

# L'incertezza di misura nell'accreditamento SINAL dei laboratori EMC

# SINAL

- Il SINAL è stato costituito il 26 aprile 1988 per iniziativa di
- UNI,
- CEI
- e sotto il patrocinio di
- Ministero dell'Industria del Commercio e dell'Artigianato
- CNR
- ENEA
- Camere di Commercio, Industria, Agricoltura e Artigianato.

# SINAL

- Il SINAL non accredita attività di consulenza, ma accredita i Laboratori per qualsiasi tipo di prova

L'accesso all'Accreditamento è volontario ed aperto a qualsiasi Laboratorio di prova, sia come Ente indipendente sia come facente parte di una organizzazione più vasta (industria, istituto di ricerca, università, ecc.).

L'accREDITAMENTO dei laboratori fa riferimento alla norma ISO/IEC 17025.

# SINAL

- DT-0002 Guida per la valutazione e la espressione dell'incertezza nelle misurazioni
- DT-0004 Linee guida per la taratura di strumenti nel settore della compatibilità elettromagnetica e dei campi elettromagnetici ambientali
- DT-0002/1 Esempi applicativi di valutazione dell'incertezza nelle misurazioni elettriche
- DT-0002/6 Guida al calcolo della ripetibilità di un metodo di prova ed alla sua verifica nel tempo

# Incertezza di misura

- **RIPETIBILITA'**: accordo tra i risultati di misurazioni replicate dello stesso misurando eseguite nelle stesse condizioni di misurazione: laboratorio, giorno, operatore, strumento. (UNI CEI ENV 13005)
- **RIPRODUCIBILITA'**: accordo tra i risultati di misurazioni replicate dello stesso misurando eseguite da diversi laboratori. (UNI CEI ENV 13005)
- **SCARTO TIPO** (o deviazione standard): definisce la variabilità dei dati sperimentali
- **INCERTEZZA DI MISURA**: un parametro associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori che possono essere ragionevolmente attribuiti al misurando, qualora siano state considerate tutte le sorgenti d'errore (UNI CEI ENV 13005)

# Incertezza di tipo A

- **Valutazione di categoria A:** i contributi di ingresso sono valutati in base a una serie di osservazioni ripetute. Possono essere stimati come scarti di parametri valutati mediante analisi statistica di risultati sperimentali (deviazione standard di una media, della pendenza di una curva di taratura...)
- Nelle prove EMC le prove ripetute possono essere eseguite una sola volta per tipologia di prova

# Incertezza di tipo B

**Valutazione di categoria B:** i contributi di ingresso derivano da informazioni relative alla strumentazione o a campioni di riferimento (ad esempio l'incertezza di taratura riportata sui certificati di taratura)

# Tarature

- Taratura di un fattore di calibrazione usato nel software di misura (ad esempio fattore di antenna nelle prove di emissione)
- Taratura di uno strumento di misura (ad esempio oscilloscopio, voltmetro, analizzatore di rete)
- Taratura di uno strumento con riferimento a una specifica di prova (ad esempio misuratore EMI progettato per CISPR 16-1)

# Come si trattano i risultati delle tarature

- **A) Il Centro SIT (o equivalente) fornisce la taratura di un fattore di calibrazione utilizzato nel software di misura per correggere un dato misurato: ad esempio il fattore di correzione del misuratore di campo oppure il fattore di antenna.**

**In questo caso l'incertezza del laboratorio metrologico entra nel calcolo dell'incertezza di misura**

- **B) Il Centro SIT (o equivalente) esegue la taratura di uno strumento (ad esempio oscilloscopio, voltmetro) intesa come conferma metrologica (stato di conformità dello strumento con i dati di incertezza dichiarati dal costruttore)**

**In questo caso l'incertezza dichiarata nel **manuale dello strumento** entra nel calcolo dell'incertezza di misura. Per il ricevitore EMI progettato secondo la CISPR 16-1 si utilizzano le incertezze dichiarate nella CISPR 16-1 (se il Centro SIT le conferma).**

