



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 VI  
Antenne filari


**LEZIONE VI**

**ANTENNE FILARI**

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](mailto:giuseppe.pelosi@unifi.it)  
URI: <http://www.cem.unifi.it/>

1/26

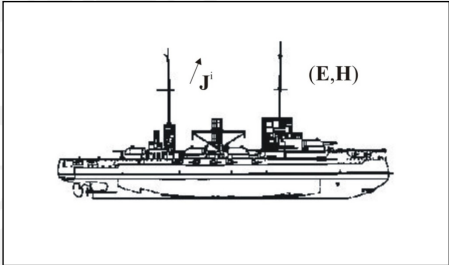


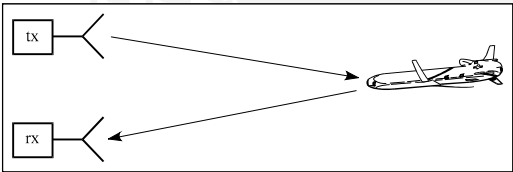
Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata  
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico  
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione VI  
Antenne filari

**PROBLEMA DI ANTENNA E PROBLEMA RADAR**

Nel problema di antenna la distribuzione di corrente nota  $J$  (antenna) è posta al finito rispetto alla struttura e si vuole determinare il campo in zona vicina-lontana.





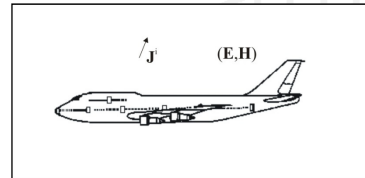
Nel problema radar la struttura è supposta illuminata da un'onda piana e si vuole determinare il campo lontano

2/26



# PRINCIPIO DI EQUIVALENZA (FORMULAZIONE DI LOVE)

## Lezione VI Antenne filari



$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega \mathbf{B} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}^i(\text{antenna}) \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= 0\end{aligned}$$

La soluzione del problema elettromagnetico richiede la soluzione delle equazioni di Maxwell una volta specificate

- le sorgenti  $\mathbf{J}^i$  (antenna)

e imposte

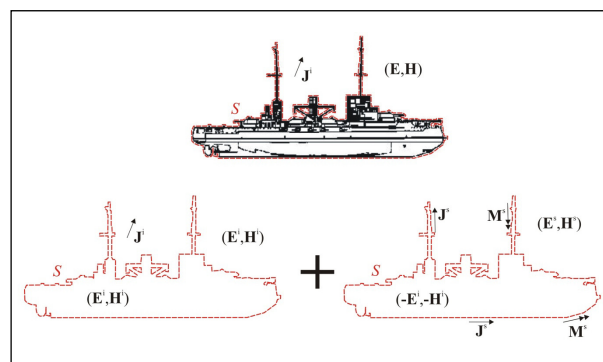
- le condizioni al contorno sulle superfici che delimitano materiali diversi
- la condizione di radiazione all'infinito

3/26



# PRINCIPIO DI EQUIVALENZA (FORMULAZIONE DI LOVE)

## Lezione VI Antenne filari



- si lavora nello spazio libero
- le correnti equivalenti  $\mathbf{J}^s$  e  $\mathbf{M}^s$  sono incognite e dipendono dal campo elettromagnetico totale  

$$(\mathbf{E}, \mathbf{H}) = (\mathbf{E}^i, \mathbf{H}^i) + (\mathbf{E}^s, \mathbf{H}^s) \text{ su } S$$
- si perde però l'informazione sul campo elettromagnetico all'interno della superficie di equivalenza  $S$

4/26

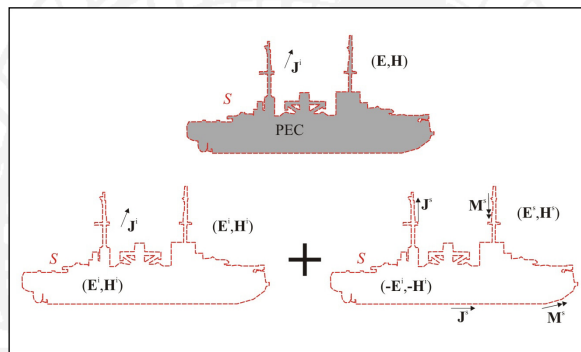


# PRINCIPIO DI EQUIVALENZA (FORMULAZIONE DI LOVE)

## Lezione VI Antenne filari

### Un caso particolare: corpi perfettamente conduttori

Facendo coincidere la superficie di equivalenza con quella di un oggetto perfettamente conduttore (PEC), le sorgenti equivalenti sono soltanto di tipo elettrico.



