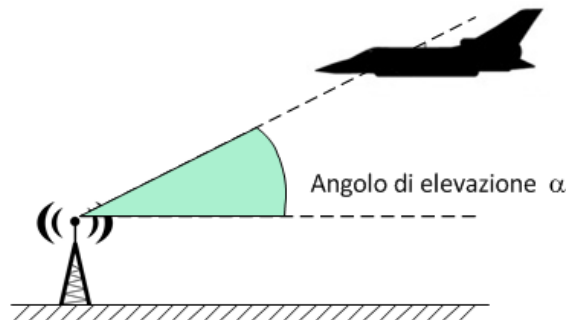
Innanzitutto, per stabilire la posizione esatta di un punto nello spazio non basta conoscere la distanza; servono anche due angoli.

Con un radar si determinano quindi:

- L'angolo formato dal fascio radar rispetto al Nord, chiamato **ANGOLO DI AZIMUT**. Questo angolo si vede considerando la traccia radar nel piano orizzontale.



- L'angolo formato dal fascio radar con il piano tangente alla superficie terrestre al sito radar è chiamato **ANGOLO DI ELEVAZIONE**. Questo angolo si vede considerando la traccia radar nel piano verticale.



La distanza tra il radar e il bersaglio: calcolata grazie alla formula della meccanica che lega spazio e tempo. Viene determinata misurando il tempo impiegato dall'impulso per percorrere la distanza D, andata e ritorno.

Poiché la velocità di trasmissione del segnale è nota (velocità della luce), la determinazione della distanza risulta immediata:

$$\text{Distanza}(\text{andata e ritorno}) = \text{velocità} \cdot \text{tempo impiegato}$$

In simboli:

$$2d = v \cdot \Delta t$$

E quindi la distanza effettiva risulta:

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

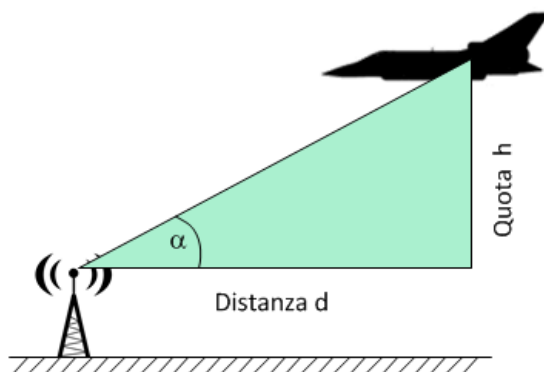
$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

I due angoli si trovano grazie alla forte direttività dell'antenna che gira nei due piani, orizzontale e verticale: quando viene colpito un bersaglio sullo schermo ne appare una traccia che mostra direttamente l'angolo di Azimuth.

La quota del bersaglio si ottiene con il teorema dei triangoli rettangoli, conoscendo la distanza (ipotenusa) e l'angolo di elevazione (angolo opposto):

$$h = d \cdot \sin(\alpha)$$

Dove h è la quota, d è la distanza e α è l'angolo di elevazione.



Sulla base del valore di distanza così calcolato, e dei valori misurati degli angoli di azimuth ed elevazione si determina la posizione del bersaglio nello spazio tridimensionale.

7.6 I parametri del radar ad impulsi

I principali parametri di un radar sono i seguenti:

- Frequenza del segnale
- Durata dell'impulso e frequenza di ripetizione dell'impulso.
- Portata del radar, che si divide in portata non ambigua e in portata geografica (o effettiva).
- Risoluzione

Abbiamo già analizzato le frequenze di funzionamento del radar e abbiamo visto quali bande si possono avere. Studiamo ora gli altri parametri.

7.6.1 Durata dell'impulso e frequenza di ripetizione dell'impulso

Il radar emette il segnale durante al fase di trasmissione, che abbiamo visto essere di durata molto breve. Quando l'impulso è stato emesso, il radar resta in "ascolto" per un certo tempo, che abbiamo visto essere dell'ordine del secondo.

Cerchiamo ora di dare un nome e una grandezza a queste fasi temporali.

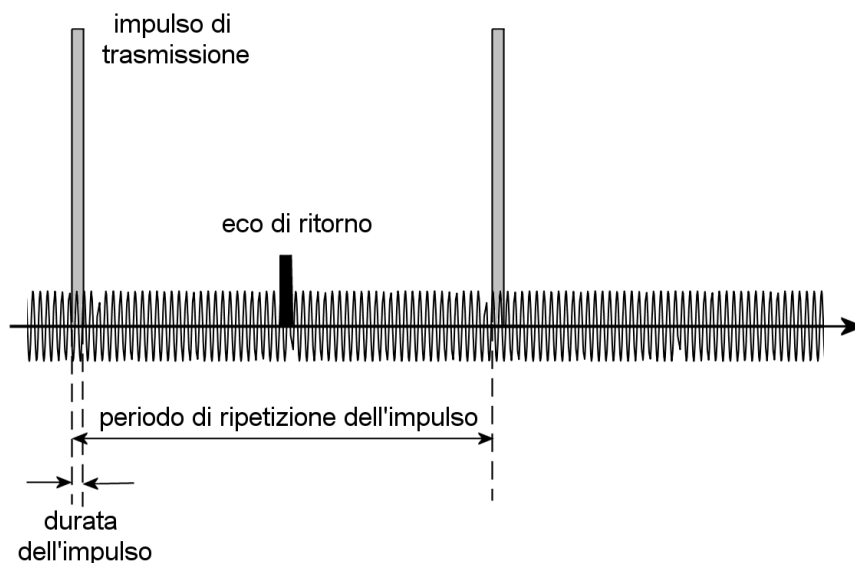
L'immagine seguente mostra il pattern di ricezione e trasmissione dei segnali coinvolti. E' presente un rumore di fondo a cui si sovrappongono due segnali:

- L'impulso di trasmissione: che è ad alta potenza e ha una durata molto breve, chiamata durata dell'impulso (in inglese pulse time PT)
- L'eco di ritorno del segnale: che è a bassa potenza e ha la stessa durata dell'impulso di trasmissione.

