

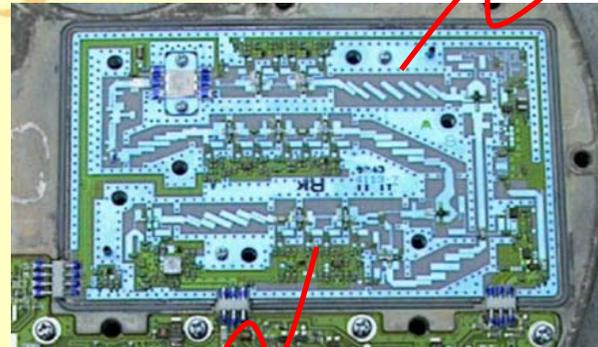
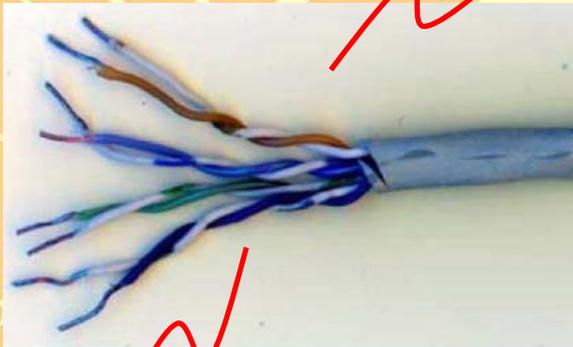
Modulo di Compatibilità Elettromagnetica

prof. A. Maffucci

**Note sul problema dell'emissione e
della suscettività radiate**

Emissioni radiate

Obiettivo: Controllo di una sorgente **non intenzionale** di campi elettromagnetici radiati



Problema: caratterizzare la sua **capacità** di trasmissione di campi elettromagnetici radiati

Suscettività radiata

Obiettivo: Controllo del disturbo indotto sugli apparati da sorgenti **intenzionali** di campi elettromagnetici radiati

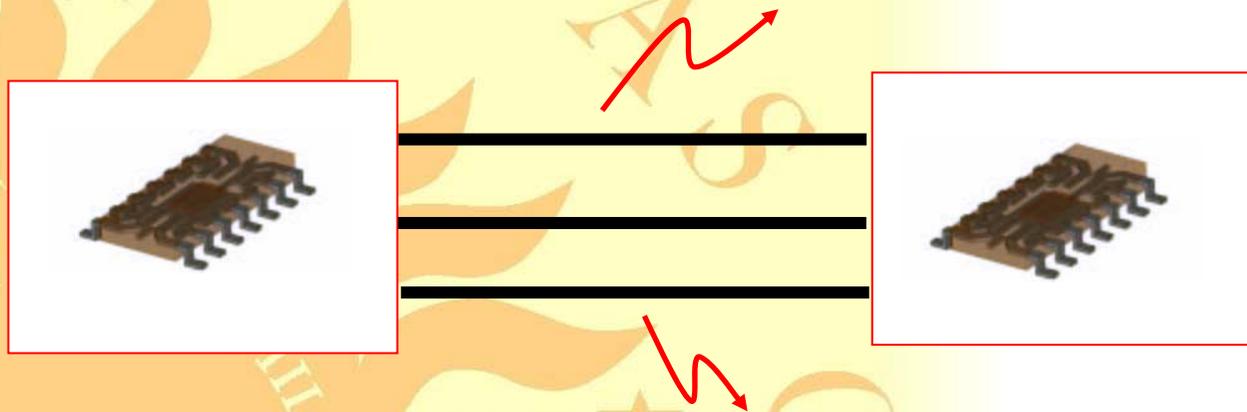


Problema: caratterizzare le **sorgenti** e l'**accoppiamento** con i circuiti



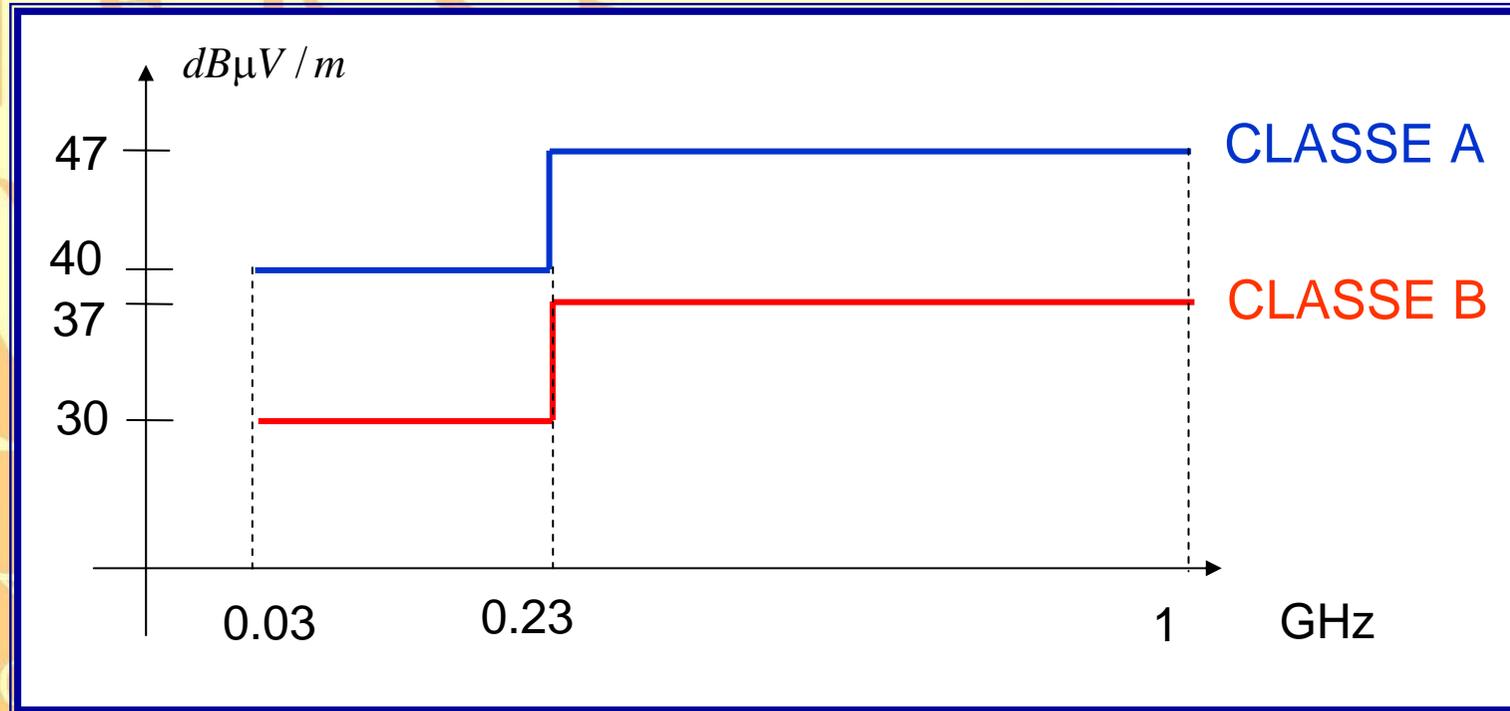
Modelli per l'emissione radiata

Emissione irradiata: il problema delle interconnessioni elettriche



la principale fonte non intenzionale di emissione irradiata è costituita dai collegamenti elettrici non schermati

Emissione irradiate: campo limite a 10m



Le emissioni irradiate si misurano in zona lontana in assenza di riflessioni (camera anecoica)

Emissione irradiate:

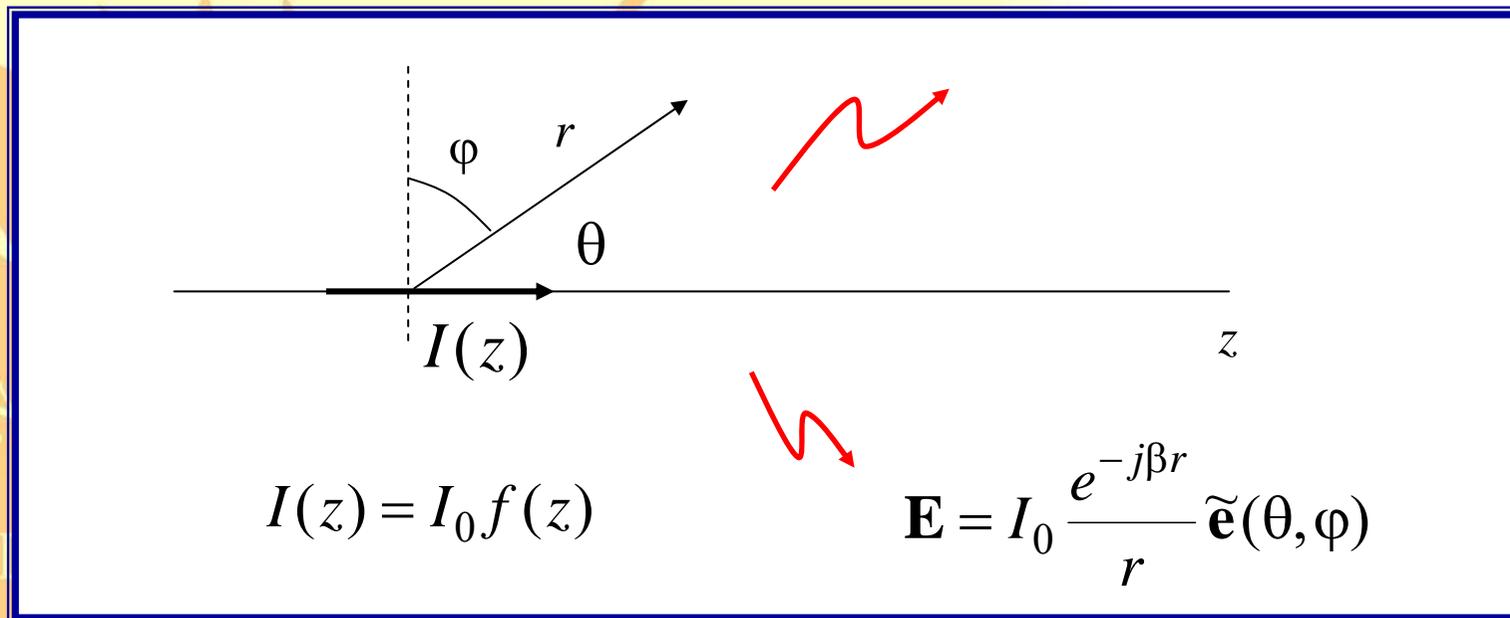
zona lontana:

misure riproducibili (codificate dalla normativa)
modelli semplificati

zona vicina:

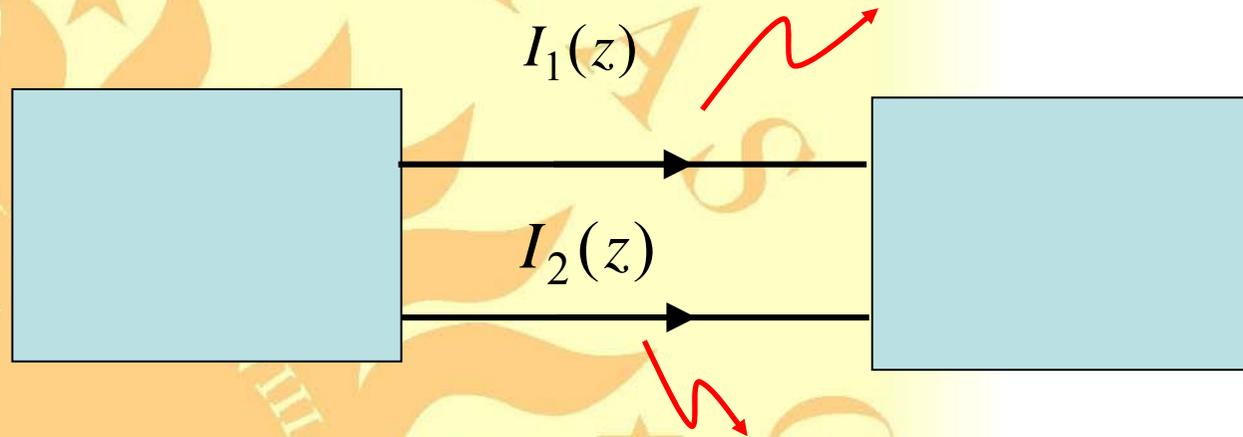
SOL PER NOCTEM
misure non riproducibili
simulazione full-wave

Emissione in zona lontana di un conduttore percorso da corrente



È fondamentale la conoscenza accurata della distribuzione di corrente lungo il conduttore

