

**APPUNTI**  
**ONDE ELETTROMAGNETICHE**  
**ED ANTENNE**

**LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE  
ELETTROMAGNETICHE NELLO SPAZIO**



**MICHAEL FARADAY**  
(1791-1867)



**JAMES CLERK MAXWELL**  
(1831-1879)



**HEINRICH HERTZ**  
(1857-1894)



**GUGLIELMO MARCONI**  
(1874-1937)

## Cenni di storia delle telecomunicazioni

L'attuale frenetico sviluppo delle tecnologie telematiche, spinto verso nuovi, ambiziosi traguardi dal processo di globalizzazione dell'economia, concerne sofisticati sistemi di telecomunicazioni (satelliti, internet, telefonia

cellulare, sistemi a fibre ottiche), la cui realizzazione si basa sulle applicazioni delle ricerche teoriche e sperimentali degli ultimi 200 anni.

Dopo la scoperta della pila elettrica (Alessandro Volta, 1800), alcuni grandi fisici del XIX secolo, Faraday, Ampere, Lord Kelvin, Maxwell ed Hertz, svilupparono la teoria dell'elettromagnetismo, sulle cui leggi si basa il funzionamento dei sistemi di telecomunicazioni.

Si deve in particolare al genio di Guglielmo Marconi lo sviluppo delle radiocomunicazioni, inizialmente concernenti i sistemi radiotelegrafici, e successivamente quelli radiofonici e radiotelevisivi.

Le due leggi fisiche fondamentali che descrivono i fenomeni elettromagnetici furono scoperte da Ampere (legge di concatenazione delle linee di forza del campo magnetico generato da un circuito elettrico) e da Faraday (legge dell'induzione elettromagnetica, 1831).

Maxwell infine, nel 1873 pubblicò il trattato "Treatise of electricity and magnetism", nel quale espone le sue quattro celebri equazioni che descrivono sinteticamente ed in forma matematica ineccepibile tutti i fenomeni elettromagnetici.

Egli inoltre, con elaborazioni esclusivamente teoriche, poté prevedere l'esistenza di onde elettromagnetiche, costituite da campi elettrici e magnetici variabili che si propagano nel vuoto con una velocità coincidente con quella della luce (300000 km/s), trasportando energia di natura elettromagnetica;

conseguentemente elaborò la teoria elettromagnetica della luce, secondo la quale la luce è costituita da onde elettromagnetiche con frequenza elevatissima, da  $3,9 \cdot 10^{14}$  Hz (luce rossa) a  $7,5 \cdot 10^{14}$  Hz (luce blu).

Maxwell sviluppò ed elaborò dal punto di vista teorico il concetto di campo, già introdotto da Faraday con considerazioni sperimentali.

Per Maxwell il campo elettromagnetico è una realtà fisica che non ha bisogno di alcun mezzo per propagarsi, diversamente da quanto sostenevano altri fisici, tra i quali Hertz, che ipotizzavano la presenza nello spazio di uno speciale mezzo elastico, l'etere cosmico, attraverso il quale si sarebbero dovute propagare le onde elettromagnetiche, ed in particolare quelle luminose, in modo analogo alla propagazione delle onde sonore nell'aria.

L'ipotesi dell'esistenza dell'etere cosmico fu definitivamente abbandonata in seguito ai reiterati risultati negativi della celebre esperienza di Michelson e Morley (1887), il cui scopo era appunto quello di dimostrare ,con uno speciale interferometro,l'inesistenza dell'etere cosmico.

Hertz, parecchi anni dopo la morte di Maxwell, riuscì a dimostrare sperimentalmente, attraverso una serie di celebri esperienze, che le onde elettromagnetiche da lui generate con speciali oscillatori a scintilla, si comportano, in determinate condizioni sperimentali, come le onde luminose,ed evidenziò fenomeni di riflessione, rifrazione,interferenza e polarizzazione, fornendo la prova definitiva della natura elettromagnetica della luce, stabilita teoricamente da Maxwell.

Guglielmo Marconi, basandosi sulle esperienze effettuate sulle onde elettromagnetiche da Hertz in Germania e da Augusto Righi (Università di Bologna), ebbe tre geniali idee:

- 1) utilizzare le onde elettromagnetiche, prima di lui studiate senza finalità pratiche, per trasmettere segnali telegrafici;
- 2) utilizzare ,sia nel trasmettitore che nel ricevitore, un sistema irradiante basato sull'antenna e sul collegamento a terra, per favorire la propagazione delle onde elettromagnetiche a grande distanza;
- 3)utilizzare lunghezze d'onda molto maggiori (onde decametriche ed ettometriche) di quelle impiegate nelle esperienze effettuate da Hertz e Righi (onde decimetriche e millimetriche).

