

Laboratorio di compatibilità Elettromagnetica

Introduzione



Antonio Maffucci

D.A.E.I.M.I.
Università degli Studi di Cassino

maffucci@unicas.it



A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Generalità sulla Compatibilità Elettromagnetica

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Che cos'è la Compatibilità Elettromagnetica?

Gli apparati elettrici ed elettronici producono intenzionalmente o non intenzionalmente **onde elettromagnetiche** che possono propagarsi:

- lungo i conduttori (**propagazione guidata**)
- nello spazio libero (**propagazione radiata**)



queste onde possono produrre **disturbi e malfunzionamenti** negli apparati elettrici ed elettronici che li subiscono.

Che cos'è la Compatibilità Elettromagnetica?

situazione-tipo



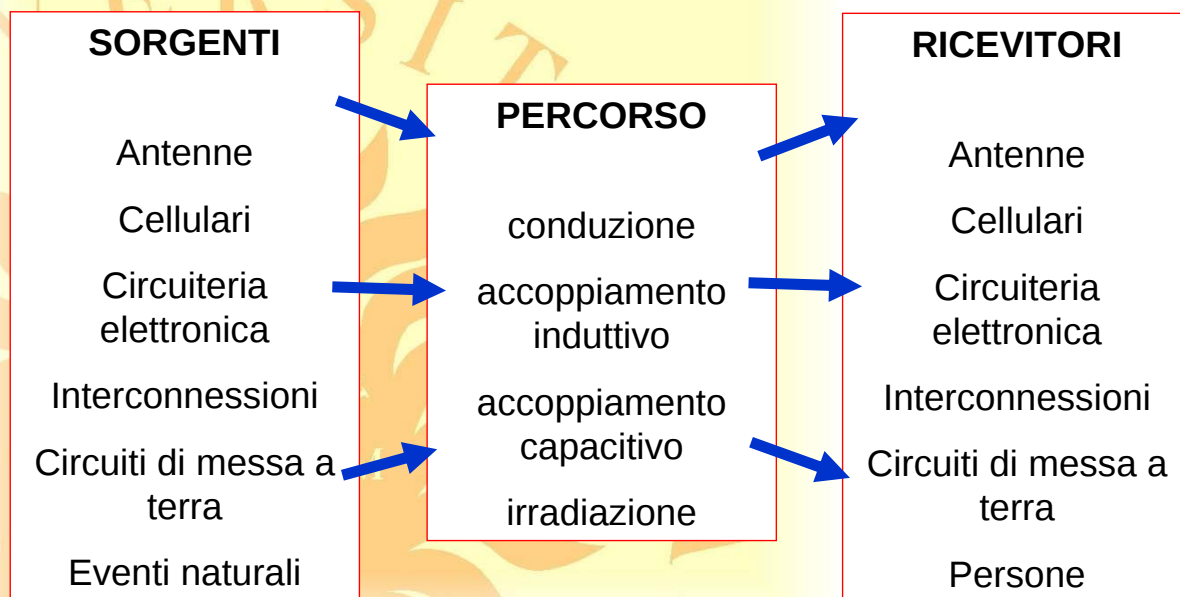
**sorgente di disturbo
elettromagnetico
(aggressore)**