Tra l'emissione di un impulso e quello successivo passa un tempo chiamato periodo di ripetizione dell'impulso (in inglese pulse repetition time PRT).

Il reciproco di questa grandezza prende il nome di frequenza di ripetizione dell'impulso (pulse repetition frequency PRF):

$$PRF = \frac{1}{PRT}$$



La frequenza di ripetizione dell'impulso è in pratica il numero di impulsi trasmessi in un secondo. Il suo contrario è il periodo di ripetizione dell'impulso, che nella figura precedente è indicato con T.

Come per i normali segnali sinusoidali:

$$f = \frac{1}{T}$$

7.6.2 La portata del radar

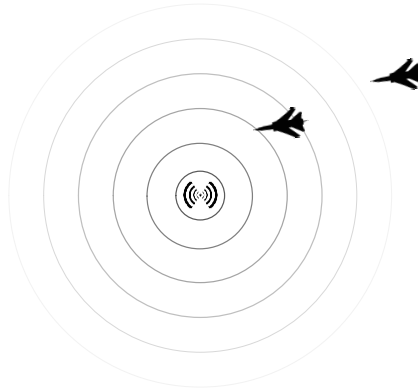
La portata di un radar si distingue in:

- Portata geografica (o effettiva)
- Portata non ambigua (o strumentale)
- Portata minima

La portata geografica è facile da comprendere: un'onda elettromagnetica, viaggiando nello spazio, si attenua e perde potenza. Ad un certo punto il segnale è così debole da non poter più essere rilevato.

La portata di un'onda dipende dalla frequenza dell'onda e dalla potenza con cui viene irradiata.

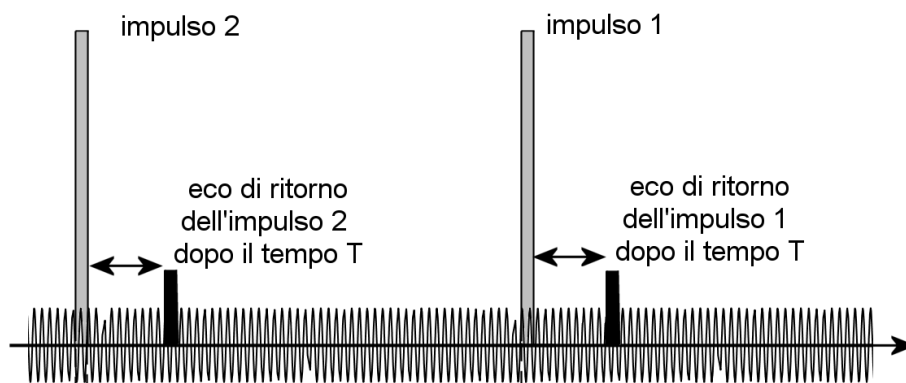
Le microonde che si trovano in natura si propagano poco, ma il radar è in grado di aumentare molto la potenza del segnale tramite il magnetron. Quindi, anche se l'onda è corta, la sua potenza è elevata e quindi il radar può avere una portata molto lunga.



La portata geografica è quindi la portata effettiva, la distanza massima a cui il radar è in grado di rilevare la presenza di un oggetto.

La portata non ambigua invece è più difficile da comprendere.

Si consideri l'immagine seguente:



Dopo aver emesso l'impulso 1, il radar resta in ascolto dell'eco per un tempo pari al PRT. Immaginiamo che nel PRT non arrivi nessun eco. Il radar emette l'impulso 2 e poi resta nuovamente in attesa.

A questo punto, dopo un tempo T , riceve un eco.

A che distanza è l'oggetto?

La risposta a questa domanda non è affatto semplice. Abbiamo infatti due possibilità:

Il bersaglio è stato colpito dal secondo impulso dopo il tempo Δt_2 e quindi la sua distanza è data da:

$$d_2 = \frac{c \cdot \Delta t_2}{2}$$

Il bersaglio è stato colpito dal primo impulso dopo il tempo Δt_1 , ma è così distante che l'eco non ha fatto in tempo a tornare prima che venisse emesso il secondo impulso. In questo caso la distanza è:

$$d_1 = \frac{c \cdot \Delta t_1}{2}$$

Quale delle due è quella corretta? Non si può sapere, a meno di avere un radar molto più complesso.

Per i radar più semplici, si accetta che, una volta emeso il secondo impulso, il primo è perso. Quindi la massima distanza alla quale può essere individuato un bersaglio è pari a quella coperta dall'impulso nel PRT:

$$d_s = PRT \cdot c$$

La portata non ambigua dunque è la distanza massima che consente di identificare la posizione del bersaglio senza possibilità di errore.

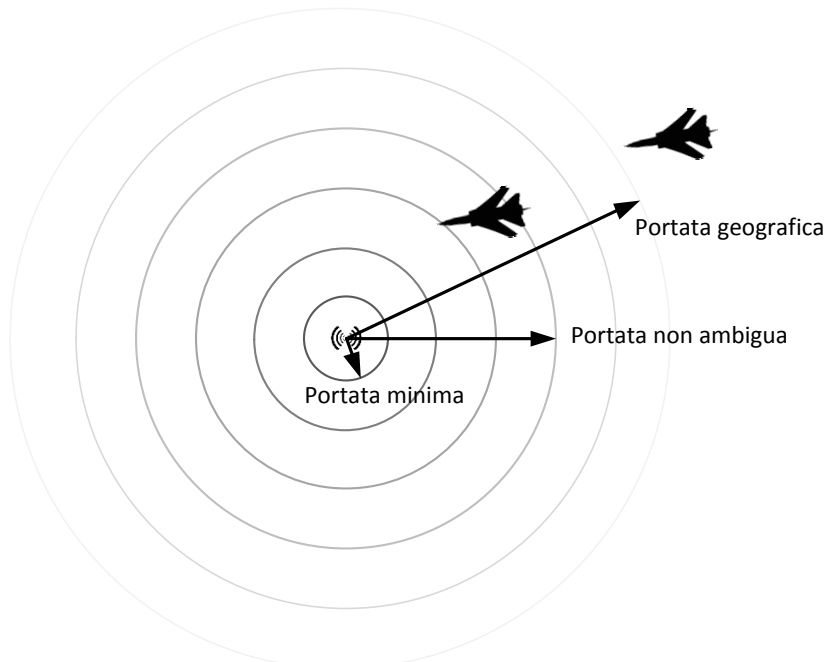
Per questo si chiama portata "non ambigua": perché non ci sono ambiguità; la posizione dell'oggetto è certamente quella rilevata dal radar. E' anche chiamata portata strumentale perché è intrinseca allo strumento, cioè al radar utilizzato. Questa portata dipende infatti dalla base dei tempi: più il PRT è grande e più lo è anche la portata non ambigua.

