



PAROLE CHIAVE ►

1. Le onde elettromagnetiche

Alla fine del 1800 **Guglielmo Marconi** durante i suoi primi esperimenti sulla trasmissione senza fili scoprì che collegando all'oscillatore di trasmissione un filo o un altro conduttore metallico poteva aumentare la distanza della trasmissione. Diede il nome di antenna al conduttore che veniva issato in alto, prendendo il nome da un termine marinaro che indicava un palo dell'albero maestro. Le prime antenne marconiane (ancora visibili a Villa Grifone) erano cubi metallici issati su un palo e collegati tramite un filo al trasmettitore. In successivi esperimenti usò antenne filiformi collegate ad aquiloni ("i draghi volanti") per issarle a decine di metri di altezza rispetto alla terra.

Si consideri un conduttore filiforme percorso da una corrente $i(t)$ come in **figura 1**, per la legge di Ampere si origina un campo magnetico nel piano perpendicolare al conduttore: per la legge di Faraday la variazione di campo magnetico genera un campo elettrico concatenato ma perpendicolare al flusso magnetico.

A sua volta la variazione di flusso di campo elettrico \vec{E} genera un successivo campo magnetico \vec{H} , che a sua volta produce un campo elettrico \vec{E} , e così in successione. In questo modo si crea un'onda che trasporta un campo elettrico ed un campo magnetico associato. L'onda si propaga nello spazio dal conduttore verso l'esterno.

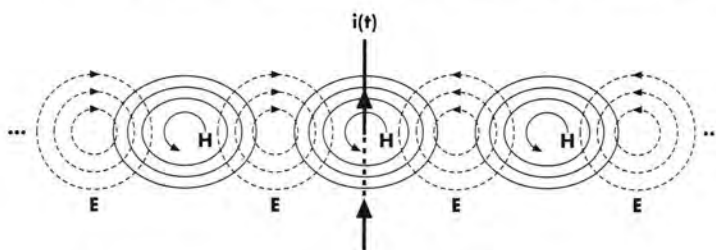


Figura 1

Onde elettromagnetiche generate da un conduttore percorso da corrente.

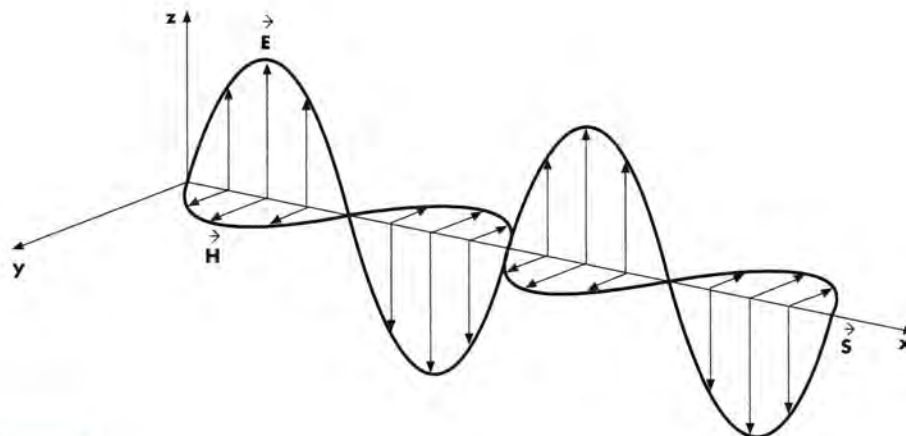
La caratteristica di queste **onde elettromagnetiche** (**fig. 2**) è che *le due campi sono perpendicolari tra loro e la direzione di propagazione è a sua volta perpendicolare ad entrambi*: sono **onde trasversali** (TEM Transverse ElectroMagnetic waves).

Se si esegue il prodotto vettoriale tra campo elettrico \vec{E} e magnetico \vec{H} si ottiene un terzo vettore \vec{S} , chiamato **vettore di Poynting**, che fornisce tutte le informazioni principali sull'onda:

Vettore di Poynting

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

1


Figura 2

Propagazione di onde elettromagnetiche trasversali (TEM).

La direzione ed il verso di questo vettore indicano la propagazione nello spazio ed il valore del modulo è la **densità di potenza elettromagnetica**¹ inviata, misurata in Watt/m²:

$$|\vec{S}| = |\vec{E}| \cdot |\vec{H}| \quad [\text{W/m}^2] \quad \mathbf{2}$$

Analogamente a quanto visto per le onde di corrente e tensione nelle linee, le onde dei due campi elettrico e magnetico sono legate tra loro dall'impedenza caratteristica del mezzo attraversato Z_0 :

$$Z_0 = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} \quad \mathbf{3}$$

l'impedenza caratteristica Z_0 dipende dalle proprietà elettriche e magnetiche del mezzo attraversato:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \mathbf{4}$$

dove μ è la permeabilità magnetica del mezzo ed ϵ la costante dielettrica.

Nel vuoto (con buona approssimazione anche in aria) Z_0 vale:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \, \Omega \quad \mathbf{5}$$

Applicando la **3** alla **2** si ricava il legame tra la densità di potenza dell'onda ed il valore del campo elettrico

$$|\vec{S}| = \frac{|\vec{E}|^2}{Z_0} = \frac{|\vec{E}|^2}{377} \quad \mathbf{6}$$

Queste onde, trasportando campi elettromagnetici, non necessitano di un mezzo composto da particelle, per cui *si propagano sia nel vuoto che in mezzi densi*, con opportune attenuazioni. Nel caso incontrino superfici metalliche, analogamente a quanto avviene per i cavi chiusi in cortocircuito, *verranno totalmente riflesse* con uno sfasamento del campo elettrico di 180°.

