

Le trasmissioni via radio

Alessandro Iscra, docente presso l'ITIS "I. Calvino" di Genova

Maria Teresa Quaglino, docente presso l'IIS "A. Maserati di Voghera"

documento redatto in occasione del

XLIII Congresso Nazionale, dell'Associazione per l'Insegnamento della Fisica (AIF),

18-21 ottobre 2004, Salice Terme (PV)

Introduzione

Questo modulo vuole fornire una breve trattazione sulle trasmissioni via radio destinata agli insegnamenti di fisica inseriti nei diversi indirizzi della scuola secondaria superiore. L'idea di scrivere queste pagine è maturata dopo aver riscontrato in diverse occasioni un notevole interesse da parte degli alunni a questo tema, scaturito dall'enorme diffusione che hanno attualmente i sistemi di comunicazione senza fili. Gli argomenti trattati possono essere integrati con altri temi che sono sviluppati in numerosi testi adottati nelle scuole. Il documento si articola nei seguenti paragrafi:

L'intensità di radiazione

Il paragrafo introduce il concetto di intensità di radiazione o densità di potenza, fornendo le procedure per il calcolo in presenza di un'antenna trasmittente isotropica. Si discutono quindi gli effetti in presenza di un'antenna reale, di cui si introduce il concetto di guadagno.

Prerequisiti: principio di conservazione dell'energia, concetto di potenza, area di una superficie sferica, onde.

Approfondimenti: elementi di ottica e di elettromagnetismo, tipologie di antenne.

La ricezione del segnale

Si interpreta la ricezione di un'antenna ricevente come la "cattura" di potenza distribuita su una superficie sferica, da parte di un'areola assorbente. Si introduce il concetto di area equivalente di un'antenna ricevente, e si forniscono alcuni esempi di sensibilità di ricevitori.

Prerequisiti: concetto di potenza.

Approfondimenti: radio, televisione, telefonia mobile.

La reversibilità delle antenne

Si illustra che un'antenna trasmittente può funzionare anche come ricevente e viceversa e si fornisce la relazione che lega il guadagno all'area equivalente.

Prerequisiti: frequenza, lunghezza d'onda.

Approfondimenti: tipologie di antenne.

L'intensità di radiazione ed i campi

Si forniscono le relazioni che intercorrono fra la densità di potenza ed i campi elettrici e magnetici efficaci corrispondenti. Il paragrafo è stato inserito per completare l'argomento delle trasmissioni via radio con aspetti relativi all'inquinamento elettromagnetico, che costituisce attualmente un tema di grande attualità. Si consiglia tuttavia di presentare questo paragrafo agli alunni dopo aver introdotto le onde elettromagnetiche e dopo aver trattato le grandezze efficaci, che si incontrano tipicamente nell'ambito delle grandezze elettriche sinusoidali.

Prerequisiti: campo elettrico, campo magnetico, onde elettromagnetiche, valore efficace di una grandezza variabile nel tempo.

Approfondimenti: ottica ondulatoria, inquinamento elettromagnetico, composizione di campi, interferenza.

I sistemi di trasmissione e ricezione reali

Si inquadrano le problematiche applicative che riguardano i concetti trattati nei punti precedenti. Il paragrafo ha quindi un taglio più tecnologico, ma che serve per completare gli argomenti esposti,

mettendo il lettore in grado di analizzare le prestazioni, in termini di trasferimento energetico, di un semplice sistema di trasmissione. La trattazione di questo paragrafo risulta decisamente più comprensibile dopo aver trattato, anche a livello qualitativo e introduttivo, aspetti relativi all'ottica ondulatoria.

Prerequisiti: elementi di ottica ondulatoria, riflessione, diffrazione, interferenza, principio di Huygens.

Approfondimenti: diffrazione da fenditure, radiocomunicazioni nell'ingegneria delle telecomunicazioni, vettore di Poynting.

