



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione IX
Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione


LEZIONE IX

PARAMETRI FONDAMENTALI DELLE ANTENNE IN RICEZIONE

Corso di
"Teoria e tecnica delle onde elettromagnetiche"

Prof. Giuseppe Pelosi
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni
Università di Firenze
E-mail: giuseppe.pelosi@unifi.it
URL: <http://www.cem.unifi.it/>

1/21

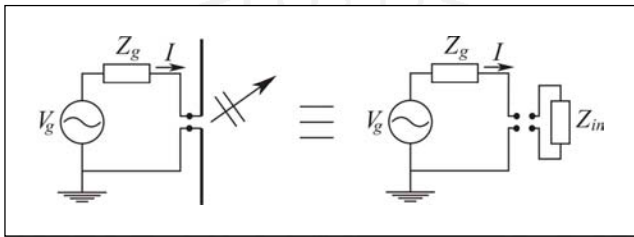


Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione IX
Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

ANTENNA IN TRASMISSIONE


Circuito equivalente di antenna trasmittente



V_g = tensione del generatore
 Z_g = impedenza interna del generatore
 I = corrente ai morsetti dell'antenna
 Z_{in} = impedenza di ingresso (caratterizza interamente l'antenna)

Se non è possibile individuare dei morsetti è comunque possibile includere nell'antenna un tratto della linea di alimentazione, definendo le grandezze di interesse ad una sezione della linea in cui sia presente il solo modo TEM (linee bifilari o coassiali). Le grandezze misurate a questa sezione vengono riportate a una sezione di riferimento, che per definizione si assume come quella di ingresso, con le usuali formule di trasporto delle linee.

2/21



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione IX

Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

ANTENNA IN TRASMISSIONE: IMPEDENZA DI INGRESSO

ANTENNA IN TRASMISSIONE: IMPEDENZA DI INGRESSO

L'impedenza d'ingresso Z_{in} di un'antenna è il rapporto tra tensione e corrente ai morsetti di alimentazione della medesima.

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = (R_r + R_p) + jX_{in}$$

$R_{in} \rightarrow$ resistenza di ingresso
 $X_{in} \rightarrow$ reattanza di ingresso (energia reattiva immagazzinata in prossimità dell'antenna)
 $R_r \rightarrow$ resistenza di radiazione
 $R_p \rightarrow$ resistenza di perdita

$X_{in} = 0 \rightarrow$ antenna risonante o accordata
 $Z_{in} = Z_0^* \rightarrow$ massimo trasferimento di potenza tra linea di alimentazione e antenna
 $Z_0^* \rightarrow$ complesso coniugato dell'impedenza caratteristica della linea (che in pratica è reale)

3/21



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione IX

Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

ANTENNA IN TRASMISSIONE: RESISTENZA DI RADIAZIONE


ANTENNA IN TRASMISSIONE: RESISTENZA DI RADIAZIONE

$P_r \rightarrow$ potenza totale radiata dall'antenna
 $I \rightarrow$ corrente arbitraria di riferimento (valore max della corrente, I_M ,
 o valore della corrente di alimentazione, I_0)

La resistenza di radiazione R_r è la resistenza che, percorsa dalla corrente I , dissipa la potenza P_r

$$P_r = \frac{1}{2} R_r |I|^2$$

4/21

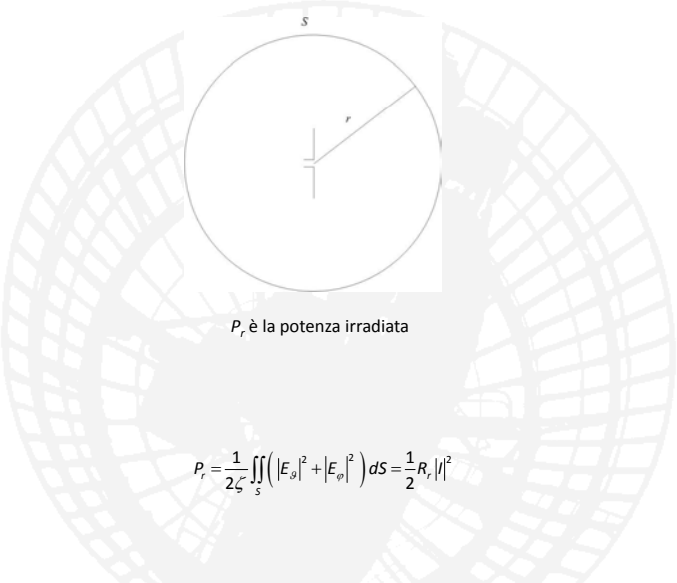


Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione IX
Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

ANTENNA IN TRASMISSIONE: RESISTENZA DI RADIAZIONE


Lezione IX
Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione



P_r è la potenza irradiata

$$P_r = \frac{1}{2\zeta} \iint_S (|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2) dS = \frac{1}{2} R_r |I|^2$$