Vediamo infine la portata minima, o range minimo. Abbiamo detto che un radar può trasmettere o ricevere alternativamente, ma non può mai fare queste due cose contemporaneamente.

Quindi mentre il radar sta trasmettendo non può rilevare alcun oggetto.

Il range minimo corrisponde alla distanza percorsa dall'impulso durante il tempo di trasmissione:

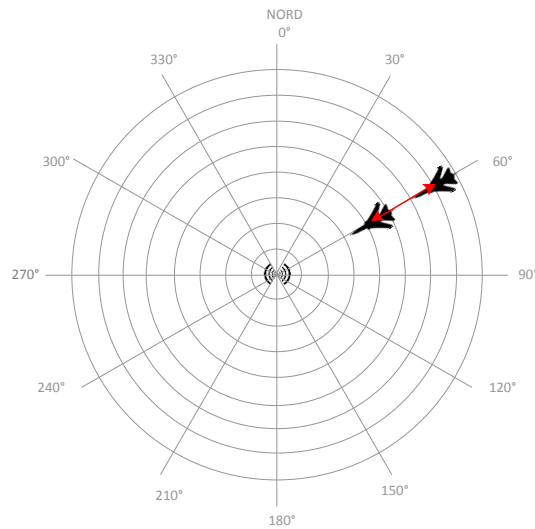
$$d_s = PT \cdot c$$



7.6.3 La risoluzione

La risoluzione di un radar è la sua capacità di distinguere due bersagli vicini. Due bersagli molto vicini possono infatti essere percepiti come uno solo più grande. Questo è il motivo per cui gli aerei militari durante un raid volano in formazioni serrate. Si divide in:

Risoluzione radiale: cioè la minima distanza che devono avere due bersagli che si trovano sulla stessa radiale affinché il radar li percepisca come distinti l'uno d'altro.

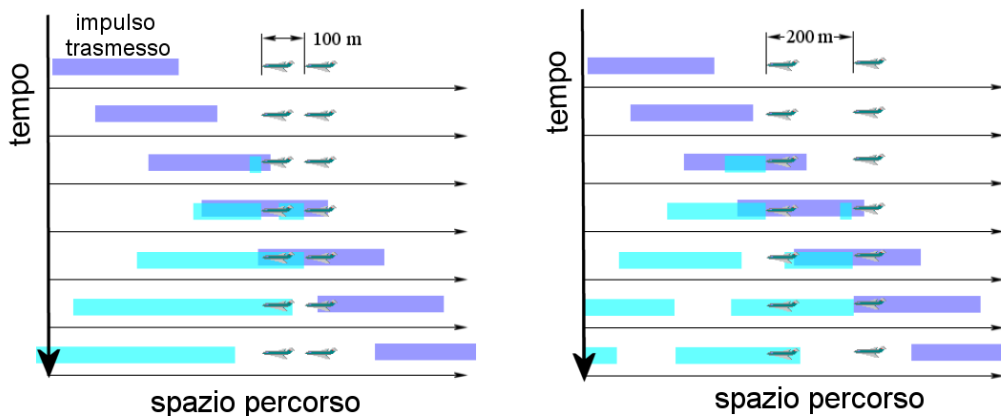


La risoluzione radiale dipende da numerosi fattori:

- lunghezza dell'impulso trasmesso (PT)
- forma e dimensioni del bersaglio
- efficienza dell'antenna ricevente

Tra questi il fattore più importante è il pulse time. Un radar ben progettato è in grado di distinguere bersagli che si trovano ad una distanza pari alla metà dello spazio percorso dall'impulso nel tempo di trasmissione.

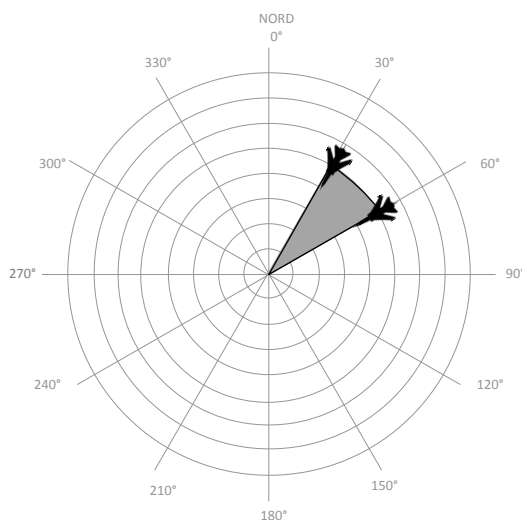
Infatti due bersagli che si trovano all'interno dello stesso impulso rifletteranno due segnali praticamente indistinguibili, come mostrato dall'immagine seguente:



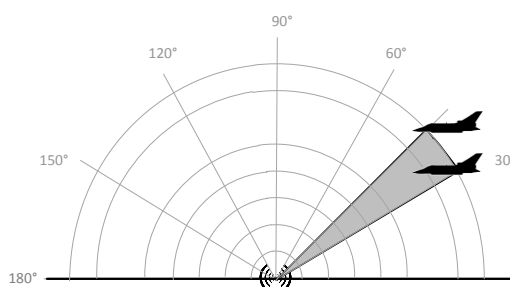
In via del tutto teorica, possiamo dire che la risoluzione radiale è pari:

$$R_{radiale} = \frac{c \cdot PT}{2}$$

Risoluzione in azimuth: cioè la minima distanza angolare che devono avere due bersagli che si trovano alla stessa distanza dal radar, ma su radiali diverse, affinché il sistema di rilevamento li percepisca come due bersagli distinti.