## DT-0002/6

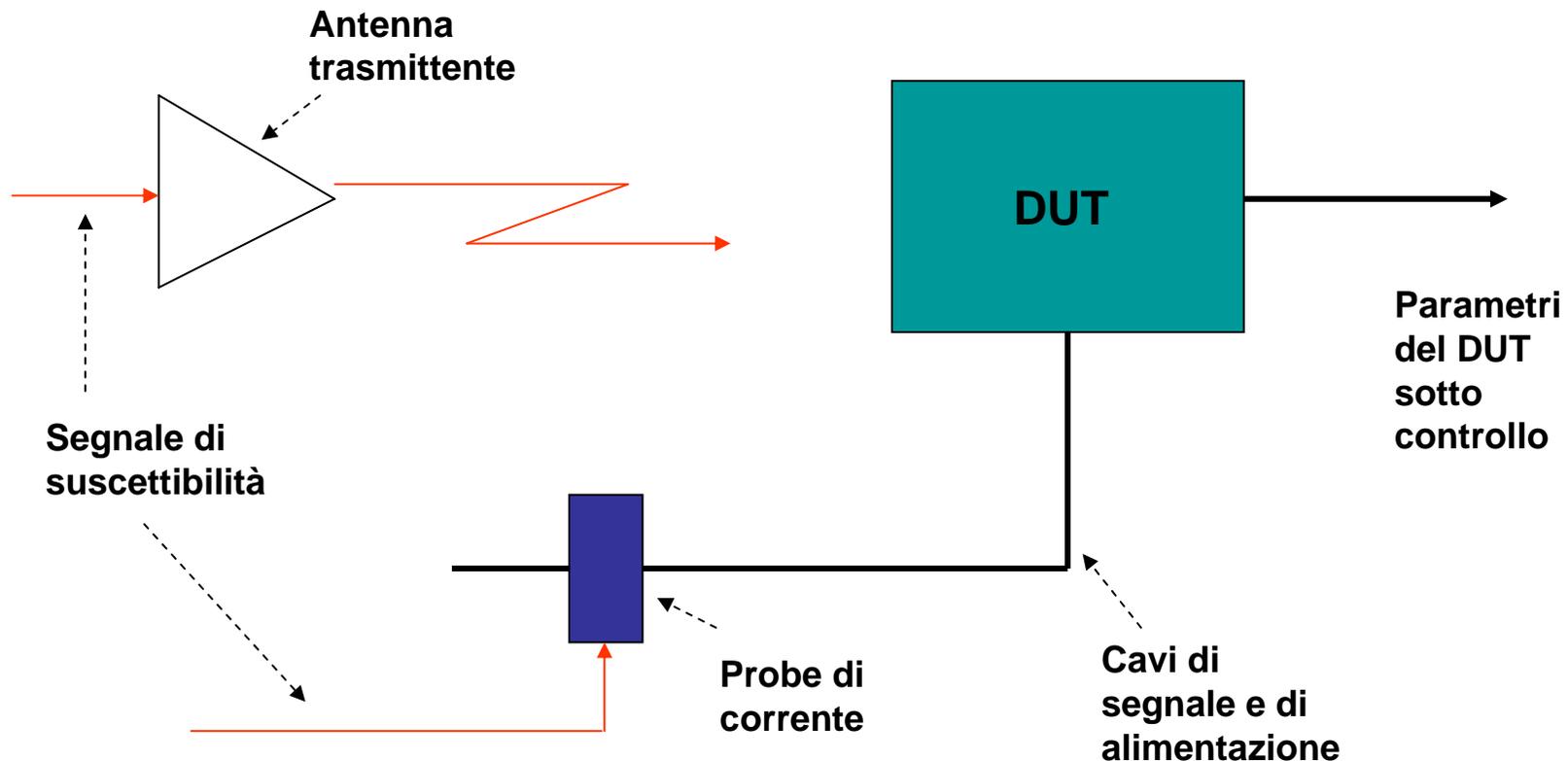
Un requisito importante è la ripetibilità delle prove EMC, la cui verifica è sempre applicabile per le grandezze di stimolo nelle prove di immunità mentre non lo è altrettanto per tutte le prove di emissione.

# Incertezza di misura

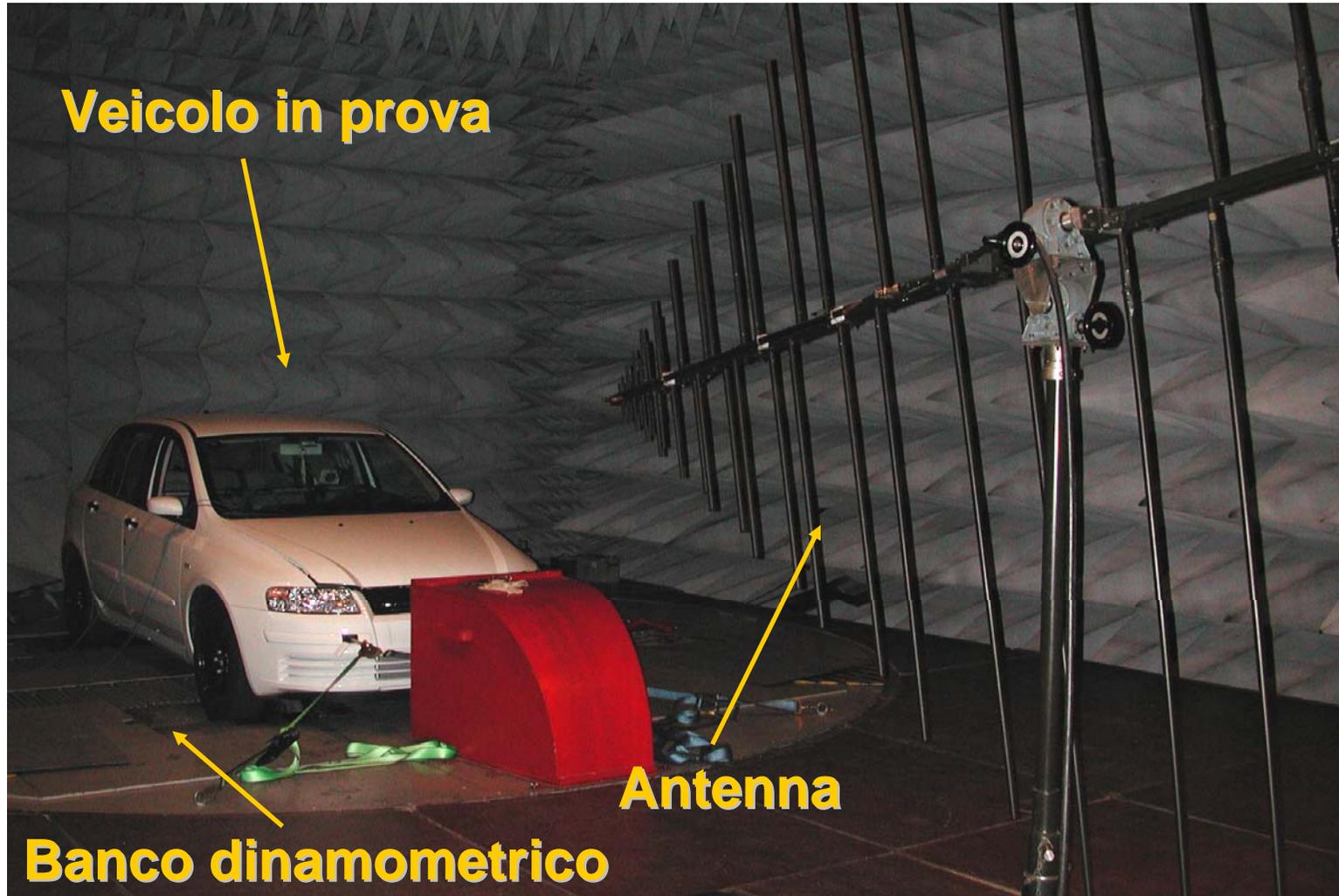
- L'incertezza delle prove di emissione è definibile in quanto il risultato delle misure è di tipo quantitativo
- L'incertezza delle prove di immunità è difficilmente definibile in quanto il risultato delle misure è di tipo qualitativo (passa/non passa)