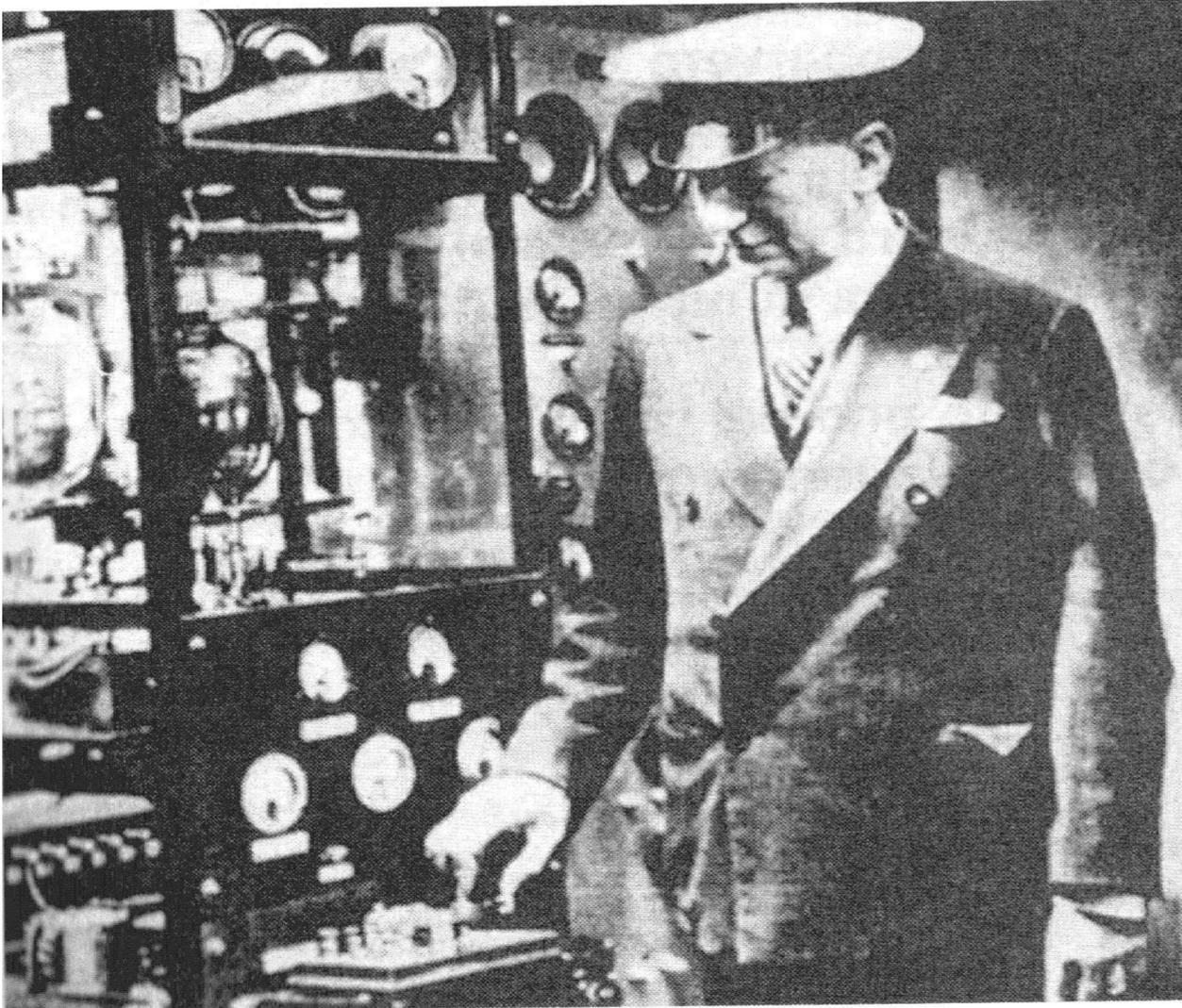
Marconi nel 1895,nella sua villa di Pontecchio (Villa "Grifone"-Bologna), riuscì a trasmettere segnali elettrici, prima da una stanza all'altra e poi al di là di una collina.

Perfezionando i dispositivi con la sua eccezionale abilità di sperimentatore, riuscì a raggiungere distanze sempre più grandi fino alla celebre esperienza del primo collegamento radiotelegrafico transatlantico (12 dicembre 1901) , effettuato tra la stazione trasmittente di Poldhu (Corno-vaglia) e l'isola canadese di San Giovanni di Terranova.

In quell'esperienza adoperò onde elettromagnetiche della lunghezza di 1000 m, atte a seguire la curvatura terrestre ,sfidando le previsioni pessimistiche della maggior parte dei fisici ,tra i quali Lord Kelvin, che ritenevano impossibile la riuscita dell'esperimento.

Successivamente, dopo il 1906, utilizzando i tubi a vuoto (valvole termoioniche) introdotte da Fleming (diodo) e De Forest (triode), perfezionò notevolmente i suoi apparati ,dando impulso allo sviluppo della radiofonia (dal 1915 in avanti) . A Marconi fu conferito nel 1909, assieme al Prof. Braun,il premio Nobel per la fisica.

Il resto della sua vita di sperimentatore lo dedicò alla realizzazione ed al perfezionamento dei sistemi di radiocomunicazioni ad onde corte (decametriche),cortissime (metriche) ed a microonde.



Guglielmo Marconi sulla nave Elettra, dalla quale, il 25 marzo 1901, inviò un segnale telegrafico che giunse fino a Sydney, in Australia (16.500 Km.). L'esperimento riuscì, facendo accendere le lampade del municipio della città.

## Esposizione elementare della teoria elettromagnetica di Maxwell

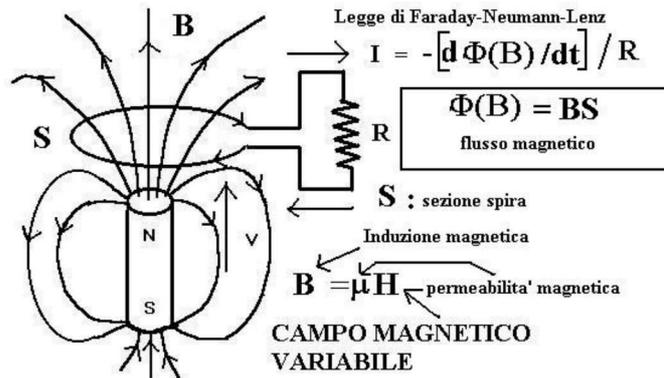


Fig. 11

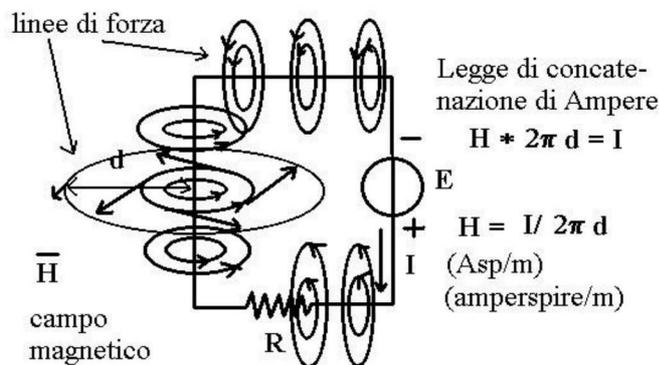


Fig. 12

La fig. 11 illustra la legge dell'induzione elettromagnetica, in base alla quale un flusso magnetico variabile nel tempo, generato in qualsiasi modo, per es. spostando un magnete rispetto al circuito elettrico indotto o facendo variare l'intensità di corrente nel circuito che genera il campo magnetico (circuito inducente), dà origine ad una forza elettromotrice indotta, il cui valore si ottiene calcolando la derivata rispetto al tempo, cambiata di segno, del flusso magnetico (in Weber = Volt\*secondo) concatenato al circuito indotto. Se il circuito indotto è chiuso, si genera in esso una corrente indotta che si ottiene applicando la legge di Ohm, cioè dividendo il valore della f.e.m.

indotta per la resistenza ohmica  $R$  del circuito.

Il segno meno esprime la legge di Lenz, che afferma che la corrente che

circola per effetto della f.e.m. indotta, ha sempre verso tale da opporsi alla causa che l'ha generata. Per esempio, se la corrente indotta è causata dall'avvicinamento di un magnete o di un circuito inducente al circuito indotto, la corrente indotta circola in un verso tale da generare un campo magnetico che tende ad allontanare il magnete o il circuito inducente. La fig. 12 illustra la legge di concatenazione di Ampere, che afferma che una corrente elettrica genera un campo magnetico, la cui intensità  $\mathbf{H}$  (in amperspire/metro), nel caso particolare di un filo rettilineo percorso da una corrente di intensità  $\mathbf{I}$ , è costante in tutti i punti di una linea di forza, per motivi di simmetria, ed è tale che, moltiplicata per la lunghezza della circonferenza (linea di forza concatenata al filo) di raggio  $\mathbf{d}$  (distanza del punto considerato dal filo), uguaglia l'intensità di corrente  $\mathbf{I}$ .