1. Per definizione il prodotto vettoriale risulta: $\vec{S} = \vec{E} \wedge \vec{H} = \hat{n} |\vec{E}| \cdot |\vec{H}| \cdot \sin\phi$ dove \hat{n} è un vettore unitario ortogonale sia ad \vec{E} che ad \vec{H} e ϕ è lo sfasamento tra questi ultimi due vettori. Essendo nel nostro caso $\phi = 90^\circ$ e quindi $\sin\phi = 1$, la **2** risulta giustificata.

La trattazione matematica delle onde elettromagnetiche è stata svolta dal fisico **Maxwell** che nel 1864 pubblicò un trattato che unificò tutti i fenomeni elettrici e magnetici.

Le equazioni di Maxwell hanno forma simile alle equazioni dei telegrafisti viste nel paragrafo precedente e quindi hanno come soluzioni onde dirette e riflesse viaggianti nello spazio con caratteristiche analoghe a quelle di corrente e tensione esaminate per le linee di trasmissione.

La differenza è che mentre nei cavi le onde rimangono confinate all'interno della linea, nello spazio le onde si propagano espandendosi sempre più.

Polarizzazione dell'onda

Come detto queste onde sono trasversali nel senso che i campi \vec{E} ed \vec{H} sono perpendicolari alla direzione di propagazione. La direzione del campo elettrico indica la polarizzazione dell'onda. Se il campo elettrico rimane sempre perpendicolare al suolo si dice che l'onda è **polarizzata verticalmente**, se rimane parallelo al suolo **polarizzata orizzontalmente**, invece se durante la propagazione si ha la rotazione dei campi sempre nel piano perpendicolare alla direzione dell'onda, questa è polarizzata **ellitticamente** o **circularmente**. Le onde polarizzate circularmente sono meno soggette a disturbi atmosferici e a quelli della ionosfera.

La direzione di polarizzazione deriva dal verso del campo elettrico generato dal dispositivo di trasmissione, e quindi dalla geometria e dalle alimentazioni dello stesso. Affinché si abbia la massima ricezione occorre che anche il dispositivo ricevente abbia la stessa direzione di polarizzazione.

Queste onde avendo la stessa natura della luce si propagano nello spazio alla sua stessa velocità c :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} = \frac{c_0}{n}$$

7
Velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche non necessitano di un mezzo fisico per propagarsi e la massima velocità di propagazione si ha nel vuoto.

ove ϵ e μ sono la costante dielettrica e la permeabilità magnetica del mezzo attraversato; ϵ_r e μ_r costante dielettrica relativa e la permeabilità magnetica relativa del mezzo attraversato; n è l'indice di rifrazione e c_0 la velocità della luce nel vuoto uguale a $3 \cdot 10^8$ m/sec. Si noti che per mezzi diversi dal vuoto (in pratica anche per l'aria) risulta $n > 0$, pertanto *la velocità di propagazione è massima nel vuoto* (aria).

Per segnali sinusoidali di frequenza f , i valori dei campi elettromagnetici si ripetono nello spazio ad ogni lunghezza d'onda λ , data da

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

8
Classificazione delle onde e.m.
Tabella 1

Classificazione standard delle bande dei segnali ad onde elettromagnetiche.

Questo relazione è molto importante perché nelle radiocomunicazioni le onde vengono classificate sulla base delle frequenze e delle lunghezze d'onde. La lunghezza d'onda è inoltre un parametro fondamentale per la realizzazione delle antenne e per il calcolo della propagazione in aria dei segnali.

Lo standard internazionale prevede bande di frequenze numerate con un valore N che definisce i limiti della banda da $0,3 \cdot 10^N$ a $3 \cdot 10^N$. In **tabella 1** sono riportate le bande per onde elettromagnetiche.

Banda	Frequenza	λ	Sigla	Nome	Applicazioni
4	3-30 kHz	100-10 km	VLF	Very Low Frequencies	Trasmissioni a bassa frequenza, radionavigazione, radiotelegrafia
5	30-300 kHz	10-1 km	LF	Low Frequencies	Trasmissioni a onde lunghe, radiotelegrafia
6	0,3-3 MHz	1-0,1 km	MF	Medium Frequencies	Trasmissioni a onde lunghe, radiodiffusione (AM)
7	3-30 MHz	100-10 m	HF	Very Low Frequencies	Trasmissioni a onde corte, radiotelegrafia
8	30-300 MHz	10-1 m	VHF	Very High Frequencies	Radiodiffusione (FM), Radiotrasmissione TV
9	0,3-3 GHz	1-0,1 m	UHF	Ultra High Frequencies	Radiotrasmissione TV, telefonia mobile
10	3-30 GHz	100-10 mm	SHF	Super High Frequencies	Trasmissione satellitare, radar, ponti radio
11	30-300 GHz	10-1 mm	EHF	Extremely High Frequencies	Trasmissione tra satelliti, radar

Al di sopra delle onde EHF si hanno le onde submillimetriche, poi lo spettro luminoso: gli infrarossi, lo spettro visibile e gli ultravioletti.

Tabella 2

Classificazione delle bande delle microonde.

Banda	P	L	S	C	X	Ku	K	Ka	V	W
frequenze (GHz)	0,22-1	1-2	2-4	4-8	8-12,4	12,4-18	18-26,5	26-40	50-75	80-110

Le onde con lunghezza d'onda inferiore al metro sono chiamate **microonde**, le cui bande vengono ulteriormente suddivise secondo classificazioni non standardizzate ma definite nella pratica di **tabella 2**.