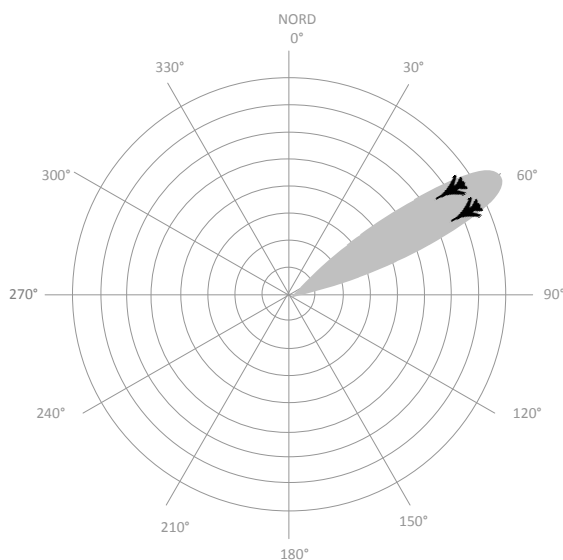


Risoluzione in elevazione: cioè la minima distanza angolare che devono avere due bersagli che si trovano sulla stessa verticale, affinché il sistema di rilevamento li percepisca come due bersagli distinti.



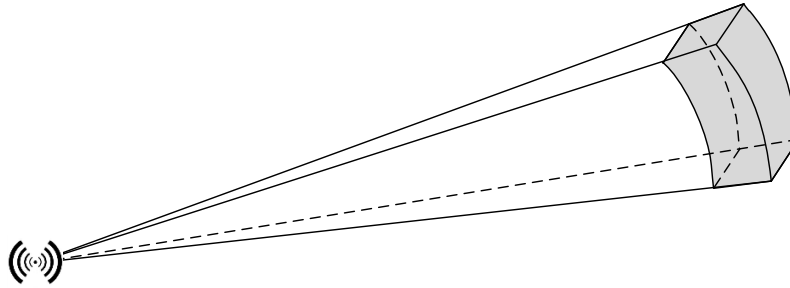
Sia la risoluzione in azimuth che quella in elevazione, essendo risoluzioni di tipo angolare, dipendono dalla direttività dell'antenna.

Infatti quando due bersagli si trovano all'interno dello stesso lobo vengono percepiti come uno solo. Quindi più l'angolo di apertura dell'antenna è piccolo, più la risoluzione angolare del radar è elevata.



Per ottenere un fascio stretto bisogna avere antenne molto grandi o frequenze molto alte.

Queste tre risoluzioni, unite, formano la cosiddetta cella di risoluzione. La cella di risoluzione è un volume di spazio all'interno del quale è impossibile distinguere tra due bersagli.



Più la cella di risoluzione è grande e più ci sarà il rischio che il radar non sia in grado di percepire due bersagli vicini come distinti.

7.6.4 L'equazione della portata

Quando l'onda di un radar incotra un bersaglio, solo una piccola parte dell'energia emessa dall'antenna viene riflessa. La maggior parte si propaga in direzioni in cui non ci sono bersagli oppure viene assorbita dal corpo.

Esiste un'equazione che lega la potenza ricevuta come eco di ritorno a tutti i parametri da cui essa dipende.

Questa equazione viene chiamata equazione della portata del radar o semplicemente equazione del radar.

La sua formulazione è la seguente:

$$P_R = P_T \left(\frac{G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 \cdot R^4 \cdot L_S} \right)$$

Possiamo vedere l'equazione del radar come un'equazione lineare tra la potenza di picco emessa dal radar P_T e la potenza che ritorna al radar dal bersaglio colpito P_R :

$$P_R = k \cdot P_T$$

k è un numero molto piccolo (molto minore di 1) ed equivale a quello che c'è tra parentesi nell'equazione del radar.

Affinchè il sistema sia in grado di rilevare un bersaglio è necessario che la potenza P_R sia superiore alla minima potenza rilevabile dal sistema.

Analizziamo adesso il significato dei termini che compaiono nell'equazione del radar.

GUADAGNO DELL'ANTENNA G

Il valore del guadagno dell'antenna è un parametro noto del sistema radar e dipende dall'antenna utilizzata. Il guadagno è direttamente proporzionale alla potenza ricevuta, quindi conviene che sia elevato.

Questo spiega perché le antenne usate nei radar sono fortemente direttive.

AREA D'INTERCETTAZIONE $\frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi}$

Questo parametro descrive con quale efficienza l'antenna può ricevere potenza da una fonte elettromagnetica (nel nostro caso l'eco di ritorno del bersaglio).

Possiamo leggere l'equazione del radar nel modo seguente, così da mettere in evidenza questo parametro:

$$P_R = P_T \left(\frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi} \frac{G \cdot \sigma_t}{(4\pi)^2 \cdot R^4 \cdot L_S} \right)$$

Per comprendere questo parametro è necessario considerare che l'antenna trasmittente è uguale a quella ricevente.

Nella fase di trasmissione l'antenna elabora tutta la potenza disponibile; nella fase di ricezione l'antenna dovrà elaborare solo una piccola parte della potenza trasmessa.

Il termine "area" deriva dal fatto che si può visualizzare l'area di intercettazione come una sfera costruita attorno alla radiazione di ritorno. Tutta la potenza che attraversa la sfera sarà ricevuta dall'antenna.