$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^i(\mathbf{r}; \mathbf{J}') + \mathbf{E}^s(\mathbf{r}; \mathbf{J}', \mathbf{M}^s = 0)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^i(\mathbf{r}; \mathbf{J}') + \mathbf{H}^s(\mathbf{r}; \mathbf{J}', \mathbf{M}^s = 0)$$

5/26



# DALLE CORRENTI EQUIVALENTI AL CAMPO ELETTROMAGNETICO

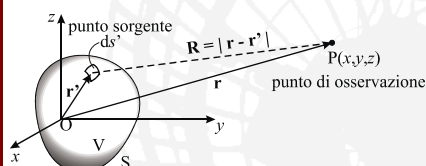
## Lezione VI Antenne filari

### Dalle correnti equivalenti al potenziale (integrali di radiazione)

Risolviendo le equazioni di Helmholtz

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}^s$$

si ottengono le relazioni integrali che legano il potenziale vettore  $\mathbf{A}$  alle sorgenti equivalenti sulla superficie di equivalenza  $S$




$$\mathbf{A} = \mathbf{A}(\mathbf{r}, \mathbf{J}^s) = \frac{\mu}{4\pi} \oint_S \mathbf{J}^s(\mathbf{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds'$$

$$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \quad k = \beta - j\alpha$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R}$$

funzione di Green dello spazio libero

6/26



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 VI  
Antenne filari

---

**DALLE CORRENTI EQUIVALENTI AL CAMPO ELETTROMAGNETICO**

**Dal potenziale al campo elettromagnetico (relazione differenziale)**

Noto il potenziale  $\mathbf{A}$  il campo elettromagnetico – esternamente alla superficie di equivalenza  $S$  - può essere ottenuto tramite delle relazioni differenziali dal potenziale vettore  $\mathbf{A}$

$$\mathbf{E}^s = \mathbf{E}^s(\mathbf{r}, \mathbf{J}^s) = -j\omega\mathbf{A}(\mathbf{r}, \mathbf{J}^s) - \frac{j}{\omega\epsilon\mu} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}(\mathbf{r}, \mathbf{J}^s))$$

$$\mathbf{H}^s = \mathbf{H}^s(\mathbf{r}, \mathbf{J}^s) = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}, \mathbf{J}^s)$$

Le relazioni che legano i campi elettromagnetici  $\mathbf{E}^s$ ,  $\mathbf{H}^s$  alle correnti equivalenti  $\mathbf{J}^s$ , passando attraverso il potenziale  $\mathbf{A}$ , sono di tipo integro-differenziale

7/26



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 VI  
Antenne filari

---

**MODALITÀ DI SOLUZIONE DEL PROBLEMA DI ANTENNA**

Come determinare le sorgenti incognite  $\mathbf{J}^s$  (che sono funzioni del campo magnetico totale incognito sulla superficie  $S$  e di conseguenza il campo elettromagnetico ( $\mathbf{E}^s$ ,  $\mathbf{H}^s$ )) ?

8/26



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 VI  
Antenne filari

---

MODALITÀ DI SOLUZIONE DEL PROBLEMA DI ANTENNA

Dalla condizione al contorno per il campo elettrico sulla superficie di equivalenza  $S$  si ottiene un'equazione integro-differenziale per la corrente equivalente incognita

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \hat{\mathbf{n}} = [\mathbf{E}^s(\mathbf{r}; \mathbf{J}^s) + \mathbf{E}^i(\mathbf{r}; \mathbf{J}^i)] \times \hat{\mathbf{n}} = 0 \quad \mathbf{r} \in S$$


$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}; \mathbf{J}^s) \times \hat{\mathbf{n}} = -\mathbf{E}^i(\mathbf{r}; \mathbf{J}^i) \times \hat{\mathbf{n}} \quad \mathbf{r} \in S$$

$$L_E(\mathbf{J}^s) = \mathbf{E}^s(\mathbf{J}^s) \times \hat{\mathbf{n}} \quad \mathbf{g} = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}^i(\mathbf{J}^i)$$

$$L_E(\mathbf{J}^s) = \mathbf{g}$$

L'equazione integro-differenziale, che prende il nome di EFIE (*Electric Field Integral Equation*). L'EFIE è un'equazione di Fredholm di prima specie (cioè l'incognita è sempre sotto il segno di integrale).