Modelli per l'emissione di una coppia di correnti in zona lontana

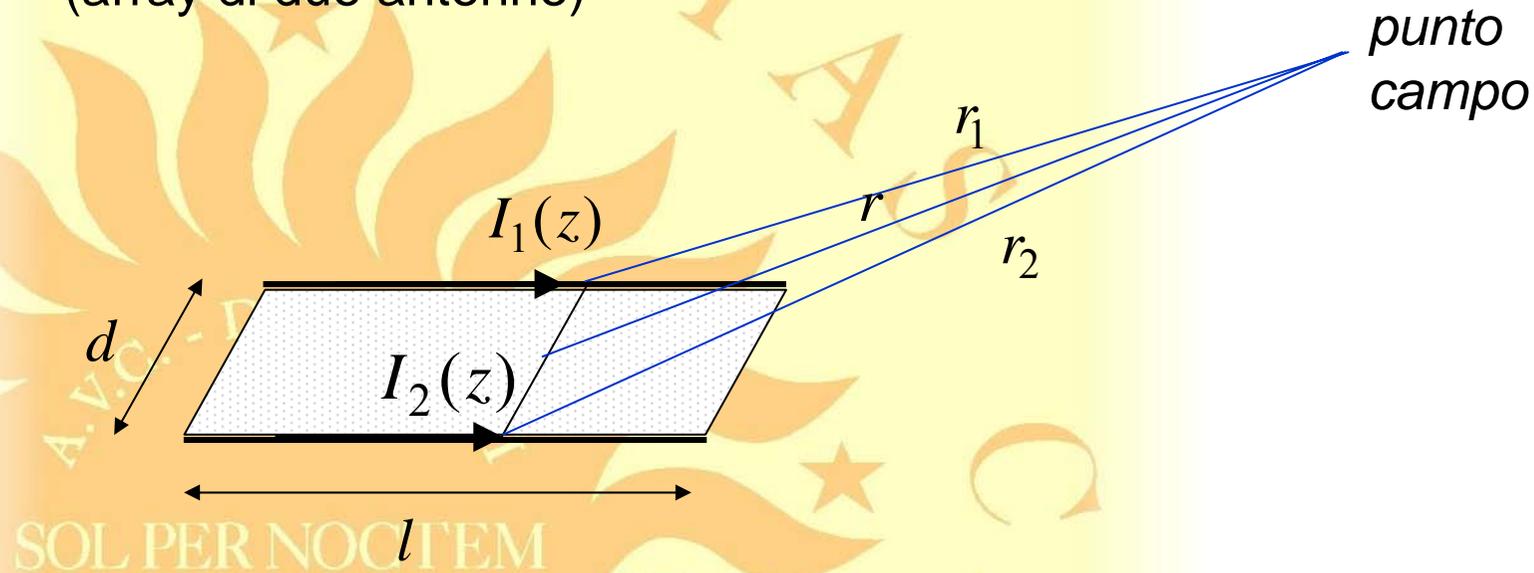


$$I_1(z) = I_2(z) \quad \text{modo comune}$$

$$I_1(z) = -I_2(z) \quad \text{modo differenziale}$$

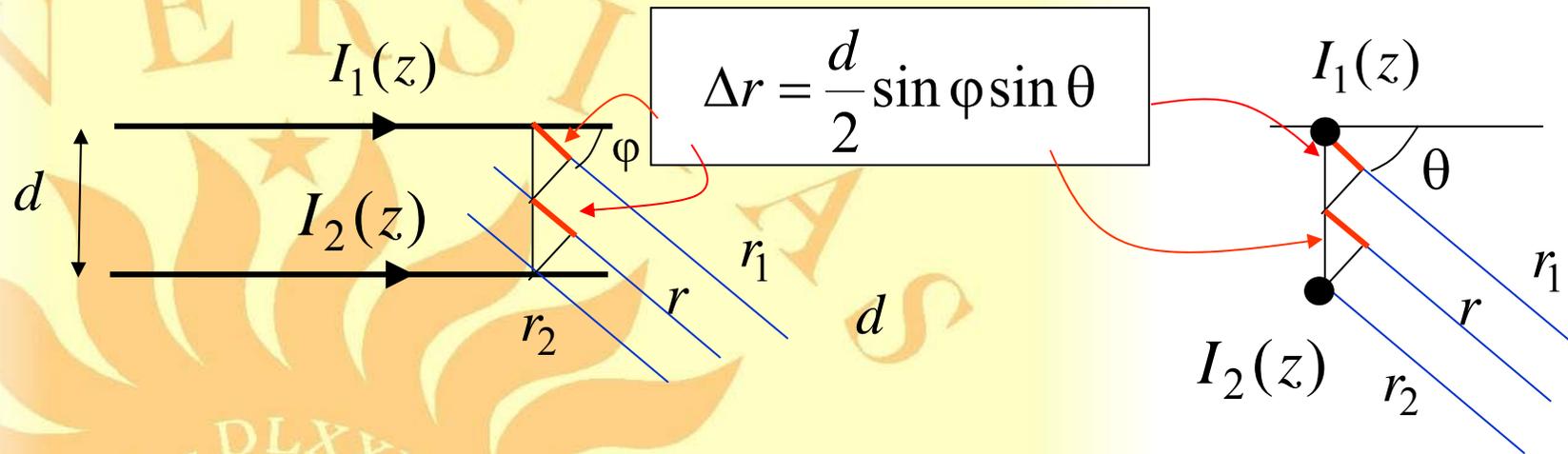
Emissione di una coppia di correnti

Il campo si può valutare come sovrapposizione degli effetti (array di due antenne)



$$\mathbf{E} = \tilde{\mathbf{e}}(\theta, \varphi) \left[I_{01} \frac{e^{-j\beta r_1}}{r_1} + I_{02} \frac{e^{-j\beta r_2}}{r_2} \right]$$

approssimazioni in campo lontano

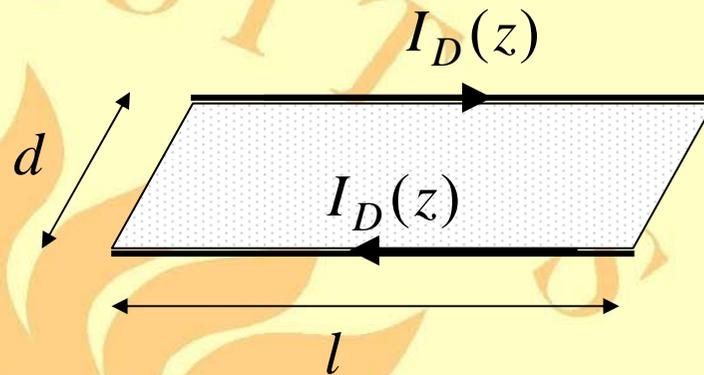


modulo del campo $r_1 \cong r_2 \cong r$

fase del campo $r_1 \cong r + \Delta r, \quad r_2 \cong r - \Delta r$

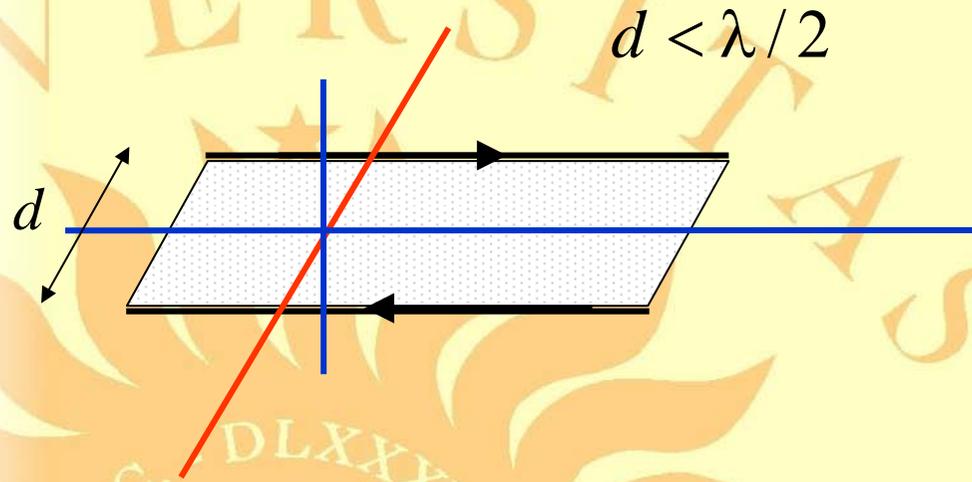
$$\mathbf{E} = \tilde{\mathbf{e}}(\theta, \varphi) \frac{e^{-j\beta r}}{r} \left[I_{01} e^{-j\beta \Delta r} + I_{02} e^{j\beta \Delta r} \right]$$

Correnti di modo differenziale



$$\mathbf{E} = \tilde{\mathbf{e}}(\theta, \varphi) \frac{e^{-j\beta r}}{r} I_{D0} \left[e^{-j\beta\Delta r} - e^{j\beta\Delta r} \right] = -2j \tilde{\mathbf{e}}(\theta, \varphi) \frac{e^{-j\beta r}}{r} I_{D0} \sin(\beta\Delta r)$$

Correnti di modo differenziale



— campo minimo
 $\theta = 0$ o $\varphi = 0$

— campo massimo
 $\theta = \frac{\pi}{2}$ e $\varphi = \frac{\pi}{2}$

campo massimo:

$$\mathbf{E}_{\max} = \mathbf{E}\left(r, \theta = \frac{\pi}{2}, \varphi = \frac{\pi}{2}\right) = -2j\tilde{\mathbf{e}}\left(\theta = \frac{\pi}{2}, \varphi = \frac{\pi}{2}\right) I_{D0} \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) \frac{e^{-i\beta r}}{r}$$

Correnti di modo differenziale



campo massimo

$$\mathbf{E}_{\max} = -2j\tilde{\mathbf{e}}\left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) I_{D0} \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) \frac{e^{-i\beta r}}{r}$$

è cruciale la **lunghezza elettrica trasversa** della linea:

$$\frac{d}{\lambda} \approx 0 \Rightarrow \mathbf{E}_{\max} \approx 0$$

nessuna emissione

$$\frac{d}{\lambda} \ll 1 \Rightarrow \mathbf{E}_{\max} \approx 2j\mathbf{e} I_{D0} \pi \frac{d}{\lambda} \frac{e^{-i\beta r}}{r}$$

emissione involontaria
(emissione irradiata)

$$\frac{d}{\lambda} \approx \frac{1}{2} \Rightarrow \mathbf{E}_{\max} \approx 2j\mathbf{e} I_{D0} \frac{e^{-i\beta r}}{r}$$

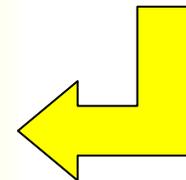
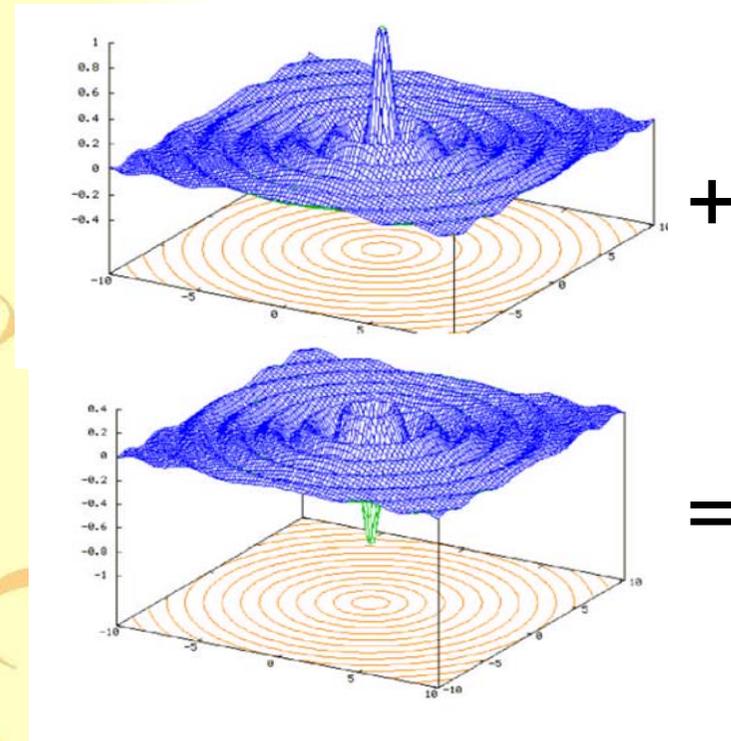
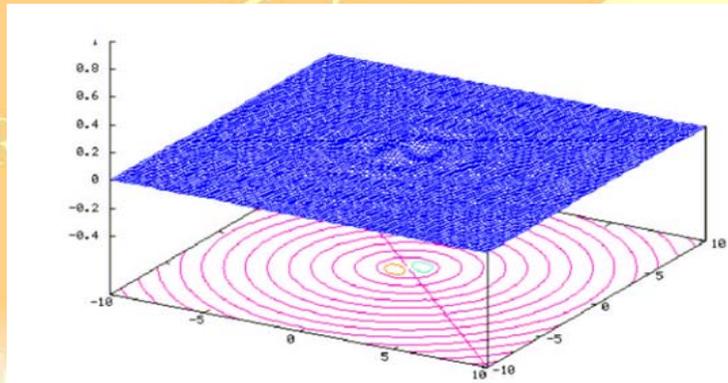
emissione volontaria
(antenna)

Emissione al variare del rapporto d/λ

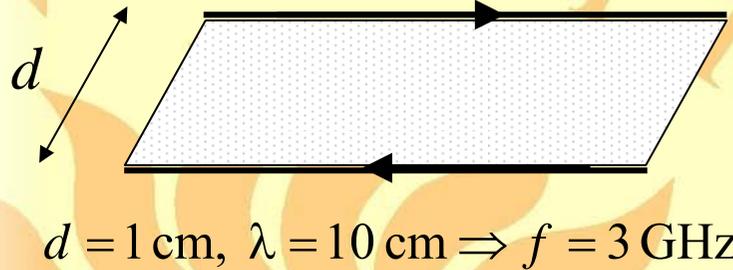


$$d = 1 \text{ cm}, \lambda = 1 \text{ m} \Rightarrow f = 300 \text{ MHz}$$

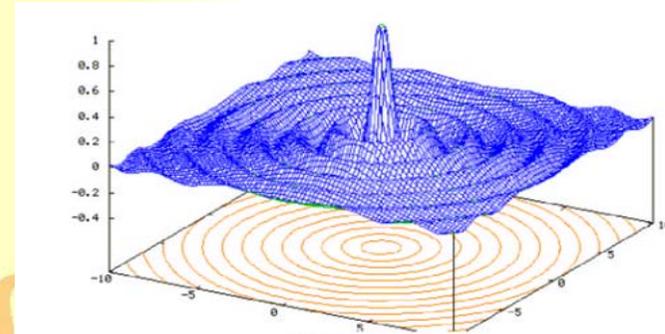
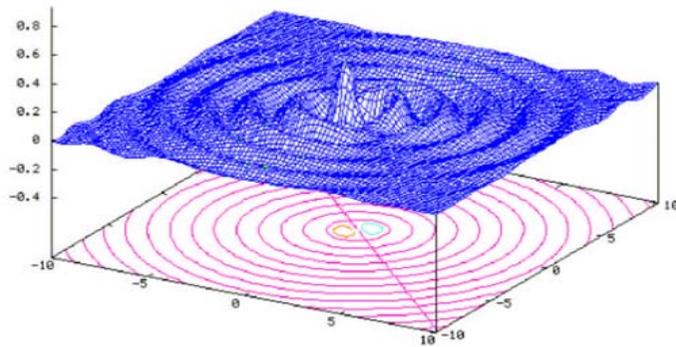
$$\frac{d}{\lambda} = 0.01$$