In questo caso particolare il campo magnetico è un vettore tangente alle linee di forza (circonferenze concentriche) in ogni loro punto, ed ha una intensità inversamente proporzionale alla distanza  $\mathbf{d}$  del punto che si considera dal filo.

La legge di Ampere è stata generalizzata da Maxwell, il quale, elaborando la sua teoria, con considerazioni esclusivamente fisico-matematiche, dedusse che un campo magnetico variabile può essere generato, oltreché da una corrente che fluisce in un circuito elettrico, anche da un campo elettrico variabile (fig. 13). Supponiamo adesso di considerare, nel

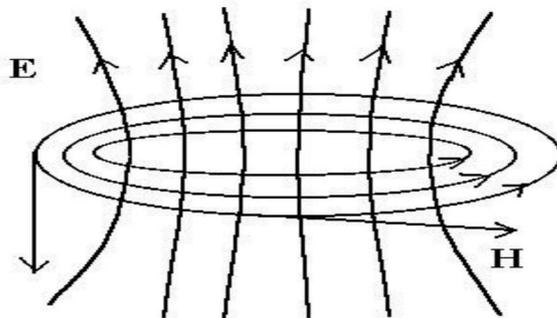


Fig. 13

vuoto una zona priva di cariche elettriche e di conduttori percorsi da corrente, ma attraversata dalle linee di forza di un campo elettrico variabile. Se si indica con  $S$  l'area del cerchio delimitato da una qualsiasi linea di forza

(circonferenza di raggio  $R$ ) del campo magnetico variabile  $\mathbf{H}$  associato al campo elettrico variabile  $\mathbf{E}$ , si può scrivere l'equazione:

$$\mathbf{H}(t) 2\pi R = d(S \epsilon_0 \mathbf{E}(t)) / dt = S \epsilon_0 d\mathbf{E}(t) / dt$$

Pertanto il campo magnetico variabile  $\mathbf{H}(t)$  generato nel vuoto dal campo elettrico variabile  $\mathbf{E}(t)$  è dato dall'espressione:

$$\mathbf{H}(t) = (S \epsilon_0 / 2\pi R) d\mathbf{E}(t) / dt ,$$

dove  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m è la costante dielettrica del vuoto nel sistema M.K.S.A.

All'espressione  $S \epsilon_0 d\mathbf{E}(t) / dt$  Maxwell diede il nome di "corrente di spostamento", in quanto nel vuoto si genera un campo magnetico variabile per effetto di un campo elettrico variabile che si propaga a distanza dalla sorgente.

L'equazione considerata, scritta in forma elementare nel caso particolare preso in esame, è una delle 4 equazioni di Maxwell che descrivono il campo elettromagnetico nel vuoto.

Un'altra equazione è fornita dalla legge di Faraday-Neumann-Lenz considerata in precedenza (fig. 11).

Considerando invece della corrente indotta  $\mathbf{I}$  in una spira circolare di raggio  $R$  ed area  $S$ , il campo elettrico indotto  $\mathbf{E}(t)$ , che dà origine, se la spira di lunghezza  $2\pi R$  è chiusa, alla corrente indotta, si ha:

$$\text{f.e.m. indotta} = \mathbf{E}(t) 2\pi R = - d(\mathbf{B}(t) S) / dt = - \mu_0 S d\mathbf{H}(t) / dt.$$

Pertanto il campo magnetico variabile  $\mathbf{H}(t)$  genera il campo elettrico variabile

$$\mathbf{E}(t) = - (S \mu_0 / 2\pi R) d\mathbf{H}(t) / dt,$$

dove  $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7}$  H/m è la permeabilità magnetica del vuoto nel sistema M.K.S.A..

Bisogna notare che, avendo considerato una zona di spazio vuoto, priva di conduttori percorsi da correnti elettriche, il campo elettrico  $\mathbf{E}(t)$  dipende esclusivamente dalla presenza di un flusso magnetico variabile concatenato ad una circonferenza di raggio  $R$  e non dall'effettiva presenza di una spira conduttrice .

Le altre due equazioni, che non riportiamo, descrivono le proprietà del campo elettrostatico generato da una distribuzione di cariche elettriche e la caratteristica fondamentale del campo magnetico, le cui linee di forza, a differenza di quelle del campo elettrico, sono sempre chiuse (ricordiamo l'esperienza della calamita spezzata e l'impossibilità di separare un polo magnetico nord da un polo magnetico sud).

Le due equazioni scritte sono importantissime, in quanto, se vengono espresse mediante speciali operatori differenziali che non consideriamo per semplicità, implicano l'esistenza di onde elettromagnetiche che si propagano nel vuoto con velocità  $c = 300000 \text{ Km/s} = 1/\sqrt{(\epsilon_0 \mu_0)}$ .

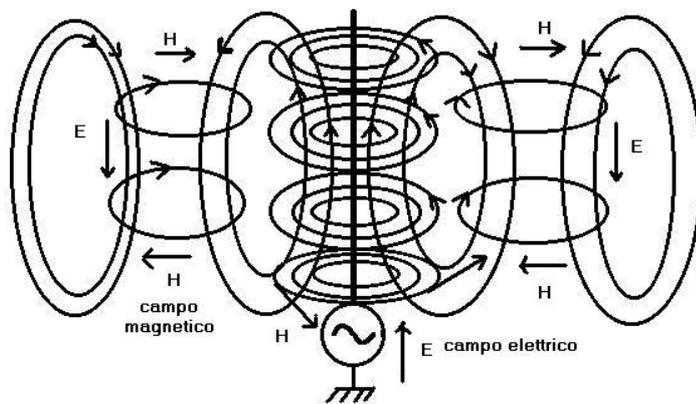


Fig. 14

La Fig. 14 mostra alcune linee di forza del campo elettromagnetico generato da un conduttore irradiente (antenna) percorso dalla corrente a radiofrequenza generata da un trasmettitore.

Le linee di forza del campo magnetico (circonferenze concentriche) generato dalla corrente d'antenna, sono concatenate alle linee di forza del campo elettrico variabile ad esse associato; ed ancora le linee di forza di questo sono concatenate alle linee di forza del campo magnetico ad esse associato, e così via. Pertanto il campo elettromagnetico generato dall'antenna si propaga a distanza grazie all'intima connessione tra campi elettrici e magnetici variabili descritta dalle equazioni di Maxwell.