Si evidenzia come sia nel titolo di questo documento che nel testo contenuto, si fa riferimento al concetto di trasmissione via radio e non di comunicazione. Gli argomenti presentati nel seguito consentono di formulare un bilancio energetico in un sistema di radiocomunicazione, senza fornire alcuna indicazione su *come* si associa dell'informazione ad un segnale radio. Questo aspetto, che riguarda nel contesto specifico le modulazioni, è trattato in diversi testi di fisica delle scuole superiori.

Si invitano i colleghi a contribuire all'arricchimento di questo breve modulo (ed alla conseguente espansione della lista degli autori) inviando i loro commenti, proposte e contributi all'indirizzo di e-mail: iscra@iscra.net.

Gli sviluppi di questo tema saranno inseriti nel sito <http://www.calvino.ge.it/fisicaeradio>

L'intensità di radiazione

Si consideri una lampadina puntiforme che irradia nello spazio una potenza P in modo uniforme in tutte le direzioni. Si consideri quindi una sfera di raggio r avente come centro la lampadina (Figura 1). La superficie A della sfera è attraversata in modo uniforme dalla potenza P e si può definire l'*intensità di radiazione* o *densità di potenza*, indicata nel seguito con S , come il rapporto fra la potenza P che attraversa la sfera e la superficie A di quest'ultima:

$$S = \frac{P}{A}$$

Utilizzando le unità di misura del sistema internazionale, la densità di potenza si misura in W/m^2 .

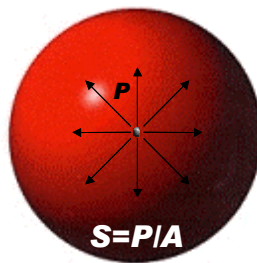


Figura 1. La potenza irradiata da una lampadina si distribuisce su una superficie sferica

Da un punto di vista intuitivo si può facilmente comprendere perché la grandezza sopra definita sia denominata intensità di radiazione: un ipotetico corpo assorbente che ricopre un'areola a della sfera, assorbe una potenza $P_a = aS$, tanto più elevata quanto più lo è il valore di S , cioè quanto più la radiazione è intensa. La luce irradiata da una lampadina è una forma di radiazione elettromagnetica di frequenza estremamente elevata (10^{14} Hz). Sostituendo alla lampadina un'antenna trasmittente, cosa cambia? In modo analogo alla lampadina, l'antenna irradia energia elettromagnetica che differisce dalla luce prodotta da un filamento incandescente poiché ha una frequenza molto più bassa (da 10^4 Hz fino a 10^{10} Hz) ed è coerente (come la luce emessa da un laser). Inoltre l'antenna difficilmente riesce ad irradiare potenza in modo uniforme in tutte le direzioni; trascurando momentaneamente quest'ultima caratteristica, ipotizzando quindi di considerare un'antenna isotropica (che irradia cioè in modo uniforme in tutte le direzioni), nulla cambia dal punto di vista energetico se alla lampadina considerata fino a questo punto si sostituisce un'antenna. Resta

ovviamente inteso che talvolta le antenne hanno dimensioni molto maggiori rispetto ad una piccola sorgente di luce, pertanto una sfera dovrà avere un raggio di notevoli dimensioni affinché il radiatore posto sul suo centro possa essere considerabile come un punto.

Sapendo che l'area della superficie di una sfera di raggio r vale $A = 4\pi r^2$, ad una distanza r da un'antenna isotropica la densità di potenza vale:

$$S = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Come già anticipato precedentemente, un'antenna reale non è isotropica, ma concentra l'energia irradiata verso direzioni privilegiate. Questa proprietà è molto utile, poiché in molti casi il ricevitore o un gruppo di ricevitori sono collocati in posizione fissa rispetto all'antenna, ed è utile concentrare verso questi la potenza trasmessa. Si pensi ad esempio ad un satellite geostazionario, posizionato necessariamente su un'orbita circolare a 36000 km di altezza sull'equatore. Da tale posizione, un intero continente è visto sotto un angolo molto piccolo e quindi è estremamente utile impiegare sul satellite un'antenna molto direttiva, risultando inutile trasmettere energia verso altre direzioni. La capacità di un'antenna di concentrare l'energia irradiata verso una direzione privilegiata, è quantificata tramite un parametro adimensionale che si chiama *guadagno* dell'antenna. Il guadagno, in seguito indicato come G_t , è definito in modo tale per cui il punto di una sfera che ha come centro l'antenna trasmittente, verso cui quest'ultima concentra la potenza irradiata, è sottoposto ad un'intensità di radiazione:

$$S = \frac{PG_t}{4\pi r^2}$$

in altre parole, nei confronti di tale punto, è come se l'antenna fosse ancora isotropica e trasmettesse una potenza $P_i = PG_t$. P_i è denominata *potenza equivalente irradiata da un'antenna isotropica*, in lingua inglese si chiama *Equivalent Isotropic Radiated Power* ed ha come acronimo "EIRP", molto usato nell'ambito dell'inquinamento elettromagnetico.

Esempio

Un'antenna avente un guadagno $G_t = 20$, irradia una potenza $P = 5$ W. Determinare il valore della EIRP e della densità di potenza a 10 km di distanza.

R: Si ha $EIRP = PG_t = 5 \times 20 = 100$ W,

$$S = \frac{PG_t}{4\pi r^2} = \frac{EIRP}{4\pi r^2} = \frac{100}{4\pi 10000^2} = 79.6 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$$

La ricezione del segnale

Come funziona un'antenna ricevente? L'esempio più intuitivo è rappresentato dalle ormai comunissime antenne a riflettore parabolico usate per la ricezione dei segnali televisivi trasmessi dai satelliti. La potenza intercettata dal disco parabolico viene riflessa e concentrata verso il ricevitore, posizionato sul fuoco del paraboloide.

Si può facilmente formulare una trattazione quantitativa, considerando le seguenti ipotesi:

1. A grande distanza dall'antenna trasmittente, l'ipotetica sfera su cui si distribuisce la potenza può essere localmente approssimata come un piano e quindi le onde elettromagnetiche assumono la forma di onde piane
2. Il riflettore parabolico ha la sua sezione ortogonale alla direzione di propagazione delle onde piane, che riflette totalmente come se fosse uno specchio ideale.

Se si verificano queste ipotesi, la potenza intercettata dal riflettore ed inviata verso il ricevitore, indicata come P_r , è ottenuta dal prodotto dell'intensità di radiazione S per l'area della sezione del disco, denominata nel seguito come A_r . Quindi:

$$P_r = SA_r$$

La prima ipotesi è facile che sia verificata, mentre per quanto riguarda la seconda, si può affermare che nessun riflettore è ideale, ed una frazione della potenza intercettata è dissipata sotto forma di calore; inoltre non si possono usare le regole dell'ottica geometrica per interpretare in modo assolutamente corretto il fenomeno della riflessione, poiché intervengono fenomeni di diffrazione; infine esiste un vasto insieme di antenne per le quali la ricezione del segnale non avviene tramite l'intercettazione di un'intensità di radiazione da parte di una superficie. In quest'ultima condizione si collocano tutte le antenne formate da conduttori elettrici filiformi, come il ben noto dipolo hertziano. Resta comunque sempre vero che, ferma restando la posizione dell'antenna trasmittente rispetto all'antenna ricevente, la potenza ricevuta da quest'ultima è direttamente proporzionale all'intensità di radiazione, cioè:

$$P_r = kS$$

dove k è un coefficiente di proporzionalità che dipende dal tipo di antenna (e da come questa è orientata verso la trasmittente) e che ha le dimensioni di un'area (dato che P si misura in W e che S si misura in W/m^2); pertanto il coefficiente k è denominato *area equivalente* dell'antenna e sarà in seguito indicato con A_{eqr} .