# Le Prove di Immunità

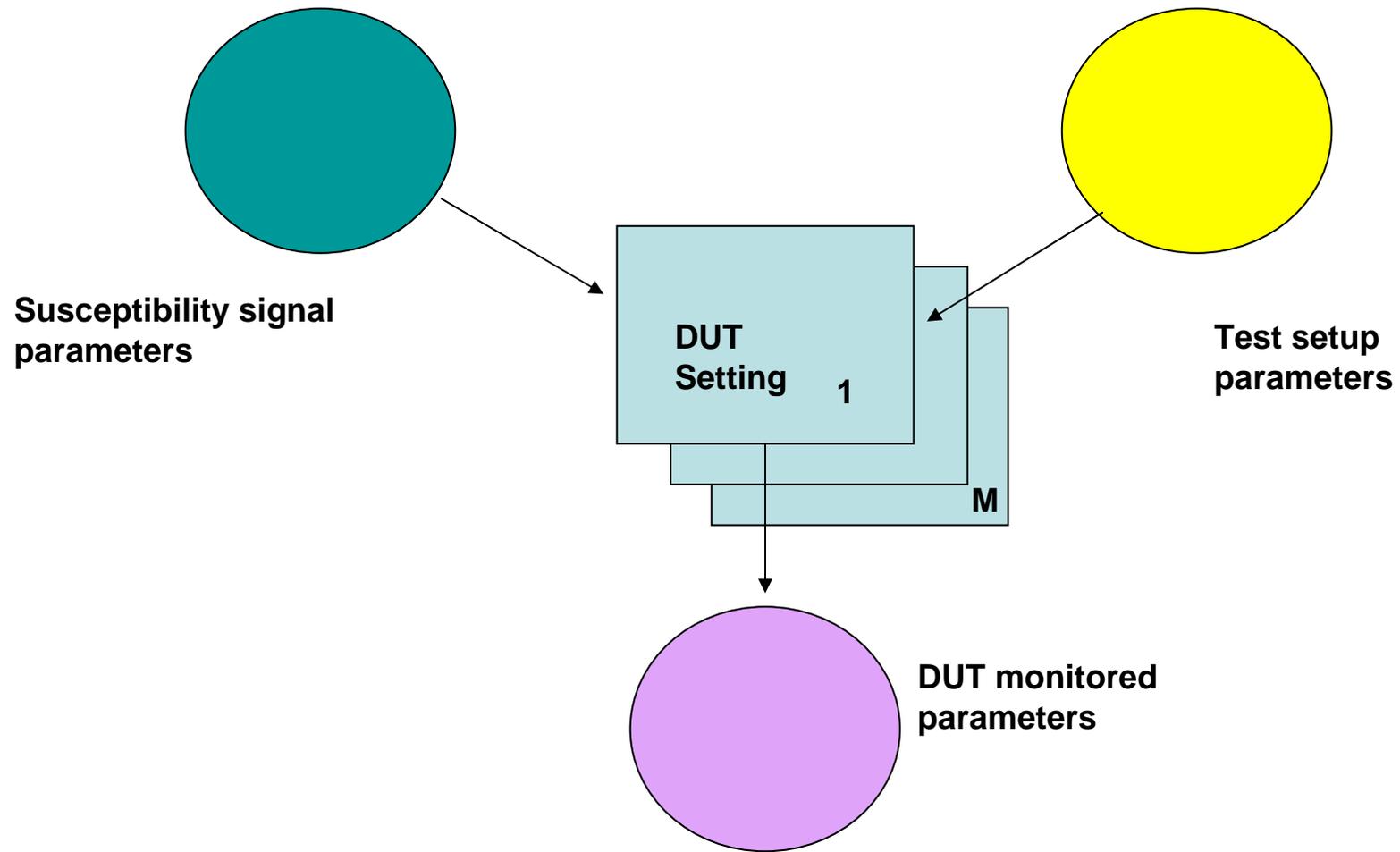
- Nelle prove di immunità si genera un segnale di suscettibilità e lo si accoppia per via condotta o irradiata all'unità in prova (DUT) verificandone eventuali variazioni dei suoi parametri significativi.