5/21



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione IX
Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

ANTENNA A DIPOLO - IMPEDENZA D'INGRESSO

Lezione IX
Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

Se per un dipolo a $\lambda/2$ infinitamente sottile si ipotizza una distribuzione di corrente sinusoidale

$$I(z) = I_0 \cos(kz) ; \quad |z| \leq \frac{\lambda}{4}$$

il calcolo della resistenza d'ingresso mediante la potenza radiata fornisce:

$$R_{in(\lambda/2)} = 73 \Omega$$

Per dipoli di spessore finito il calcolo richiede l'ausilio di tecniche numeriche che non assumono una distribuzione di corrente assegnata sul filo

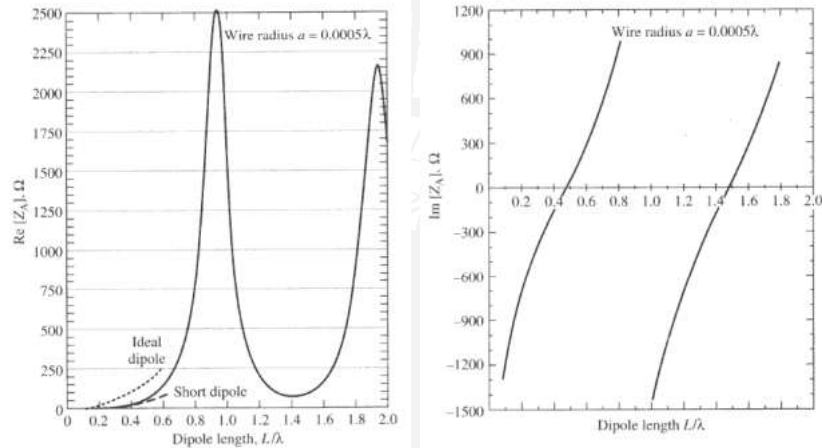
6/21



ANTENNA A DIPOLO - IMPEDENZA D'INGRESSO

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

Impedenza calcolata con l'ausilio di tecniche numeriche



7/21



ANTENNA A DIPOLO - IMPEDENZA D'INGRESSO

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

Formule pratiche per il calcolo della resistenza d'ingresso (L : lunghezza totale del filo)

Length L	Input Resistance (R_{in}), Ω
$0 < L < \frac{\lambda}{4}$	$20\pi^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2$
$\frac{\lambda}{4} < L < \frac{\lambda}{2}$	$24.7 \left(\pi \frac{L}{\lambda}\right)^{2.4}$
$\frac{\lambda}{2} < L < 0.637\lambda$	$11.14 \left(\pi \frac{L}{\lambda}\right)^{4.17}$

Nei dipoli reali la lunghezza di risonanza diminuisce all'aumentare dello spessore (a =raggio)

Length to Diameter Ratio, $L/2a$	Percent Shortening Required	Resonant Length L	Dipole Thickness Class
5000	2	0.49λ	Very thin
50	5	0.475λ	Thin
10	9	0.455λ	Thick

Al diminuire della lunghezza di risonanza la resistenza d'ingresso alla risonanza diminuisce

8/21



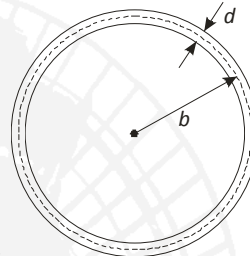
ANTENNA A LOOP - IMPEDENZA DI INGRESSO

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

Si considera un'antenna a loop circolare con una circonferenza di 0.2λ ed un raggio del filo di 0.001λ , da cui:

$$b = \frac{0.1\lambda}{\pi} \rightarrow \text{raggio medio del loop}$$

$$d = 0.002\lambda \rightarrow \text{diametro del filo}$$



$$R_r^{(s)} = \frac{2}{3} \frac{k^2}{\zeta} \frac{\omega^2 \mu^2 \Delta s^2}{4\pi} = 20(k^2 \Delta s)^2 \approx 31.2 \left(\frac{\Delta s}{\lambda^2} \right)^2 = 31.2 \left(\frac{\pi b^2}{\lambda^2} \right)^2 = 0.316\Omega$$

$$X_{in}^{(s)} = \omega L = 2\pi \frac{C}{\lambda} b \mu \left[\ln \left(\frac{16b}{d} \right) - 1.75 \right] = 2\pi \frac{3 \times 10^8}{\lambda} \frac{0.1\lambda}{\pi} 4\pi \times 10^{-7} \left[\ln \left(\frac{1.6}{0.002\pi} \right) - 1.75 \right] = 285.8\Omega$$