**percorso di
accoppiamento**



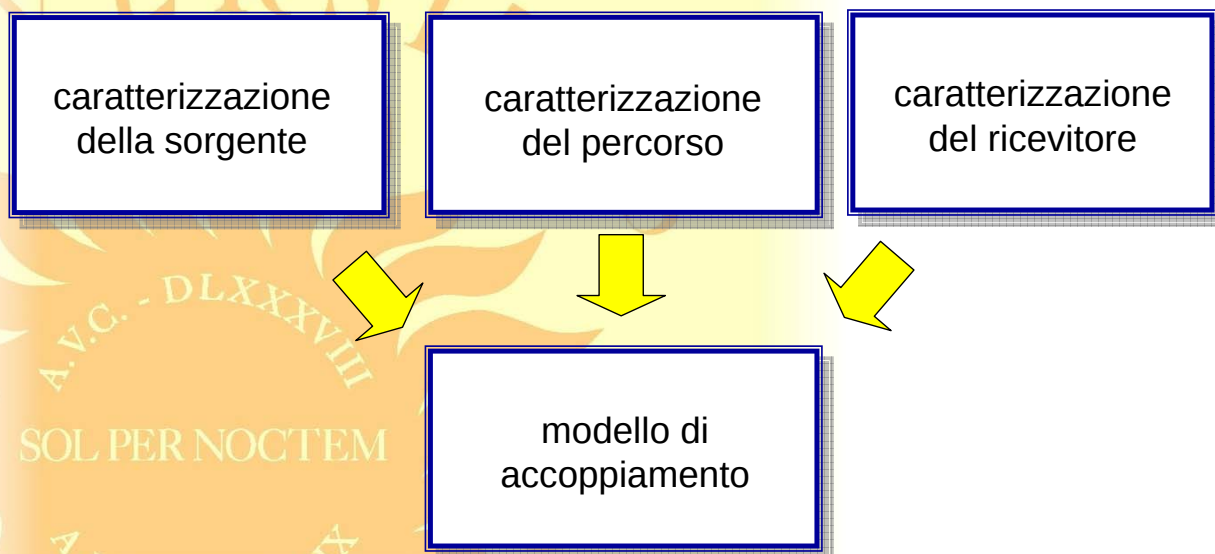
apparato vittima

I tre elementi di un problema EMC



A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Modellizzazione di un problema EMC



A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Compatibilità Elettromagnetica

Capacità di un apparato, componente o installazione elettrica e/o elettronica di funzionare correttamente nel suo ambiente elettromagnetico senza altresì introdurre disturbi che possano interferire con il funzionamento di altre apparecchiature presenti nello stesso ambiente

Criteri da soddisfare

Non causare interferenze con altri sistemi (**EMISSIONI**)

Non essere suscettibile alle emissioni di altri sistemi (**IMMUNITA'**)

Non causare interferenze con se stesso (**COMPATIBILITA' INTERNA**)

Compatibilità Elettromagnetica



Un'apparecchiatura deve praticamente:

emettere campi elettromagnetici, sia sotto forma condotta che irradiata, al di sotto di una soglia definita dalla normativa

essere **immune** a tutta una serie di fenomeni elettromagnetici condotti ed irradiati tipici dell'ambiente a cui è destinata

garantire la **compatibilità interna** dei suoi sottosistemi

Quadro normativo

Enti normatori e comitati tecnici

IEC (International Electrotechnical Committee)

CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques).

CENELEC (Comité Européen de Normalisation ELECTrotechnique)

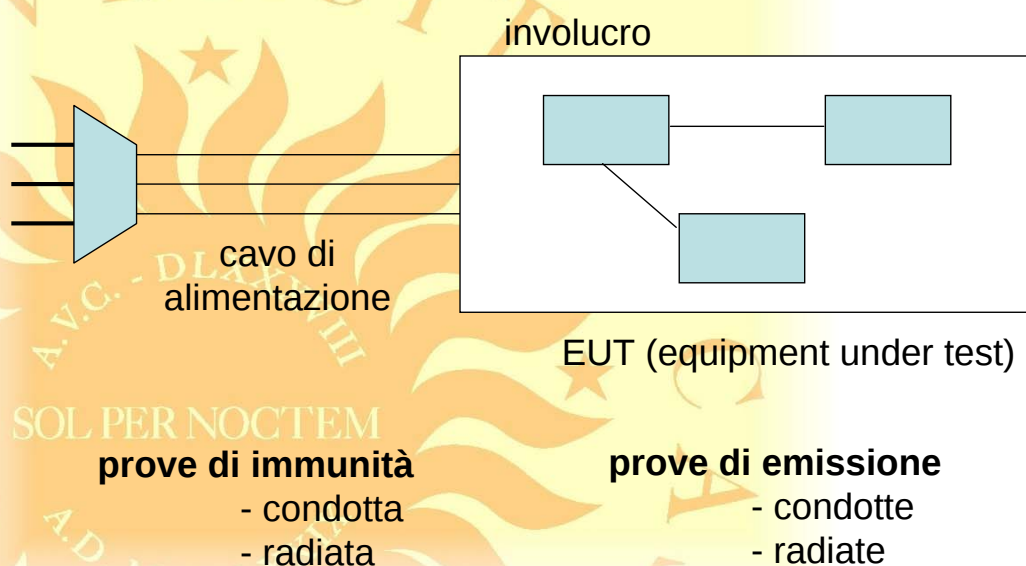
CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano), Comitato Tecnico 210