9/26



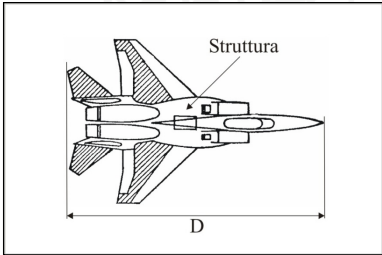
Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata  
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico  
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione VI  
Antenne filari

---

MODALITÀ DI SOLUZIONE DEL PROBLEMA DI ANTENNA


Nei problemi di antenna, quando le dimensioni caratteristiche del problema sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda, si riconduce la soluzione delle equazioni di Maxwell a quella di un'equazione di tipo integrale. L'equazione integro-differenziale viene risolta con tecniche di tipo numerico che – a loro volta – riconducono la soluzione dell'equazione integro-differenziale alla risoluzione di un'equazione di tipo matriciale.



$D \leq \lambda$  regime di bassa frequenza

$D \rightarrow$  dimensione caratteristica della struttura

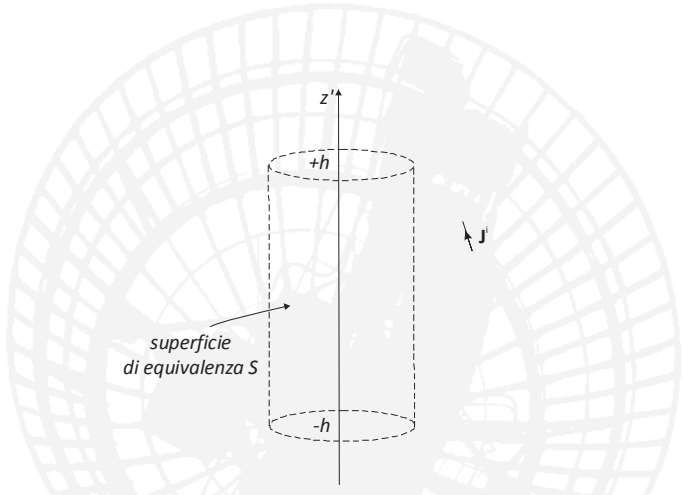
10/26



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 VI  
Antenne filari

DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE



superficie di equivalenza S

11/26



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 VI  
Antenne filari

DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE

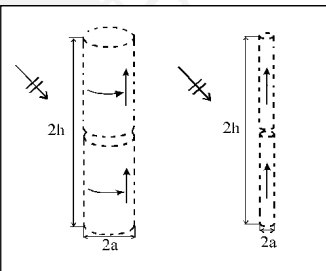
**Antenne filari – EFIE: thin wire approximation**

Se la struttura è sottile ( $h \gg a$ ) si trascurano:

- la variazione della corrente lungo la circonferenza
- la componente longitudinale della corrente rispetto a quella assiale
- i contributi delle estremità della struttura cilindrica

Inoltre la corrente è assunta:

- nulla alle estremità della struttura filare
- concentrata sull'asse della struttura filare



12/26



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 VI  
Antenne filari

---


**DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE**

**Antenne filari – EFIE: thin wire approximation**

La thin wire approximation consente di:

- semplificare l'equazione integrale
- rimuovere la singolarità della funzione di Green che si ha quando punto di integrazione e di osservazione coincidono

13/26

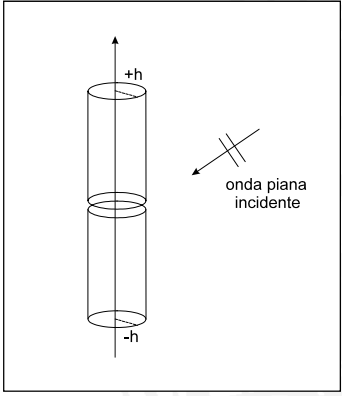


Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche - Propagazione radiata e propagazione guidata  
Prof. G. Pelosi, Laboratorio di Elettromagnetismo Numerico  
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni - Università di Firenze

