

Propagazione del Rumore nei Sistemi di Misura EMI nel Dominio del Tempo



D. Bellan and S. A. Pignari



POLITECNICO DI MILANO — Dipartimento di ELETTRONICA
EMC Group @ POLIMI
Milano, Italy



IEEE
Electromagnetic Compatibility and
Instrumentation & Measurement
Italy Chapters

**L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009**



Motivazioni e Obiettivi

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTROTECNICA

- La misura di campi elettrici/magnetici può essere condotta efficacemente mediante sistemi di misura che impiegano:**
 - sensori triassiali di campo
 - schede per la conversione analogico/digitale (A/D)
 - trasformazioni tempo-frequenza per mezzo della Trasformata di Fourier Discreta (DFT)
- Ciascuno dei tre canali di misura introduce rumore additivo**
 - particolare rilievo nel caso di finestre di misura di breve durata (sorgenti tempo-varianti: non sono applicabili le tecniche di media)
 - finestre con pochi campioni comportano un elevato livello di rumore
- Propagazione dell'incertezza fino all'ampiezza del campo misurato**
 - proprietà statistiche dell'ampiezza del campo misurato



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

2 di 22



Piano della Presentazione

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTROTECNICA

- Trasformazione tempo-frequenza dei segnali campionati**
 - modello nel dominio del tempo
 - proprietà statistiche fondamentali

- Proprietà statistiche in forma analitica dell'ampiezza del campo misurato:**
 - valore medio e deviazione standard
 - funzione densità di probabilità (PDF)

- Validazione numerica e sperimentale**
 - simulazione numerica dell'intero processo
 - verifica mediante una procedura sperimentale