Per applicazioni **ISM** (*Industrial, Scientific, Medical*) sono riservate alcune bande per le quali non si richiede la licenza per l'utilizzo. In **tabella 3** sono riportate alcune di queste utilizzate nell'uso comune.

Tabella 3

Bande riservate ad applicazioni ISM.

Frequenza	Applicazioni
26,957-27,283 MHz	Radioamatori di Banda Cittadina (CB)
902-928 MHz	802.15.4, ZigBee
2,4-2,5 GHz	Forni a microonde, Bluetooth, WiFi 802.11 b, g, 802.15.4, ZigBee
5,725-5,875 GHz	WiFi 802.11 a

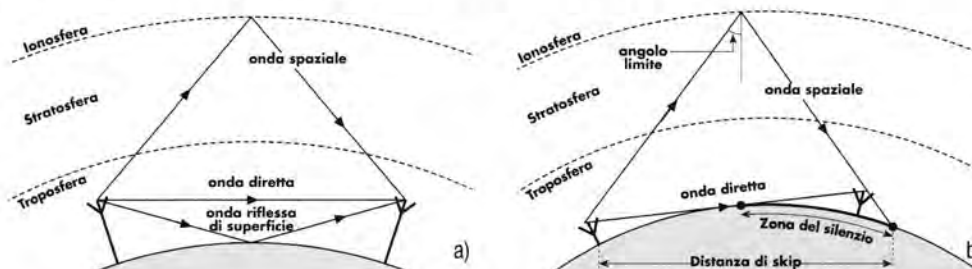
La propagazione nell'atmosfera

Idealmente nello spazio le onde si propagano in maniera rettilinea, mentre nell'atmosfera terrestre la propagazione dipende sia dalla frequenza dei segnali sia dagli strati che attraversano.

L'atmosfera che circonda la terra può essere suddivisa in tre zone di seguito descritte.

- La **troposfera** dal suolo fino a circa 10-12 km, nella quale le onde elettromagnetiche sono influenzate dai fenomeni meteorologici;
- La **stratosfera** compresa tra i 12 e i 60 km, con bassa densità gassosa e quindi senza grande influenza nella propagazione;
- La **ionosfera** che si estende dai 60 km ad oltre i 400 km di altezza; vi è una forte presenza di cariche libere, ioni ed elettroni, determinate dalle radiazioni ultraviolette del sole. La densità delle cariche non è omogenea ma varia con l'altezza e con l'irraggiamento solare, per cui le sue caratteristiche mutano di giorno e di notte. In questo strato le onde elettromagnetiche di frequenza inferiore a circa 30 MHz subiscono sia una curvatura delle traiettorie per effetti di diffrazione sia la riflessione totale che le rimanda verso la superficie terrestre. Per frequenze superiori le onde non vengono deviate ma si propagano attraverso i vari strati della ionosfera in maniera rettilinea, con debole attenuazione da parte delle cariche libere.

A causa di queste interazioni con l'atmosfera e con la superficie terrestre le onde elettromagnetiche possono propagarsi in diversi modi (fig. 3).

**Figura 3**

Modalità di propagazione di onde elettromagnetiche nell'atmosfera terrestre (a), zona del silenzio e distanza di skip (b).

Gli strati dell'atmosfera terrestre

Troposfera: fino a 12 km: i fenomeni meteorologici influiscono sulla propagazione.
Stratosfera: tra 12 e 60 km: non influenza la propagazione.
Ionosfera: da 60 e oltre 400 km: diffrazione sotto i 30 MHz.

Tipologie di onde e.m. in atmosfera

Angolo limite: con un angolo di incidenza inferiore non c'è riflessione.
Distanza di skip: distanza minima di ricezione tramite onda riflessa.

- ▶ Si hanno le **onde dirette** quando i due punti di trasmissione e di ricezione sono in visibilità, la propagazione può essere rettilinea o curvilinea dovuta alla rifrazione dell'aria.
- ▶ Le **onde di superficie** invece sono onde che seguono la curvatura del suolo terrestre e sono soggette a diffrazione, attenuazione e riflessioni dipendenti dalla natura e forma delle superficie terrestri.
- ▶ Le **onde spaziali** invece sono le onde dirette verso la ionosfera che vengono poi riflesse da questa sulla superficie terrestre. La riflessione avviene se l'angolo di incidenza della radiazione supera un valore limite (detto **angolo limite**), per cui per avere riflessione occorre che la direzione dell'onda verso la ionosfera sia sufficientemente inclinata. A causa di questo fenomeno vi è una zona, detta **zona del silenzio**, all'interno della quale non è possibile ricevere nessun tipo di onda, a meno di avere un'antenna sufficientemente alta (come mostrato in **figura 3b**). La distanza minima di ricezione dell'onda riflessa spaziale che limita la zona del silenzio è detta **distanza di skip**.

Un fenomeno estremamente importante per la trasmissione di segnali mediante onde elettromagnetiche è il **fading** (affievolimento) che è un'ulteriore attenuazione imprevista dell'onda dovuta a fenomeni atmosferici o a sovrapposizione di riflessioni dello stesso segnale che segue diversi percorsi (**multipath fading**). Lo studio di questi effetti richiede di analizzare statisticamente l'occorrenza di questi fenomeni, per poi tenerne conto nel progetto aumentando la potenza emessa di un margine che superi il fading previsto, sulla base della qualità del collegamento voluto.

2. Le antenne

I dispositivi che permettono di irradiare le onde elettromagnetiche nello spazio sono le **antenne**. Gli stessi dispositivi sono in grado di intercettare le onde e trasformare i campi elettromagnetici in segnali elettrici. Le tipologie e le forme delle antenne dipendono sia dalle lunghezze d'onda dei campi elettromagnetici che si vogliono trasmettere e ricevere sia dalle prestazioni richieste dal collegamento.