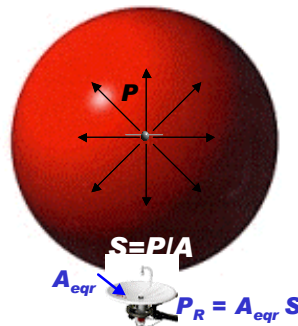


Figura 2. Un'antenna a riflettore parabolico intercetta la sfera "catturando" potenza

A questo punto si può calcolare la potenza ricevuta da un'antenna ricevente di area equivalente A_{eqr} , collocata ad una distanza r da un'antenna trasmittente di guadagno G_t che è alimentata da una potenza P . Si ha:

$$P_r = A_{eqr} S = A_{eqr} \frac{PG_t}{4\pi r^2}$$

Ottenuto l'importante legame che esiste fra la potenza trasmessa e quella ricevuta in un collegamento via radio, si tratta di valutare quanto deve valere P_r affinché un ricevitore funzioni correttamente. Il progresso tecnologico ha consentito di realizzare ricevitori molto sensibili: un telefono GSM è in grado di ricevere bene un segnale avente una potenza dell'ordine dei 10^{-12} W; un'autoradio riproduce musica con buona qualità con potenze dell'ordine dei 10^{-11} W; un ricevitore satellitare ha bisogno di circa 10^{-9} W.

Esempio

Un'autoradio è collegata direttamente ad un'antenna che ha un'area equivalente $A_{eqr} = 0.1 \text{ m}^2$ e deve ricevere una potenza $P_R = 10^{-11}$ W. Sapendo che l'autoradio dista dal trasmettitore 5 km, determinare la potenza che deve avere essere trasmessa utilizzando un'antenna di guadagno $G_t = 3$ per permettere di fornire all'autoradio la potenza necessaria.

R: Sapendo che $P_r = A_{eqr} \frac{PG_t}{4\pi r^2}$ si ottiene $P = \frac{4\pi r^2 P_r}{A_{eqr} G_t} = \frac{4\pi 5000^2 \times 10^{-11}}{0.1 \times 3} = 10.4 \times 10^{-3}$ W

Si può notare che si ottiene un valore di potenza molto basso, in realtà i radiotrasmettitori impiegano potenze di qualche migliaio di watt per poter consentire una ricezione anche in presenza di ostacoli ed all'interno di edifici.

La reversibilità delle antenne

Ogni antenna trasmittente può funzionare come ricevente e viceversa, inoltre noto il guadagno G di un'antenna trasmittente verso una determinata direzione, si può calcolare la sua area equivalente A_{eq} , quando l'antenna riceve dalla stessa direzione. Si può dimostrare che:

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

dove λ è la lunghezza d'onda utilizzata per la trasmissione. Si ricorda infatti che una trasmissione via radio impiega una determinata frequenza f a cui corrisponde una lunghezza d'onda $\lambda = cf$, dove c è la velocità della luce. I costruttori delle antenne, quindi, non forniscono mai G e A_{eq} , ma solo uno dei due parametri (quasi sempre il guadagno), essendo essi legati tramite la relazione appena vista. Quindi, se di un'antenna ricevente è noto il guadagno G_r , anziché l'area equivalente, l'ultima formula ricavata nel paragrafo precedente diventa:

$$P_r = A_{eqr} \frac{PG_t}{4\pi r^2} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \frac{PG_t}{4\pi r^2} = P \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_t G_r$$

Esempio

Calcolare l'area equivalente di un'antenna isotropica alle frequenze $f_1 = 10$ MHz e $f_2 = 100$ MHz.

R: Alla frequenza f_1 corrisponde una lunghezza d'onda $\lambda_1 = cf_1 = 3 \times 10^8 / 10^7 = 30$ m.

Alla frequenza f_2 corrisponde una lunghezza d'onda $\lambda_2 = cf_2 = 3 \times 10^8 / 10^8 = 3$ m.

Sapendo che le antenne isotropiche hanno un guadagno unitario ($G = 1$), si ha:

$$A_{eq1} = \frac{\lambda_1^2}{4\pi} = \frac{30^2}{4\pi} = 71.6 \text{ m}^2 \text{ e } A_{eq2} = \frac{\lambda_2^2}{4\pi} = \frac{3^2}{4\pi} = 0.716 \text{ m}^2$$

Si può notare che, a parità di guadagno di un'antenna, l'area equivalente varia in modo inversamente proporzionale al quadrato della frequenza. Da ciò ne consegue che impiegando frequenze molto alte (come quelle appartenenti alla regione delle microonde, dell'ordine di 10^{10} Hz) è necessario disporre di antenne dotate di un guadagno molto elevato e quindi molto direttive (poiché un elevato guadagno è sintomo della capacità dell'antenna di concentrare la potenza trasmessa verso un'unica direzione). Per questo motivo, i collegamenti radio a microonde avvengono prevalentemente fra postazioni fisse (o fra postazioni mobili in ambienti di dimensioni molto contenute, dove anche aree equivalenti molto piccole permettono una buona ricezione dei segnali).