Lezione VI  
Antenne filari

---

**DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE**



Onda piana incidente su un'antenna filare il cui diametro della struttura cilindrica è piccolo rispetto alla lunghezza  $2h$

↓

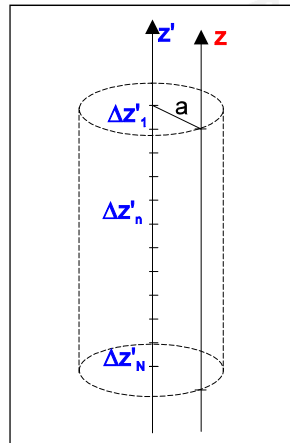
EFIE nell'ambito dell'approssimazione di filo sottile

14/26



DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE

Lezione VI  
Antenne filari



L'asse dell'antenna filare viene suddiviso in  $N$  segmenti di lunghezza  $\Delta z$  ( $\Delta z \ll \lambda$ ) e la corrente incognita è rappresentata come sovrapposizione di una serie di dipoli elettrici corti (dec) di ampiezza incognita corrispondenti a ciascun segmento

$$I(z') \cong \sum_{n=1}^N I_n F_n(z')$$

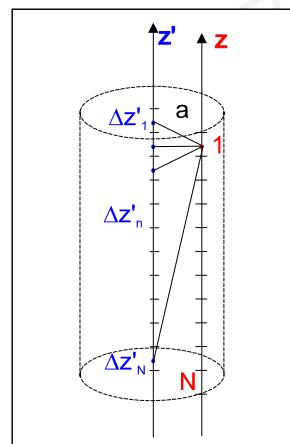
$$F_n(z') = \begin{cases} 1 & \text{per } z' \text{ in } \Delta z'_n \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

15/26



DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE

Lezione VI  
Antenne filari



Anche la superficie dell'antenna viene suddivisa in  $N$  segmenti di cui si considerano i punti centrali  $(1, 2, \dots, N)$  in corrispondenza dei quali vengono imposte le condizioni al contorno.

Il campo elettrico tangente corrispondente alla somma dei contributi di tutti i dipoli in ciascun punto della superficie deve essere uguale alla componente tangente del campo incidente cambiata di segno

$$\mathbf{E}_1^1(z_1) + \mathbf{E}_2^2(z_1) + \dots + \mathbf{E}_N^N(z_1) = -\mathbf{E}_z^i(z_1)$$


$$\mathbf{E}_1^1(z_2) + \mathbf{E}_2^2(z_2) + \dots + \mathbf{E}_N^N(z_2) = -\mathbf{E}_z^i(z_2)$$

$$\vdots$$

$$\mathbf{E}_1^1(z_N) + \mathbf{E}_2^2(z_N) + \dots + \mathbf{E}_N^N(z_N) = -\mathbf{E}_z^i(z_N)$$

16/26





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 VI

Antenne filari

---

DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE

Poiché il campo irradiato da un dipolo elettrico corto è proporzionale alla corrente si ha:

$E_z^n(z_m) = Z_{mn} I_n$

→

Contributo al campo elettrico nel punto m sull'asse z dovuto alla n-esimo dipolo posto sull'asse z'

$V_m = -E_z^i(z_m)$


→

Componente z del campo elettrico incidente valutata nel punto m-esimo della superficie dell'antenna

L'equazione che traduce la condizione al contorno per il campo elettrico tangente diventa:

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_m, \quad m = 1, \dots, N$$

17/26



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 VI

Antenne filari

---

DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_m, \quad m = 1, \dots, N \quad [Z_{mn}][I_n] = [V_m]$$

$[I_n] = [Z_{mn}]^{-1} [V_m]$

→

$I_n$

→

$I(z') \cong \sum_{n=1}^N I_n F_n(z')$

→

caratteristiche dell'antenna

$[V_m] = [-E_z^i(z_m)]$

vettore colonna delle tensioni generalizzate

$[Z_{mn}]$

matrice delle impedenze generalizzate

$[I_n]$

vettore colonna delle correnti generalizzate (incognite)