Per analizzare le modalità di radiazione tra antenne si utilizzano due principi:

- ▶ il **principio di reciprocità**, che afferma che le proprietà di radiazione di un'antenna rimangono inalterate per l'utilizzo dell'antenna sia in trasmissione che in ricezione;
- ▶ il **principio delle immagini elettriche** che afferma che il piano di massa o un piano conduttore posto perpendicolarmente rispetto all'antenna consente di raddoppiare l'effetto di radiazione a causa delle riflessioni delle onde elettromagnetiche.

In questo paragrafo si descrivono solo i parametri principali delle antenne, rimandando a testi specifici per una trattazione approfondita.

La più semplice antenna può essere costituita da un tratto di linea terminata in circuito aperto (**fig. 4**).

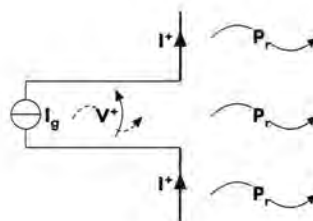


Figura 4

Antenna a dipolo hertziano.

Reciprocità: stesse proprietà sia in trasmissione che in ricezione.
Immagini elettriche: un piano di massa o conduttore perpendicolare all'antenna raddoppia l'effetto di radiazione.

Se i due conduttori sono vicini, nella linea si hanno onde di tensione e di corrente sia dirette che riflesse, secondo quanto trattato nella precedente unità di lavoro. Se invece si aprono i due conduttori di 90° , le onde di corrente e tensione generano onde di campi magnetici ed elettrici che si propagano dal generatore verso lo spazio circostante. Le onde generate si diffondono in tutto lo spazio con conseguente riduzione della densità di potenza irradiata nell'allontanarsi dall'antenna.

Se viceversa la medesima antenna è investita da un flusso di onde elettromagnetiche, nei conduttori si indurranno segnali di corrente e di tensione proporzionali alla potenza dei campi magnetici ed elettrici ricevuti.



Scheda integrativa 10A.1
Linee ad alta frequenza

Applicando le formule esposte nella scheda integrativa 10A.1 per linea aperta in alta frequenza (chiamata stub), si ricava che *per massimizzare la corrente che percorre l'antenna occorre dimensionare la lunghezza di ciascun conduttore ad $1/4$ della lunghezza d'onda λ* . Quindi la lunghezza totale l dell'antenna dovrà essere

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 \cdot f}$$

9

Dipolo hertziano

Questa antenna è chiamata **dipolo hertziano** o **dipolo a $\lambda/2$** .

Si definisce come **resistenza di radiazione** R_r il rapporto tra la potenza totale irradiata dall'antenna P_r ed il quadrato del valore efficace della corrente fornita dal generatore I_e .

$$R_r = \frac{P_r}{I_e^2}$$

10

Mediante lo studio della propagazione delle onde si ricava che per il dipolo hertziano il valore della **10** è

$$R_r|_{\lambda/2} = 73 \, \Omega$$

11

Dipolo marconiano

Un'altra antenna filiforme a dipolo è il **dipolo marconiano** o **dipolo a $\lambda/4$** . È costituito da un conduttore posto verticalmente rispetto al piano di massa (dato dal suolo o da una superficie metallica). Come si vede in **figura 5**, per il principio delle immagini elettriche il meccanismo di radiazione e la potenza trasmessa sono simili a quanto visto per il dipolo hertziano. Utilizzando un solo conduttore la lunghezza totale l dell'antenna e la resistenza di radiazione diventano:

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4 \cdot f}$$

12

$$R_r|_{\lambda/4} = 37,5 \, \Omega$$

13

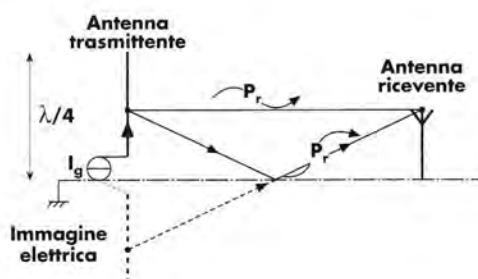


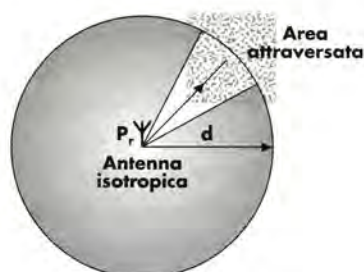
Figura 5

Antenna a dipolo marconiano.