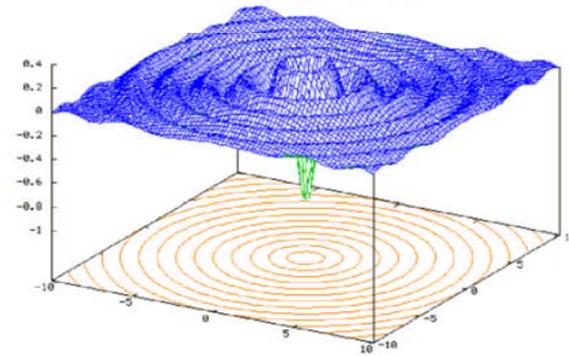
Emissione al variare del rapporto d/λ



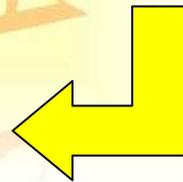
$$\frac{d}{\lambda} = 0.1$$



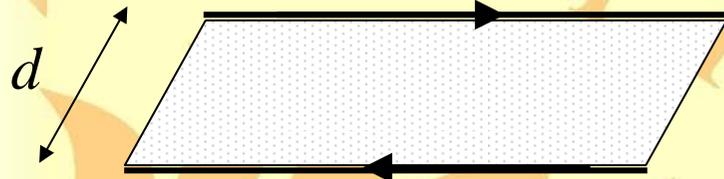
+



=

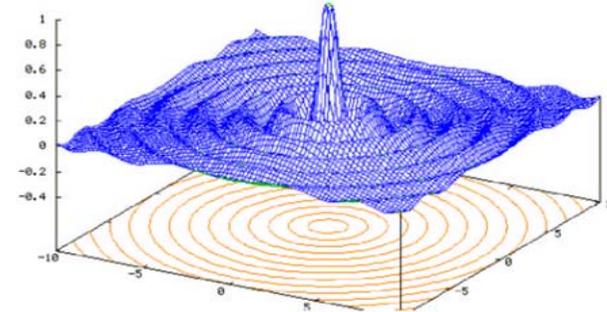
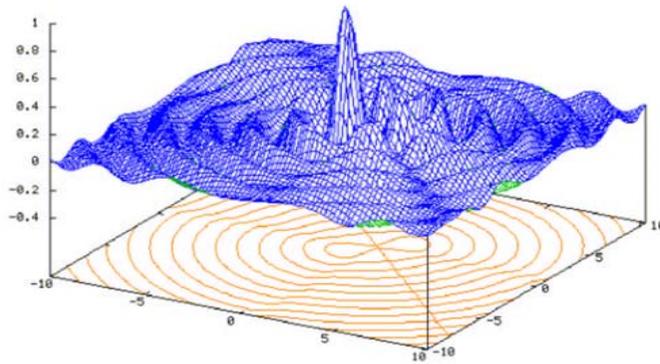


Emissione al variare del rapporto d/λ

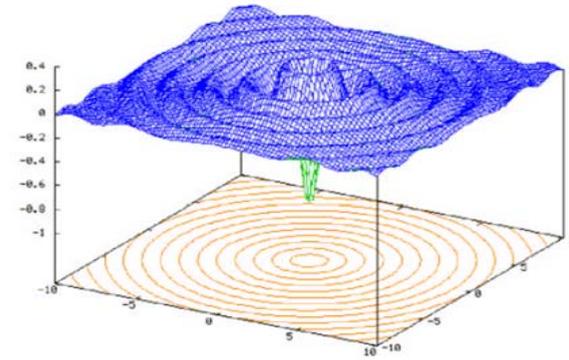


$$d = 1 \text{ cm}, \lambda = 2 \text{ cm} \Rightarrow f = 15 \text{ GHz}$$

$$\frac{d}{\lambda} = 0.5$$



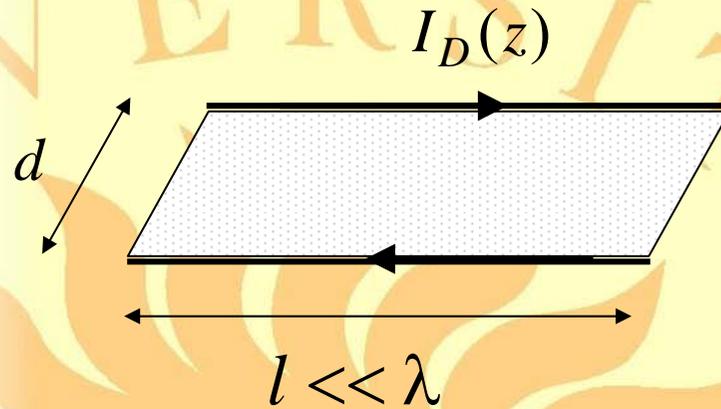
+



=



Modo differenziale: modello per linee corte



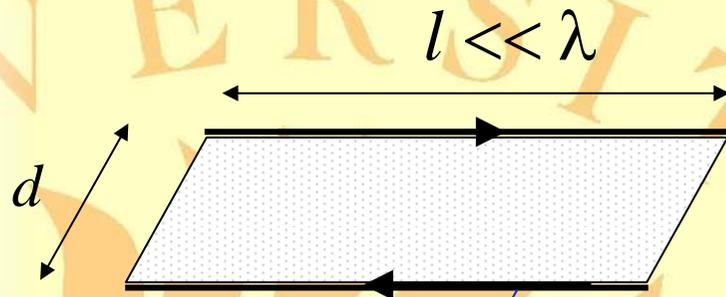
$$I_D(z) \approx I_{D0} = \text{costante}$$

$$E_{\max} = \frac{\zeta\pi}{v^2} l d I_{D0} f^2 \frac{e^{-i\beta r}}{r}$$

nel vuoto:

$$E_{\max} = 1.316 \cdot 10^{-14} \frac{|I_{D0}| f^2 l d}{r}$$

Modo differenziale: modello per linee corte



$$E_{\max} = 1.316 \cdot 10^{-14} \frac{|I_{D0}| f^2 l d}{r}$$

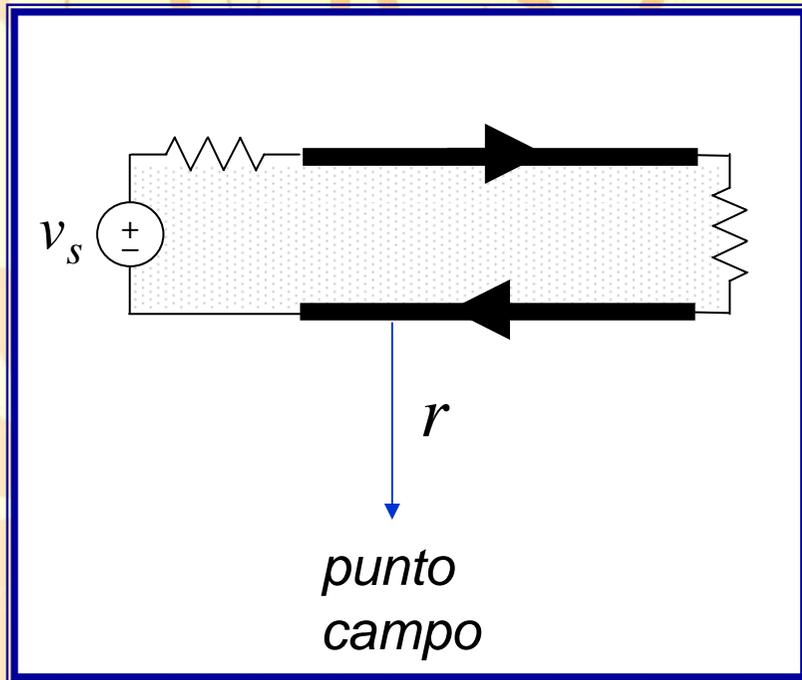
E_{\max} direttamente **proporzionale** a:

- corrente
- quadrato della frequenza
- area del circuito

E_{\max} inversamente **proporzionale** a:

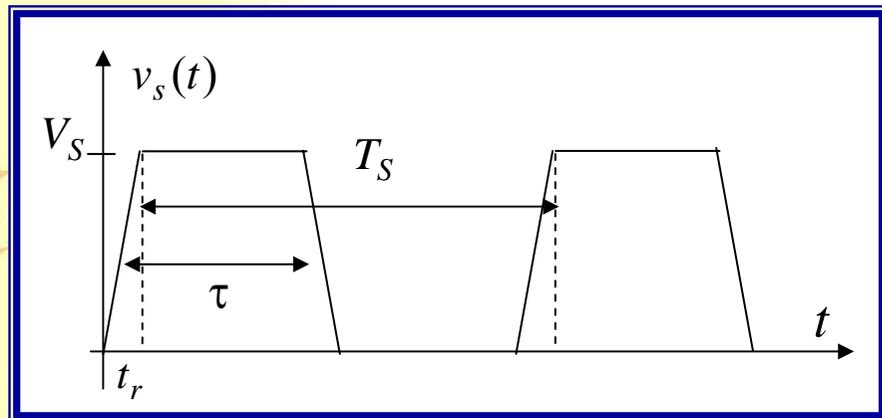
- distanza

Modo differenziale: esempio

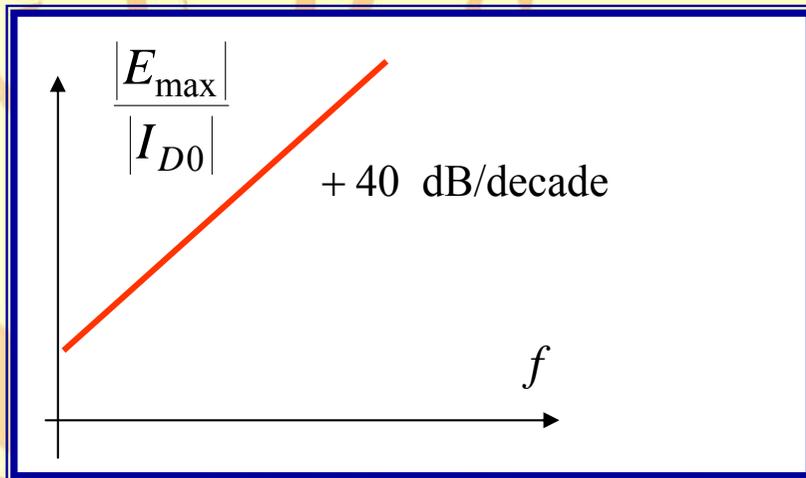


$$E_{\max} = 1.316 \cdot 10^{-14} \frac{|I_{D0}| f^2 l d}{r}$$

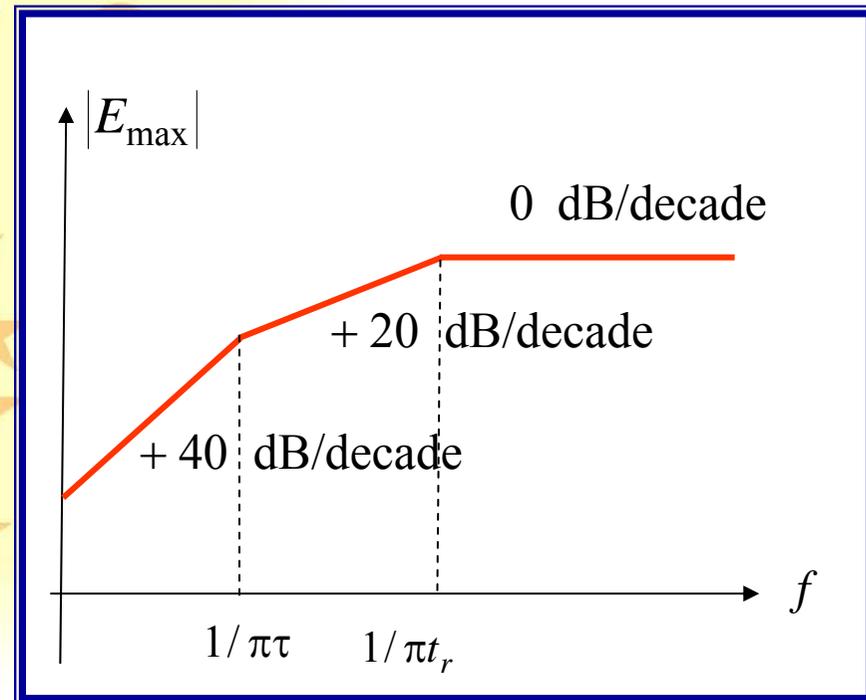
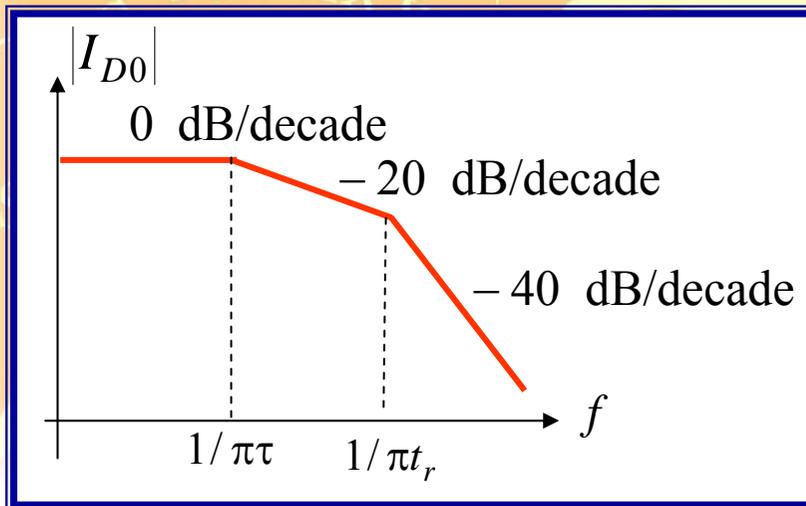
segnale di clock



Modo differenziale: esempio



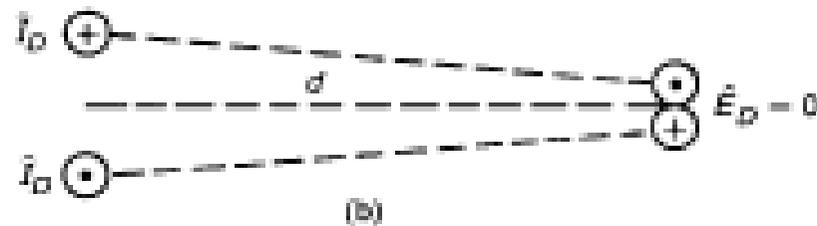
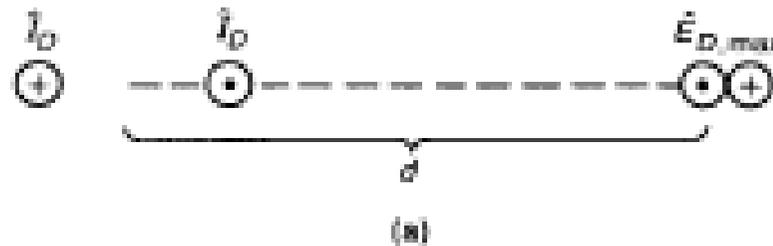
$$E_{\max} = 1.316 \cdot 10^{-14} \frac{|I_{D0}| f^2 l d}{r}$$