Naturalmente non esiste nessuna sfera. Essa è solo un artificio per comprendere che la potenza ricevuta dall'antenna si ottiene da due grandezze:

la densità di potenza

l'area di intercettazione

$$\text{potenza dell'antenna} = \text{densità di potenza} \cdot \text{area}$$

$$\text{Watt} = \frac{\text{Watt}}{\text{metro}^2} \cdot \text{metro}^2$$

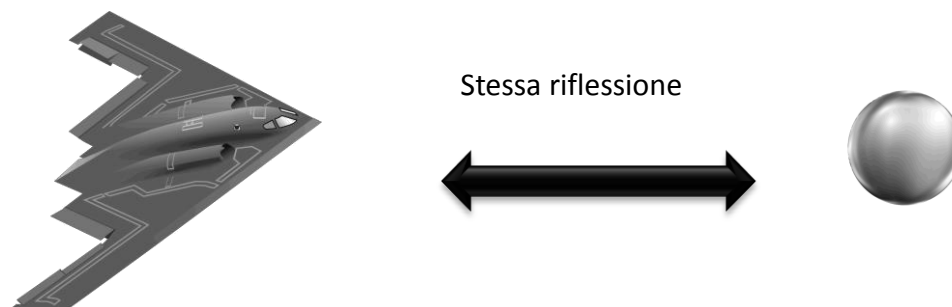
Le dimensioni di un'antenna dipendono direttamente da questo parametro. Più l'area di intercettazione è grande e più l'antenna dovrà essere grande. Le antenne a paraboloide usate nei radar hanno un'area di intercettazione che è circa uguale alla superficie fisica della parabola, con un guadagno di circa 40 Db.

RADAR CROSS SECTION σ_t

Il termine chiamato radar cross section, indicato anche con la sigla RCS, indica la capacità del bersaglio di riflettere l'energia elettromagnetica che lo colpisce.

È un parametro tipico di ogni bersaglio e la sua unità di misura è il metro quadro m^2 .

La ragione di questa unità di misura sta nel fatto che l'RCS rappresenta la superficie di una sfera perfetta che riflette la stessa quantità di energia del bersaglio.



Il valore dell'RCS è molto alto per aerei di linea e molto piccolo per gli aerei che fanno uso di tecnologia stealth. L'RCS di un F117 è uguale a quella di un pettirosso.

Il valore dell'RCS è una media che risulta dall'energia riflessa in ogni direzione dal bersaglio. Infatti un aereo non riflette nello stesso modo in ogni direzione.

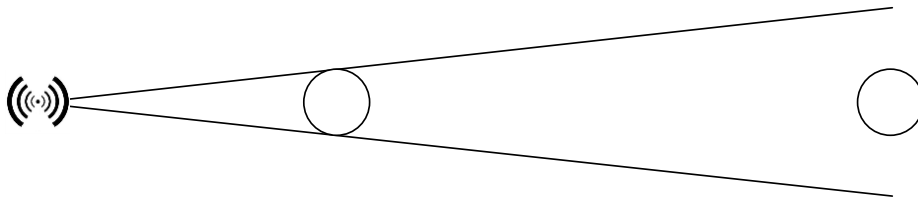
Questo parametro dipende da diversi fattori:

- La forma e le dimensioni del bersaglio (gli aerei con molti diedri, cioè con molti spigoli hanno una minore RCS)
- La direzione in cui il bersaglio viene colpito
- La frequenza del radar
- Il materiale di cui è fatto il bersaglio (esistono alcuni materiali chiamati Radr Absorbant Materials RAM che riducono l'energia riflessa)

PERDITA DI CAMMINO LIBERO

Questo termine indica quanta energia viene persa dal segnale lungo il percorso di ritorno.

Sappiamo infatti che all'aumentare della distanza, la quantità di potenza per unità di area diminuisce:



La perdita di libero cammino indica l'energia persa da un'onda elettromagnetica che viaggia in linea retta, lungo un percorso privo di ostacoli (il libero cammino) per una distanza R.

La sua espressione è:

$$\left(\frac{1}{4\pi \cdot R^2} \right)^2$$

PERDITE INTERNE ED ESTERNE L_s (LOSSES)

Questo termine tiene conto della somma di tutte le perdite del radar dovute a:

fattori interni al radara, come le perdite dovute al passaggio del segnale in diversi dispositivi elettronici che generano perdite e distorsioni.

fattori esterni al radar, dovuti alla presenza dell'atmosfera. La differenza tra la perdita di cammino libero e queste perdite sta proprio qui: la perdita di cammino libero si ha anche nel vuoto, quando il cammino del segnale è appunto "libero"; le perdite dovute a fattori esterni sono invece da imputarsi alla presenza del gas atmosferico e sono nulle nel vuoto.

In totale, l'entità di queste perdite è di circa 20 dB.

7.6.5 Il calcolo del range

L'equazione del radar può essere trasformata per mettere in evidenza la portata geografica. Con dei passaggi matematici, l'equazione può essere scritta come:

$$P_R = P_T \left(\frac{G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 \cdot R^4 \cdot L_s} \right) \rightarrow \frac{P_R}{P_T} = \frac{G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 \cdot R^4 \cdot L_s} \rightarrow R^4 \frac{P_R}{P_T} = \frac{G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 \cdot L_s}$$

$$R^4 = \frac{G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 \cdot L_s} \cdot \frac{P_T}{P_R} \rightarrow R = \sqrt[4]{\frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{P_R \cdot (4\pi)^3 \cdot L_s}}$$

Questa espressione ci dice quanto vale la distanza alla quale possiamo ricevere un eco di ritorno. La distanza è massima quando il denominatore è minimo. Il denominatore presenta tre termini, ma solo 1 è variabile: la potenza di ritorno del segnale.

Quindi la massima distanza alla quale si può individuare un bersaglio è quella che si ottiene quando la potenza del segnale di ritorno è la minima percepibile dal sistema.

Questo valore prende il nome di Eco **MDS**, acronimo inglese della frase **MINIMUM DISCERNIBLE SIGNAL ECHO**, cioè minimo segnale distinguibile.

Si tratta, come dice la parola stessa, della minima potenza distinguibile dal rumore di fondo.

Il valore dell'Eco MDS dipende dal rapporto segnale/rumore, chiamato in inglese Noise To Signal Ratio.