# Le Prove di Immunità



# Le Prove di Immunità



# Le Prove di Immunità

- Parametri del segnale di suscettibilità;
- **f** frequenza
- **fs** passo di frequenza
- **dw** tempo di permanenza (dwell time)
- **a** ampiezza
- **m** (tipo, ampiezza, frequenza)

# Le Prove di Immunità

- Parametri del test setup di prova
- **s** dimensioni del volume di campo uniforme
- **ss** specifiche di uniformità di campo
- **ant** tipo di antenna trasmittente
- **r** distanza fra antenna trasmittente e EUT
- **h** altezza dell'antenna trasmittente sul piano di massa
- **pol** polarizzazione del campo irradiato
- **pw** potenza netta o potenza diretta iniettata in antenna
- **da** angolo di azimuth dell'EUT
- **de** angolo di elevazione dell'EUT

# Le Prove di Immunità

Parametri del DUT monitorati

La normativa vigente considera le seguenti categorie di malfunzionamento:

- 1) Prestazioni normali dell'apparato in prova (EUT) entro i suoi limiti di specifica
- 2) Temporanea degradazione o perdita di funzionamento che l'EUT è in grado di recuperare senza l'intervento dell'operatore
- 3) Temporanea degradazione o perdita di funzionamento che l'EUT non è in grado di recuperare senza l'intervento dell'operatore
- 4) Degradazione o perdita di funzionamento a carattere permanente conseguente al guasto di un componente, perdita di dati o alterazione del software

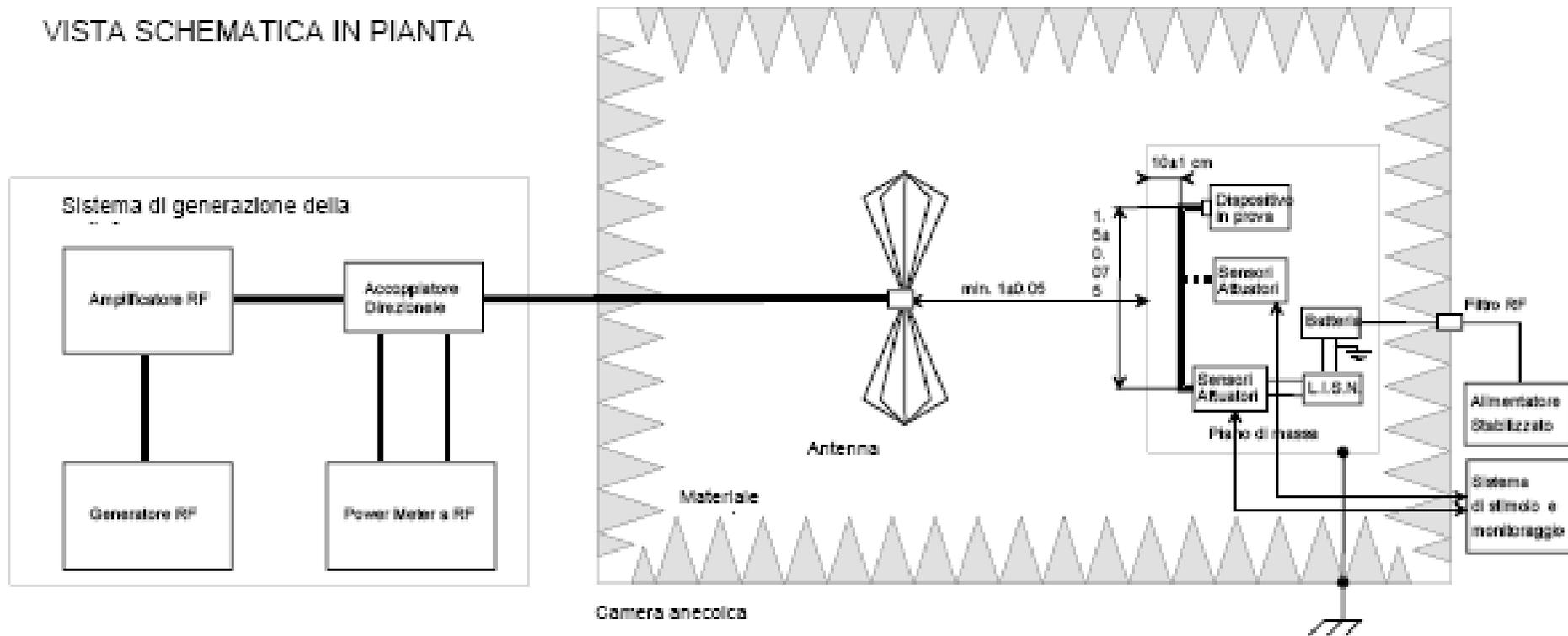
# Le Prove di Immunità

- Come si definisce l'incertezza del metodo di prova ?
- L'incertezza espressa sui parametri dell'EUT: impossibile a causa della definizione qualitativa dei malfunzionamenti e della mancanza di stabilità dell'EUT(prova passa/non passa)
- L'incertezza espressa sulla causa che genera la deviazione dalle prestazioni nominali dell'EUT: possibile a patto di considerare sia i parametri del test setup sia quelli del segnale di suscettibilità