Modo differenziale: riduzione emissione

1. Reduce the current level.
2. Reduce the loop area.

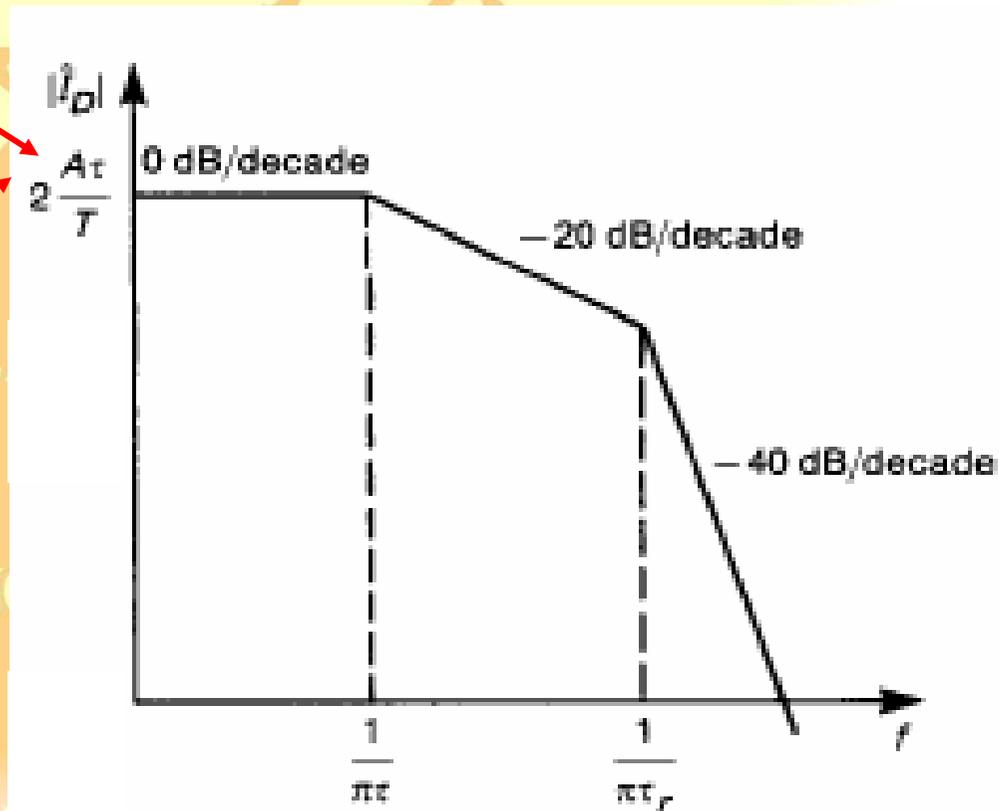
$$\left| \frac{\dot{E}_{D,max}}{\dot{I}_D} \right| = Kf^2 A$$



Modo differenziale: riduzione emissione

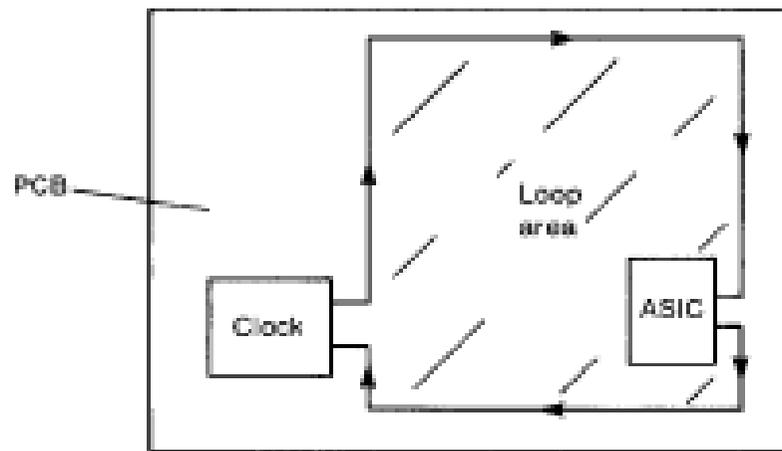
riduzione dei livelli di picco

$$A = V_s$$

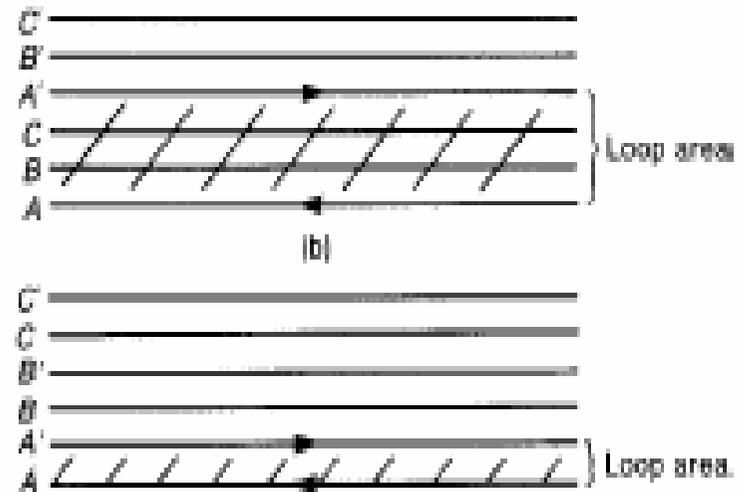


Modo differenziale: riduzione emissione

riduzione della loop area



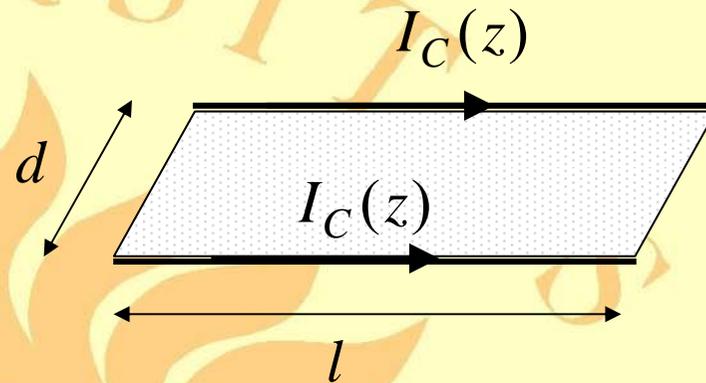
(a)



(b)

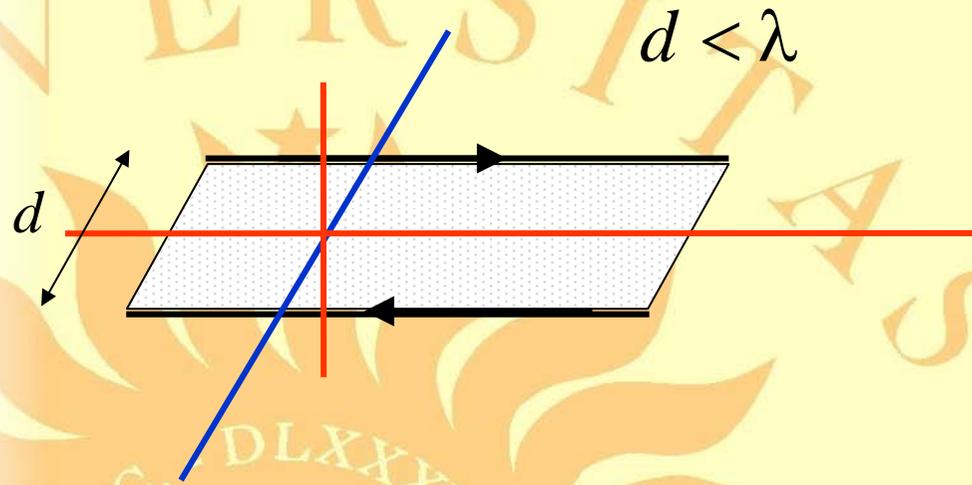
Routing e pin assignment

Correnti di modo comune



$$\mathbf{E} = \tilde{\mathbf{e}}(\theta, \varphi) \frac{e^{-j\beta r}}{r} I_{C0} \left[e^{-j\beta\Delta r} + e^{j\beta\Delta r} \right] = 2\tilde{\mathbf{e}}(\theta, \varphi) \frac{e^{-j\beta r}}{r} I_{C0} \cos(\beta\Delta r)$$

Correnti di modo comune



— campo minimo

$$\theta = \frac{\pi}{2} \text{ e } \varphi = \frac{\pi}{2}$$

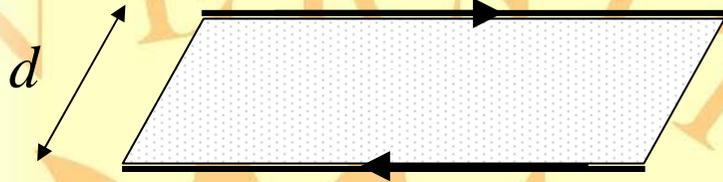
— campo massimo

$$\theta = 0 \text{ o } \varphi = 0$$

campo massimo:

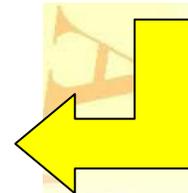
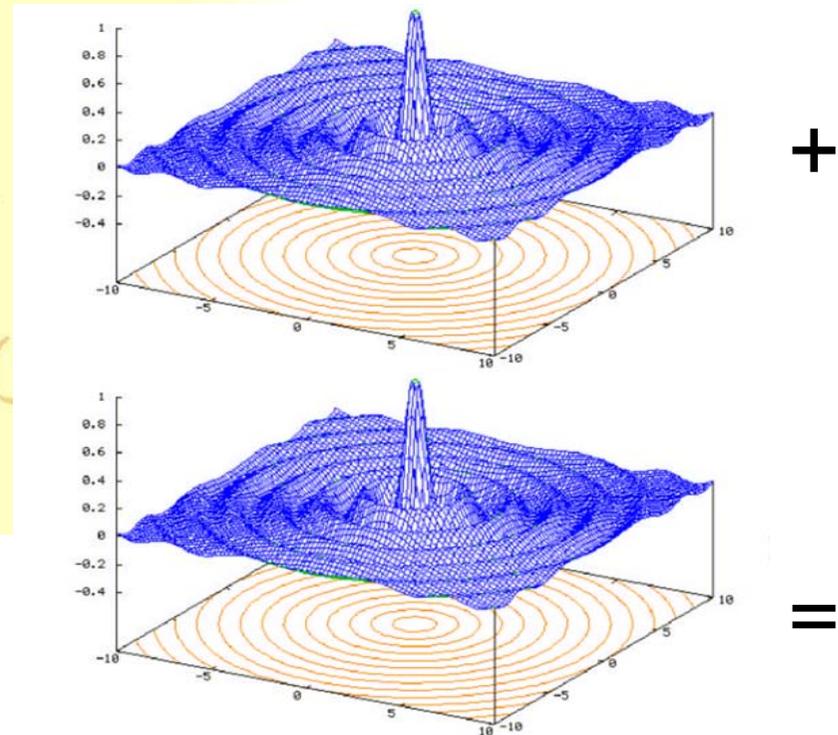
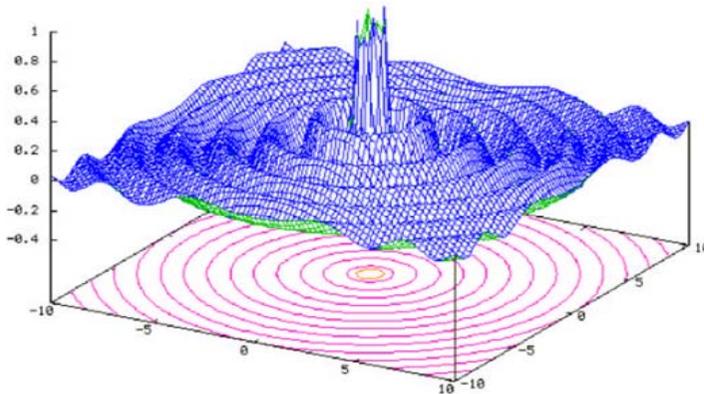
$$\mathbf{E}_{\max} = \mathbf{E}\left(r, \theta = \frac{\pi}{2}, \varphi = 0\right) = 2\tilde{\mathbf{e}}\left(\theta = \frac{\pi}{2}, \varphi = 0\right) I_{C0} \frac{e^{-i\beta r}}{r}$$

Emissione di modo comune



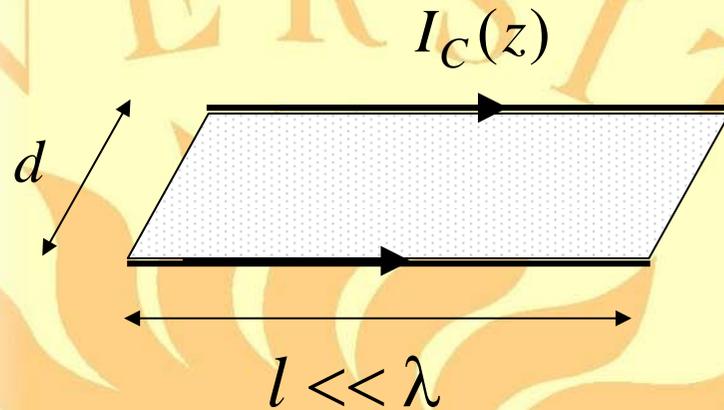
$$d = 1 \text{ cm}, \lambda = 1 \text{ m} \Rightarrow f = 300 \text{ MHz}$$

$$\frac{d}{\lambda} = 0.01$$



è significativa anche per bassi valori di d/λ

Modo comune: modello per linee corte



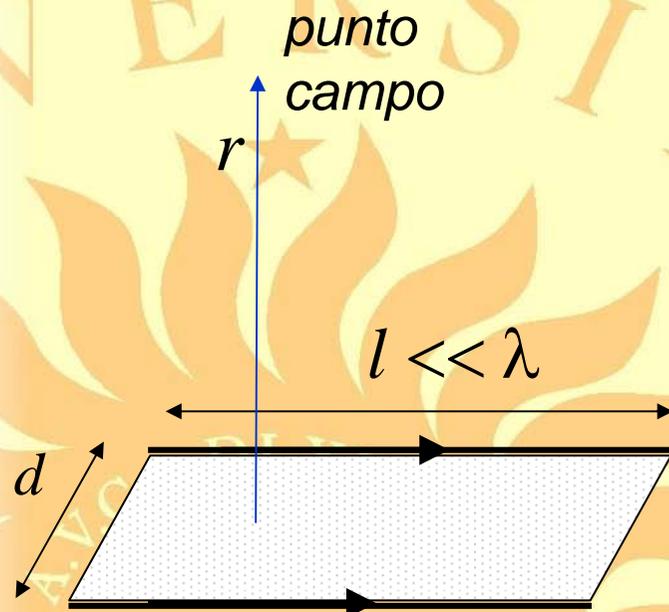
$$I_C(z) \approx I_{C0} = \text{costante}$$

$$E_{\max} = \zeta \frac{l}{v} I_{C0} f \frac{e^{-i\beta r}}{r}$$

nel vuoto:

$$E_{\max} = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{|I_{C0}| fl}{r}$$