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

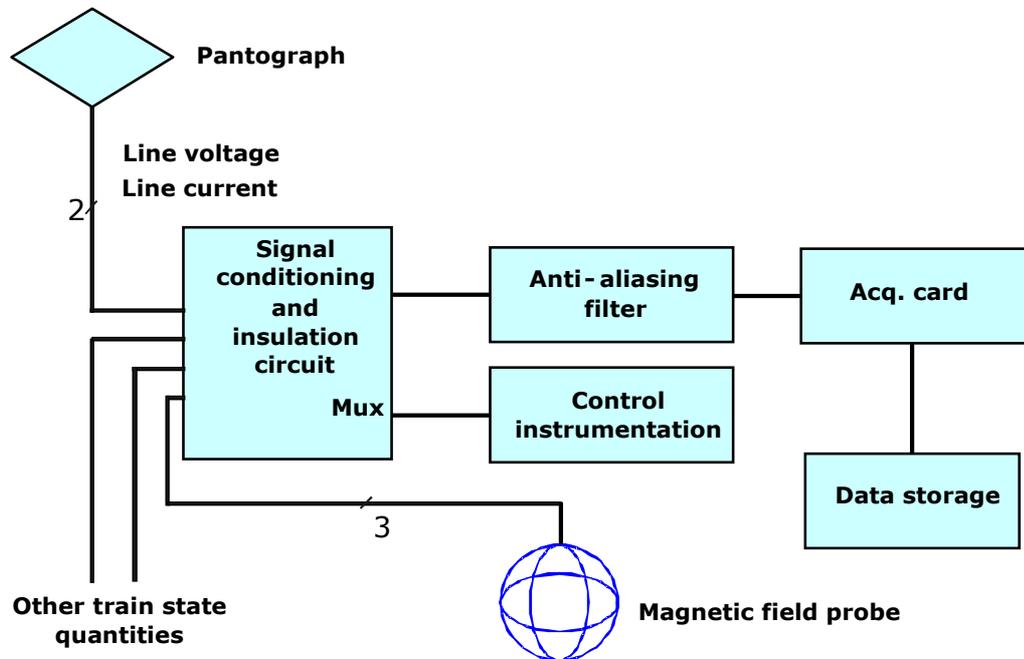
3 di 22



Un Esempio Applicativo

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTROTECNICA

Misura del campo magnetico generato da un locomotore



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

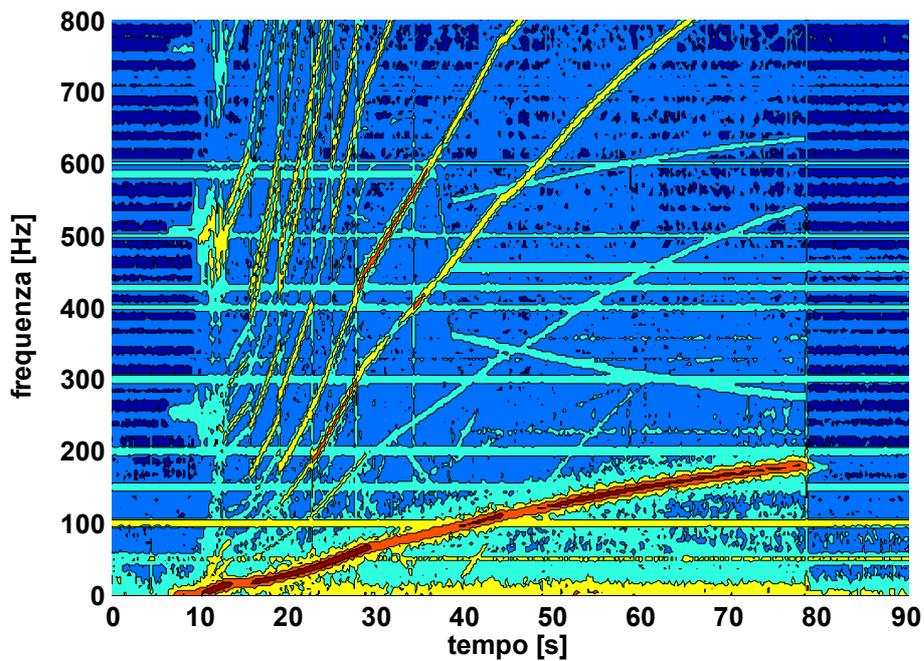
4 di 22



Mappa Tempo-Frequenza

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTRONICA

Fase di accelerazione



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

5 di 22



Trasformazione Tempo-Frequenza

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTRTECNICA

- **Modello analitico di ciascuna delle componenti spaziali del campo da misurare:**

$$v_x(t) = A_{x,0} + \sum_{n=1}^N A_{x,n} \cos(2\pi f_n t + \vartheta_n)$$

- **Conversione A/D:**

$$x[k] = x(kT_S) = v_x(kT_S) + n_x(kT_S) \quad f_S > 2f_N$$

- **Trasformazione tempo-frequenza:**

$$X[n] = \frac{2}{N_S \text{NPSG}} \text{DFT}\{x[k]w[k]\}$$

- **La DFT è un operatore lineare:**

$$X[n] = V_x[n] + N_x[n]$$



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

6 di 22



Il Campo 3D Misurato è una RV

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTROTECNICA

Risultato fondamentale:

$\Re\{N_x[n]\}$, $\Im\{N_x[n]\}$ Variabili casuali (RVs) normali

valore medio nullo

varianze $\sigma_x^2(n\Delta f) \cong \text{ENBW} S_{n_x}(n\Delta f) \Delta f$

ENBW: Equivalent Noise Bandwidth

S_n : Power Spectral Density (PSD) del rumore

$\Delta f = f_s/N_s$: risoluzione in frequenza della DFT

Ampiezza del campo 3D misurato:

$$M[n] = \sqrt{X_R[n]^2 + X_I[n]^2 + Y_R[n]^2 + Y_I[n]^2 + Z_R[n]^2 + Z_I[n]^2}$$



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

7 di 22



Canali con lo Stesso Livello di Rumore 1/2

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTROROTECNICA

□ Varianze uguali:

$$\sigma^2(f) = \sigma_X^2(f) = \sigma_Y^2(f) = \sigma_Z^2(f)$$

□ PDF dell'ampiezza normalizzata $m = M/\sigma$:

PDF di Rice generalizzata

$$f_m(m) = \frac{m^3}{(A/\sigma)^2} \exp\left(-\frac{m^2 + (A/\sigma)^2}{2}\right) I_2\left(m \frac{A}{\sigma}\right), \quad m \geq 0$$

A è l'ampiezza "noise-free" del campo

□ Momenti statistici:

$$E[M^\nu] = (2\sigma^2)^{\nu/2} \frac{\Gamma[(6+\nu)/2]}{\Gamma(3)} {}_1F_1\left(-\frac{\nu}{2}, 3; -\frac{A^2}{2\sigma^2}\right)$$



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

8 di 22



Canali con lo Stesso Livello di Rumore 2/2

EMC Group @ POLIMI — Dip. Elettrotecnica

□ Risultati approssimati ottenibili mediante linearizzazione (sviluppo in serie di Taylor):

□ Valore medio

$$\mu_m \cong \sqrt{6 + (A/\sigma)^2} - \frac{3 + (A/\sigma)^2}{2[6 + (A/\sigma)^2]^{3/2}}$$

□ Deviazione Standard

$$\sigma_m \cong \sqrt{\frac{3 + (A/\sigma)^2}{6 + (A/\sigma)^2}}$$

➤ Dipendenza dal rapporto segnale/rumore A/σ

➤ D. Bellan, A. Gaggelli, and S. A. Pignari, "Noise Effects in Time-Domain Systems Involving Three-Axial Field Probes for the Measurement of Nonstationary Radiated Emissions," accettato per la pubblicazione su *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

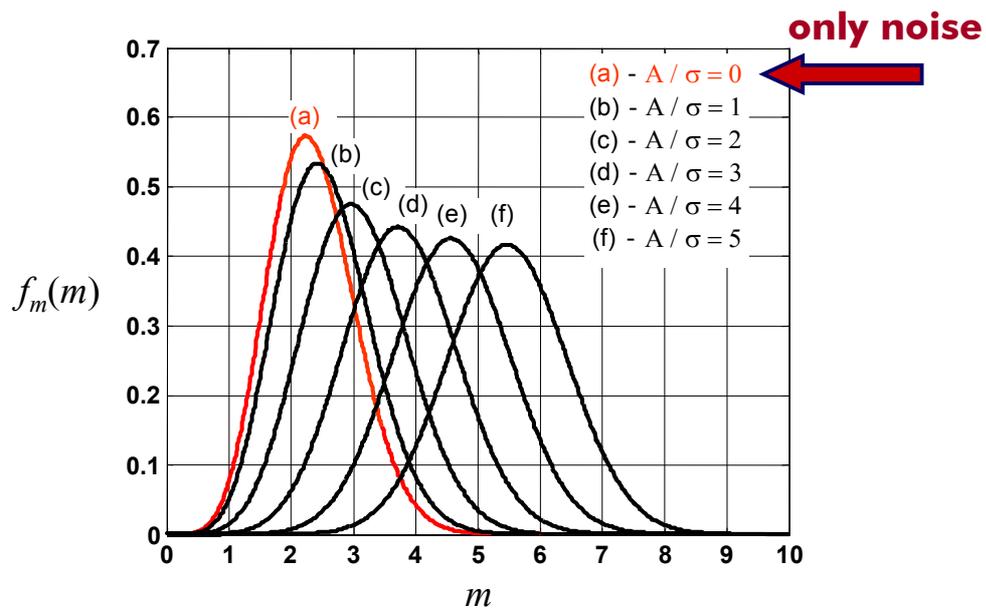
9 di 22



Densità di Probabilità

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTRTECNICA

PDF del campo misurato normalizzato m per diversi valori di SNR (A/σ)