18/26



DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE

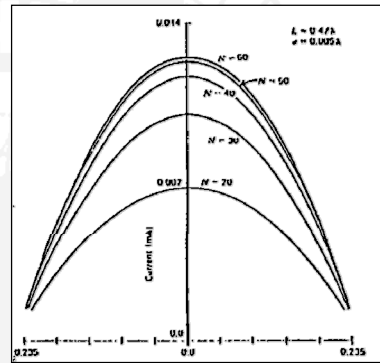
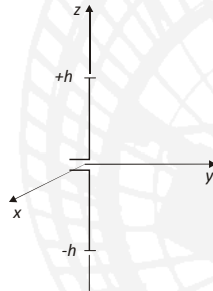
Lezione VI  
Antenne filari

$f = 300 \text{ MHz}$  (frequenza di lavoro)

$\lambda = 1 \text{ m}$

$2h = 0.47 \lambda$  (lunghezza del filo)

$a = 0.0005 \text{ m}$  (raggio del filo)



19/26



DETERMINAZIONE DELLA CORRENTE SU UN'ANTENNA FILARE

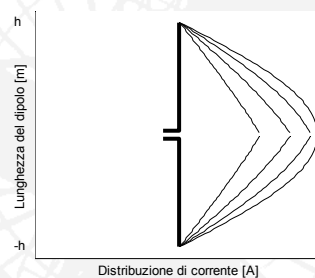
Lezione VI  
Antenne filari

Come si vede, per un'antenna filare con  $2h$  circa uguale a  $\lambda/2$  la distribuzione di corrente è di tipo cosinusoidale della forma:


$$I(z') = I_0 \cos(kz') \quad -h \leq z' \leq +h \quad h = \frac{\lambda}{4}$$

Per un'antenna filare corta ( $2h \leq \lambda/10$ ) la distribuzione di corrente è sostanzialmente di tipo triangolare

$$I(z) = I_0 \left[ 1 - \frac{|z|}{h} \right]$$



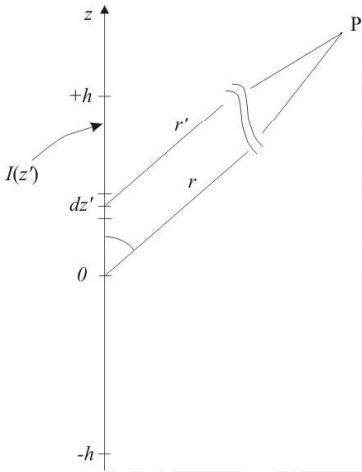
20/26



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 VI  
Antenne filari

---



$$\mathbf{E} = E_{\theta} \hat{\theta} = \int_{-h}^{+h} dE_{\theta} \hat{\theta}$$


$$dE_{\theta} = \frac{jk\zeta I(z') \sin \theta}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r'} dz'$$

al denominatore  $\frac{1}{r'} \approx \frac{1}{r}$

all'esponente  $r' \approx r - z' \cos \theta$

$$\mathbf{E} = E_{\theta} \hat{\theta} = \frac{jk\zeta I_0 \sin \theta}{4\pi r} e^{-jkr} \int_{-h}^{+h} \frac{I(z')}{I_0} e^{jkz' \cos \theta} dz' \hat{\theta}$$

21/26



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 VI  
Antenne filari

---

Campo elettrico e magnetico per il dipolo elettrico corto (d.e.c.) a grande distanza

$$E_{\theta} \approx j\zeta k \frac{I_0 \Delta z}{4\pi r} \sin \theta \exp(-jkr)$$

$$H_{\phi} \approx \frac{E_{\theta}}{\zeta}$$

Campo elettrico per l'antenna filare a grande distanza


$$\mathbf{E} = E_{\theta} \hat{\theta} = \frac{jk\zeta I_0 \sin \theta}{4\pi r} e^{-jkr} \int_{-h}^{+h} \frac{I(z')}{I_0} e^{jkz' \cos \theta} dz' \hat{\theta}$$