Direttiva EMC di riferimento in Europa

Direttiva CEE 89/336

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Normativa EMC: le prove



A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Principali prove EMC

Prove di emissione

- Emissione di disturbi irradiati (dall'involucro)
- Emissione di disturbi condotti (sull'alimentazione)
- Emissione di correnti armoniche
- Misura della potenza di disturbo

Prove di immunità

- Immunità ai campi elettromagnetici irradiati
- Immunità ai campi elettromagnetici condotti
- Immunità alla scarica elettrostatica (ESD)
- Immunità ai transitori/treni elettrici veloci (EFT/BURST)
- Immunità all'impulso di tensione (SURGE)
- Immunità al campo magnetico generato a frequenza di rete
- Immunità ai buchi di tensione, brevi interruzioni e variazioni di tensione

Normativa: classificazione in frequenza

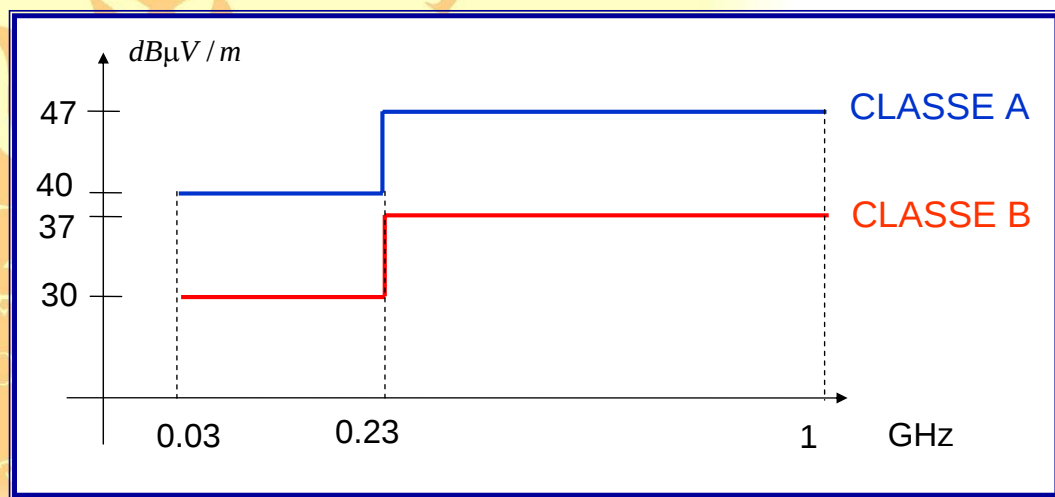
Norme CISPR

Disturbi **condotti**: 150 kHz – 30 MHz

Disturbi **radiati**: 30 MHz – 1 GHz

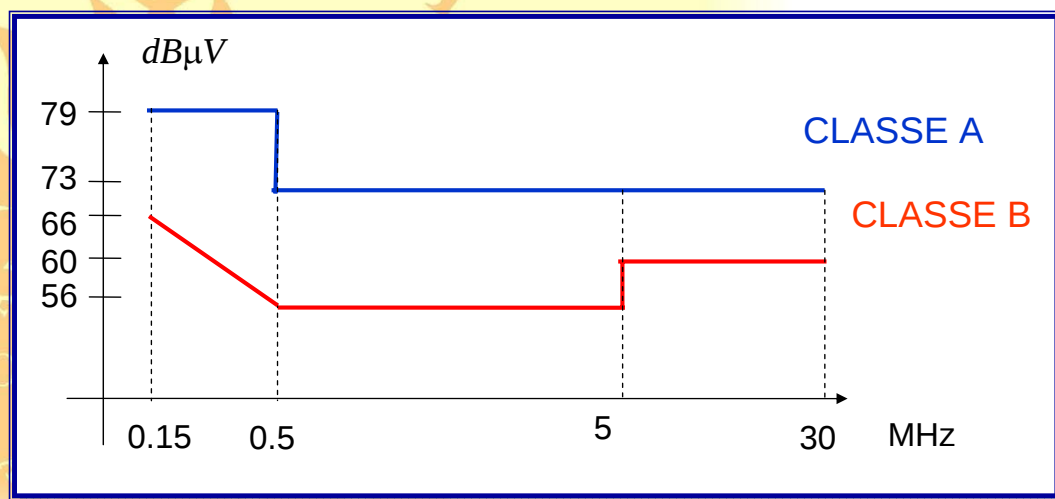
E' spesso fondamentale portare in conto la propagazione elettromagnetica