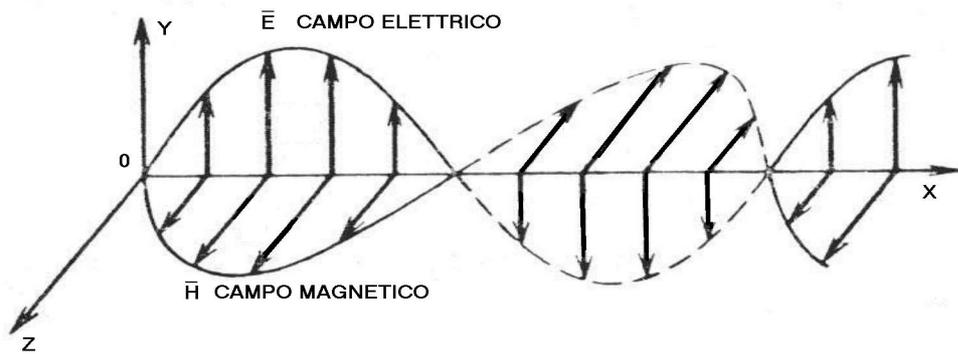


Fig. 15

La Fig. 15 mostra un'onda elettromagnetica piana costituita da un campo elettrico e da un campo magnetico sinusoidali, che oscillano rispettivamente nel piano xy e nel piano xz.

Bisogna tenere presente che un'onda elettromagnetica assume questo comportamento a grande distanza dal trasmettitore, poiché è lecito approssimare una piccola calotta sferica con una superficie piana, ritenendo quindi che entrambi i vettori di campo, in prima approssimazione, dipendano soltanto da x (direzione di propagazione dell'onda).

La lunghezza d'onda  $\lambda = c/f$  corrisponde allo spazio percorso dall'onda in un periodo, e coincide con la distanza tra due punti associati alla stessa fase, in particolare alla distanza tra due massimi o tra due minimi.

L'onda elettromagnetica piana di fig. 15 è descritta dalle seguenti espressioni:

$$E(t) = E_{\max} \sin(kx - \omega t),$$

$$H(t) = H_{\max} \sin(kx - \omega t),$$

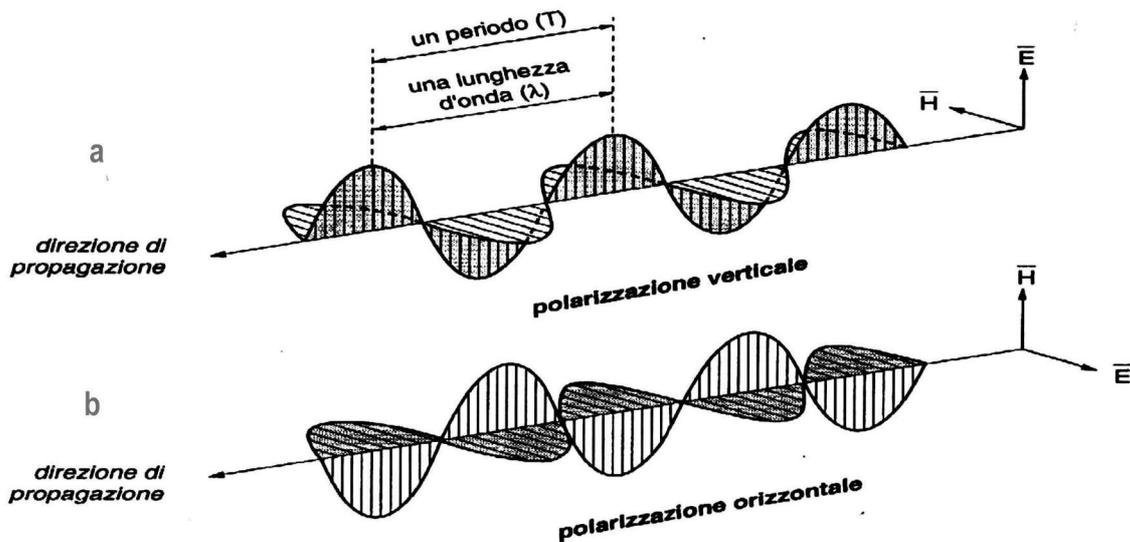
dove  $k = 2\pi/\lambda$  è il numero d'onda,  $\omega = 2\pi f$  è la pulsazione ed

$$E_{\max} / H_{\max} = Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120 \pi = 377 \Omega$$

(impedenza caratteristica del vuoto).

Un'onda elettromagnetica piana è caratterizzata inoltre dal suo tipo di

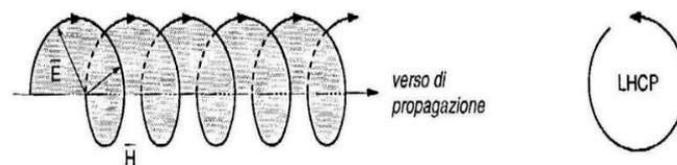
polarizzazione, che generalmente è verticale (fig. 16 a) o orizzontale (fig. 16 b), a seconda che il campo elettrico oscilli verticalmente o orizzontalmente.



*· Onda piana sinusoidale con polarizzazione verticale (a) e orizzontale (b); significato di lunghezza d'onda.*

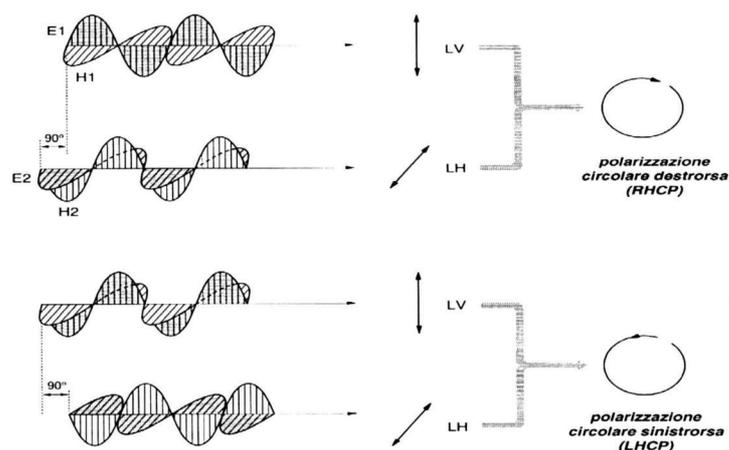
Fig. 16

In particolare, un'onda elettromagnetica piana ottenuta componendo due onde elettromagnetiche piane con piani di polarizzazione perpendicolari e sfasate di  $90^\circ$  l'una rispetto all'altra (fig. 18), presenta una polarizzazione circolare, che può essere destrorsa o sinistrorsa, a seconda che guardando verso la sorgente si vedano i vettori  $E$  ed  $H$  ruotare in senso orario o rispettivamente antiorario. In questo caso i vettori  $E$  ed  $H$  descrivono un moto elicoidale, mantenendo l'ampiezza costante ed "avvitandosi" intorno alla direzione di propagazione (fig. 17).