Il campo coincide formalmente con quello per d.e.c. se si sostituisce all'altezza  $\Delta z$  la quantità:

$$h_{eff} = \left| \int_{-h}^{+h} \frac{I(z')}{I_0} e^{jkz' \cos \theta} dz' \hat{\theta} \right|$$

che prende il nome di **altezza efficace in trasmissione**

22/26



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 VI**  
**Antenne filari**

---

**ALTEZZA EFFICACE IN TRASMISSIONE PER UN'ANTENNA FILARE**

L'espressione dell'altezza efficace per l'antenna filare corta (corrente approssimativamente triangolare)

$$h_{eff} = \left| \int_{-h}^{+h} \left[ 1 - \frac{|z'|}{h} \right] e^{jkz' \cos \vartheta} dz' \right|$$

$$kz' \cos \vartheta \ll 1 \quad -h \leq z' \leq +h \quad h \cong \lambda / 20$$

$$e^{jkz' \cos \vartheta} \cong 1$$


$$h_{eff} \cong \int_{-h}^{+h} \left[ 1 - \frac{|z'|}{h} \right] dz' = h$$

Per un antenna a mezz'onda tale che  $2h = \lambda/2$ , l'altezza efficace vale:

$$I(z') = I_0 \cos(kz') \quad -h \leq z' \leq +h \quad h = \frac{\lambda}{4}$$

$$h_{eff} = h_{eff}(\vartheta) = \left| \int_{-h}^{+h} \cos(kz') e^{jkz' \cos \vartheta} dz' \right|$$

23/26



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 VI**  
**Antenne filari**

---

**ALTEZZA EFFICACE IN TRASMISSIONE PER UN'ANTENNA FILARE**

Bisogna valutare l'integrale  $\int_{-h}^{+h} \cos(kz') e^{jkz' \cos \vartheta} dz'$


$$\cos(kz') = \frac{1}{2} (e^{jkz'} + e^{-jkz'})$$

$$\frac{1}{2} \int_{-h}^{+h} e^{jkz'(1+\cos \vartheta)} dz' + \frac{1}{2} \int_{-h}^{+h} e^{-jkz'(1-\cos \vartheta)} dz' = \frac{1}{2} \frac{e^{jkz'(1+\cos \vartheta)}}{jk(1+\cos \vartheta)} \Big|_{-h}^{+h} - \frac{1}{2} \frac{e^{-jkz'(1-\cos \vartheta)}}{jk(1-\cos \vartheta)} \Big|_{-h}^{+h} =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{e^{jkh(1+\cos \vartheta)} - e^{-jkh(1+\cos \vartheta)}}{jk(1+\cos \vartheta)} - \frac{1}{2} \frac{e^{-jkh(1-\cos \vartheta)} - e^{jkh(1-\cos \vartheta)}}{jk(1-\cos \vartheta)} =$$

$$= \frac{\sin[kh(1+\cos \vartheta)]}{k(1+\cos \vartheta)} + \frac{\sin[kh(1-\cos \vartheta)]}{k(1-\cos \vartheta)}$$

24/26



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 VI  
Antenne filari

---

ALTEZZA EFFICACE IN TRASMISSIONE PER UN'ANTENNA FILARE

$$kh(1 + \cos \vartheta) = \frac{2\pi}{\lambda} h(1 + \cos \vartheta) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} (1 + \cos \vartheta) = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \cos \vartheta$$

$$kh(1 - \cos \vartheta) = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cos \vartheta$$


$$\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{k(1 + \cos \vartheta)} + \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{k(1 - \cos \vartheta)} = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{k} \left( \frac{1}{1 + \cos \vartheta} + \frac{1}{1 - \cos \vartheta} \right) =$$

$$= \frac{2 \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{k(1 - \cos^2 \vartheta)} = \frac{2 \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{k \sin^2 \vartheta}$$

campo elettrico  $E_\vartheta = \frac{j\zeta I_0}{2\pi r} e^{-jkr} F(\vartheta)$

fattore di forma  $F(\vartheta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{\sin \vartheta}$

25/26



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 VI  
Antenne filari

---

ALTEZZA EFFICACE IN TRASMISSIONE PER UN'ANTENNA FILARE

$$h_{eff} = h_{eff}(\vartheta) = \left| \int_{-h}^{+h} \cos(kz') e^{jkr' \cos \vartheta} dz' \right| = \frac{2 \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \vartheta\right)}{k \sin^2 \vartheta}$$

La quantità varia con l'angolo  $\vartheta$ , e in genere si fa riferimento al suo valore massimo che in questo caso vale per  $\vartheta = \pi/2$

26/26