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

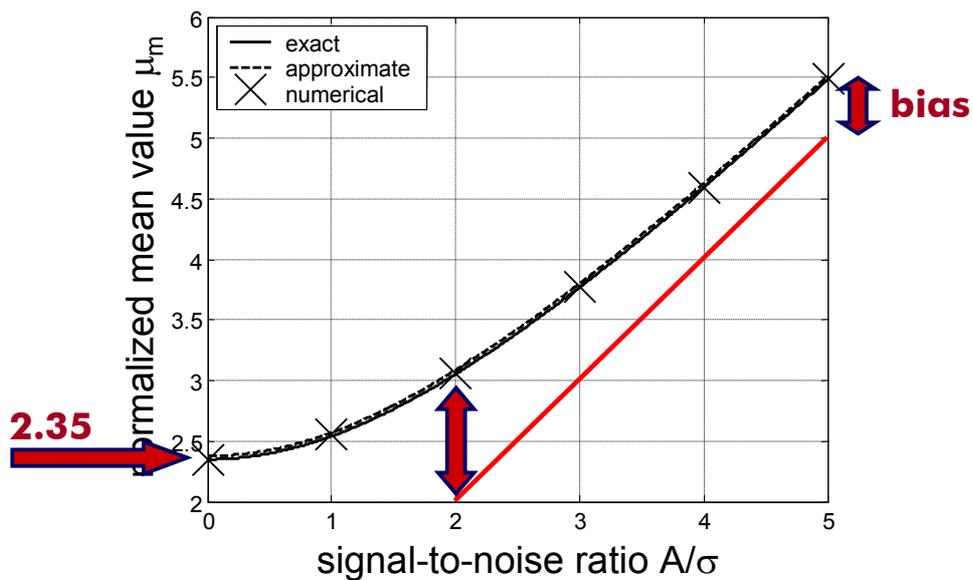
10 di 22



Valore Medio

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTRTECNICA

Valore medio del campo misurato normalizzato m in funzione di SNR



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

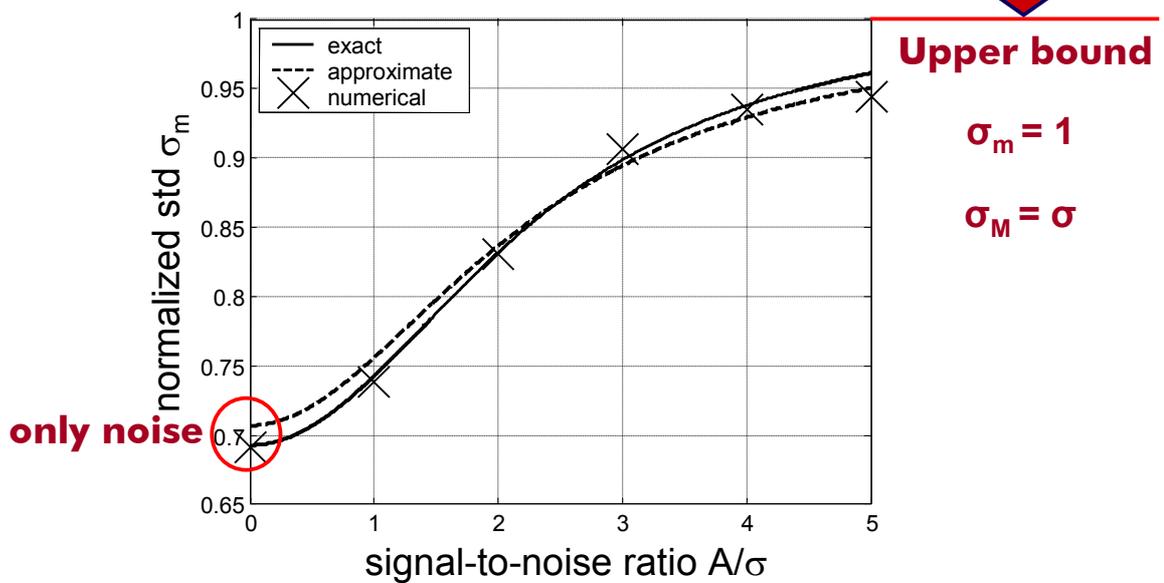
11 di 22



Deviazione Standard

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTRONICA

Deviazione Standard del campo misurato normalizzato m in funzione di SNR



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

12 di 22