*Nella polarizzazione circolare (sinistrorsa - LHCP, nel disegno) i vettori  $E$  e  $H$  sono costanti in ampiezza e la loro estremità descrive un moto di tipo elicoidale.*

Fig. 17



La polarizzazione circolare è il risultato della combinazione di due onde polarizzate linearmente su piani ortogonali e sfasate nel tempo di  $90^\circ$ .

Fig. 18

## Antenne

Un'antenna è un conduttore irradiante, isolato da terra e percorso dalla corrente ad alta frequenza erogata dal trasmettitore; può essere considerata un circuito a parametri distribuiti che deve risuonare alla stessa frequenza del segnale da irradiare, al fine di rendere massima la potenza elettromagnetica irradiata nello spazio rispetto a quella elettrica fornita dal trasmettitore.

Un'antenna è caratterizzata da tre parametri:

- l'impedenza  $Z_a$ , che in prima approssimazione si riduce ad una resistenza (resistenza di irradiazione  $R_a$ ), e rappresenta il rapporto tra la tensione a radiofrequenza applicata all'antenna e la corrente assorbita;
- il guadagno  $G$ , che è il rapporto, a parità di campo elettrico generato ad una certa distanza, se si tratta di antenna trasmittente, tra la potenza/mq irradiata nella direzione di massima efficienza e la potenza/mq irradiata da un'ideale antenna isotropa (che irradia con la stessa efficienza in tutte le direzioni).

Nel caso di un'antenna ricevente,  $G$  è invece il rapporto tra la potenza a radiofrequenza fornita al ricevitore nella direzione di massima efficienza di captazione e la potenza a radiofrequenza fornita al ricevitore da un'antenna isotropa (che capta con la stessa efficienza in tutte le direzioni);

- la direttività, che dipende dal guadagno e da come varia la potenza irradiata o captata in funzione dell'angolo (diagramma di

irradiazione in coordinate polari);

-la larghezza di banda  $B$ , che è l'intervallo di frequenza entro il quale un'antenna è in grado di ricevere o irradiare con la massima efficienza.

Per ottenere il massimo trasferimento di potenza dal trasmettitore all'antenna ed ottimizzare l'irradiazione della potenza elettromagnetica nello spazio, occorre adattare l'impedenza del trasmettitore all'impedenza caratteristica della linea di trasmissione e l'impedenza caratteristica di quest'ultima all'impedenza  $Z_a$  dell'antenna, in modo tale da ottenere un ROS vicino all'unità. Il ROS si misura con il ROS-metro, che viene inserito tra il trasmettitore e la linea di trasmissione.

Esistono diversi tipi di antenne : dipoli, antenne a cortina (con diversi elementi irradianti, antenne paraboliche ed a tromba per microonde, antenne ad elica, antenne logaritmiche.

Le antenne più semplici sono i dipoli : il dipolo Hertziano o antenna a semionda (fig. 19) ed il dipolo marconiano o antenna a quarto d'onda (figg. 20 e 21).



Fig. 19

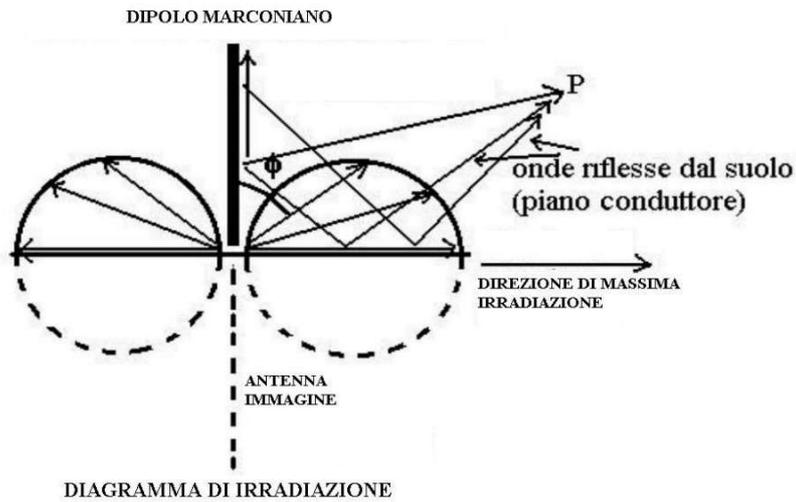


Fig. 20

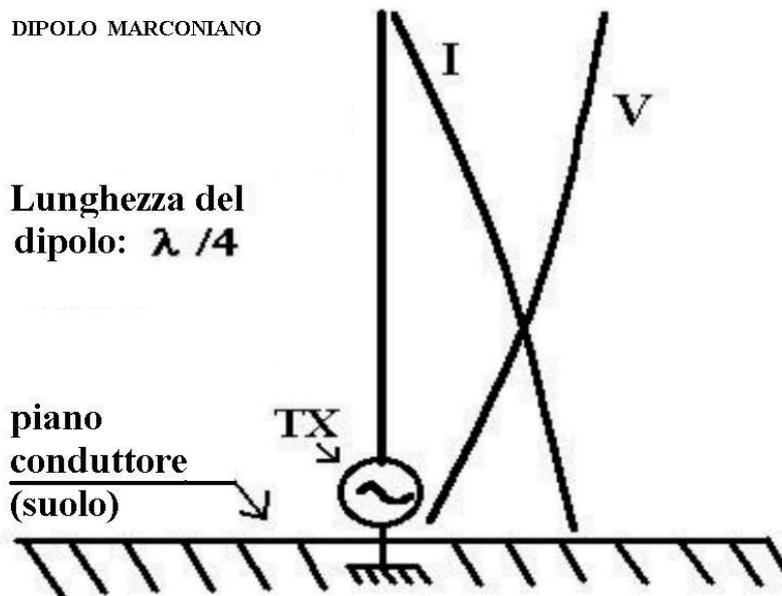


Fig. 21

Il **dipolo hertziano** è un conduttore lungo  $\lambda / 2$ , alimentato dal trasmettitore in corrispondenza del punto medio.

Pertanto, poiché la corrente nel punto medio è uguale a quella erogata dal trasmettitore, si ha in tal punto un massimo (ventre) di corrente ed un minimo (nodo) di tensione. Alle estremità invece si hanno due nodi

di corrente e due ventri di tensione in opposizione di fase tra loro.