Esempio: limite per le emissioni irradiate (campo elettrico a 10 m)



A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Esempio: limite per le emissioni condotte (tensione quasi-picco ai morsetti)



A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Modellistica Elettromagnetica per problemi di Compatibilità

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Principali obiettivi della modellistica elettromagnetica per problemi EMC

- Caratterizzazione delle sorgenti (in particolare non intenzionali)
- Valutazione dei disturbi condotti
- Valutazione dei disturbi radiati
- Analisi dei transitori elettrici veloci e problemi di signal integrity
- Analisi della risposta ad impulsi di tipo surge
- Scarica elettrostatica
- Stima dell'emissione di corrente armonica
- Stima dell'efficienza degli schermi
- Analisi dell'immunità a campi magnetici a frequenza di rete
- Studio della qualità dell'energia

**argomento di
queste lezioni!**

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

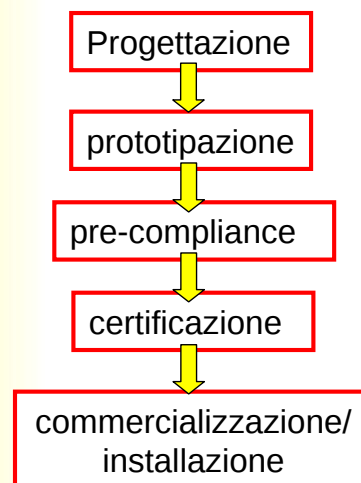
Valutazione della compatibilità elettromagnetica di apparati e sistemi

Due strumenti fondamentali:

- **Simulazione** attraverso modelli
- **Misure** e verifiche sperimentali

Nella progettazione e nella prototipazione

Utilizzare simulatori affidabili ed efficienti consente di abbattere i costi della progettazione e di diminuire il time-to-market



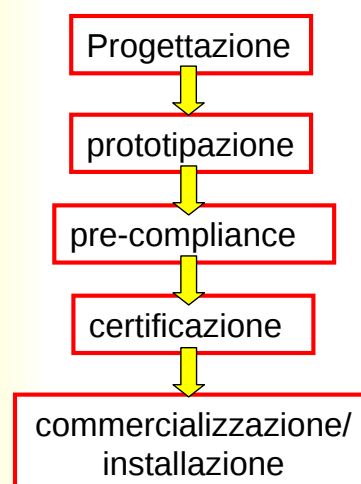
Valutazione della compatibilità elettromagnetica di apparati e sistemi

Due strumenti fondamentali:

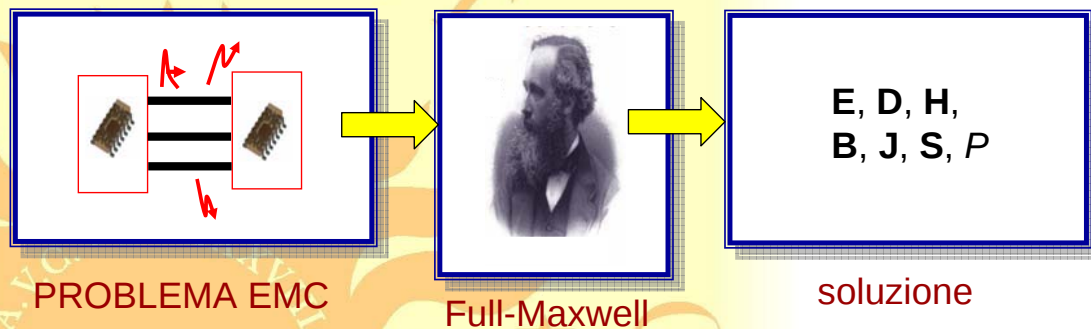
- **Simulazione** attraverso modelli
- **Misure** e verifiche sperimentali

Nella pre-compliance e nella certificazione

La simulazione può supportare la misura, specialmente nei casi in cui non ci sono norme di riferimento specifiche. Secondo la nuova direttiva **CEE (dic. 2004)** alcune misure potranno essere simulate!