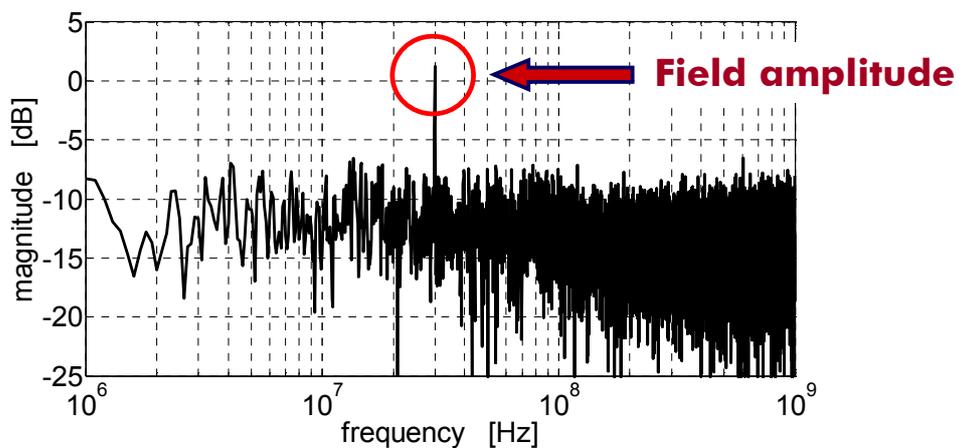


Simulazioni Numeriche 1/3

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTRTECNICA

Esempio di spettro di ampiezza:

- ❑ Campo irradiato costituito da una sinusoide alla frequenza di 30 MHz e di ampiezza unitaria
- ❑ Frequenza di campionamento 2GS/s, finestra di Hanning ($N_s=20kS$)



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

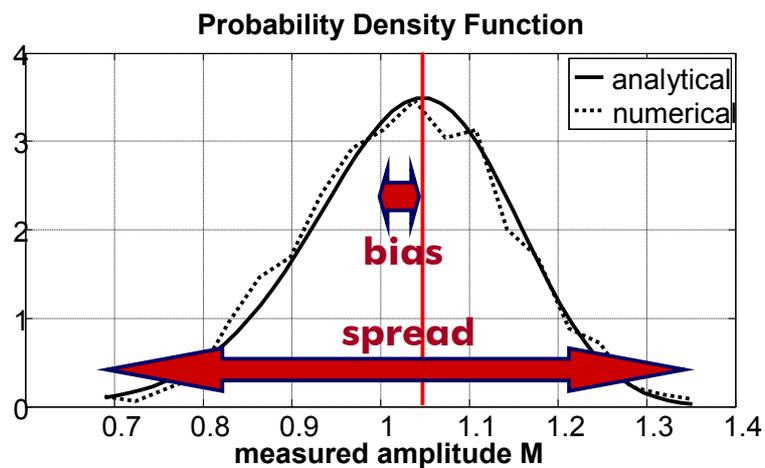
13 di 22



Simulazioni Numeriche 2/3

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTRTECNICA

- ❑ Simulazioni ripetute (1000 prove)
- ❑ PDF dell'ampiezza della riga spettrale @ 30 MHz