Antenna isotropica

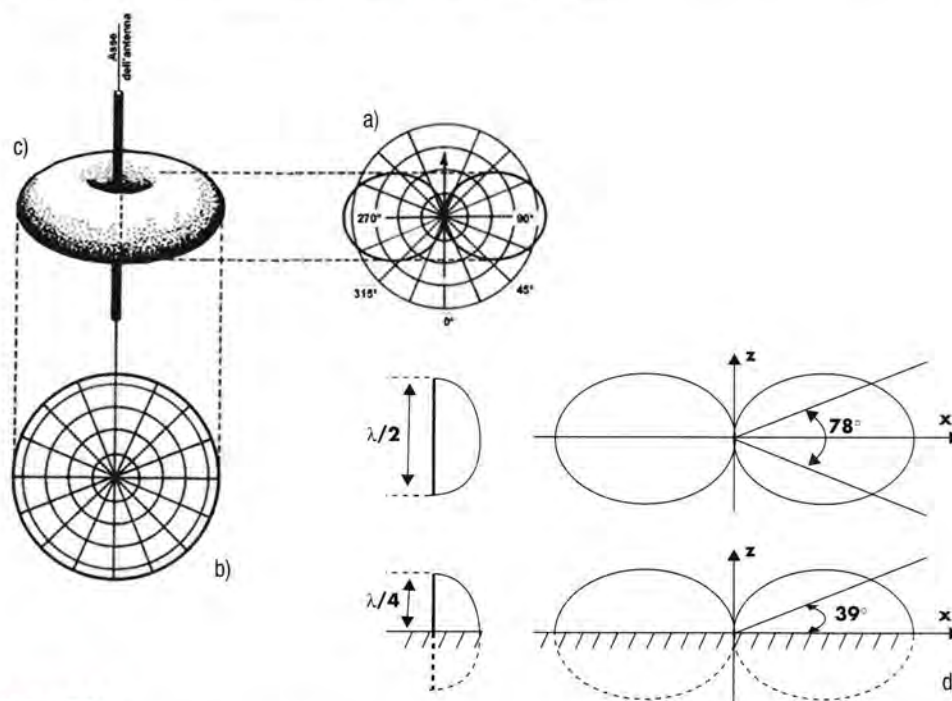
Un'antenna si dice **isotropica** se emette radiazione in maniera omogenea in tutte le direzioni dello spazio (fig. 6). In tale caso il fronte delle onde ha la forma di una sfera avente il centro presso l'antenna, man mano che l'onda si propaga la potenza si distribuisce su superfici sempre maggiori, per cui ad una distanza d dall'antenna si ha una densità di potenza S data da

$$S = \frac{P_r}{4\pi d^2} \quad \mathbf{14}$$


Figura 6

Radiazione dell'antenna isotropica.

Si noti che la **14** esprime il modulo $|\vec{S}|$ del vettore Poynting dato dalla **2**. Ogni antenna reale ha direzioni privilegiate verso cui i campi elettromagnetici sono più intensi e direzioni verso cui i campi emessi sono deboli o nulli. Tali direzioni sono determinate dalla forma geometrica dell'antenna e dalle fasi dei segnali elettrici del conduttore metallico. Queste caratteristiche vengono descritte mediante figure solide che rappresentano la distribuzione dei campi elettromagnetici emessi o dai **diagrammi di radiazione**, che per ogni piano dell'antenna rappresentano, in forma polare, l'intensità del campo ad una distanza fissa al variare dell'angolo di propagazione (fig. 7). In particolare in **figura 7d** sono riportati i diagrammi di radiazione dei dipoli $\lambda/2$ e $\lambda/4$ con indicati gli angoli di radiazione.

Diagramma di radiazione

Figura 7

Diagrammi di radiazione tridimensionale (c) e bidimensionale secondo i piani orizzontale (a) e verticale (b) di un dipolo hertziano (tratto da J.J. Carr, *Practical Antenna Handbook*, 2001, McGraw-Hill). Le situazioni specifiche dei dipoli $\lambda/2$ e $\lambda/4$ con indicati gli angoli di radiazione (d).

Angolo di radiazione

L'apertura dell'angolo entro cui la densità di potenza emessa non scende al di sotto dei 3dB (o in lineare al di sotto del 50%) rispetto al suo valore massimo si dice **angolo di radiazione** o **di apertura del fascio**. È il parametro che va utilizzato per posizionare le antenne di trasmissione e di ricezione, perché entro questa direzione deve essere ricevuto il fascio di onde trasmesso per non avere attenuazioni elevate.

Guadagno di antenna

La maggiore potenza emessa nella direzione di massima propagazione viene calcolata mediante il **guadagno di antenna G** , definito come rapporto tra la potenza P_{iso} che dovrebbe emettere un'antenna isotropica per irradiare la stessa densità di potenza dell'antenna considerata e la potenza realmente trasmessa dall'antenna nella sua direzione di massima propagazione $P_{r|max}$

$$G = \frac{P_{iso}}{P_{r|max}}$$

15

Angolo di radiazione: la densità di potenza emessa è contenuta entro 3 dB rispetto al suo massimo.
Guadagno di antenna: viene valutato rispetto all'antenna isotropica.

La potenza P_{iso} che dovrebbe emettere l'antenna isotropica per raggiungere lo stesso livello di potenza trasmessa dall'antenna reale nella sua direzione di massima propagazione è chiamata **EIRP** (*Equivalent Isotropic Radiated Power*), solitamente espressa in dB_W. Il dB watt ha come riferimento 1 W ovvero a questa potenza si ha 0 dB_W; rispetto ai dBm che hanno come riferimento 1 mW si ha quindi dBW = dBm - 30.

Esempio 1

Se ad esempio un'antenna irradia una EIRP = 7 dB_W vuole dire che il valore della potenza trasmessa nella direzione di massima propagazione risulta:

$$P_{r|max} = 10^{7/10} = 5 \text{ W}$$

Il valore in dBm sarebbe 7 + 30 = 37 dBm

Analizzando i diagrammi di radiazione delle antenne a dipolo si ricava che per il dipolo hertziano G vale 1,65, mentre per il dipolo marconiano G vale 3,3.

Per avere guadagni maggiori, si utilizzano tipologie di antenne di forme diverse o formate da un allineamento di più dipoli che aumentano i guadagni senza aumentare in maniera esagerata le dimensioni.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda ai numerosi testi che illustrano le caratteristiche delle antenne più utilizzate, come quelle per la ricezione di segnali televisivi (antenne a dipolo ripiegato, antenne Yagi, cortine di dipoli, ecc.). Un'esposizione di tipo informativo sull'antenna parabolica la trovate nella successiva scheda di "non solo teoria 1", mentre per la relativa teoria si rimanda all'omonima *scheda integrativa* 10B.1.