L'intensità di radiazione ed i campi

Nei paragrafi precedenti, per effettuare una trattazione quantitativa delle trasmissioni via radio è stato utilizzato un approccio basato su considerazioni di tipo energetico, senza considerare che le energie e le potenze in gioco sono associate ad onde elettromagnetiche. In un'onda piana, il campo elettrico ed il campo magnetico vibrano ortogonalmente fra loro e rispetto alla direzione di propagazione (Figura 3) e, come già accennato nei paragrafi precedenti, a ragionevole distanza dall'antenna trasmittente le onde elettromagnetiche possono essere considerate con buona approssimazione come onde piane.

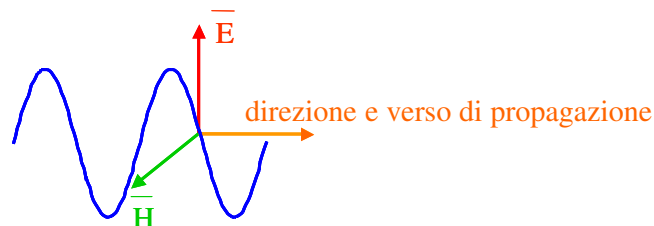


Figura 3. Ortogonalità fra campo elettrico, magnetico e direzione di propagazione in un'onda piana

Le intensità dei vettori campo elettrico e campo magnetico sono funzioni del tempo, rispettivamente indicate come $E(t)$ e $H(t)$, che nel più semplice dei casi sono funzioni sinusoidali. Considerando i valori efficaci delle due funzioni, E_{eff} e H_{eff} , si ha che l'intensità di radiazione è data dal prodotto dei due campi:

$$S = E_{eff} H_{eff}$$

inoltre in un'onda piana le due grandezze efficaci non sono indipendenti, ma correlate tramite la relazione:

$$\frac{E_{eff}}{H_{eff}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$$

se le onde si propagano nel vuoto (o nell'atmosfera, dato che questa ha valori di permittività elettrica e permeabilità magnetica circa uguali a quella del vuoto).

$\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ è anche definita come *impedenza caratteristica del vuoto* e si indica con R_0 o Z_0 .

Valgono di conseguenza anche le relazioni:

$$S = E_{eff}^2 / R_0 = H_{eff}^2 R_0$$

che sono molto utili nell'ambito dell'inquinamento elettromagnetico. In questo contesto, alcune normative italiane impongono che il corpo umano non sia sottoposto ad un'intensità di radiazione superiore a 1 W/m^2 , che devono essere ridotti a 0.1 W/m^2 in ambienti abitualmente frequentati (tali limiti valgono per frequenze comprese fra 3 MHz e 3 GHz).

Al primo valore di intensità di radiazione S_1 corrisponde un campo elettrico efficace:

$$E_{eff1} = \sqrt{S R_0} = \sqrt{1 \times 377} = 19.4 \text{ V/m}$$

Al secondo valore di densità di potenza S_2 corrisponde un campo elettrico efficace:

$$E_{eff2} = \sqrt{S R_0} = \sqrt{0.1 \times 377} = 6.14 \text{ V/m}$$

I due valori ottenuti si approssimano ponendo con i parametri limite di esposizione rispettivamente di 20 V/m e 6 V/m.

Esempio

Una stazione radio base di una rete telefonica cellulare trasmette una potenza di 50 W con un'antenna avente un guadagno pari a 30. Determinare:

- 1- Il valore del campo elettrico efficace ad una distanza di 100 m dall'antenna lungo la direzione di massima radiazione.
- 2- A quale distanza si ottiene un campo efficace di intensità pari a 20 V/m.