Modo comune: modello per linee corte



$$E_{\max} = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{|I_{C0}| fl}{r}$$

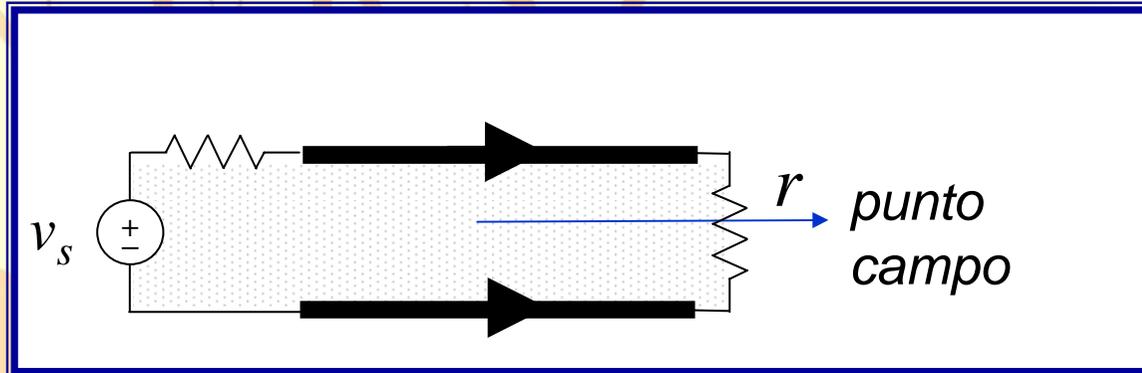
E_{\max} direttamente **proporzionale** a:

- corrente
- frequenza
- lunghezza del circuito

E_{\max} inversamente **proporzionale** a:

- distanza

Modo comune: esempio

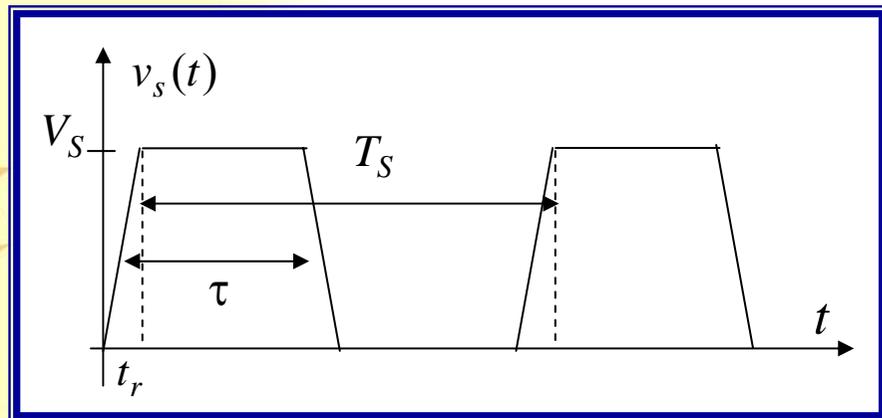


segnale di clock

$$E_{\max} = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{|I_{C0}| fl}{r}$$

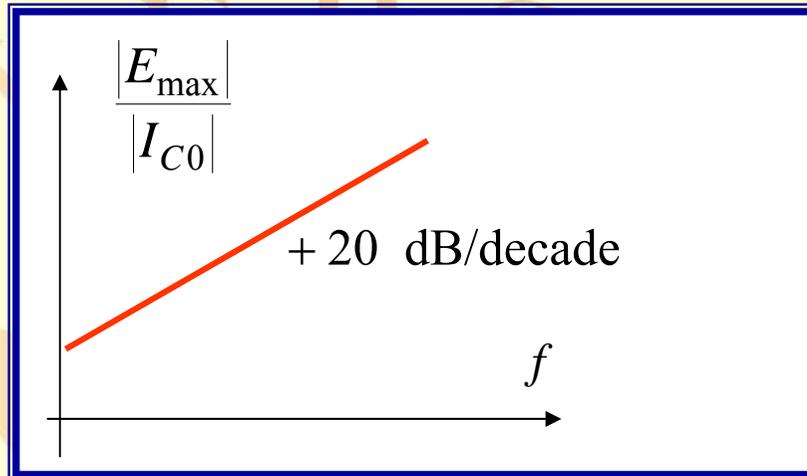
SOL PER NOCTEM

A.D. MCMLXXIX

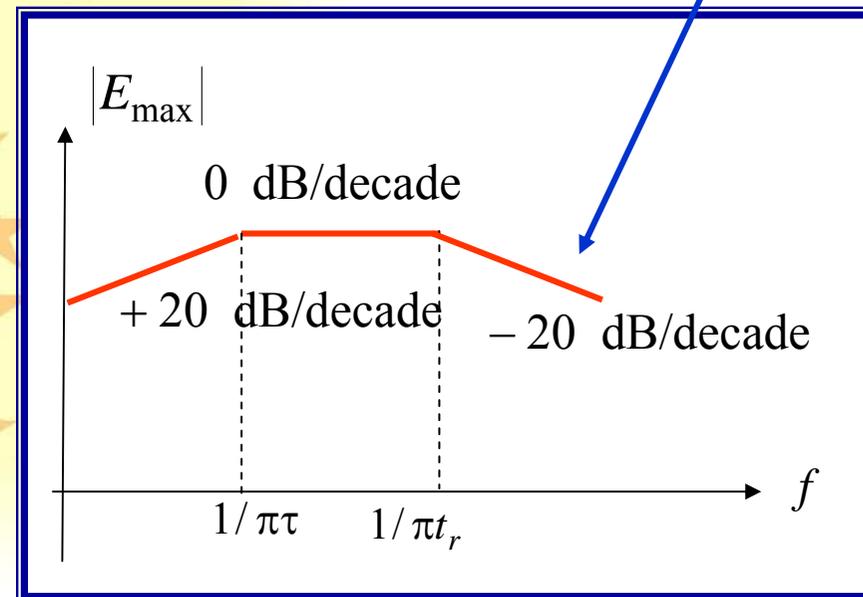
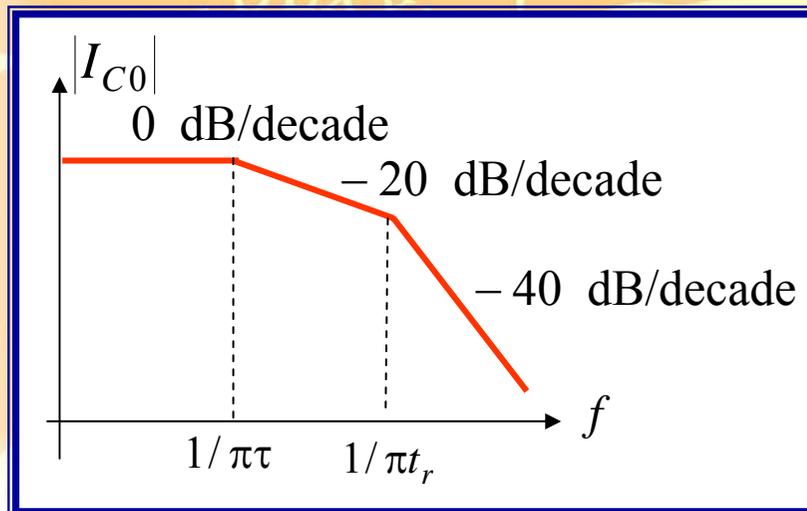


Modo comune : esempio

$$E_{\max} = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{|I_{C0}| fl}{r}$$

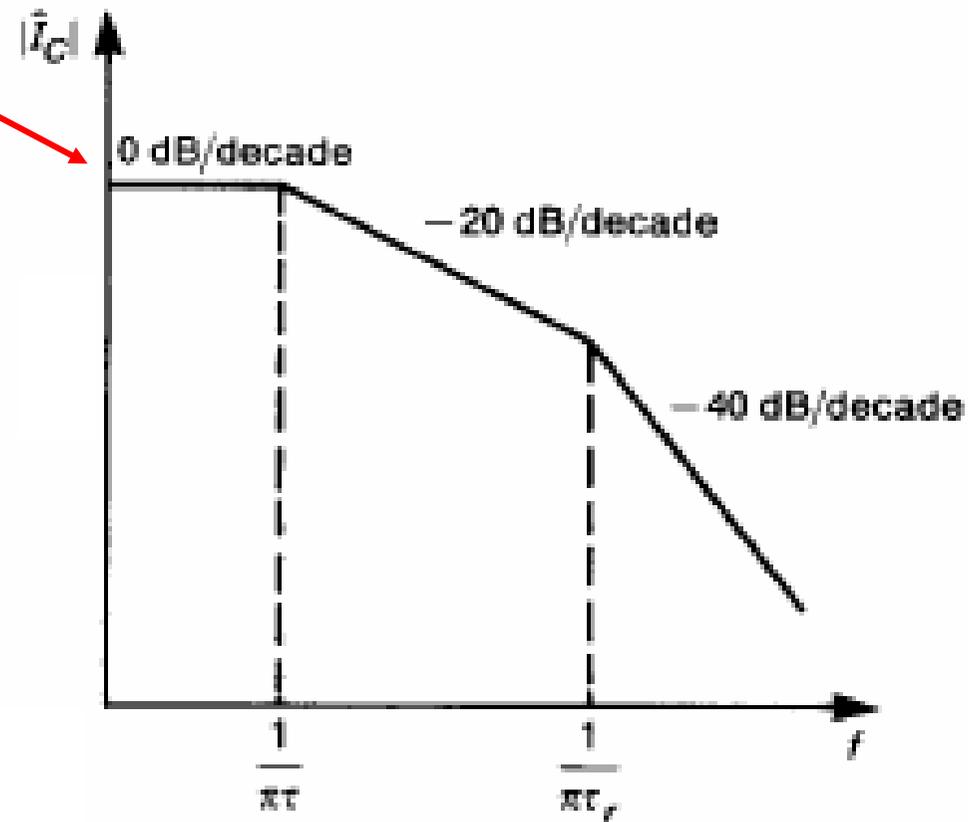


buon comportamento
ad alta frequenza



Modo comune: riduzione emissione

riduzione dei livelli di picco



Modo comune: riduzione emissione

- **blocco del modo comune (fattibile sui cavi di collegamento)**
- **riduzione della lunghezza delle connessioni**
- **posizionamento del clock in prossimità del modulo che alimenta**
- **riduzione del livello di picco**

Modo comune e modo differenziale

Il modo **comune** dipende da:

- frequenza
- lunghezza del circuito

$$E_{\max} = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{|I_{C0}| fl}{r}$$

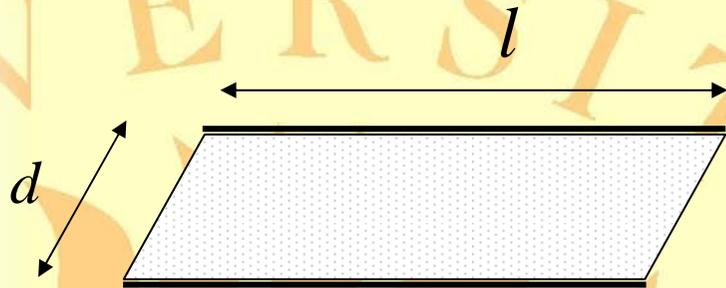
Il modo **differenziale** dipende da:

- quadrato della frequenza
- area del circuito

$$E_{\max} = 1.316 \cdot 10^{-14} \frac{|I_{D0}| f^2 ld}{r}$$

anche se le correnti di modo comune non sono correnti di funzionamento, possono produrre emissioni non trascurabili