AULADIGITALE

Scheda integrativa 10B.1
 L'antenna parabolica

non solo teoria 1
L'antenna parabolica

L'antenna a riflettore parabolico, o semplicemente antenna parabolica (in figura quella in uso presso il centro spaziale di Fucino, presso Avezzano AQ) è una delle antenne più utilizzate per la trasmissione delle microonde. La sua caratteristica è di avere una superficie conduttiva di forma parabolica che, per le proprietà geometriche, riflette nel suo fuoco tutte le onde parallele al suo asse o al contrario riflette tutte le onde emesse dal fuoco nella direzione parallela all'asse. Utilizzata in ricezione questa proprietà permette di convogliare nel punto focale tutte le onde provenienti da grande distanza che possono considerarsi parallele all'asse. In trasmissione, invece, consente di convogliare le onde emesse dal fuoco secondo una sola direzione, quindi di generare un fascio parallelo e rettilineo.

Perciò l'antenna è molto direttiva e dotata di un elevato guadagno, per questi motivi è utilizzata per le trasmissioni satellitari dove, a causa delle distanze, le attenuazioni dello spazio libero sono elevate.



3. Il collegamento tra antenne

Ogni antenna, quando viene utilizzata come antenna ricevente, intercetta una porzione della densità di potenza delle onde che si propagano nelle sue vicinanze. Per calcolare quanta potenza viene ricevuta si utilizza l'**area o apertura efficace** A_e dell'antenna, che esprime una *superficie fittizia all'interno della quale il fronte d'onda trasmesso viene captato*.

La sua ampiezza dipende sia dalla direttività dell'antenna che dalla lunghezza d'onda λ del segnale intercettato (e quindi tramite questo parametro dipende dalle dimensioni geometriche dell'antenna) secondo la formula seguente:

Area o apertura efficace

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

16

Sulla base dei parametri sopraelencati si può ricavare la potenza ricevuta da un'antenna posta ad una distanza d dall'antenna trasmittente, nel caso le antenne siano posizionate lungo la direzione di massima propagazione del fascio:

Formula di Friis

$$P_{Rx} = \frac{P_r}{4\pi d^2} G_{Tx} A_e$$

17

ove G_{Tx} è il guadagno dell'antenna di trasmissione e P_r la potenza irradiata. Tale espressione è nota come **formula di Friis** per la trasmissione mediante antenne.

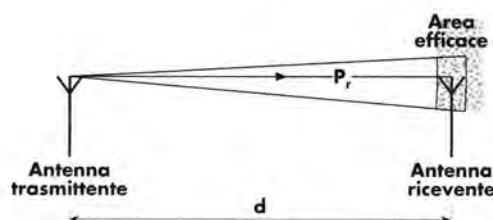


Figura 8

Collegamento tramite antenne.

Applicando la relazione **16** nella **17** si ottiene

$$P_{Rx} = P_r \cdot G_{Tx} \cdot G_{Rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

18

ove si è chiamato G_{Rx} il guadagno dell'antenna ricevente per distinguerlo da quello dell'antenna trasmittente.

La perdita di potenza dovuta solo all'irraggiamento delle onde nello spazio, chiamata **attenuazione dello spazio libero** A_{sl} (*loss free space*), è data dal rapporto tra la potenza irradiata e ricevuta, utilizzando antenne isotrope. Ponendo al valore uno i guadagni G_{Tx} e G_{Rx} ed esprimendo la lunghezza d'onda λ in funzione della frequenza f si ottiene dalla **18**:

Attenuazione dello spazio libero

$$A_{sl} = \frac{P_r}{P_{Rx}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 \cdot d^2 \cdot f^2$$

19

La formula per il calcolo dell'attenuazione in decibel, considerando la velocità delle onde pari a quella della luce nel vuoto c_0 ed esprimendo la frequenza in MHz e la distanza in km è la seguente

$$\begin{aligned} A_{sl}|_{dB} &= 10\log\left(\frac{4\pi}{3 \cdot 10^8}\right)^2 + 10\log(10^3 d)^2 + 10\log(10^6 f)^2 = \\ &= 20\log\left(\frac{4\pi}{3 \cdot 10^8}\right) + 20\log(10^3 d) + 20\log(10^6 f) \\ &= 32,4 + 20\log(d_{km}) + 20\log(f_{MHz}) \end{aligned} \quad \mathbf{20}$$

Esprimendo in dB_m la potenza ricevuta data dalla **18**, si ottiene

$$P_{Rx}|_{\text{dB}_m} = P_{T}|_{\text{dB}_m} - A_{sl}|_{dB} + G_{Tx}|_{dB} + G_{Rx}|_{dB} \quad \mathbf{21}$$

La potenza ricevuta data dalla **21** è quindi *fortemente dipendente dal tipo di antenna utilizzata*, attraverso i guadagni e le direzioni di massima radiazione. Per aumentare i guadagni occorre scegliere le antenne più opportune in base al tipo di collegamento.

Per quel che riguarda il dimensionamento del collegamento, non occorre conoscere il funzionamento delle antenne ma basta conoscerne i diagrammi di radiazione per posizionarle secondo le direzioni migliori e per ricavare i guadagni per il calcolo della **18** o della **21**.

Esempio **2**

Si consideri un radiocollegamento tra due antenne televisive Yagi costituite da un dipolo ripiegato e da altri 4 conduttori, aventi un guadagno di 18 dB ed un angolo di apertura di 66° . Sapendo che si trasmettono segnali ad una frequenza di 50 MHz, che le antenne distano 2 km e che la potenza trasmessa è di 100 W, si determini la potenza ricevuta.