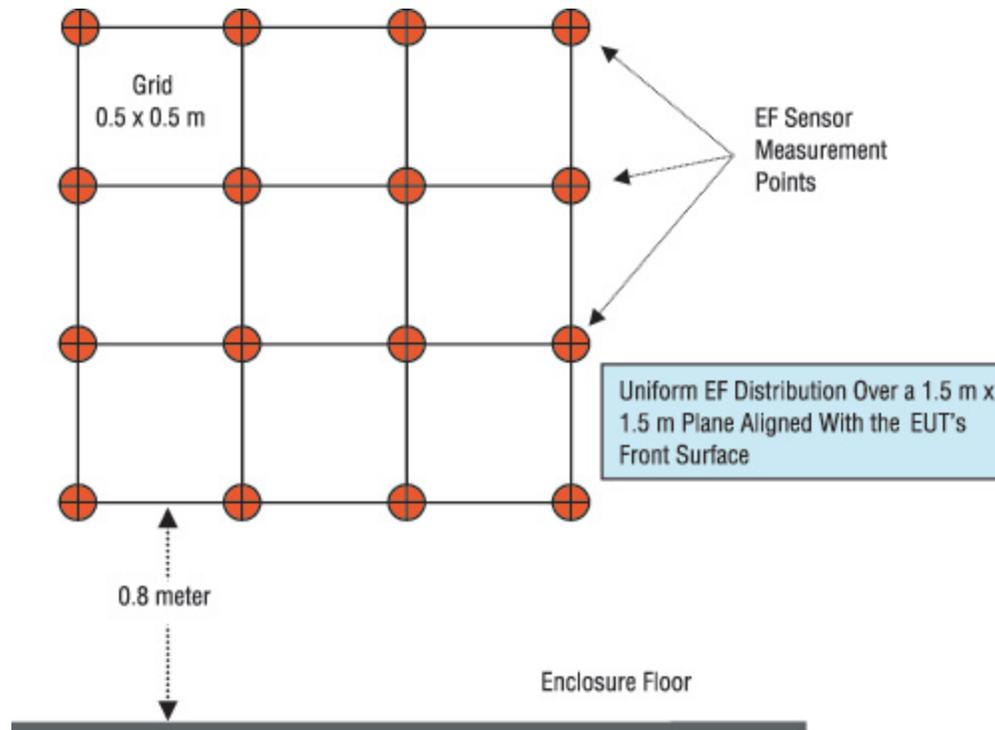
# Prova di Immunità Irradiata

## Set-up per la sistemazione delle apparecchiature

VISTA SCHEMATICA IN PIANTA



# Taratura del campo



La tolleranza del campo elettrico è espressa come  $-0 \text{ dB}/+6 \text{ dB}$  per un massimo del 75% dei punti della griglia per essere sicuri che il campo non scenda sotto il valore nominale con una probabilità accettabile. Nel campo di frequenza fino a 1 GHz la tolleranza può essere superiore a  $+6 \text{ dB}$  fino a  $+10 \text{ dB}$  per un massimo di 3 % delle frequenze

# Campo generato

Campo elettrico generato con il metodo di sostituzione

$$|E| = k_E \sqrt{\frac{P_n}{P_{nc}}} |E_u| = k_E \sqrt{\frac{P_n}{P_{nc}}} |E_c| UF$$

$P_n$  potenza netta

$P_{nc}$  potenza netta di taratura

$E_c$  campo elettrico di taratura

UF fattore di uniformità di campo elettrico

$k_E$  fattore di scala

# Uniformità di campo

$$UF = \frac{1}{\sqrt{M \times N} E_c} \|A\|_F = \frac{1}{\sqrt{M \times N} E_c} \sqrt{\text{Trace}(A^T A)} = \frac{1}{\sqrt{M \times N} E_c} \sqrt{\sigma_1^2 + \dots + \sigma_p^2}$$

A di dimensioni MxN è la matrice dei punti della superficie di taratura

$\|A\|_F$  norma di Frobenius (corrisponde alla somma dei quadrati degli elementi della matrice)

M=N=4     $E_c$  campo di taratura     $\sigma_1^2, \dots, \sigma_p^2$  autovalori di  $A^T A$

# Uniformità di campo

- Poiché la norma di Frobenius soddisfa il seguente limite
- $$r(B) \leq \|B\|_F \leq \sqrt{N} r(B)$$
- per ogni matrice  $B \in \mathbb{R}^{N \times N}$
- $r(B)$  raggio spettrale (modulo del massimo autovalore) di  $B$
- Per aumentare la riproducibilità della prova bisogna ridurre il massimo autovalore di  $B$
- Nel caso della norma EN-61000-4-3
- $$r(B) \leq \|B\|_F \leq 2 r(B)$$