R1: La densità di potenza vale: $S = \frac{P G_t}{4\pi r^2} = \frac{50 \times 30}{4\pi 100^2} = 0.0119 \text{ W/m}^2$, a cui corrisponde un campo

elettrico efficace $E_{eff} = \sqrt{S R_0} = \sqrt{0.0119 \times 377} = 2.12 \text{ V/m}$

R2: Per ottenere $E_{eff1} = 20 \text{ V/m}$, l'intensità di radiazione deve valere:

$S = E_{eff}^2 / R_0 = 20^2 / 377 = 1.06 \text{ W/m}^2$, da cui:

$$r = \sqrt{\frac{P G_t}{4\pi S}} = \sqrt{\frac{50 \times 30}{4\pi 1.06}} = 10.9 \text{ m}$$

Poiché le antenne delle stazioni radio base delle reti radiomobili cellulari hanno dimensioni dell'ordine del metro, il risultato è *molto indicativo* poiché dalla distanza ottenuta, l'antenna trasmittente difficilmente si può considerare puntiforme. Probabilmente a tale distanza l'intensità del campo è minore di 20 V/m, essendo la sorgente non concentrata.

I sistemi di trasmissione e ricezione reali

Le formulazioni sviluppate nei paragrafi precedenti, hanno preso in considerazione la potenza trasmessa dall'antenna trasmittente e quella ricevuta dall'antenna ricevente nell'ipotesi in cui il mezzo trasmissivo collocato fra le due antenne non introduca alcun assorbimento di potenza: utilizzando ad esempio un'ipotetica antenna isotropica, si è ipotizzato che la potenza si diffonde uniformemente nello spazio. Se si considera un collegamento reale, fra l'antenna trasmittente e quella ricevente, anche nel caso in cui la retta congiungente le due antenne fosse libera, sono presenti degli ostacoli, come ad esempio il terreno sottostante. Questi ostacoli possono creare fenomeni di riflessione e di diffrazione. In caso di riflessione, all'antenna ricevente giunge l'onda diretta, che si compone con un'onda riflessa, ritardata rispetto alla prima perché compie un percorso più lungo (Figura 4).

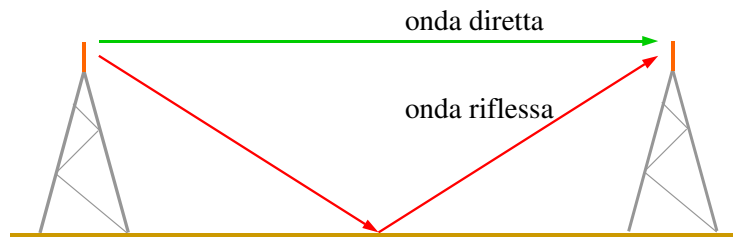


Figura 4. L'onda diretta si compone con l'onda riflessa dal terreno

In funzione del ritardo, le due onde possono creare un fenomeno di interferenza costruttiva, dove la potenza ricevuta è maggiore di quella che si otterrebbe in assenza di riflessione, oppure un fenomeno di interferenza distruttiva, che conferisce alla potenza ricevuta un valore inferiore rispetto a quello che si otterrebbe senza fenomeni di riflessione. La diffrazione disperde ulteriormente l'energia nello spazio, riducendo la potenza ricevuta rispetto a quella che si otterrebbe nelle condizioni di spazio completamente libero. Il principio di Huygens afferma infatti che un fronte d'onda è equivalente ad un'infinità di sorgenti elementari, dalle quali dipende il campo elettromagnetico nello spazio antistante –rispetto alla direzione di propagazione- al fronte considerato. La presenza di ostacoli che non intercettano il cammino ottico perturba comunque le sorgenti elementari, indebolendo progressivamente l'energia di un'onda. Una causa comune di diffrazione è rappresentata non solo da rilievi collinari o montuosi e costruzioni artificiali, ma anche dalla superficie del terreno che separa l'antenna trasmittente da quella ricevente. L'ingegneria delle telecomunicazioni ha sviluppato diversi modelli per quantificare gli effetti di riflessione e di diffrazione, che possono rendere la potenza ricevuta dall'antenna ricevente diversi ordini di grandezza inferiore a quella prevista in condizioni di spazio libero. Ovviamente, nei collegamenti satellitari i fenomeni di riflessione e di diffrazione sono estremamente ridotti.