La modellizzazione dei problemi di compatibilità elettromagnetica



In linea di principio qualsiasi problema può essere affrontato risolvendo le equazioni di Maxwell complete (full-wave)

Nei problemi di interesse applicativo la dimensione dei problemi rende irrealizzabile tale approccio per il costo ed il tempo richiesto

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

La modellizzazione dei problemi di compatibilità elettromagnetica

Approccio generale

Definizione del problema

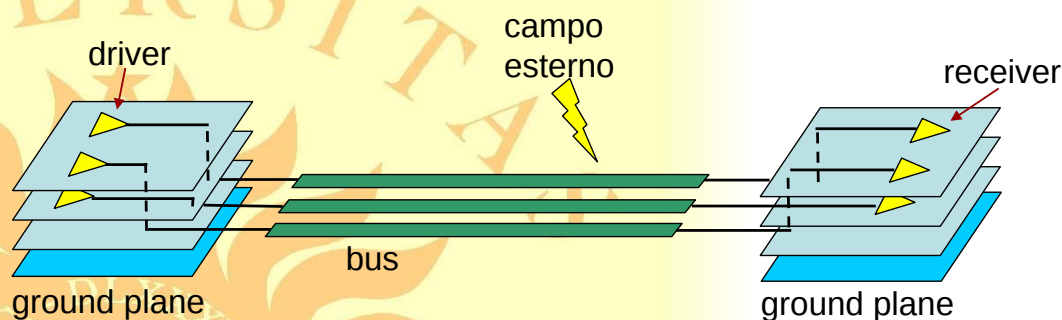
Individuazione dei sottosistemi da modellare indipendentemente

Scelta del modello elettromagnetico da usare per ciascun sottosistema

Simulazione efficiente del sistema completo

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

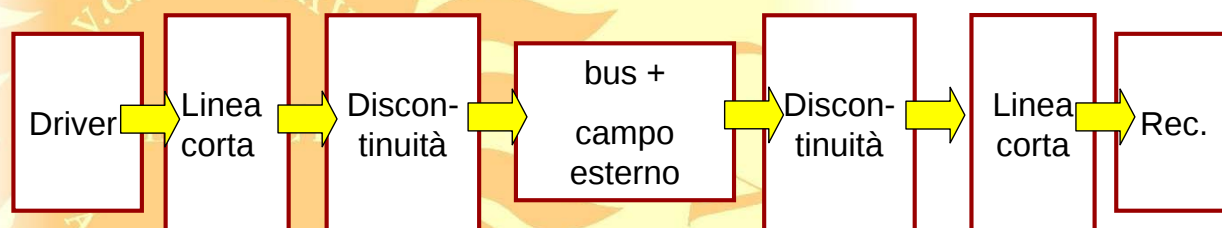
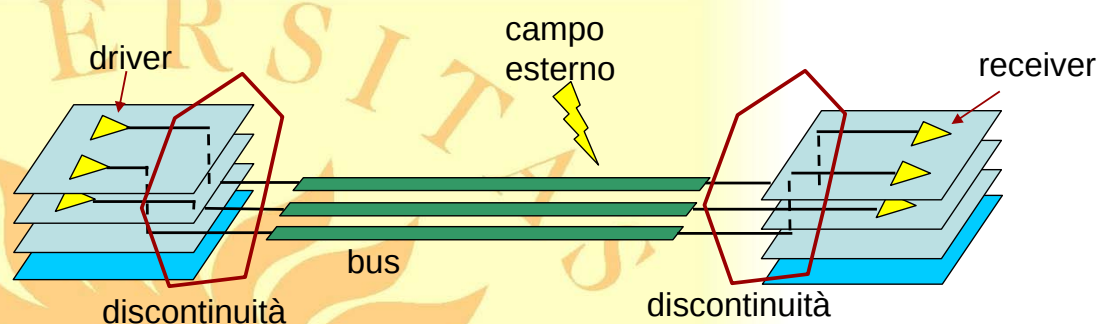
Definizione del problema



Individuazione di tutte le interazioni elettromagnetiche da portare in conto, sia intenzionali che non intenzionali