9/21



ANTENNA A LOOP - IMPEDENZA DI INGRESSO

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

resistenza superficiale $R_s^{(s)} = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2\pi \times 10^6}{2 \times 5.7 \times 10^7}} = 2.63 \times 10^{-4} \Omega$


resistenza di perdita $R_p^{(s)} = \frac{2b}{d} R_s = \frac{2b}{d} 2.63 \times 10^{-4} \Omega = 8.38 \times 10^{-3} \Omega$

resistenza di ingresso $R_{in}^{(s)} = R_r^{(s)} + R_p^{(s)} = 0.324\Omega$

impedenza di ingresso $Z_{in}^{(s)} = R_{in}^{(s)} + jX_{in}^{(s)} = 0.324 + j285.8\Omega$

efficienza di radiazione $e = \frac{R_r^{(s)}}{R_{in}^{(s)}} = \frac{0.316}{0.324} = 97.5\%$


10/21



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze


Lezione IX
Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

ANTENNA IN RICEZIONE: CIRCUITO EQUIVALENTE



$V \rightarrow$ tensione del generatore di tensione equivalente
 $Z_{in} \rightarrow$ impedenza interna del generatore equivalente (coincide con l'impedenza di ingresso in TX)
 $I \rightarrow$ corrente ai morsetti dell'antenna
 $Z_u \rightarrow$ impedenza di carico


11/21



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione IX
Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

ANTENNA IN RICEZIONE: ALTEZZA EFFICACE



Sia E l'ampiezza complessa del campo elettrico associato all'onda incidente in corrispondenza dell'antenna.
 Per la presenza del campo incidente, ai morsetti dell'antenna supposta a vuoto, si induce una tensione V proporzionale al campo E

$$V = h_r E$$

dove h_r prende il nome di altezza efficace in ricezione

Dall'altezza efficace dell'antenna si può calcolare la tensione a vuoto quando l'antenna è investita da un'onda piana

Mediante il teorema di reciprocità si dimostra che per qualunque antenna l'altezza efficace in ricezione h_r coincide con l'altezza efficace in trasmissione h_t

$$h_r = h_t = h$$

12/21



ANTENNA IN RICEZIONE: ALTEZZA EFFICACE

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

L'altezza efficace in ricezione, h_r , di un'antenna dipende dalla direzione mutua fra l'antenna e il campo incidente



13/21



ANTENNA IN RICEZIONE: POTENZA SUL CARICO

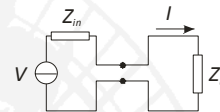
Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

$$V_u = \frac{EhZ_u}{Z_{in} + Z_u}$$

Tensione ai capi del carico

$$P_u = \frac{1}{2} \frac{|Eh|^2 R_u}{|Z_{in} + Z_u|^2}$$

Potenza attiva sul carico



Condizione di adattamento per il massimo trasferimento di potenza
 (adattamento di potenza)

$$P_{u_{max}} = \frac{1}{2} \frac{|Eh|^2}{4R_{in}}$$

Potenza attiva massima sul carico per $Z_{in} = Z_u^*$ ($R_{in} = R_u$; $X_{in} = -X_u$)

14/21



ANTENNA IN RICEZIONE: AREA EFFICACE

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

L'area efficace è il rapporto tra potenza trasferita al carico (in condizioni di adattamento di potenza) e densità di potenza incidente

$$A = \frac{P_{u_{max}}}{\frac{1}{2} |\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*|} = \frac{\frac{1}{2} \frac{|Eh|^2}{4R_m}}{\frac{1}{2} \frac{|E|^2}{\zeta}} = \frac{|h|^2 \zeta}{4R_m}$$

Per ogni antenna l'area efficace dipende dalla angolazione mutua tra antenna e onda piana incidente

15/21



ANTENNA IN RICEZIONE: RELAZIONE TRA DIRETTIVITÀ ED AREA EFFICACE

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

Due antenne adatte in potenza ai carichi: antenna (1) in TX e antenna (2) in RX



Potenza sul carico (2) quando trasmette l'antenna (1)

$$P_{u2} = \frac{P_{r1} D_1}{4\pi r^2} A_2$$

$P_{r1} \rightarrow$ potenza radiata dall'antenna (1)

$D_1 \rightarrow$ direttività dell'antenna (1)

$A_2 \rightarrow$ area efficace dell'antenna (2)

$r \rightarrow$ distanza tra le antenne

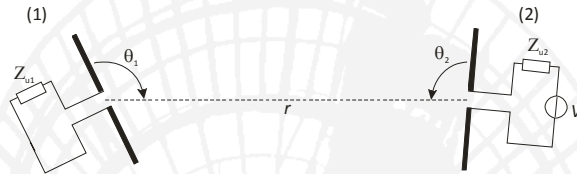
16/21



ANTENNA IN RICEZIONE: RELAZIONE TRA DIRETTIVITÀ ED AREA EFFICACE

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

Due antenne adattate in potenza ai carichi: antenna (2) in TX e antenna (1) in RX