L'impedenza caratteristica  $Z_a = R_a + jX_a$ , che in pratica coincide con la resistenza di irradiazione  $R_a$ , è pari a circa  $73 \Omega$ , se il conduttore è molto sottile, e diminuisce all'aumentare del diametro.

Il guadagno  $G$  è pari a  $1,64 = 10 \log_{10} 1,64 = 2,148$  dB.

Dal diagramma di irradiazione di un dipolo hertziano disposto verticalmente, fig. 19, si vede che la potenza irradiata tende a concentrarsi nel piano orizzontale passante per il punto medio del dipolo.

Il **dipolo marconiano** (antenna in  $\lambda / 4$ ), molto usato nelle versioni a stilo (antenne telescopiche di lunghezza regolabile) e ground plain (antenne con un semidipolo verticale e quattro semidipoli orizzontali ad inclinazione regolabile, per ottimizzare l'adattamento di impedenza), è costituito da un semidipolo disposto verticalmente ed alimentato alla base dal trasmettitore, che a sua volta è collegato con l'altro morsetto a terra.

In tal modo alla base si ha un ventre di corrente ed un nodo di tensione (figg. 20 e 21).

Essendo il suolo assimilabile ad un piano conduttore che riflette le onde elettromagnetiche, l'antenna marconiana, alla quale, grazie alla riflessione, è associata un'antenna immagine (virtuale) corrispondente al semidipolo mancante, necessita di metà potenza rispetto al dipolo hertziano, a parità di campo prodotto.

Infatti la potenza irradiata dal trasmettitore si concentra in una semisfera, invece di distribuirsi in una sfera, come avviene nel dipolo hertziano, consentendo di ottenere un guadagno quasi doppio rispetto  $G = 3,3$  (5,18 dB) rispetto a quello (1,64) del dipolo hertziano ed una resistenza di irradiazione intorno a  $30 \Omega$ .

Calcolo del campo elettrico prodotto in un punto a distanza  $R$  dall'antenna.

La potenza per unità di superficie ( $W/mq$ ) trasportata da un'onda elettromagnetica, prende il nome di densità di potenza e corrisponde al modulo del vettore di Poynting  $\mathbf{S} = \mathbf{E} \wedge \mathbf{H}$  ( $\mathbf{S}$  prodotto vettoriale perpendicolare al piano determinato dai vettori  $\mathbf{E}$  ed  $\mathbf{H}$ ).

In pratica si considera il valor medio della densità di potenza in un periodo, dato dal prodotto dei valori efficaci del campo elettrico e del campo magnetico ( $E = E_{\max} / \sqrt{2}$ ;  $H = H_{\max} / \sqrt{2}$ ):

$$S = E_{\max} H_{\max} / 2 \text{ (W/mq)}.$$

Se si considera che la potenza  $P$  irradiata da un'antenna isotropa, a distanza  $R$  dal trasmettitore, si distribuisce sulla superficie di una sfera di raggio  $R$ , si ha:  $S = P / (4\pi R^2)$ .

Inoltre , essendo  $S = E_{\max} H_{\max} / 2 = E_{\max}^2 / (2Z_0)$  , si ha:

$$P / (4\pi R^2) = E_{\max}^2 / (2Z_0),$$

ed infine si ottiene:  $E_{\max} = (\sqrt{Z_0 P / (2\pi)}) / R = (\sqrt{60 P}) / R$ .

Peranto l'intensità del campo elettrico e del campo magnetico è inversamente proporzionale alla distanza R tra il ricevitore ed il trasmettitore.

Se invece si considera un' antenna direttiva con guadagno G, si ha:

$$G P / (4\pi R^2) = E_{\max}^2 / (2Z_0),$$

ed infine si ottiene:  $E_{\max} = (\sqrt{Z_0 G P / (2\pi)}) / R = (\sqrt{60 G P}) / R$ ,

in quanto la potenza si concentra nella direzione di massima irradiazione.

Per quanto concerne l'esigenza di impiegare segnali ad alta frequenza per trasmettere l'informazione, bisogna considerare che l'intensità delle cosiddette "correnti di spostamento maxwelliane" dipende dalla derivata del campo elettrico rispetto al tempo:

Se  $E = E_{\max} \sin (k x - \omega t)$  (onda elettrica) , si ha:

$$dE/dt = - E_{\max} \omega \cos (k x - \omega t),$$

da cui si nota che il valore della derivata temporale del campo elettrico è direttamente proporzionale alla pulsazione  $\omega$  e quindi alla frequenza.

Nel caso delle correnti alternate a frequenza industriale (50 Hz) , la lunghezza d'onda è così grande (6000 km), che il tempo che impiega il campo elettrico a propagarsi con la velocità della luce in un tratto di lunghezza comparabile con le dimensioni del circuito, è trascurabile rispetto al tempo necessario per per percorrere un tratto pari alla lunghezza d'onda, e quindi rispetto al periodo della corrente alternata ( $T = 1/f = 1/50 = 0,02$  s).

Di conseguenza la derivata del campo elettrico è così piccola da non consentire la propagazione del campo a distanza , ed il campo elettromagnetico è semplicemente quello associato alla corrente che passa nel circuito (corrente di conduzione).

## Lo spettro elettromagnetico

"In principio" la suddivisione dello spettro elettromagnetico che poteva essere utilizzato per la radiodiffusione, venne fatta per lunghezza d'onda:

- Onde lunghe (OL), Long waves (LW) (frequenze fino a 500 kHz)
- Onde medie (OM), Medium waves (MW) (da 500 a 1600 kHz)
- Onde corte (OC), Short waves (SW) (da 1600 kHz a 30 MHz)
- Onde ultracorte (da 30 a 300 MHz)
- Microonde (da 300 MHz a 300 GHz)

Quando si capì che la diffusione sopra i 30 MHz si sarebbe sempre più sviluppata, si decise di dare una suddivisione delle frequenze più razionale e basata sulla frequenza (espressa in Hz o, meglio, nei suoi multipli : kHz, MHz, GHz, THz (Tera= $10^{12}$  Hz), PHz (Peta= $10^{15}$  Hz), EHz (Esa= $10^{18}$  Hz) .

La vecchia denominazione è rimasta comunque per indicare le bande di frequenza dedicate alla radiodiffusione.

Ricordiamo che la relazione che lega la lunghezza d'onda alla frequenza, nel vuoto e praticamente anche nell'aria, è:

$$\lambda = c / f$$

Dove:  $\lambda$ : lunghezza d'onda (metri)

$f$ : frequenza (Hertz)

$c$ : velocità della luce nel vuoto in metri al secondo

(costante uguale a 299792458 m/s) = ~ 300000 Km/s = 3 \* 10<sup>8</sup> m/s.