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

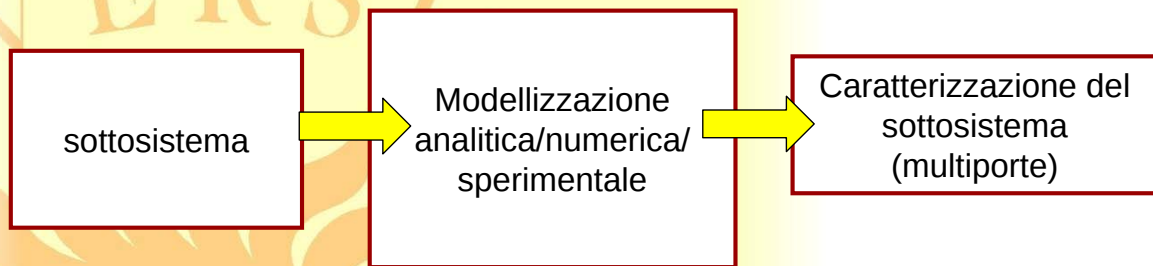
Segmentazione



Individuazione dei sottosistemi che possono essere modellati indipendentemente (multiporte)

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Modellizzazione dei sottosistemi: 2 step



scelta del modello elettromagnetico e caratterizzazione del sottosistema



identificazione dei multiporte attraverso circuito equivalenti
(modelli di ordine ridotto)

Scelta del modello elettromagnetico

Full-wave	q.s. elettrico	q.s. magnet.	stazionario
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$	$\nabla \times \mathbf{E} = 0$ $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$	$\nabla \times \mathbf{E} = 0$ $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$
fondamentale	trascurabile		assente
	propagazione		

Scelta del modello elettromagnetico

Lunghezza elettrica di un sistema

dimensione geometrica massima $L_{\max}$

frequenza massima $f_{\max}$

lunghezza d'onda minima

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}}$$

Se accade che $\frac{L_{\max}}{\lambda_{\min}} \leq \frac{1}{10}$ allora il sistema è **eletttricamente corto**

frequenza f	lunghezza d'onda λ
50 Hz	6000 Km
3 KHz	100 Km
30 KHz	10 Km
300 KHz	1 Km
3 MHz	100 m
30 MHz	10 m
300 MHz	1 m
3 GHz	10 cm
30 GHz	1 cm

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Scelta del modello elettromagnetico

Caso 1: analisi di sovratensione indotta su una linea aerea per fulminazione

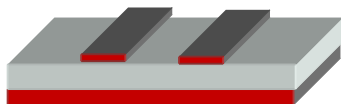
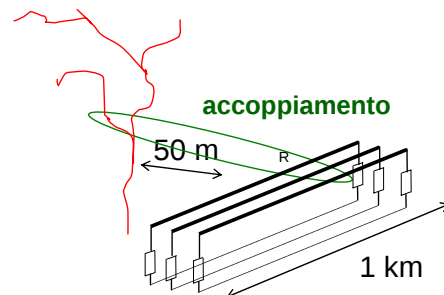
Banda del segnale 1 MHz

Velocità di propagazione $3 \cdot 10^8$ m/s

Lunghezza d'onda $\lambda = 300$ m

Dimensione tipica del problema $l = 1$ Km

$l \approx 3.33\lambda$: il circuito è **eletttricamente lungo**



Caso 2: microstrip on-chip

Frequenza massima 20 GHz

Velocità di propagazione $1.7 \cdot 10^8$ m/s

Lunghezza d'onda $\lambda = 10.5$ mm

Dimensione tipica del problema $l = 1$ mm

$l \approx 0.09\lambda$: il circuito è **eletttricamente corto**

A. Maffucci, Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica a.a. 2005/2006

Scelta del modello elettromagnetico

Quasi-stazionario elettrico o magnetico?

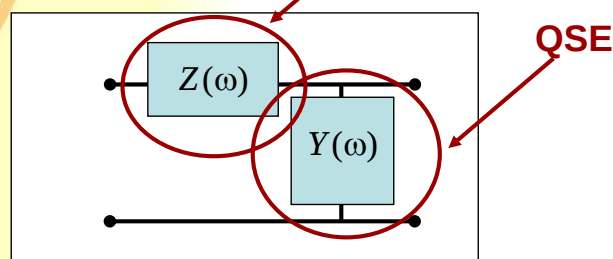
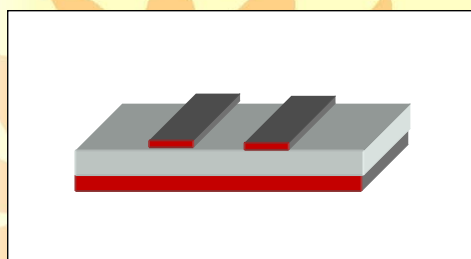
Q.S.E. Domina l'effetto della **carica** elettrica:
l'accoppiamento è di tipo **capacitivo**

Q.S.M. Domina l'effetto della **corrente** elettrica
l'accoppiamento è di **induttivo**

In molti casi non è banale capire quale modello utilizzare!