Modo comune e modo differenziale: esempio



$$l = 1 \text{ m}, \quad d = 1.27 \text{ mm}$$

$$f = 30 \text{ MHz}, \quad r = 3 \text{ m}$$

Caso 1

$$E_{\max} = 100 \text{ } \mu\text{V/m}$$



$$I_D = 20 \text{ mA}, \quad I_C = 8 \text{ } \mu\text{A}$$

$$l = 1 \text{ cm}, \quad d = 1.27 \text{ mm}$$

$$f = 300 \text{ MHz}, \quad r = 3 \text{ m}$$

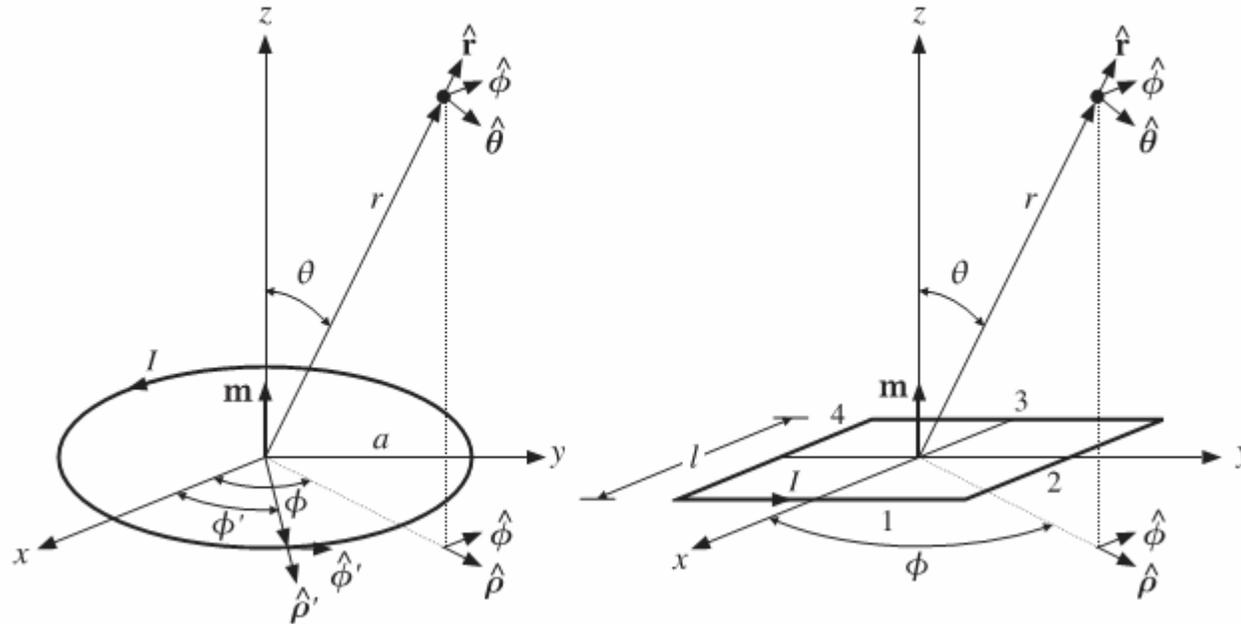
Caso 2

$$E_{\max} = 100 \text{ } \mu\text{V/m}$$



$$I_D = 20 \text{ mA}, \quad I_C = 80 \text{ } \mu\text{A}$$

Radiazione da una spira in campo lontano



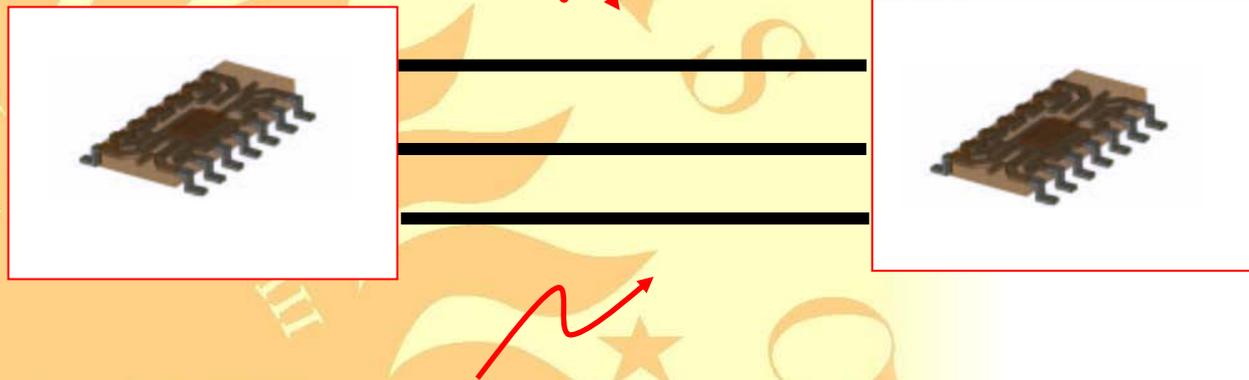
$$|E(r, f)| \cong Z_0 \pi f^2 \frac{S}{rc^2} I(f)$$

S = superficie spira
 r = distanza dalla spira
 $c = 3 \cdot 10^8$ m/s
 $I(f)$ = corrente nella spira

Modelli per la suscettività radiata



Suscettività irradiata



I conduttori di collegamento si accoppiano con un campo esterno provocando **sovratensioni** e **sovracorrenti** sui componenti

Definizione del problema

2 sotto-problemi:

caratterizzazione
della sorgente

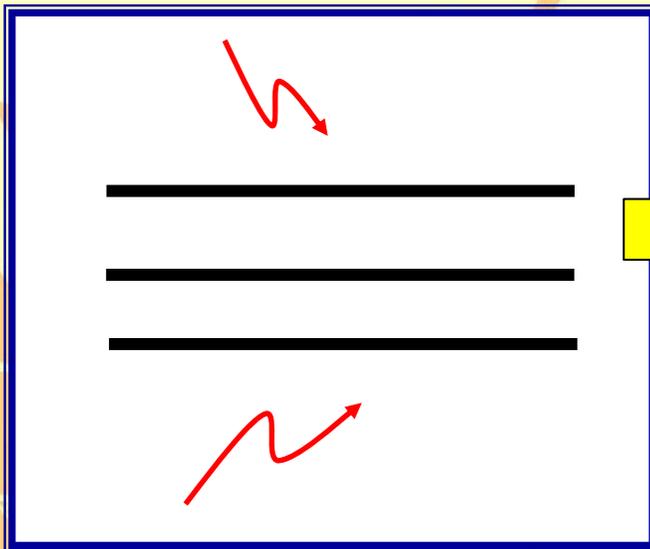


modello di
accoppiamento

SOL PER NOCTEM

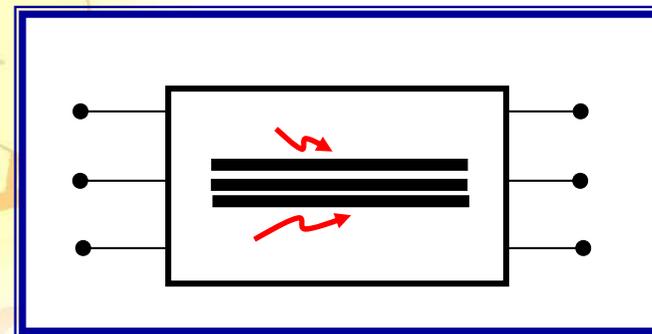
possono presentare lo stesso ordine di difficoltà!

Modello distribuito (conduttori elettricamente lunghi)



$$-\frac{d\mathbf{V}(z, \omega)}{dz} = \underline{\underline{Z}}(z, \omega)\mathbf{I}(z, \omega) + \mathbf{V}'_{eq}(z, \omega)$$

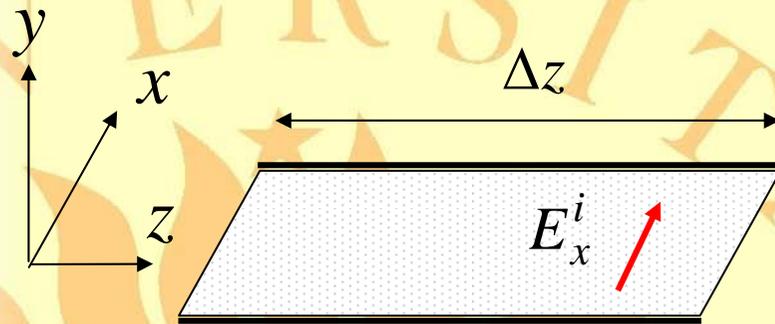
$$-\frac{d\mathbf{I}(z, \omega)}{dz} = \underline{\underline{Y}}(z, \omega)\mathbf{V}(z, \omega) + \mathbf{I}'_{eq}(z, \omega)$$



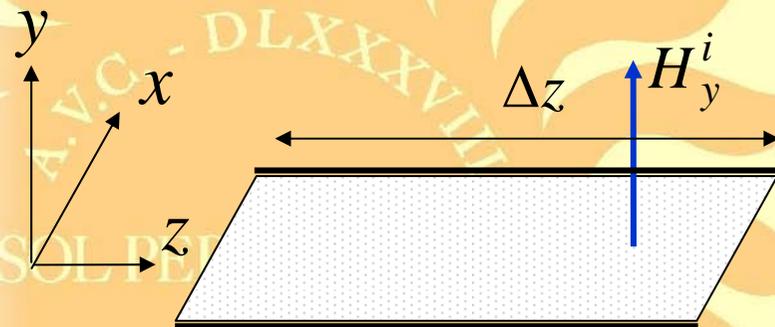
SOL PER NOCTEM

Il sistema campo-conduttori si modella con Equazioni dei Telegrafisti in cui compaiono due forzamenti noti

Modello distribuito: sorgenti equivalenti



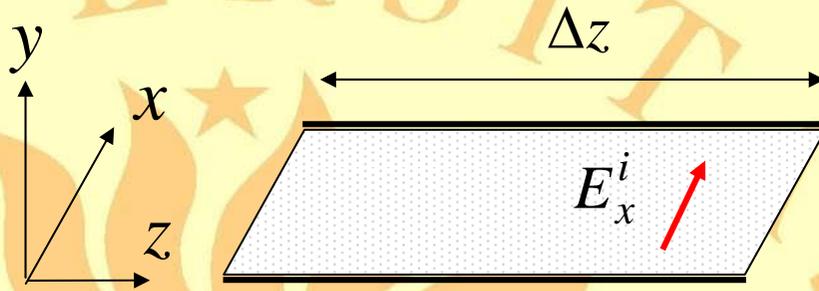
la componente di E trasversale all'asse dei fili induce una corrente $I'_{eq}(z, \omega)$ (di spostamento) tra i fili



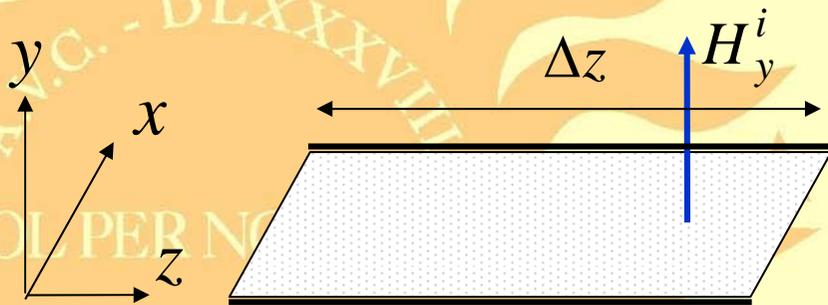
la componente di H ortogonale al piano induce una tensione $V'_{eq}(z, \omega)$ nei fili per la legge di Faraday

Il campo è quello **incidente**, cioè calcolato in **assenza** di linea

Modello distribuito: sorgenti equivalenti



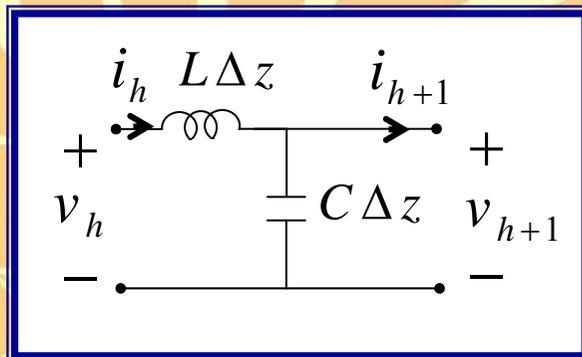
$$I'_{eq}(z, \omega) = j\omega C \int_0^d E_x dx$$



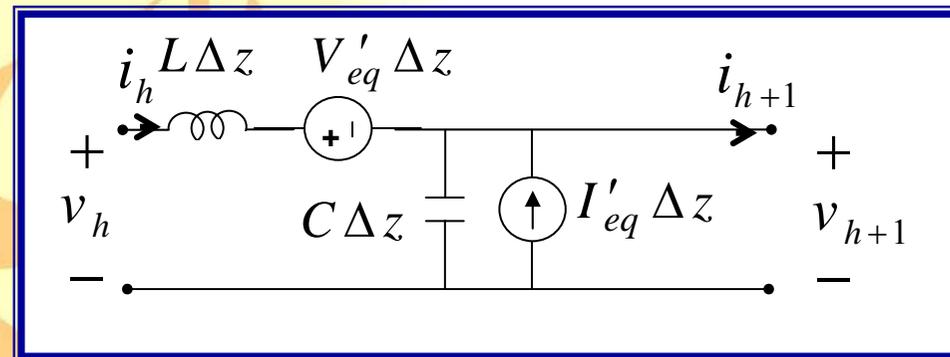
$$V'_{eq}(z, \omega) = j\omega\mu \int_0^d H_y dx$$

Modello distribuito: cella elementare

assenza di campo esterno

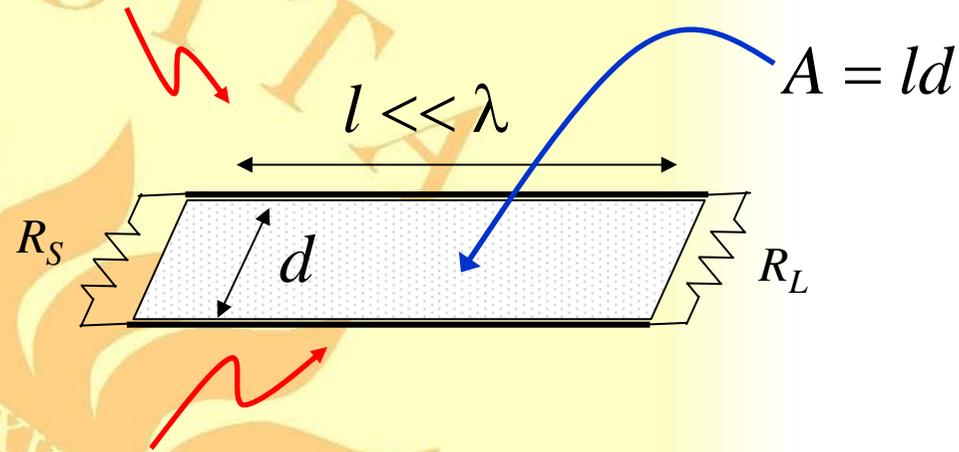


presenza di campo esterno



segmentazione: il sistema può essere modellato con una cascata di celle elementari

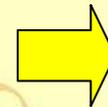
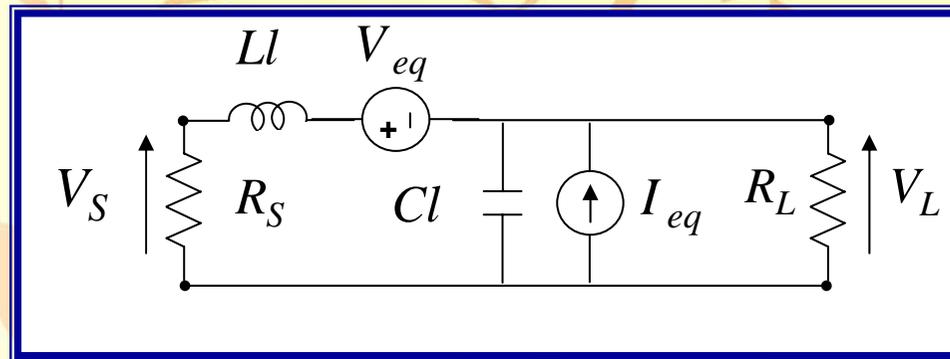
Modello semplificato (conduttori elettricamente corti)