Il rumore non può essere eliminato poiché dipende da:

rumore presente nell'atmosfera

rumore generato dai dispositivi interni al radar, che può essere ridotto con un buon progetto dei dispositivi elettronici.

Correlato al noise to signal ratio c'è un altro parametro che è la probabilità di acquisire falsi bersagli, chiamata in inglese FAR, acronimo della frase False Alarm Rate.

Questo parametro indica la probabilità che il dispositivo radar generi un rumore superiore all'MDS Echo rilevando un bersaglio che in realtà non esiste.

Per ridurre la possibilità di falsi bersagli, bisogna avere un alto rapporto segnale /rumore ma questo aumenta la probabilità di non individuare un vero bersaglio poiché viene scambiato per rumore.

IL RADAR AD ONDA CONTINUA

I radar che abbiamo visto fin'ora sono radar ad impulsi, cioè il segnale è emesso solo per un breve periodo, stabilito dal generatore di segnale.

Esistono però altri tipi di radar che utilizzano un segnale continuo, cioè un segnale che non viene mai interrotto. Questi radar si chiamano radar ad onda continua o CW (in inglese Continuous Wave)

Abbiamo detto che, per quanto riguarda i radar ad impulsi, l'eco giunge al ricevitore con un ritardo R rispetto all'istante d'emissione, pari al tempo impiegato a percorrere due volte (andata e ritorno) la distanza D tra il radar e il bersaglio alla velocità della luce c. Il ritardo Δt è legato a D dalla relazione:

$$\Delta t = \frac{2D}{c}$$

I normali radar ad onda continua, invece, non possono rilevare la distanza perché non vi è alcun ritardo tra l'istante di emissione del segnale e il suo ritorno.

Non è quindi possibile rilevare la posizione del bersaglio.

Un radar ad onda continua ha però la possibilità di misurare la variazione istantanea della velocità radiale del bersaglio rispetto al suo ricevitore, e quindi capire se il bersaglio è in avvicinamento o in

allontanamento.

Questo avviene mediante la misurazione diretta della variazione doppler (in inglese Doppler Shift) nel segnale di ritorno.

Un radar di questo tipo è chiamato radar doppler ed è in grado di individuare la velocità del bersaglio, ma non la sua posizione.

Esiste anche un radar ad onda continua in grado di individuare, oltre alla velocità, la posizione del bersaglio. Questo tipo di radar è più complicato e viene chiamato radar ad onda continua e a frequenza modulata.

7.7 Il radar doppler

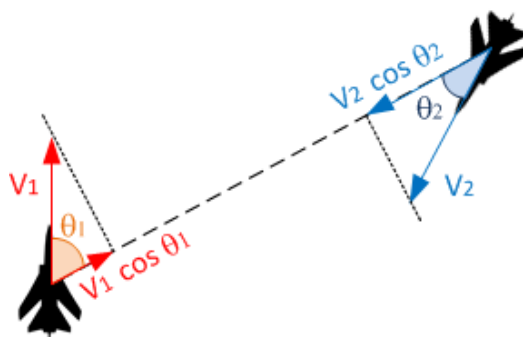
I radar doppler sono in grado di rilevare la velocità del bersaglio sfruttando, come dice il loro nome, l'effetto doppler.

L'effetto doppler, come abbiamo già introdotto nel capitolo sulle onde elettromagnetiche, è un cambiamento apparente di frequenza dovuto al fatto che un osservatore (in questo caso l'antenna del radar) percepisce un'aumento di frequenza quando l'oggetto che ha emesso il segnale eco (in questo caso il bersaglio) è in avvicinamento; quando il bersaglio è in allontanamento la frequenza risulterà invece maggiore.

Misurando la variazione di frequenza tra l'onda emessa dal radar e l'onda ricevuta come eco di ritorno, si può quindi dire se il bersaglio è in avvicinamento o in allontanamento e a che velocità si sta muovendo.

La variazione di velocità che si può percepire è quella radiale: non è quindi la vera velocità del bersaglio, ma solo la componente radiale di questa velocità.

Per comprendere cosa sia la velocità radiale si può osservare l'immagine seguente:



Le velocità vere dei due aeromobili sono v_1 e v_2 ; gli angoli θ_1 e θ_2 sono gli angoli di cui è inclinato il vettore velocità rispetto alla linea che unisce i due aerei.

Le componenti radiali delle due velocità, cioè le proiezioni dei vettori sulla linea che unisce i due aeromobili, sono:

$$v_{1 \text{ radiale}} = v_1 \cdot \cos \theta_1$$

$$v_{2 \text{ radiale}} = v_2 \cdot \cos \theta_2$$

La somma delle due velocità lungo la linea di unione (velocità radiale) è data dalla somma delle singole velocità radiali:

$$v_{radiale} = v_1 \cdot \cos\theta_1 + v_2 \cos\theta_2$$

Questa è la velocità rilevata dal radar doppler.

Se consideriamo un radar fermo al suolo, la velocità è nulla quindi la somma tra la velocità dell'aeromobile e la velocità del radar coincide con la velocità dell'aeromobile.

Quello che consente di calcolare la velocità radiale è la conoscenza della variazione di frequenza apparente.

Con la formula:

$$v_R = \frac{\Delta f \cdot \lambda}{2}$$

Possiamo calcolare v_R conoscendo la lunghezza d'onda iniziale del segnale e la variazione di frequenza tra il segnale di andata e il segnale di ritorno.

7.8 Il radar ad onda continua a frequenza modulata

E' possibile utilizzare un radar ad onda continua per misurare la distanza, oltre alla velocità, attraverso la modulazione di frequenza. Un radar che utilizza questo principio viene chiamato Radar ad onda continua a frequenza modulata.