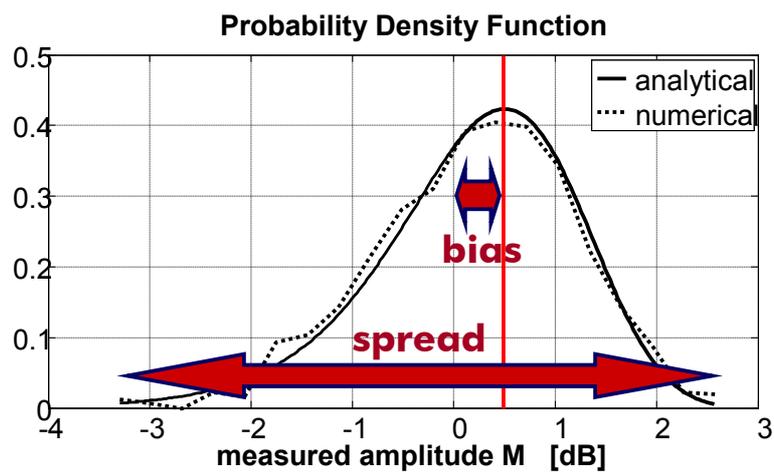


L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

14 di 22



PDF dell'ampiezza del campo espressa in dB



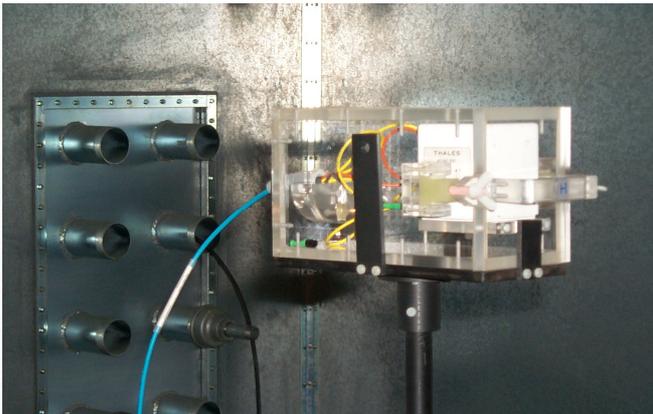


Verifica Sperimentale

1/6

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTROTECNICA

- Sonda triassiale di campo magnetico in camera schermata
- Misura preliminare del livello di rumore (PSD) dei tre canali

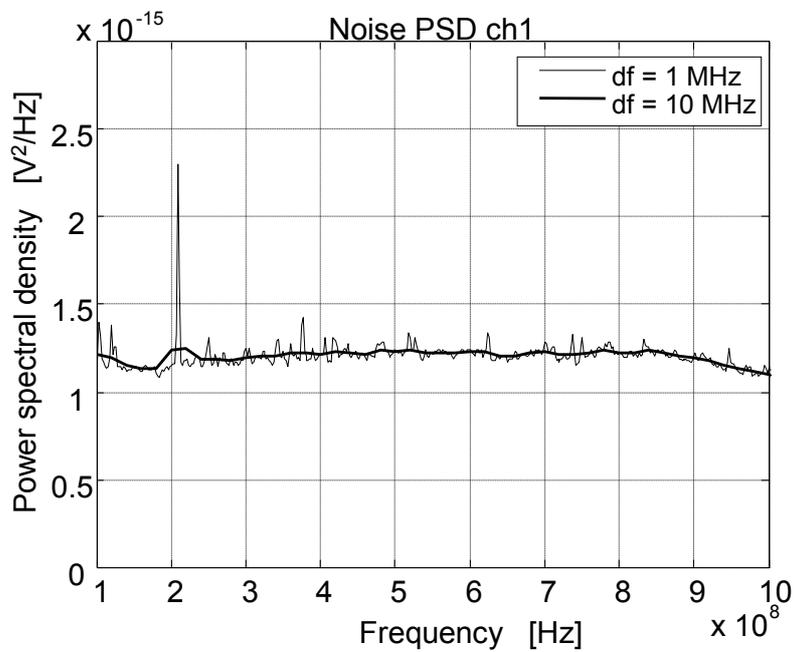


L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

16 di 22



PSD del rumore (canale #1)