La suddivisione attuale è:

- **VLF** (very low frequencies, 3 - 30 kHz), onde decakilometriche (circa 100 - 10 km)
- **LF** (low frequencies, 30 - 300 kHz), onde kilomeriche (circa 10 - 1 km)
- **MF** (medium frequencies, 300 - 3000 kHz), onde ettometriche (circa 1000 - 100 m)
- **HF** (high frequencies, 3 - 30 MHz), onde decametriche (circa 100 - 10 m)
- **VHF** (very high frequencies, 30 - 300 MHz), onde metriche (circa 10 - 1 m)
- **UHF** (ultra high frequencies, 300 - 3000 MHz), onde decimetriche (circa 100 - 10 cm)
- **SHF** (super high frequencies, 3 - 30 GHz), onde centimetriche (circa 10 - 1 cm)
- **EHF** (extra high frequencies, 30 - 300 GHz), onde millimetriche (circa 10 - 1 mm)

La definizione di microonde, al giorno d'oggi, si preferisce associarla a SHF e EHF (UHF ormai non viene più ritenuta banda di microonde).

Le frequenze sotto le VLF sono dette basse frequenze (**BF**) e sono

utilizzate come segnali elettrici (trasmetterli sarebbe molto difficile perché richiedono antenne di dimensioni molto grandi) .

Ricordiamo che l'audio telefonico raggiunge 3400 Hz, l'audio ad alta fedeltà in modulazione di frequenza i 15 kHz, mentre l'audio ad alta fedeltà degli apparati di registrazione raggiunge anche i 20 kHz, dopo i quali l'orecchio umano, solitamente, non percepisce nulla).

Immediatamente sopra le EHF troviamo l'infrarosso (**IR**, la prima parte si chiama infrarosso lontano, quello più "vicino" alla luce visibile si chiama infrarosso vicino) che si estende fino a circa 400 THz (750 nm). La trasmissione su IR si usa (infrarosso vicino) per la trasmissione dati su fibra ottica (diodi laser) e per i telecomandi domestici (TV, video-recorder, TV-SAT, HI-FI).

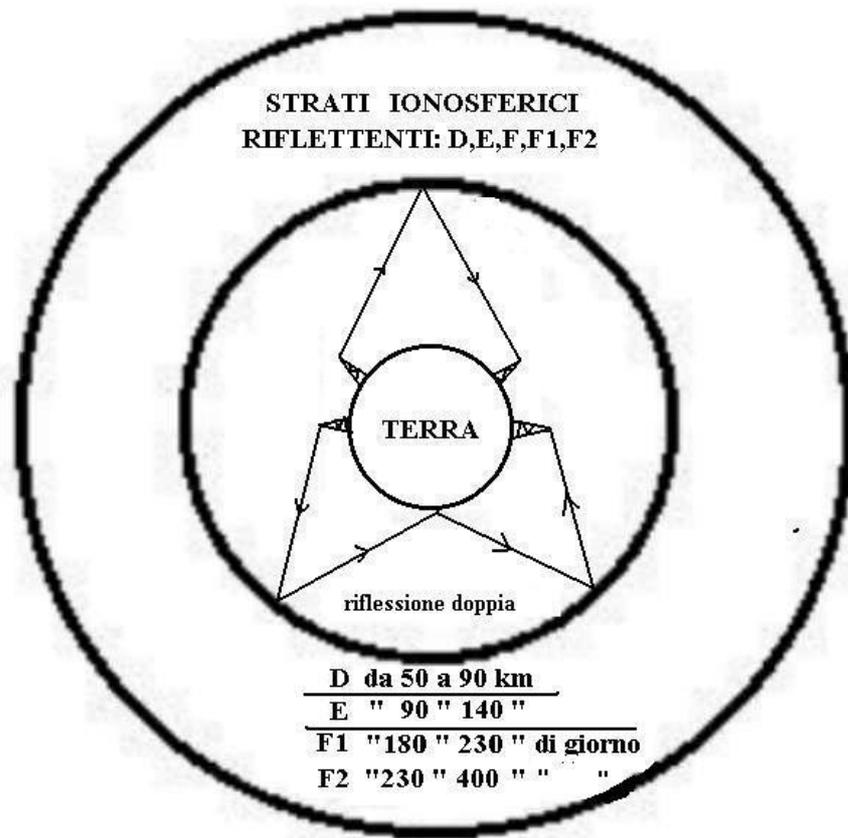
Di seguito vengono riportati la suddivisione da 30 kHz a 300 GHz dello spettro e l'elenco delle frequenze assegnate a servizi di radio e telediffusione, telefonia, radioamatori e comunicazioni via satellite.

Nell'ultima colonna di ogni tabella è riportato il nome "convenzionale" che viene dato alla gamma.

#### LF (30 - 300 kHz)

<b>kHz</b>	<b>kHz</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>utilizzo</b>	<b>nome</b>
135,7	137,8	2209	2175	radioamatori	onde lunghe
148,5	285,0	2019	1052	radiodiffusione	onde lunghe

Le onde LF (onde lunghe) si propagano di giorno lungo la superficie terrestre e per riflessione da parte dello strato ionosferico D (localizzato tra 50 km e 90 km di quota) . Di notte invece si propagano a distanze maggiori di 1000 km per riflessione da parte dello strato ionosferico E (localizzato tra 90 e 140 km di quota).



**MF (300 - 3000 kHz)**

kHz	kHz	m	m	utilizzo	Nome
526,5	1606,5	569	187	radiodiffusione	onde medie
1830,0	1850,0	164	162	radioamatori	160 metri
2300,0	2495,0	130	120	radiodiffusione	120 metri

Le onde MF (onde medie) si propagano di giorno per onda superficiale e di notte per riflessione ionosferica da parte dello strato E.

**HF (3 - 30 MHz)**

<b>MHz</b>	<b>MHz</b>	<b>M</b>	<b>m</b>	<b>utilizzo</b>	<b>nome</b>
3,200	3,400	93,7	88,2	radiodiffusione	90 metri
3,500	3,800	85,7	78,9	radioamatori	80 metri
3,900	4,000	76,9	74,9	radiodiffusione	75 metri
4,750	5,060	63,1	59,2	radiodiffusione	60 metri
5,730	6,295	52,3	47,6	radiodiffusione	49 metri
6,890	6,990	43,5	42,9	radiodiffusione	41 metri
7,000	7,100	42,8	42,2	radioamatori	40 metri
7,100	7,600	42,2	39,4	radiodiffusione	41 metri
9,250	9,990	32,4	30,0	radiodiffusione	31 metri
10,100	10,150	29,7	29,5	radioamatori	30 metri
11,500	12,160	26,1	24,7	radiodiffusione	25 metri
13,570	13,870	22,1	21,6	radiodiffusione	22 metri
14,000	14,350	21,4	20,9	radiodiffusione	20 metri
15,030	15,800	19,9	19,0	radiodiffusione	19 metri
17,480	17,900	17,2	16,7	radiodiffusione	16

					metri
18,068	18,168	16,6	16,5	radioamatori	16 metri
18,900	19,020	15,9	15,8	radiodiffusione	15 metri
21,000	21,450	14,3	14,0	radioamatori	15 metri
21,450	21,850	14,0	13,7	radiodiffusione	13 metri
24,890	24,990	12,0	12,0	radioamatori	12 metri
25,670	26,100	11,7	11,5	radiodiffusione	11 metri
26,960	27,410	11,1	10,9	Banda cittadina	11 metri
28,000	29,700	10,7	10,1	radioamatori	10 metri