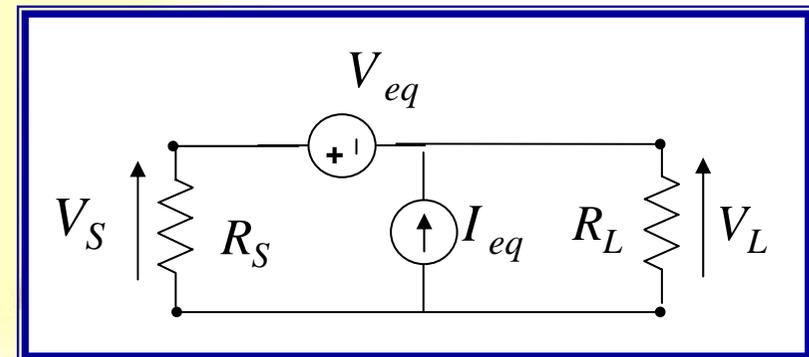
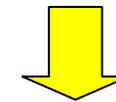
Linee elettricamente corte: $l \ll \lambda \Rightarrow V_{eq} \approx V'_{eq}l, I_{eq} \approx I'_{eq}l$

Linee trasversalmente corte: $d \ll \lambda \Rightarrow \begin{aligned} V_{eq} &\approx -j\omega\mu H_y A \\ I_{eq} &\approx -j\omega C E_x A \end{aligned}$

Modello semplificato



se R_S, R_L sono dello stesso ordine di grandezza di Z_0



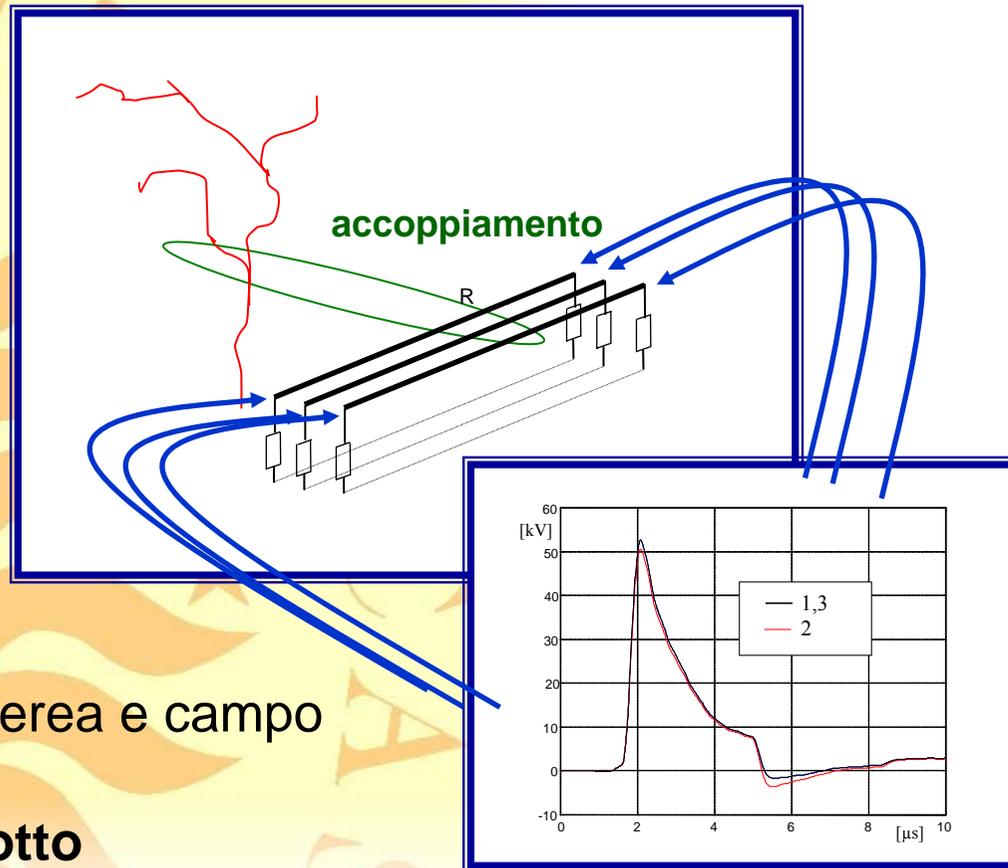
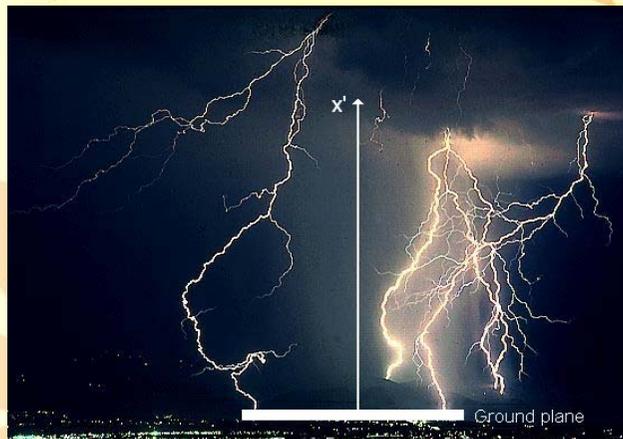
$$V_S \approx -\frac{R_S}{R_S + R_L} j\omega\mu H_y A - \frac{R_S R_L}{R_S + R_L} j\omega C E_X A$$

$$V_L \approx \frac{R_L}{R_S + R_L} j\omega\mu H_y A - \frac{R_S R_L}{R_S + R_L} j\omega C E_X A$$



**Un problema di suscettività radiata:
stima delle sovratensioni indotte in
una linea aerea per fulminazione
indiretta**

Il problema delle sovratensioni indotte da fulminazione indiretta

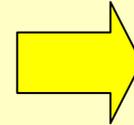


SOL PER NOCTEM

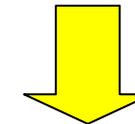
accoppiamento tra linea aerea e campo
prodotto da un fulmine:
disturbo radiato + condotto

Definizione del problema

caratterizzazione
della sorgente

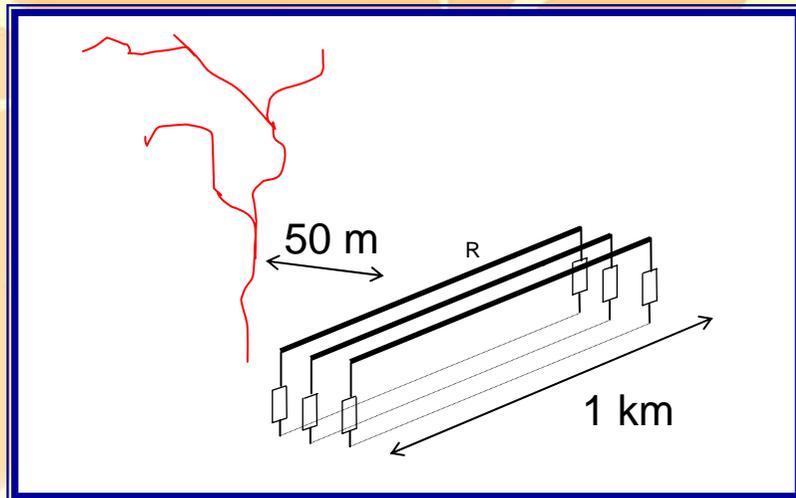


modello di
accoppiamento

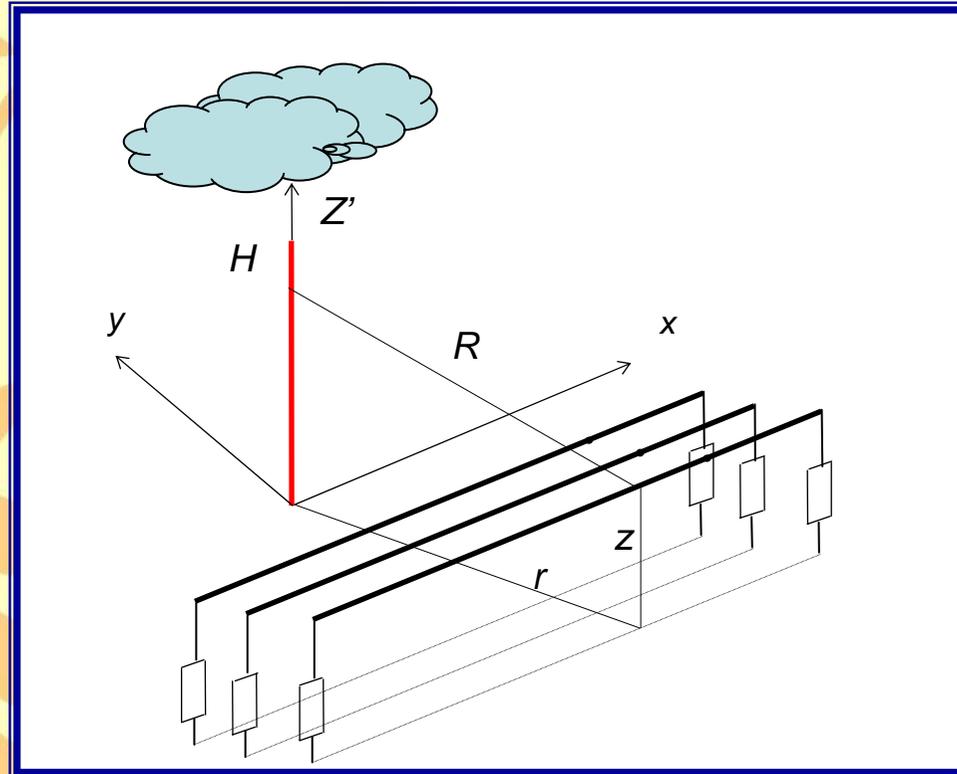
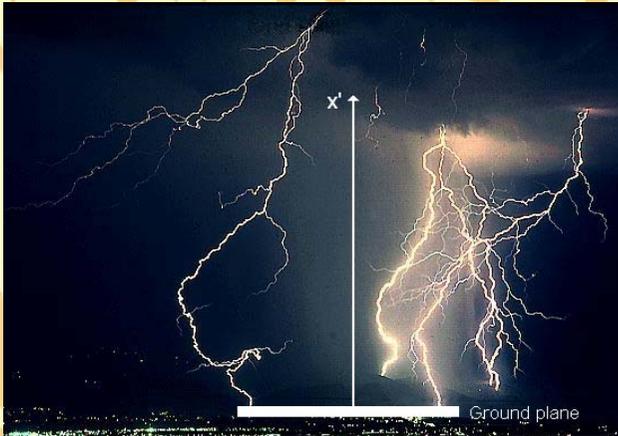


analisi del
comportamento del
sistema completo

situazione-tipo



Caratterizzazione della sorgente



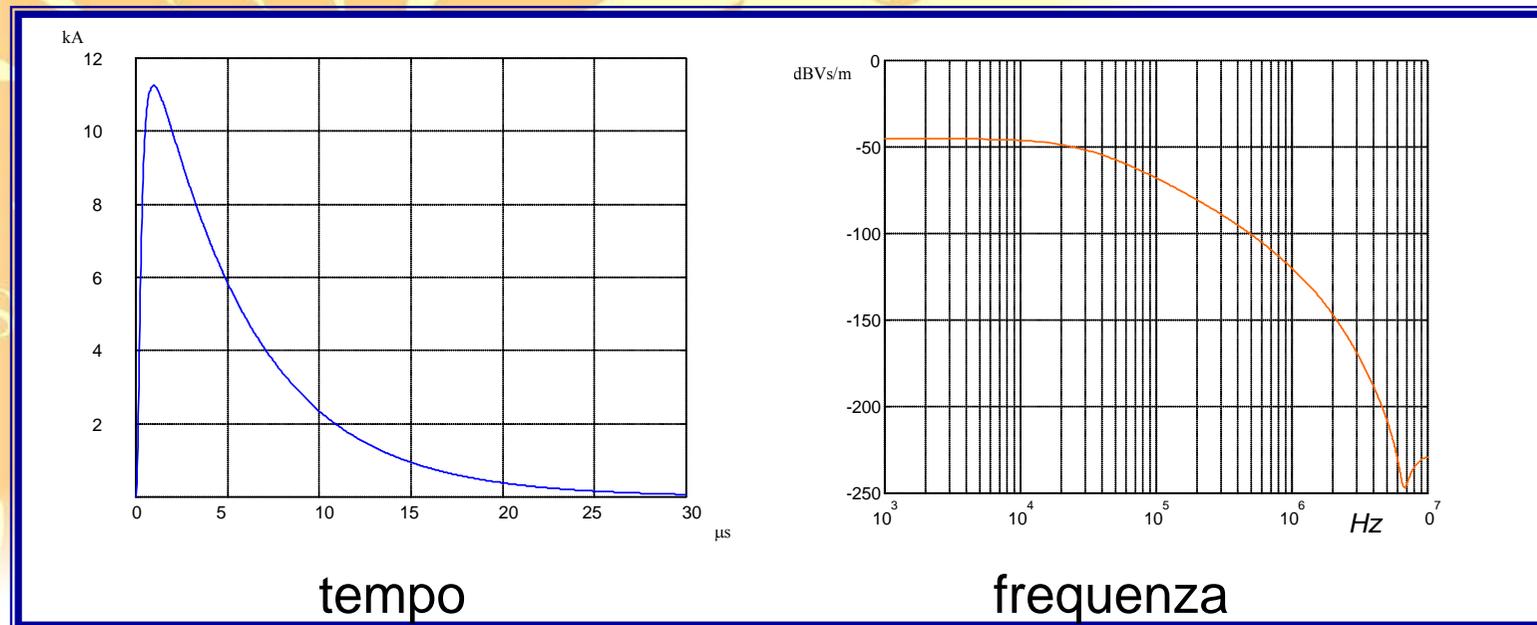
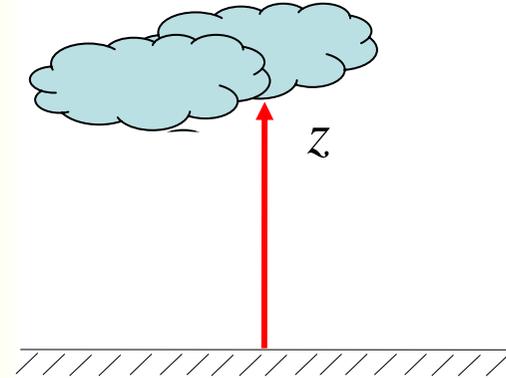
Il fulmine viene modellato come un'antenna verticale di cui si conosce la distribuzione di corrente