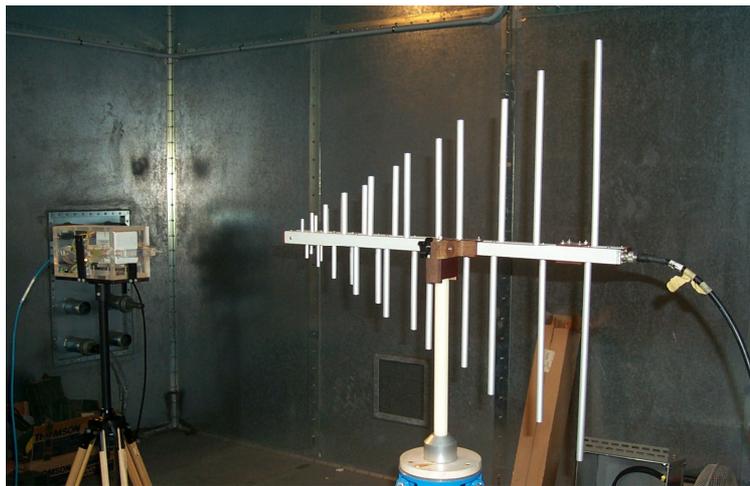
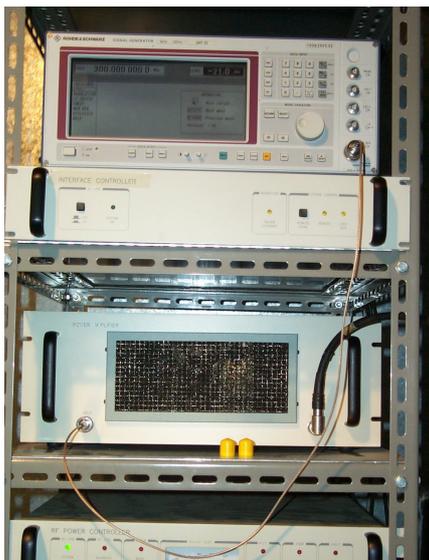