Le onde HF (onde corte) si propagano a brevi distanze ,fino a 10 km, per onda superficiale, essendo notevole l'attenuazione subita dal campo elettrico alle frequenze da 3 a 30 MHz, a causa della resistività del terreno. Sia di giorno che di notte si propagano a grandi distanze ,per riflessioni semplici e multiple (ionosfera-terra e terra-ionosfera) da parte dello strato ionosferico F ad alta densità elettronica (localizzato tra 180 e 400 km di quota) ,che di giorno si scinde negli strati F1 (da 180 a 230 km di quota) ed F2 (da 230 a 400 km di quota). La ionizzazione dello strato F dipende dall'attività solare (flusso del vento solare formato da protoni ed elettroni) e dalla località, e varia nelle 24 ore.

### VHF (30 - 300 MHz)

MHz	MHz	M	m	utilizzo	nome
50,0	51,0	6,00	5,88	radioamatori	6 metri
52,5	59,5	5,71	5,04	telediffusione	canale A
61,0	68,0	4,91	4,41	telediffusione	canale B
81,0	88,0	3,70	3,41	telediffusione	canale C

87,5	108,0	3,43	2,78	radiodiffusione	banda FM
144,0	146,0	2,08	2,05	radioamatori	2 metri
174,0	181,0	1,72	1,66	telediffusione	canale D
182,5	189,5	1,64	1,58	telediffusione	canale E
191,0	198,0	1,57	1,51	telediffusione	canale F
200,0	207,0	1,50	1,45	telediffusione	canale G
209,0	216,0	1,43	1,39	telediffusione	canale H
216,0	223,0	1,39	1,34	telediffusione	Canale H1
223,0	230,0	1,34	1,30	telediffusione	Canale H2

Le onde VHF (onde ultracorte metriche) si propagano soltanto nella troposfera (fino a 12 km di quota) in condizioni di visibilità diretta tra le antenne trasmittente e ricevente ; infatti la ionosfera, a causa della frequenza molto elevata, non è in grado di variare la curvatura della traiettoria delle onde in modo tale che si verifichi la riflessione . Per la stessa ragione non si possono propagare per onda superficiale, a causa dell'elevata resistività del terreno, che ne dissipa rapidamente l'energia.

Si possono propagare anche per diffrazione, in quanto vengono reirradiate da ostacoli (tetti, muri) che si presentino sul loro percorso (proprietà di aggirare gli ostacoli, se questi hanno dimensioni comparabili con la lunghezza d'onda) .

#### **UHF (300 - 3000 MHz)**

<b>MHz</b>	<b>MHz</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>utilizzo</b>	<b>nome</b>
432	434	69,4	69,1	radioamatori	70 centimetri
435	438	68,9	68,6	radioamatori	70 centimetri
470	870	63,8	34,5	telediffusione c	canali 21-70
880	892	34,1	33,6	telefonia	ETACS uplink
892	915	33,6	32,8	telefonia	GSM uplink
925	937	32,4	32,0	telefonia	ETACS downlink

937	960	32,0	31,2	telefonia	GSM downlink
1240	1245	24,2	24,1	radioamatori	23 centimetri
1267	1270	23,7	23,6	radioamatori	23 centimetri
1296	1298	23,1	23,1	radioamatori	23 centimetri
1755	1785	17,1	16,8	telefonia	DCS uplink
1850	1880	16,2	15,9	telefonia	DCS downlink
1880	1900	15,9	15,8	telefonia	DECT
2303	2313	13,0	13,0	radioamatori	13 centimetri
2440	2450	12,3	12,2	radioamatori	13 centimetri
2535	2655	11,8	11,3	diffusione satellitare	S-Band

Le onde UHF (onde ultracorte decimetriche) si propagano con modalità analoghe a quelle espone per le onde VHF, e vengono anch'esse utilizzate per comunicazioni fino a distanze dell'ordine del raggio di visibilità.

### **SHF** (3 - 30 GHz)

<b>GHz</b>	<b>GHz</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>utilizzo</b>	<b>nome</b>
3,70	4,20	81,0	71,0	diffusione satellitare	C-Band
5,65	5,67	53,1	52,9	radioamatori	5 GHz
5,76	5,77	52,0	52,0	radioamatori	5 GHz
5,83	5,85	51,4	51,2	radioamatori	5 GHz
10,45	10,50	28,7	28,6	radioamatori	10 GHz
10,70	11,75	28,0	25,5	diffusione satellitare	Ku1-Band
11,75	12,50	25,5	24,0	diffusione satellitare	Ku2-Band
12,50	12,75	24,0	23,5	diffusione satellitare	Ku3-Band

18,00	20,00	16,7	15,0	diffusione satellitare	Ka-Band
24,00	24,05	12,5	12,5	radioamatori	24 GHz

### **EHF (30 - 300 GHz)**

<b>GHz</b>	<b>GHz</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>utilizzo</b>	<b>nome</b>
47,0	47,2	6,38	6,35	radioamatori	47 GHz
75,5	76,0	3,97	3,94	radioamatori	75 GHz
142,0	144,0	2,11	2,08	radioamatori	142 GHz
248,0	250,0	1,21	1,20	radioamatori	248 GHz

Le onde SHF (microonde centimetriche) ed EHF (microonde millimetriche) si propagano in linea retta, evidenziando un comportamento analogo a quello dei raggi luminosi. Sono utilizzate per comunicazioni terrestri a larga banda ed a breve distanza (ponti radio analogici e digitali terrestri) e per telecomunicazioni satellitari .

### **BIBLIOGRAFIA**

- 1) Biondo- Sacchi “Manuale di Elettronica e Telecomunicazioni” – Hoepli
- 2) Reale Accademia d’Italia “Scritti di Guglielmo Marconi”, Roma – 1941
- 3) A. Deotto “Manuale degli impianti TV e SAT - Editrice COEL
- 4) Giovanni G. Turco “ Il manuale delle antenne” - Editrice CD srl
- 5) Sito Webscuola.it