Caratterizzazione della sorgente

distribuzione della corrente nel canale

$$i(z, t) = \begin{cases} i(0, t - z/v) \exp(-z/\lambda) & z < vt \\ 0 & z > vt \end{cases}$$

distribuzione della corrente alla base



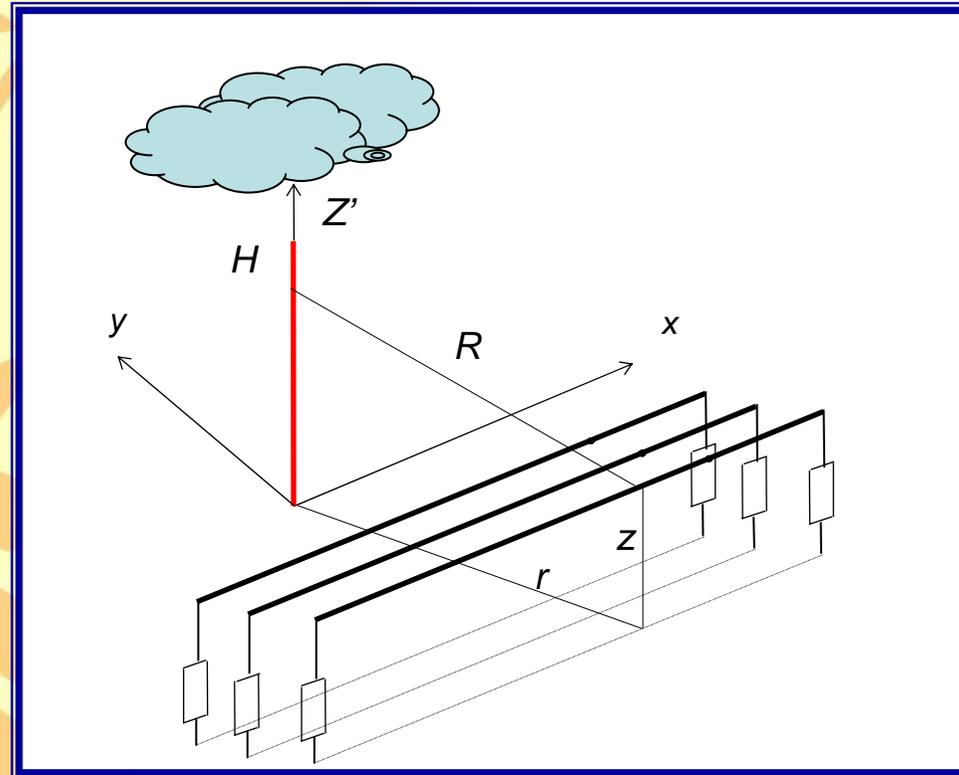
Stima del campo radiato

Banda del segnale 1 MHz

Lunghezza d'onda 300 m

Distanza tipica 50 m

Si tratta di un
problema di campo
vicino!!



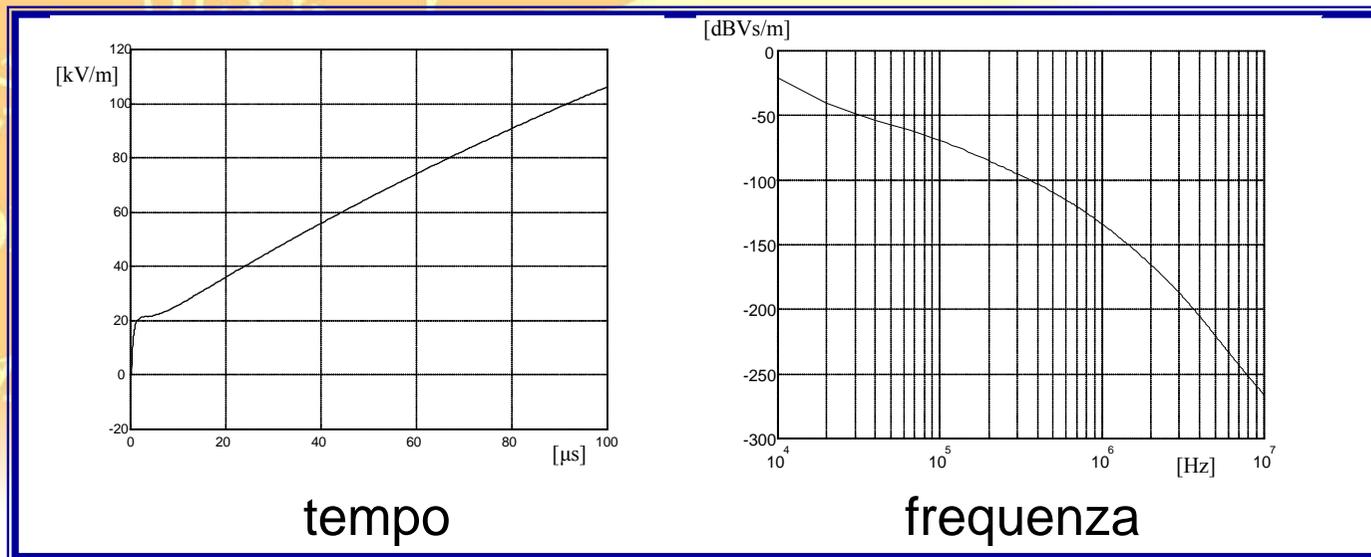
Stima del campo radiato

$$E_z(r, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-H}^H \left[\frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \frac{1}{j\omega} + \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^4} - \frac{r^2}{c^2R^3} j\omega \right] I(z', \omega) \exp(-j\omega R/c) dz'$$

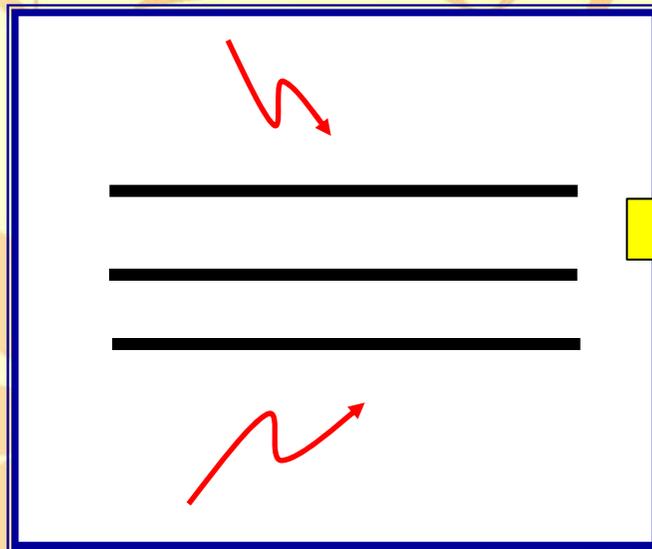
$$E_r(r, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-H}^H \left[\frac{3r(z-z')}{R^5} \frac{1}{j\omega} + \frac{3r(z-z')}{cR^4} + \frac{r(z-z')}{c^2R^3} j\omega \right] I(z', \omega) \exp(-j\omega R/c) dz'$$

$$H_\varphi(r, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{-H}^H \left[\frac{r}{R^3} + \frac{r}{cR^2} j\omega \right] I(z', \omega) \exp(-j\omega R/c) dz'$$

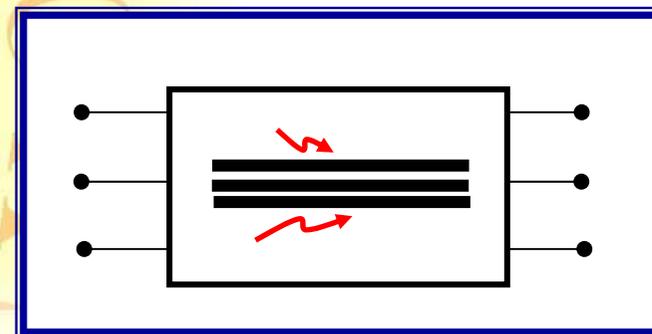
Campo elettrico a 50 m in direzione ortogonale alla linea



Modello di accoppiamento campo-linea: caso distribuito



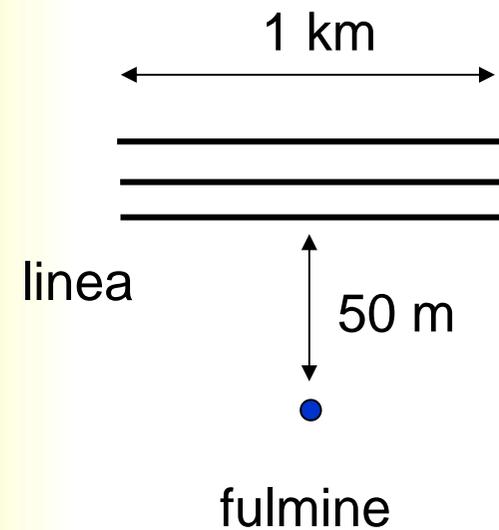
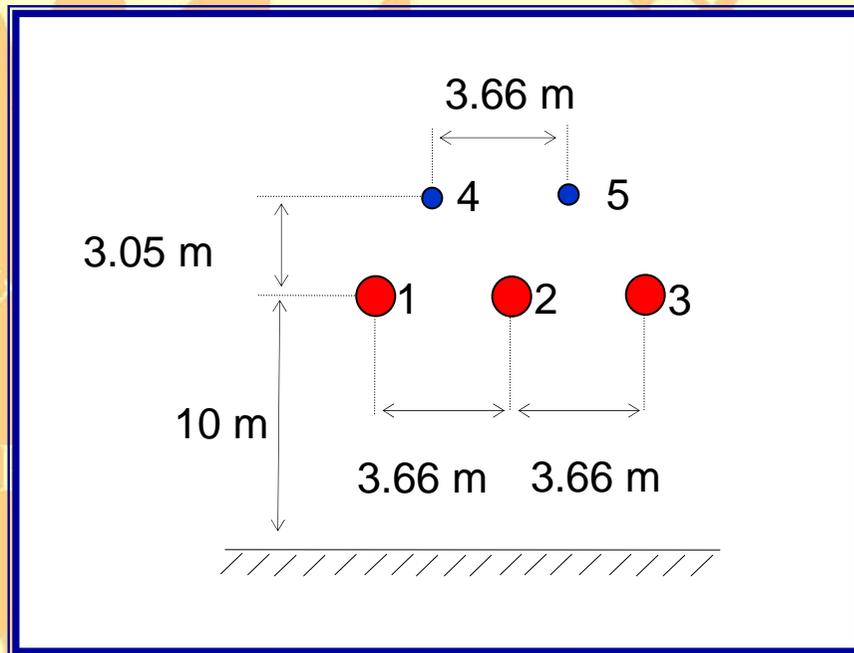
$$\begin{aligned}
 -\frac{d\mathbf{V}(z, \omega)}{dz} &= \underline{\underline{\mathbf{Z}}}(z, \omega)\mathbf{I}(z, \omega) + \mathbf{V}'_{eq}(z, \omega) \\
 -\frac{d\mathbf{I}(z, \omega)}{dz} &= \underline{\underline{\mathbf{Y}}}(z, \omega)\mathbf{V}(z, \omega) + \mathbf{I}'_{eq}(z, \omega)
 \end{aligned}$$



SOL PER NOCTEM
Il sistema campo-conduttori si modella
con Equazioni dei Telegrafisti in cui
compaiono due forzamenti noti

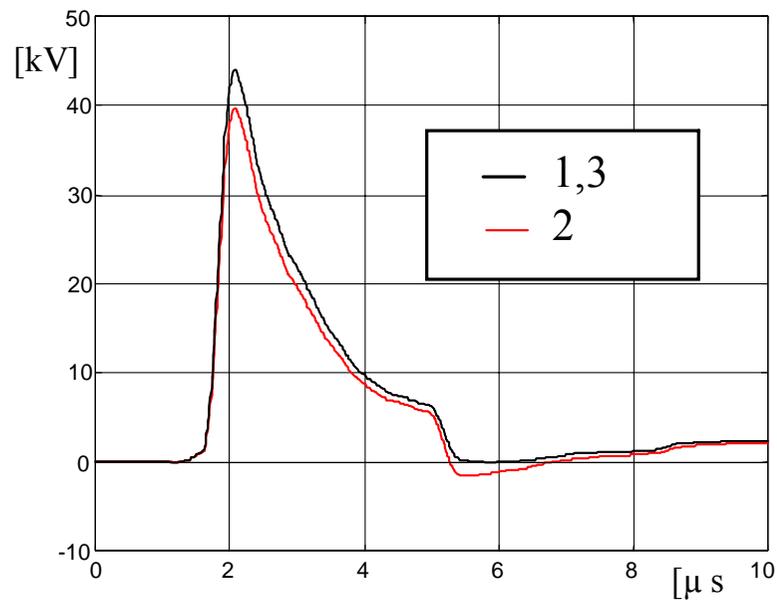
Caso-studio: linea aerea trifase con funi di guardia

linea di media tensione

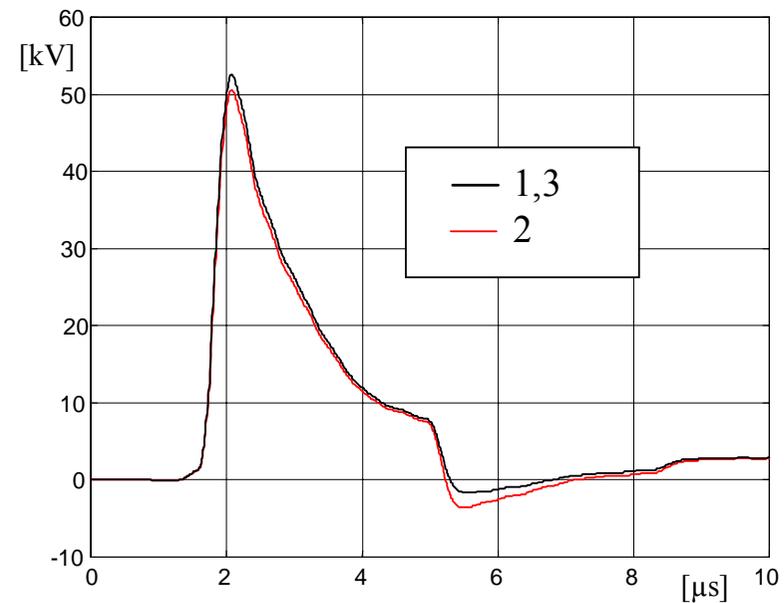


Effetto delle funi di guardia

sovratensione indotta sulle 3 fasi (carichi adattati)



funi di guardia messe a terra



funi di guardia flottanti