# Calcolo dell'incertezza

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_i \dots x_N)$$

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} u(\bar{x}_i) \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \rho(x_i, x_j) u(\bar{x}_i) u(\bar{x}_j)}$$

$$\rho(x_i, x_j) = \frac{u(\bar{x}_i, \bar{x}_j)}{u(\bar{x}_i) u(\bar{x}_j)}$$

**Coefficiente di correlazione**

# Calcolo dell'incertezza

- Affinchè si possa applicare questa legge è necessario che:
  - - la non-linearità di  $f$  non sia significativa
  - - il teorema del limite centrale sia applicabile implicando la rappresentatività della funzione di densità di probabilità con la distribuzione Gaussiana oppure con la distribuzione  $t$
  - - la formula di Welch-Satterwaite si possa applicare per il calcolo dei gradi di libertà effettivi.

# Prove di Suscettibilità

- Prove di suscettibilità con il metodo di sostituzione

$$|E| = k_E \sqrt{\frac{P_n}{P_{nc}}} |E_c|$$

$$\frac{u_E}{E} = \sqrt{\frac{u_{E_c}^2}{(E_c)^2} + \frac{1}{4} \left( \frac{u_{P_n}}{P_n} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{u_{P_{nc}}}{P_{nc}} \right)^2 - \frac{1}{2} \rho \frac{u_{P_n}}{P_n} \frac{u_{P_{nc}}}{P_{nc}}} = \sqrt{(\dot{u}_{E_c})^2 + (\dot{u}_P)^2}$$

**Incertezza relativa  
del misuratore di  
campo**

$$\longrightarrow (\dot{u}_{E_c})^2 = \frac{u_{E_c}^2}{(E_c)^2}$$

**Incertezza relativa  
della misura di  
potenza netta**

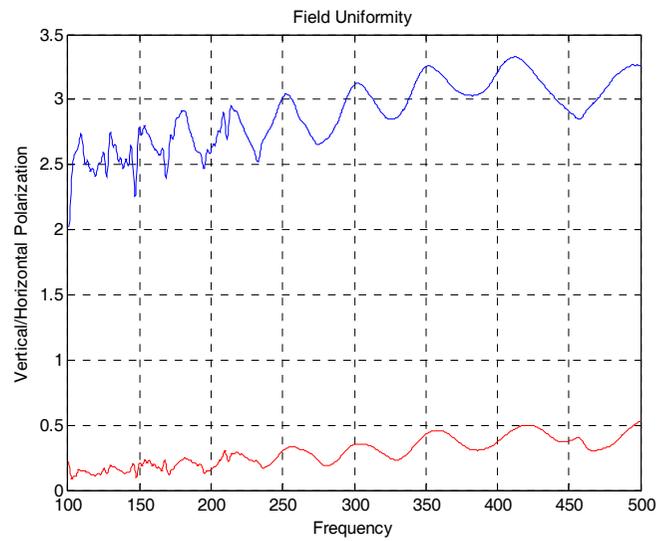
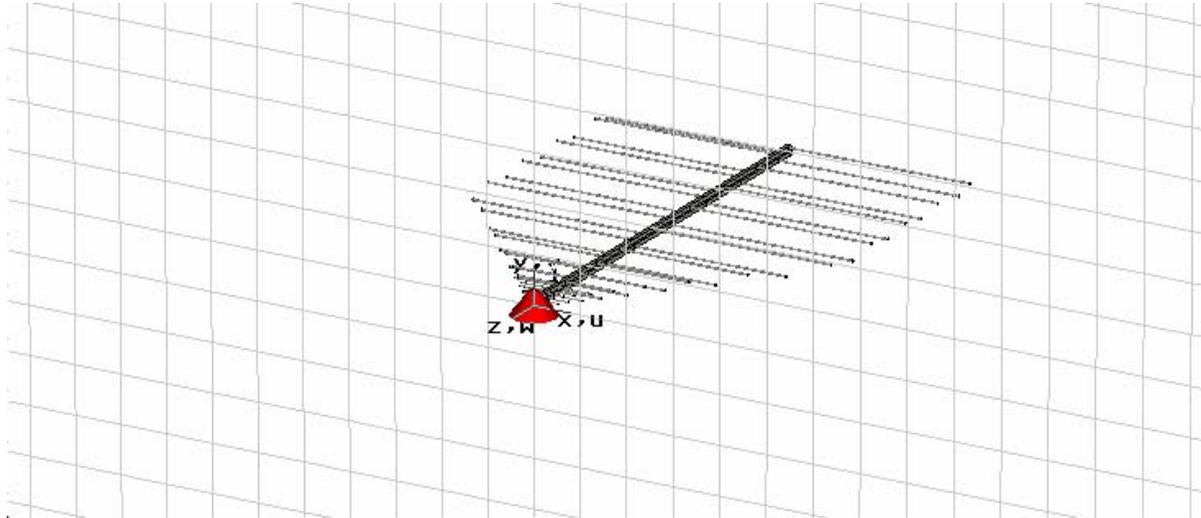
$$\longrightarrow (\dot{u}_P)^2 = \frac{1}{4} \left( \frac{u_{P_n}}{P_n} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{u_{P_{nc}}}{P_{nc}} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{u_{P_n}}{P_n} \frac{u_{P_{nc}}}{P_{nc}}$$