Verifica Sperimentale

3/6

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTRONICA

Sorgente (antenna) di campo alla frequenza di 300 MHz

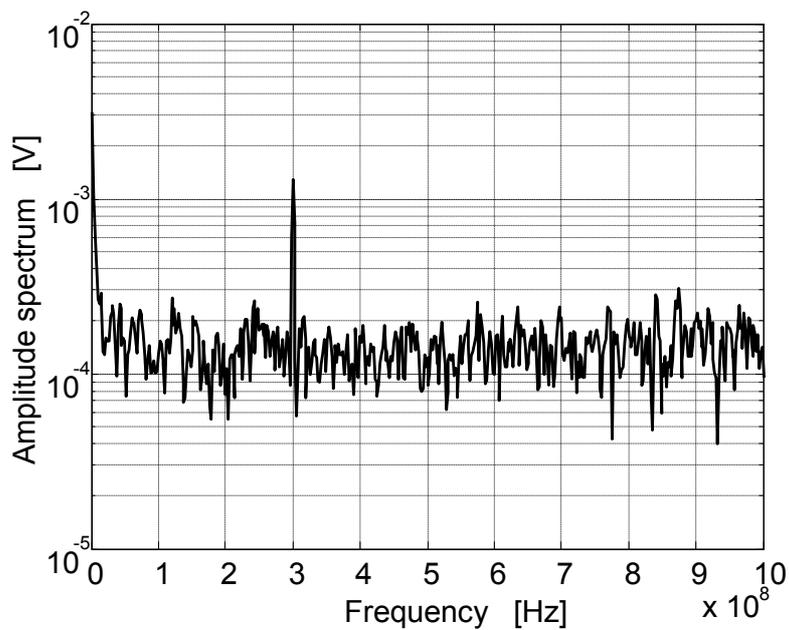


L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

18 di 22

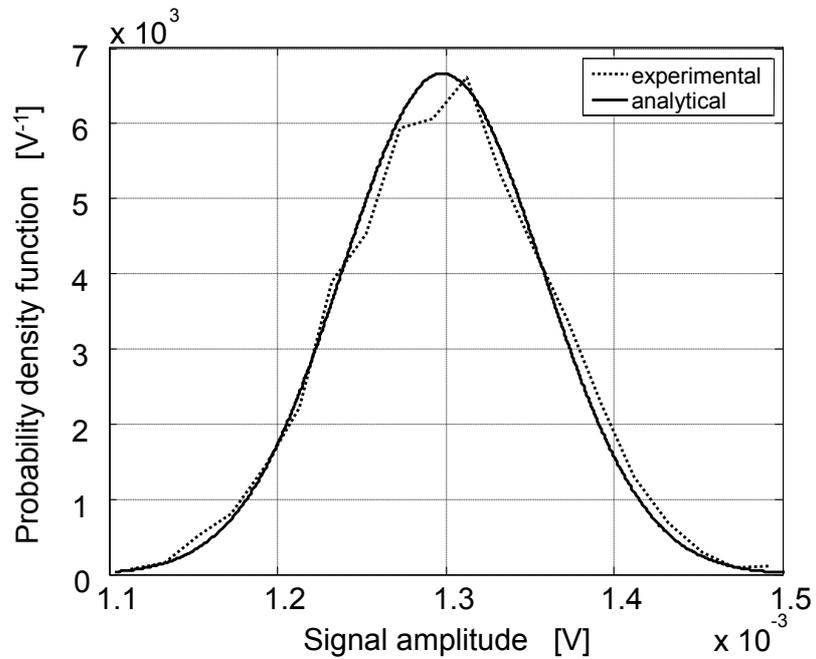


Esempio di spettro ampiezza misurato



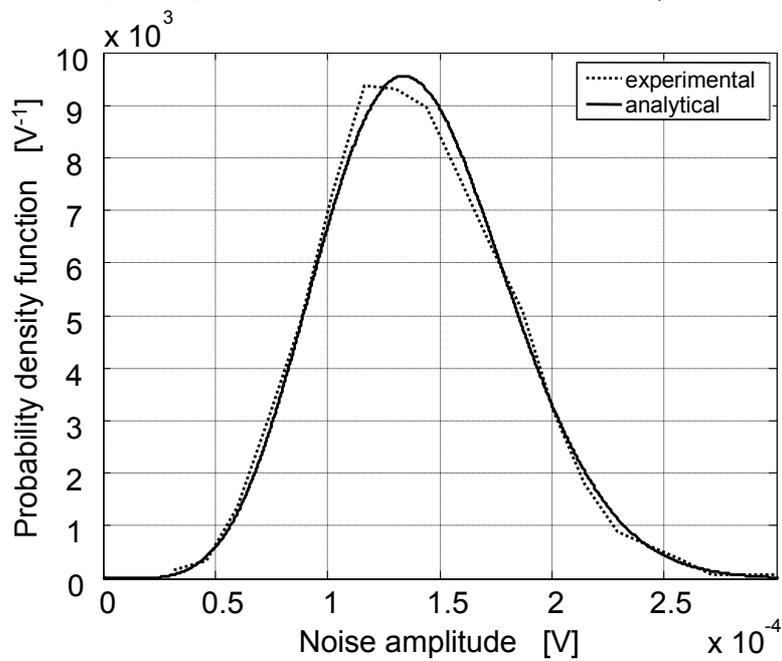


PDF della riga spettrale a 300 MHz





PDF della riga spettrale a 400 MHz (rumore)





Conclusioni

EMC Group @ POLIMI — Dip. ELETTROTECNICA

- ❑ **Il rumore introdotto dai tre canali di misura contribuisce all'incertezza associata alle misure di ampiezza del campo**
- ❑ **La caratterizzazione statistica dell'ampiezza del campo misurato, dopo la DFT, può essere ottenuta in forma analitica: valore medio, STD, PDF**
- ❑ **Le condizioni di campionamento e la finestra utilizzata influiscono sulle proprietà statistiche del campo misurato**
- ❑ **L'impatto del rumore in termini di incertezza può essere particolarmente rilevante in tutte le applicazioni in cui il numero di campioni è necessariamente piccolo (sorgenti tempo-varianti)**



L'Incertezza di Misura nella Compatibilità Elettromagnetica
Politecnico di Milano - 20 febbraio 2009

22 di 22