Bisogna inoltre considerare che gli apparati per le radiocomunicazioni sono collegati con le rispettive antenne attraverso cavi (oppure guide d'onda). Questi mezzi trasmissivi assorbono (talvolta anche in modo considerevole) una parte della potenza fornita all'ingresso (Figura 5).

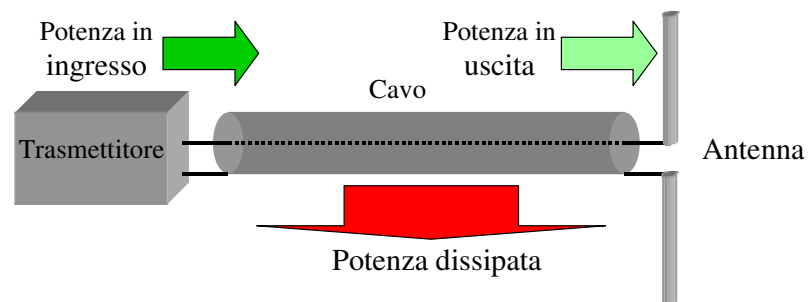


Figura 5. Potenza in ingresso, dissipata ed in uscita da un cavo per la trasmissione di segnali

Il rapporto fra la potenza fornita all'ingresso del cavo e quella presente in uscita, è definito come *attenuazione di potenza* del cavo. Pertanto in un sistema di radiocomunicazione, se sono definite:

- l'attenuazione di potenza del cavo che collega il trasmettitore all'antenna trasmittente L_1
- l'attenuazione di potenza del cavo che collega il trasmettitore all'antenna ricevente L_2
- la distanza fra le due antenne r
- la lunghezza d'onda impiegata λ (o la frequenza)
- il guadagno dell'antenna trasmittente G_t
- il guadagno dell'antenna ricevente G_r

In corrispondenza di una potenza P_{TX} fornita dal trasmettitore, in condizione di spazio libero si ha:

-potenza fornita all'antenna trasmittente: $P = \frac{P_{TX}}{L_1}$

-densità di potenza sull'antenna ricevente: $S = \frac{PG_t}{4\pi r^2} = \frac{P_{TX}}{L_1} \frac{G_t}{4\pi r^2}$

-potenza ricevuta dall'antenna ricevente:

$$P_r = A_{eqr} S = A_{eqr} \frac{P_{TX}}{L_1} \frac{G_t}{4\pi r^2} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \frac{P_{TX}}{L_1} \frac{G_t}{4\pi r^2} = \frac{P_{TX}}{L_1} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_t G_r$$

-potenza ricevuta dal ricevitore: $P_{RX} = \frac{P_r}{L_2} = P_{TX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \frac{G_t G_r}{L_1 L_2}$

In presenza di fenomeni di riflessione e di diffrazione, i modelli utilizzati nell'ingegneria delle telecomunicazioni forniscono un'attenuazione aggiuntiva L_m tale che:

$$P_{RX} = P_{TX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \frac{G_t G_r}{L_1 L_2 L_m}$$

Esempio

Di un sistema di radiotrasmissione sono noti i seguenti dati:

- potenza del trasmettitore: $P_{TX} = 1$ mW
- guadagno dell'antenna trasmittente: $G_t = 20$
- antenna ricevente uguale a quella trasmittente
- attenuazione del cavo che collega il trasmettitore all'antenna trasmittente: $L_1 = 1.52$
- attenuazione del cavo che collega il trasmettitore all'antenna ricevente: $L_2 = 2.63$
- distanza fra le antenne: $r = 980$ m
- frequenza impiegata: $f = 433$ MHz

Determinare il valore della potenza ricevuta supponendo che siano verificate le condizioni di spazio libero, ed il valore dell'attenuazione aggiuntiva L_m se $P_{RXI} = 10^{-10}$ W