La modulazione di frequenza si ha quando la frequenza d'oscillazione f della sinusoide:

$$y = Y \sin(2\pi f \cdot t + \varphi)$$

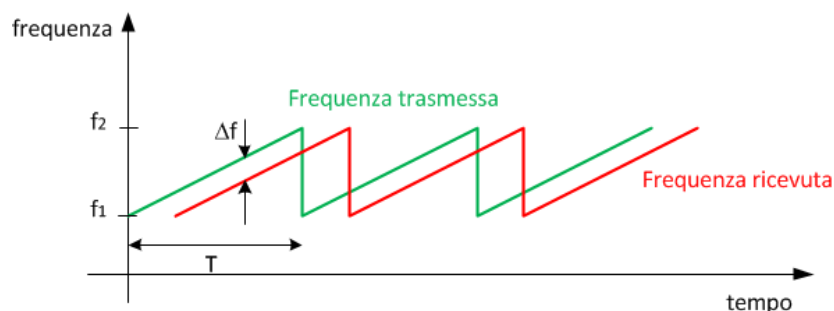
viene fatta variare agendo sul valore di f in modo proporzionale al segnale da trasmettere.



Il tempo di ritardo fra la trasmissione e la ricezione può essere determinato misurando le frequenze del segnale di ritorno; la distanza è quindi determinabile come precedentemente descritto.

La via più semplice per modulare l'onda è di aumentarne linearmente la frequenza.

In altre parole, la frequenza emessa varierà in maniera costante per un certo tempo, per poi ricominciare da capo, dato che, naturalmente, la frequenza non può aumentare all'infinito.



Come si può vedere dallo schema, la frequenza aumenta dal valore base f_1 fino al valore f_2 , per poi tornare bruscamente al valore base e ricominciare a crescere.

Il segnale di ritorno, che è rappresentato tratteggiato, torna con la frequenza che aveva quando ha colpito il bersaglio. Questo significa che il **segnale di andata** (linea verde) e il **segnale di ritorno** (linea rossa) avranno una differenza di frequenza Δf .

I sistemi ad onda continua con frequenza modulata vengono spesso utilizzati per gli altimetri radar, o nei radar di ricerca dei missili, quando stabilire la velocità d'inseguimento consente di sapere il tempo che manca all'impatto.

I sistemi ad onda continua hanno un grande vantaggio rispetto a quello ad impulso: non hanno una distanza minima d'impiego.

Infatti, la distanza minima a cui un radar ad impulsi può funzionare è data dalla durata dell'impulso, in quanto mentre il radar sta trasmettendo non è in grado di ricevere.

Risulta quindi chiaro come per i sistemi di guida dei missili o per i sistemi di rilevamento degli stessi siano impiegati radar ad onda continua.

Lo svantaggio dei sistemi ad onda continua è che richiedono potenze di alimentazione molto elevate e questo ne limita la portata, come vedremo nel prossimo paragrafo in cui parleremo delle potenze in gioco nei sistemi radar.

7.9 La potenza del radar

Il radar, come ogni apparecchiatura elettrica ed elettronica (antenne, generatori, elettrodomestici) presenta due potenze:

La potenza di alimentazione, che rappresenta quello che spendiamo per far funzionare la macchina.

La potenza emessa, che rappresenta quello che la macchina ci dà.

Qualsiasi dispositivo elettronico funziona nello stesso modo e può essere visto come una scatola a cui viene fornita della potenza e che ci restituisce altra potenza:



La potenza di alimentazione rappresenta quello che spendiamo e quindi vogliamo che sia il più bassa possibile. Invece la potenza erogata rappresenta quello che ci dà la macchina e quindi vogliamo che sia il più alta possibile.

Purtroppo non riusciamo ad ottenere da una macchina tutto quello che le forniamo...

Per tener conto delle inevitabili perdite, possiamo introdurre un parametro che abbiamo già visto per le antenne: il rendimento.

Per una qualsiasi macchina, il rendimento è dato dal rapporto tra la potenza in uscita e la potenza in ingresso; e poiché, purtroppo, la potenza in uscita è sempre minore di quella in ingresso, il rendimento sarà un numero minore di 1:

$$\eta = \frac{P_{uscita}}{P_{ingresso}} < 1$$

Anche il radar non fa eccezione: solo una parte della potenza di alimentazione viene effettivamente irradiata nello spazio. L'efficienza di un radar nell'irradiare potenza è dato principalmente dall'antenna utilizzata.

Quando parliamo di potenza di un radar dobbiamo però fare una distinzione tra:

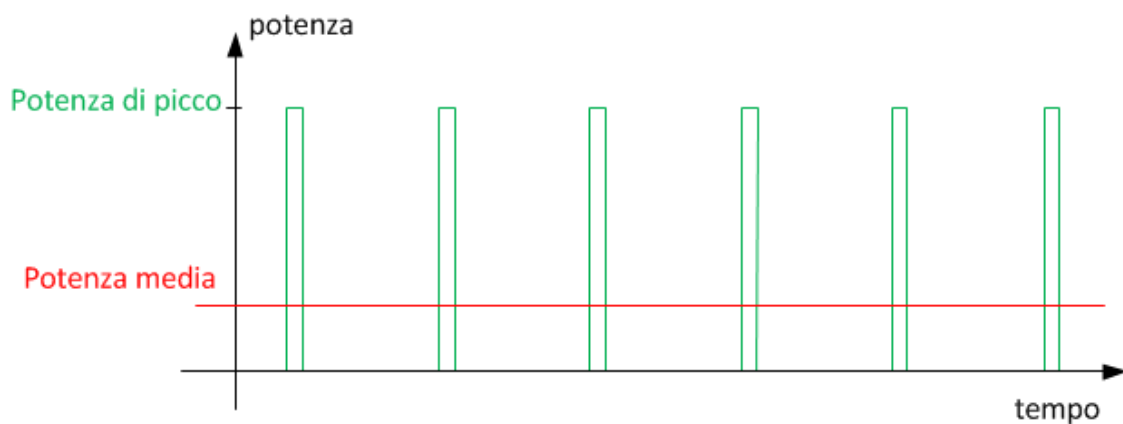
radar ad onda continua, la cui potenza irradiata è data dalla potenza del segnale sinusoidale.

radar ad impulsi la cui potenza si divide in:

potenza di picco: quella che viene irradiata nello spazio durante l'emissione del segnale sinusoidale.

potenza media: quella calcolata sull'intero periodo e che quindi è notevolmente inferiore alla potenza di picco.