Innanzitutto si devono porre le antenne nella direzione di massima propagazione, cioè l'una allineata all'altra entro un angolo di $\pm 33^\circ$. Poi tramite la **20** si calcola l'attenuazione di spazio libero:

$$A_{sl}|_{dB} = 32,4 + 20\log(2) + 20\log(50) = 72,4 \text{ dB}$$

Esprimendo la potenza irradiata in dB_m si ha

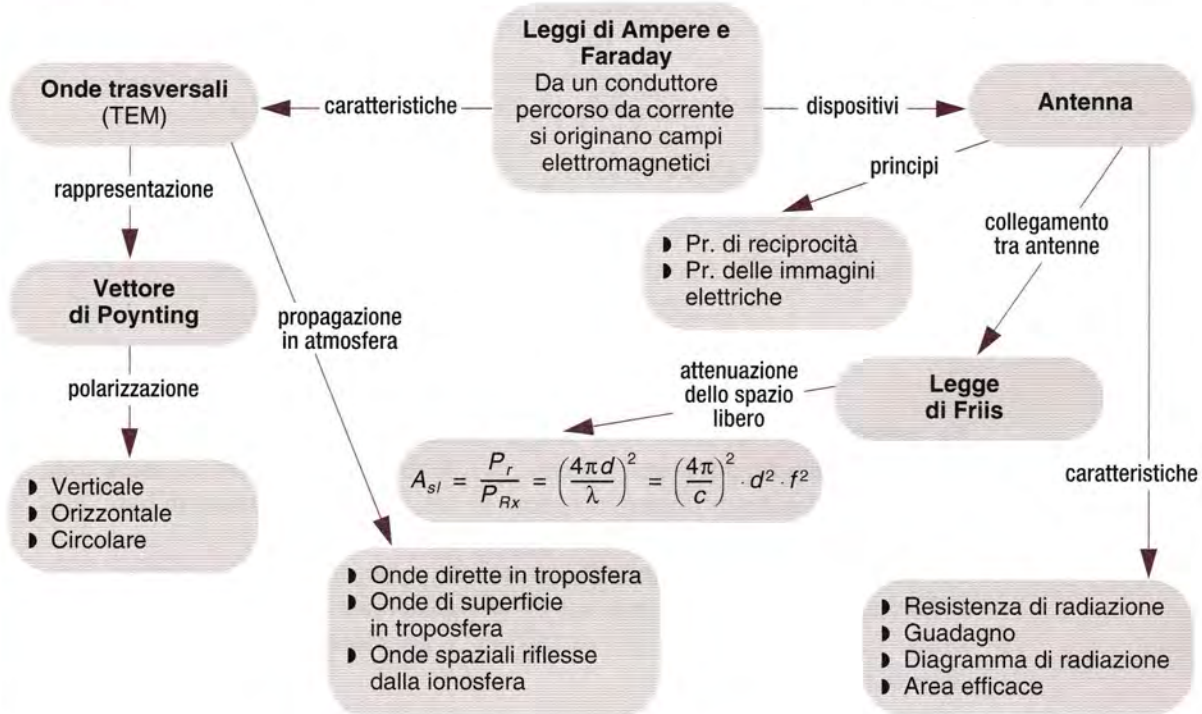
$$P_{T}|_{\text{dB}_m} = 10\log(100 \cdot 10^3) = 50 \text{ dB}_m$$

Applicando la **21** si ottiene

$$P_{Rx}|_{\text{dB}_m} = 50 - 72,4 + 18 + 18 = 13,6 \text{ dB}_m \quad \text{ovvero } P_{Rx} = 10^{\frac{13,6}{10}} = 23 \text{ mW}$$

Facciamo il punto

Il vuoto e le antenne



Test

- Par. 1 **1** Il campo magnetico dell'onda elettromagnetica generata da un conduttore è:
 a ☐ parallelo alla direzione della corrente;
 b ☐ perpendicolare alla direzione della corrente;
 c ☐ parallelo alla superficie del conduttore;
 d ☐ perpendicolare al piano di massa.
- Par. 1 **2** La polarizzazione di un'onda elettromagnetica è:
 a ☐ la direzione del campo elettrico;
 b ☐ la direzione del campo magnetico;
 c ☐ la direzione di propagazione;
 d ☐ la direzione del collegamento tra le due antenne.
- Par. 1 **3** La propagazione per onde riflesse in atmosfera:
 a ☐ avviene solo nella stratosfera;
 b ☐ è dovuta solo alle onde spaziali;
 c ☐ è dovuta sia alla riflessione della troposfera che alla superficie terrestre;
 d ☐ è dovuta solo alle onde di superficie.
- Par. 2 **4** La densità di potenza irradiata da un'antenna dipende dalla distanza nel seguente modo:
 a ☐ diminuisce linearmente con la distanza;
 b ☐ diminuisce esponenzialmente con la distanza;
 c ☐ diminuisce logaritmicamente con la distanza;
 d ☐ diminuisce quadraticamente con la distanza.
- Par. 3 **5** L'attenuazione dello spazio libero:
 a ☐ è maggiore per segnali a bassa frequenza;
 b ☐ è maggiore per segnali ad alta frequenza;
 c ☐ è maggiore per segnali ad alta lunghezza d'onda;
 d ☐ non dipende dalla frequenza ma solo dalla distanza.

Problemi svolti

Il numero dei pallini ● indica il grado di difficoltà.

- Par. 2 **1** Si abbia un'antenna filiforme di lunghezza di 10 cm. Calcolare la frequenza di oscillazione nei casi di dipolo hertziano e marconiano. In entrambi i casi calcolare la corrente da fornire ai dipoli per irradiare una potenza di 100 Watt.