# Prove di Suscettibilità

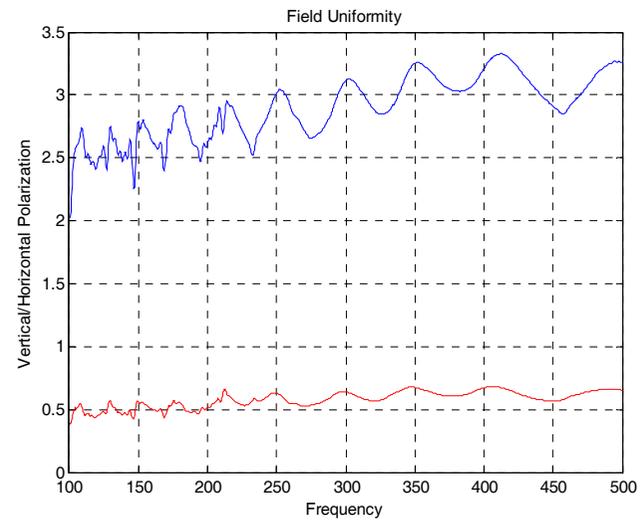
Field sensor FL7006 (AR)

- risposta in freq. (campo all. con asse del sensore) +/-1dB
- accuratezza di ampiezza (campo all. con asse del sensore)
  - senza fattore di correzione +/-1dB a 10 MHz
  - con fattore di correzione 0.8 dB (inc. esp. 95% i.c.)
- linearità 0.5-800 V/m (64 dinamica) +/-1dB e +/- 0.3 V/m
- deviazione dall'isotropia +/-0.5dB a 10 MHz (+/-5dB 0.5 MHz/2 GHz (tipica))
- stabilità con la temperatura: +/-0.5dB