Potenza sul carico (1) quando trasmette l'antenna (2)

$$P_{v1} = \frac{P_{r2} D_2}{4\pi r^2} A_1$$

$P_{r2} \rightarrow$ potenza radiata dall'antenna (2)

$D_2 \rightarrow$ direttività dell'antenna (2)

$A_1 \rightarrow$ area efficace dell'antenna (1)

$r \rightarrow$ distanza tra le antenne

17/21



ANTENNA IN RICEZIONE: RELAZIONE TRA DIRETTIVITÀ ED AREA EFFICACE

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

$$\frac{P_{v2}}{P_{v1}} = \frac{\frac{P_{r1} D_1}{4\pi r^2} A_2}{\frac{P_{r2} D_2}{4\pi r^2} A_1} = \frac{P_{r1} D_1 A_2}{P_{r2} D_2 A_1} \Rightarrow \frac{D_1}{A_1} = \frac{D_2}{A_2} \left[\frac{P_{r2} P_{v2}}{P_{r1} P_{v1}} \right]$$

$$P_{v2} = \frac{1}{2} \frac{|E_{12}|^2}{4R_2} \quad P_{v1} = \frac{1}{2} \frac{|E_{21}|^2}{4R_1}$$


$$P_{r2} = \frac{1}{2} R_2 |I_2|^2 \quad P_{r1} = \frac{1}{2} R_1 |I_1|^2$$

Il campo elettrico E_{21} è quello radiato dall'antenna (2) valutato in corrispondenza dell'antenna (1)

Il campo elettrico E_{12} è quello radiato dall'antenna (1) valutato in corrispondenza dell'antenna (2)

$$\begin{aligned} |E_{21}| &= \left| jk \zeta l_2 h_2 \sin \vartheta_2 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \right| \\ |E_{12}| &= \left| jk \zeta l_1 h_1 \sin \vartheta_1 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \right| \end{aligned} \quad \frac{P_{r2} P_{v2}}{P_{r1} P_{v1}} = \frac{\frac{1}{2} R_2 |I_2|^2}{\frac{1}{2} R_1 |I_1|^2} \frac{\frac{1}{2} \frac{|E_{12}|^2}{4R_2}}{\frac{1}{2} \frac{|E_{21}|^2}{4R_1}} = \left| \frac{h_1 h_2 l_2 l_1 \sin \vartheta_1}{h_2 h_1 l_1 l_2 \sin \vartheta_2} \right|^2$$

18/21



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione IX

Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

ANTENNA IN RICEZIONE: RELAZIONE TRA DIRETTIVITÀ ED AREA EFFICACE


Si considerino due antenne arbitrarie e si imponga $\vartheta_1 = \vartheta_2$

$$\frac{P_{r2} P_{a2}}{P_{r1} P_{a1}} = \frac{|h_1 h_2 I_2 I_1 \sin \vartheta_1|^2}{|h_2 h_1 I_1 I_2 \sin \vartheta_2|^2} = 1$$

Si deduce quindi che $\frac{D_1}{A_1} = \frac{D_2}{A_2}$

Da cui segue che il rapporto D/A è costante indipendentemente dalla particolare antenna considerata

19/21



Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione IX

Parametri fondamentali
delle antenne in ricezione

ANTENNA IN RICEZIONE: RELAZIONE TRA DIRETTIVITÀ ED AREA EFFICACE

Se si considera un dipolo elettrico corto (dec) si ha:

$$\left. \begin{aligned} D &= 3/2 \\ A &= \frac{3\pi}{2k^2} = \frac{3\lambda^2}{8\pi} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{D}{A} = \frac{4\pi}{\lambda^2}$$

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

Questa relazione è valida per un'antenna qualsiasi

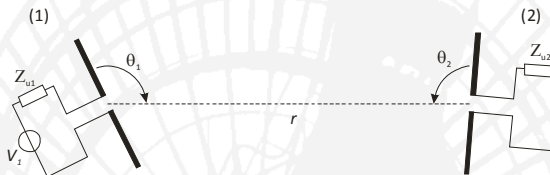
20/21



LE FORMULE DEL COLLEGAMENTO

Lezione IX Parametri fondamentali delle antenne in ricezione

Si considerano due antenne, (1) in TX e (2) in RX adattata in potenza, distanti tra loro r .
 Il rapporto tra la potenza reale consegnata al carico e la potenza trasmessa è:



Formula del collegamento:
$$\frac{P_{u2}}{P_{r1}} = \frac{A_2 D_1}{4\pi r^2} = \left[\frac{\lambda}{4\pi r} \right]^{-2} D_1 D_2 = \frac{A_1 A_2}{\lambda^2 r^2}$$

Attenuazione dello spazio libero:
$$\left[\frac{\lambda}{4\pi r} \right]^2$$