Scelta del modello elettromagnetico

Quasi-stazionario elettrico o magnetico?



SOL PER NOCTEM

In altri casi non è semplice scegliere oppure la caratterizzazione
va effettuata con entrambi i modelli

Scelta del modello elettromagnetico

Analisi adimensionale

Problema

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho, \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= 0 \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \gamma \mathbf{E}\end{aligned}$$

+ cond. iniziali e al contorno

Normalizzazione

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{E}} &= \frac{\mathbf{E}}{E_0}, \hat{\mathbf{D}} = \frac{\mathbf{D}}{D_0} \\ \hat{\mathbf{H}} &= \frac{\mathbf{H}}{H_0}, \hat{\mathbf{B}} = \frac{\mathbf{B}}{B_0} \\ \hat{\rho} &= \frac{\rho}{\rho_0}, \hat{\mathbf{J}} = \frac{\mathbf{J}}{J_0} \\ \tau &= \frac{t}{t_0}, \hat{r} = \frac{r}{r_0}\end{aligned}$$

I valori di normalizzazione vanno scelti in modo che i campi adimensionali, il loro rotore, la loro divergenza e le derivate temporali siano di un ordine di grandezza confrontabile

Scelta del modello elettromagnetico

Modello adimensionale

$$\begin{aligned}\nabla_{\hat{r}} \times \hat{\mathbf{E}} &= -\alpha \beta \frac{\partial \hat{\mathbf{B}}}{\partial t} \\ \nabla_{\hat{r}} \times \hat{\mathbf{H}} &= \frac{t_0}{\tau_e} \hat{\mathbf{J}} + \frac{\beta}{\alpha} \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}}{\partial t}\end{aligned}$$

costanti adimensionali

$$\alpha = c \frac{B_0}{E_0} \Rightarrow \alpha^2 = \frac{\frac{1}{\Omega} \iiint_{\Omega} \frac{|\mathbf{B}|^2}{2\mu} d\Omega}{\frac{1}{\Omega} \iiint_{\Omega} \frac{\epsilon |\mathbf{E}|^2}{2} d\Omega} = \frac{W_M^2}{W_E^2}$$

$$\beta = \frac{r_0}{ct_0} = \frac{r_0}{\lambda_0}$$

$$\tau_E = \frac{\epsilon}{\gamma} \quad \text{rilassamento della carica}$$

Scelta del modello elettromagnetico

Modelli stazionari e quasi-stazionari: $\beta \rightarrow 0$

Modello adimensionale

$$\nabla_{\hat{r}} \times \hat{\mathbf{E}} = -\alpha\beta \frac{\partial \hat{\mathbf{B}}}{\partial t}$$

$$\nabla_{\hat{r}} \times \hat{\mathbf{H}} = \frac{T_0}{\tau_e} \hat{\mathbf{J}} + \frac{\beta}{\alpha} \frac{\partial \hat{\mathbf{D}}}{\partial t}$$

$\alpha \rightarrow 0$ come β ($W_M \ll W_E$) QSE

$\alpha \rightarrow \infty$ come $\frac{1}{\beta}$ ($W_M \gg W_E$) QSM

$\alpha \rightarrow \text{costante}$ ($W_M \approx W_E$) STAZ

Alcuni riferimenti

H. W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, Wiley, 1988

T. Williams, *EMC for Product Designers*, Butterworth-Heinemann, 1992.

C. R. Paul, *Electromagnetic Compatibility*, Wiley, 1992 (Ed. ital.: Hoepli, 1999)

L. Tihanyi, *Electromagnetic Compatibility in Power Electronics*, IEEE Press, 1995

V. P. Kodali, *Engineering electromagnetic compatibility: principles, measurements and technologies*, IEEE press, 1996

J. Carr, *The Technician's EMI Handbook : Clues and Solutions*, Newnes, 2000

G. Miano, A. Maffucci, *Transmission lines and lumped circuits*, Academic Press, 2001

K. L. Kaiser, *Electromagnetic Compatibility Handbook*, CRC Press, 2004