R: Si determina la lunghezza d'onda $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / (433 \times 10^6) = 0.693$ m

Quindi, considerando che in condizioni di spazio libero l'attenuazione L_m è ininfluente ($L_m = 1$), si ha:

$$P_{RX} = P_{TX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \frac{G_t G_r}{L_1 L_2 L_m} = 10^{-3} \times \left(\frac{0.693}{4\pi 980} \right)^2 \frac{20 \times 20}{1.52 \times 2.63} = 3.17 \times 10^{-10} \text{ W}$$

Se la potenza ricevuta vale P_{RXI} , si può calcolare L_m dalla formula precedente, oppure semplicemente notare che $L_m = P_{RX} / P_{RXI} = 3.17 \times 10^{-10} / 10^{-10} = 3.17$.

Si può notare come la potenza ricevuta sia oltre dieci volte superiore a quella necessaria per una buona ricezione da parte di un'autoradio e oltre cento volte superiore a quella che necessita un telefono cellulare per garantire una buona ricezione. E' molto comune che un ricevitore riceva potenze molto maggiori di quelle necessarie, le quali non producono generalmente alcun danno. Il

sovradimensionamento della potenza trasmessa risulta necessario per prevenire elevati valori dell'attenuazione aggiuntiva L_m in presenza di ostacoli, di fenomeni di riflessione e di diffrazione.

Esercizi

1. Quanta potenza deve trasmettere un'antenna isotropica per produrre, ad una distanza di 1 km, una densità di potenza pari a 10^{-10} W/m²? E se l'antenna ha un guadagno $G = 50$?
2. Quanta potenza EIRP deve trasmettere un trasmettitore collocato sulla Luna affinché un'antenna sulla Terra avente un'area equivalente di 10 m² riceva una potenza di 10 pW? (si assuma la distanza Terra – Luna pari a 380000 km).
3. Con riferimento all'esercizio precedente, determinare la potenza che deve trasmettere l'antenna se ha un guadagno $G = 3000$ e, successivamente, se ha un'area equivalente pari a 5 m², in corrispondenza di una frequenza $f_1 = 150$ MHz e $f_2 = 10000$ MHz.
4. Si deve realizzare una trasmissione radio che copra una distanza pari a 55 km. I guadagni dell'antenna trasmittente e ricevente valgono rispettivamente $G_t = 15$ e $G_r = 20$; sapendo che il cavo collegato al trasmettitore ha un'attenuazione $L_1 = 2$ e quello collegato al ricevitore ha un'attenuazione $L_2 = 1.5$, determinare la potenza che deve fornire il trasmettitore affinché la potenza ricevuta valga 10 pW, alla frequenza di 450 MHz e considerando un'attenuazione aggiuntiva $L_m = 10$.
5. Con riferimento all'esercizio precedente, determinare il valore del campo elettrico efficace ad una distanza di 50 m dall'antenna trasmittente lungo la direzione di massima irradiazione ed il valore che deve assumere la potenza erogata dal trasmettitore affinché a tale distanza il campo elettrico efficace assuma il valore di 6 V/m.

Bibliografia

M.E. Bergamaschini, P. Marazzini, L. Mazzoni: *Fisica 3*, Carlo Signorelli Editore
D. Halliday, R. Resnick: *Fisica 2*, Casa Editrice Ambrosiana Milano
S. Bobbio, E. Gatti: *Elementi di Elettromagnetismo*, Bollati Boringhieri
S. Ramo, J. R. Whinnery, T. Van Duzer: *Campi e Onde nell'Elettronica per le Telecomunicazioni*, Ingegneria Elettrica Franco Angeli
A. Iscra, M. T. Quaglini, *Le Radiocomunicazioni alla Portata di Tutti*, www.iscra.net/multimedia (prodotto multimediale).

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Corso di Studi in Ingegneria delle Telecomunicazioni dell'Università di Genova ed il Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni (CNIT) per il supporto fornito e per la preziosa ed indispensabile strumentazione concessa in prestito.