Consideriamo il grafico seguente che mostra la potenza irradiata nello spazio al variare del tempo:



La potenza di picco è quella corrispondente al valore massimo, quella che viene irradiata effettivamente nello spazio durante l'emissione del segnale.

La potenza media è la linea tratteggiata: rappresenta la media tra il valore della potenza di picco e il valore nullo che la potenza assume quando il segnale non viene irradiato.

La potenza di picco e la potenza media in un sistema ad impulsi sono legate dal rapporto DC, chiamato duty cycle:

$$Duty\ Cycle = \frac{Potenza\ di\ picco}{Potenza\ media}$$

Per un sistema ad onda continua, il duty cycle vale uno, cioè la potenza di picco è uguale a quella media.

Questo spiega perché la portata dei radar ad onda continua è limitata: se si irradia nello spazio un segnale continuo, la potenza media, che è la potenza totale che "paghiamo", aumenta molto rispetto ad un sistema che trasmette solo per brevi periodi.



Sommaro

1	INTRODUZIONE: LE INFORMAZIONI.....	3
1.1	Il processo di comunicazione.....	3
1.2	Classificazione dei segnali.....	7
1.2.1	Mezzo di trasporto.....	7
1.2.2	Forma d'onda	7
1.2.3	Segnali periodici e aperiodici	8
1.2.4	Segnali analogici e digitali	9
1.3	I segnali sinusoidali.....	11
1.3.1	Rappresentazione dei segnali	12
1.3.2	Frequenza, periodo e lunghezza d'onda	14
2	LE TELECOMUNICAZIONI	18
2.1	Breve storia delle telecomunicazioni.....	18
2.2	Classificazione dei sistemi di telecomunicazione.....	20
2.3	Il mezzo di trasmissione.....	21
2.3.1	Linee di trasmissione	21
2.3.2	Guide D'onda.....	22
2.3.3	Spazio	23
3	LE ONDE ELETTROMAGNETICHE.....	25
3.1	La classificazione delle onde.....	26
3.1.1	Onde trasversali e onde longitudinali	27
3.1.2	Onde elastiche e onde elettromagnetiche.....	28
3.1.3	Lo spettro elettromagnetico	32
3.1.4	La polarizzazione delle onde elettromagnetiche	32
3.2	Onde elettromagnetiche e materia	33
3.2.1	L'attraversamento di un mezzo materiale	34
3.2.2	La riflessione di un' onda	37
3.2.3	L'assorbimento delle onde.....	37
3.3	La propagazione delle onde elettromagnetiche	38
3.3.1	Onde terrestri di superficie.....	38
3.3.2	Onde terrestri dirette	39
3.3.3	Onde terrestri riflesse dal suolo.....	39
3.3.4	Onde spaziali (o ionosferiche).....	39
3.4	Le radiofrequenze.....	41
3.5	Fenomeni associati alle onde: l'eco e l'effetto doppler	42

3.5.1	L'eco	43
3.5.2	L'effetto doppler	44
4	GENERAZIONE DELLE ONDE: GLI OSCILLATORI	47
4.1	Gli amplificatori	47
4.2	Il deciBel	48
4.3	Il Magnetron	50
5	LA MODULAZIONE	53
5.1	Segnale portante e segnale modulante	53
5.2	La banda di frequenza	55
5.2.1	La modulazione di ampiezza	56
5.2.2	La modulazione di frequenza	59
5.2.3	La modulazione di fase	60
5.3	Confronto tra i tipi di modulazione.....	62
6	LE ANTENNE.....	63
6.1	Principio di funzionamento delle antenne.....	63
6.1.1	L'antenna come circuito risonante serie.....	65
6.2	Il solido di radiazione.....	65
6.2.1	La forma del diagramma di radiazione	68
6.3	I parametri delle antenne	69
6.3.1	Guadagno d'antenna	69
6.3.2	Angolo di apertura	70
6.3.3	Area d'intercettazione	71
6.3.4	Rapporto lobo principale-lobo posteriore	72
6.3.5	Rendimento	72
6.4	Le antenne non direttive	73
6.4.1	Dipolo elementare	74
6.4.2	Antenna Hertziana o dipolo a mezz'onda	74
6.4.3	Dipolo $\lambda/4$ o antenna Marconiana.....	75
6.4.4	Dipolo ripiegato	76
6.5	Le antenne direttive	77
6.5.1	Antenna Yagi.....	77
6.5.2	Antenne a paraboloide	78
6.5.3	Antenna a parabola	79
6.5.4	Antenna fan-beam	80
6.5.5	Antenna cassegrain.....	81

6.5.6	Antenna a V	82
6.5.7	Antenna a telaio	83
6.5.8	Antenna a scansione di fase	84
7	IL RADAR	86
7.1	Classificazione dei radar	86
7.1.1	Numero di antenne.....	86
7.1.2	Mobilità del sistema	86
7.1.3	Attività del bersaglio.....	87
7.1.4	Funzione del radar	87
7.1.5	Tipo di onda utilizzata.....	87
7.1.6	Le frequenze impiegate dai radar	88
7.2	Storia del radar	89
7.3	Componenti del radar ad impulsi	90
7.3.1	Radar monostatico.....	90
7.3.2	Radar Bistatico.....	93
7.4	I tipi di antenne usate nei radar.....	94
7.4.1	Antenne a riflettore parabolico	94
7.4.2	Antenne a scansione di fase	95
7.5	Calcolo della posizione	95
7.6	I parametri del radar ad impulsi	97
7.6.1	Durata dell'impulso e frequenza di ripetizione dell'impulso	97
7.6.2	La portata del radar	98
7.6.3	La risoluzione.....	100
7.6.4	L'equazione della portata	103
7.6.5	Il calcolo del range	105
7.7	Il radar doppler.....	107
7.8	Il radar ad onda continua a frequenza modulata.....	108
7.9	La potenza del radar	109