Soluzione

Nel caso di dipolo hertziano dalla **9** si può ricavare il valore della frequenza f di oscillazione (si considera la velocità dell'onda pari a quella della luce nel vuoto c_0):

$$f = \frac{c}{2 \cdot l} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-2}} = 1,5 \text{ GHz}$$

Dalla **10** si ricava la corrente efficace che va fornita all'antenna trasmittente:

$$I_e = \sqrt{\frac{P_r}{R_r}} = \sqrt{\frac{100}{73}} \approx 1,17 \text{ A}$$

Nel caso di dipolo marconiano dalla **12** si può ricavare il valore della frequenza f di oscillazione (si considera la velocità dell'onda pari a quella della luce nel vuoto c_0):

$$f = \frac{c}{4 \cdot l} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10 \cdot 10^{-2}} \approx 750 \text{ MHz}$$

Dalla **10** si ricava la corrente efficace che va fornita all'antenna trasmittente

$$I_e = \sqrt{\frac{P_r}{R_r}} = \sqrt{\frac{100}{37,5}} \approx 1,63 \text{ A}$$

Parr. 2 e 3

2

Un'antenna ricevente è costituita da una dipolo a $\lambda/4$, è situata a distanza di 30 km da un antenna trasmittente avente guadagno $G = 30$ dB. La frequenza di trasmissione è 50 MHz, la potenza irradiata è 4 kW. Calcolare la potenza ricevuta dall'antenna a dipolo.

Soluzione

La lunghezza d'onda del segnale irradiato è

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50 \cdot 10^6} = 6 \text{ m}$$

Il valore della potenza ricevuta si può ricavare dalla **17**. Per applicarla occorre ricavare il guadagno dell'antenna di trasmissione G_{Tx} in lineare:

$$G_{Tx} = 10^{30/10} = 10^3$$

e l'area efficace del dipolo marconiano, tramite la **16**:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G = \frac{6^2}{4\pi} 3,3 \approx 9,45 \text{ m}^2$$

Quindi dalla **17**:

$$P_{Rx} = \frac{P_r}{4\pi d^2} G_{Tx} A_e = \frac{4 \cdot 10^3}{4\pi (30 \cdot 10^3)^2} 10^3 \cdot 9,45 \approx 3,34 \text{ mW}$$

Parr. 2 e 3

3

Si trasmettono segnali sinusoidali ad una frequenza di 300 MHz con antenna a dipolo marconiano. L'antenna è alimentata da una corrente di 3 A efficaci. Calcolare la potenza irradiata, la potenza ricevuta da un'antenna identica ad una distanza di 100 m, l'attenuazione del collegamento e l'attenuazione dello spazio libero.

Soluzione

La lunghezza d'onda dei segnali irradiati è

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{300 \cdot 10^6} = 1 \text{ m}$$

La potenza irradiata si ottiene dalla **10**:

$$P_r = R_r \cdot I_e^2 = 36,5 \cdot 3^2 = 328,5 \text{ W}$$

La potenza ricevuta può essere calcolata dalla **13**, sapendo che i guadagni delle due antenne marconiane valgono 3,3.

$$P_{Rx} = P_r \cdot G_{Tx} \cdot G_{Rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = 328,5 \cdot 3,3^2 \left(\frac{1}{4\pi \cdot 100} \right)^2 \approx 2,26 \text{ mW}$$

L'attenuazione del collegamento è dato dal rapporto tra la potenza irradiata e quella ricevuta:

$$A_{tt} = \frac{P_r}{P_{Rx}} = \frac{328,5}{2,26 \cdot 10^{-3}} = 145,0 \cdot 10^3$$

che trasformato in decibel dà

$$A_{tt|dB} = 10 \log(145,0 \cdot 10^3) \approx 51,6 \text{ dB}$$

Applicando la **20** si ricava l'attenuazione dello spazio libero

$$\begin{aligned} A_{sl|dB} &= 32,4 + 20 \log(d_{km}) + 20 \log(f_{MHz}) = \\ &= 32,4 + 20 \log(0,1) + 20 \log(300) \approx 61,9 \text{ dB} \end{aligned}$$

Problemi da svolgere

- Parr. 2 e 3 **4** Un'antenna genera ad una distanza di 100 m una densità di potenza di $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2$. Calcolare la potenza irradiata e la corrente che alimenta l'antenna sapendo che questa ha una resistenza di radiazione di 180Ω ed un guadagno di 10 dB. Calcolare l'*EIRP* e quanta potenza dovrebbe irradiare un solo dipolo a $\lambda/2$ per avere alla stessa distanza la medesima densità di potenza.
- Parr. 2 e 3 **5** Calcolare l'attenuazione dello spazio libero e l'attenuazione effettiva di un collegamento di due antenne paraboliche uguali distanti 50 km, operanti a 4 GHz. (il guadagno delle antenne è di 27 dB).
- Parr. 2 e 3 **6** Un radiocollegamento tra 2 stazioni, distanti 110 m, utilizza, come antenne, singoli dipoli uguali. Sapendo che l'attenuazione è 62 dB e la frequenza di trasmissione è di 900 MHz, si determini se i dipoli sono marconiani od hertziani.
- Parr. 2 e 3 **7** Un radiocollegamento è composto da un'antenna trasmittente hertziana ed una ricevente marconiana. La frequenza di trasmissione è di 400 MHz, la distanza di 200 m. Sapendo che si vuole ricevere una potenza di almeno 10 dB_m , si determini la minima corrente (efficace) fornita all'antenna trasmittente.

Parole chiave

Individuare i termini e i raggruppamenti delle parole chiave di inizio sezione (vedere l'esempio risolto della sezione 2A).