# Uniformità di campo

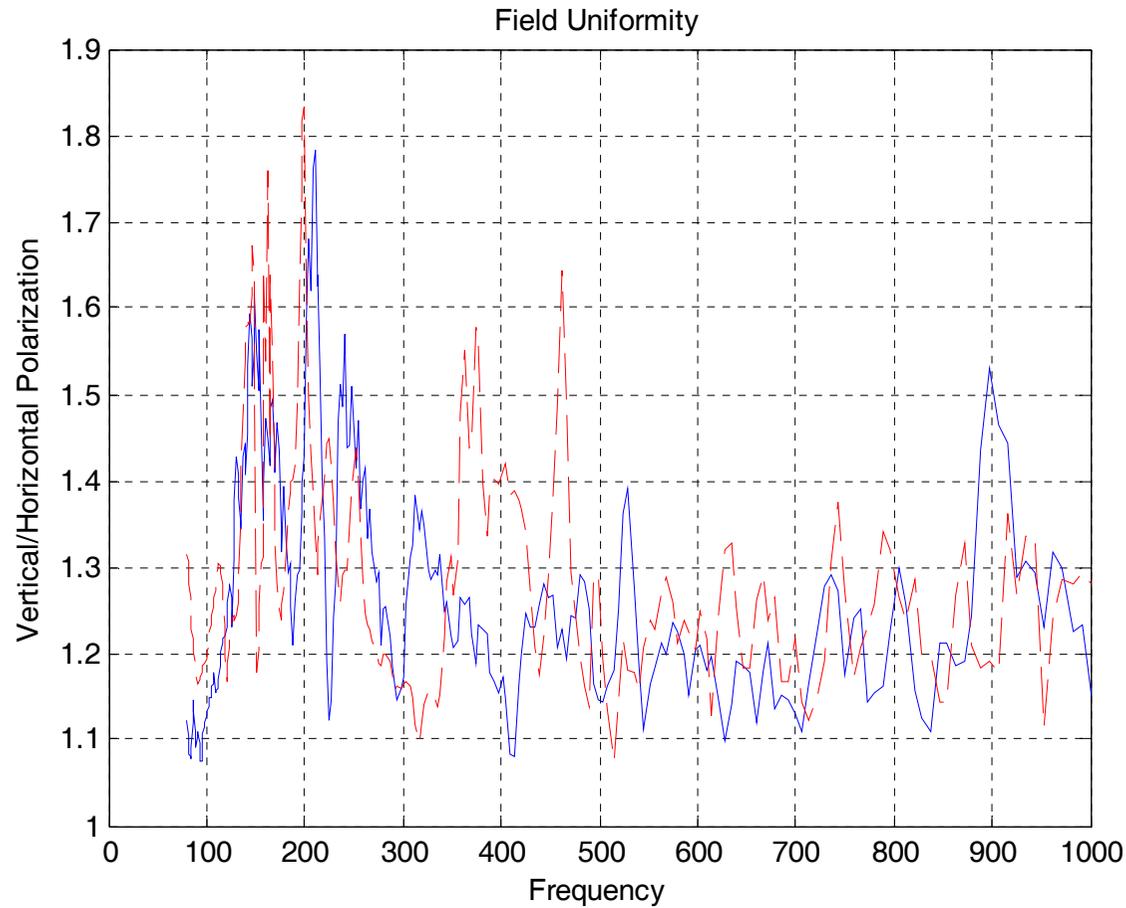


**Campo assi Y e X**



**Campo assi Y e Z**

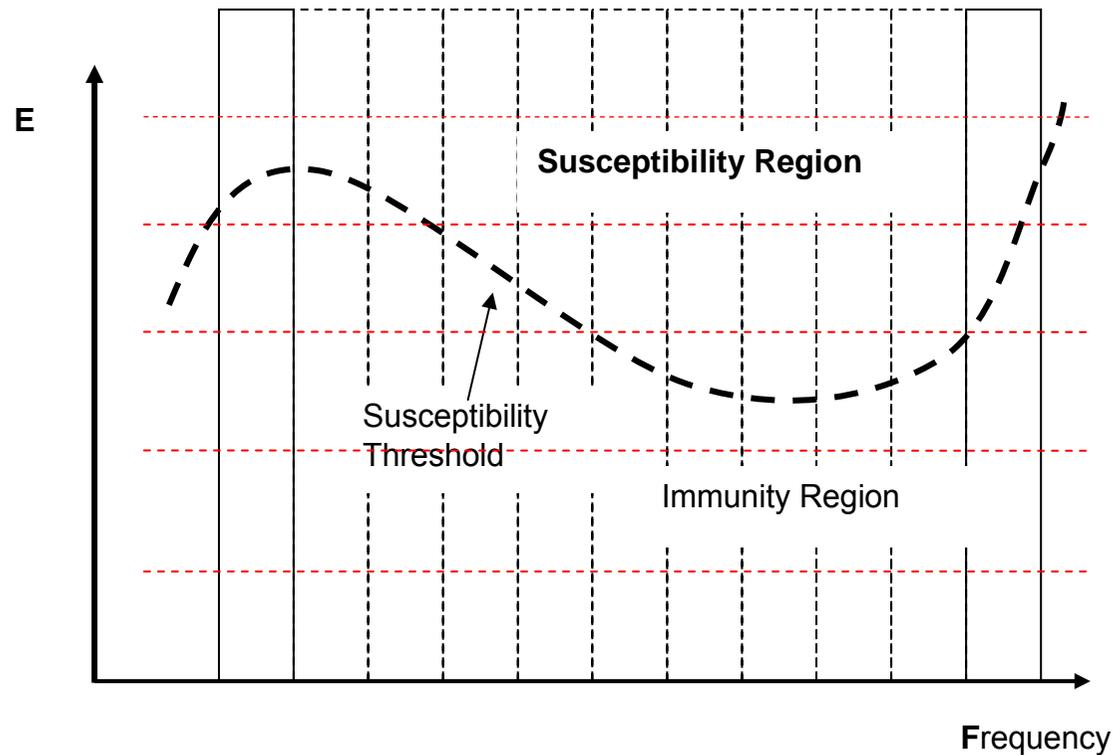
# Uniformità di campo



La mancanza di uniformità impedisce la riproducibilità della prova di immunità

# Incertezza nella prove di immunità

La soglia di suscettibilità non è esplicitamente richiesta nella norma EN 61000-4-3 mentre è richiesta in altre norme (ad esempio militari, automotive ecc.)



E' necessario definire l'incertezza della soglia di suscettibilità 30

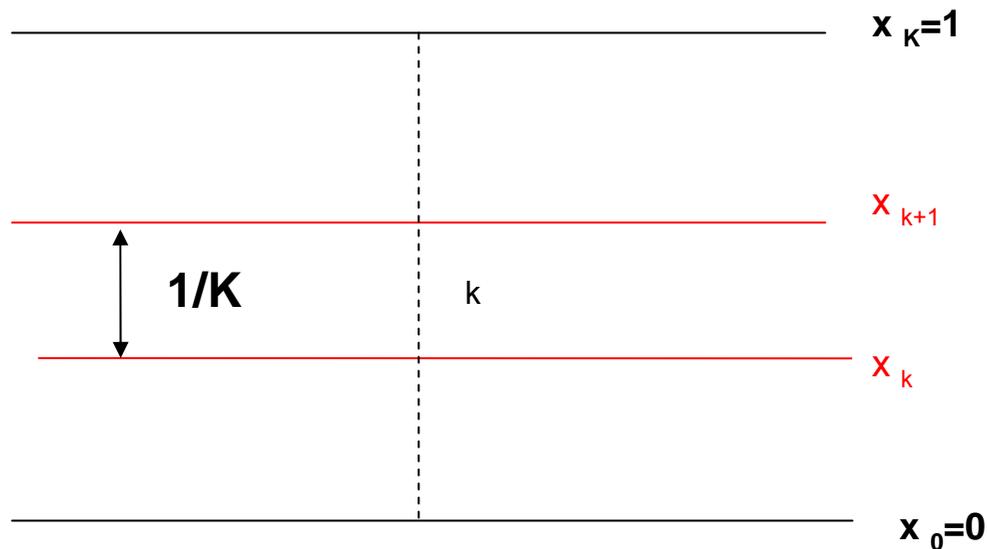
# Incertezza nella prove di immunità

- $ST_E = E_{\max} Q(x)$

$$ST_I = I_{\max} Q(x) \quad (6)$$

$$Q(x) = xk \quad \text{con} \quad k = 1, 2, \dots, K$$

**Quantizzatore di livello di segnale di suscettibilità**



**ST Soglia di Suscettibilità**

# Incertezza nella prove di immunità

$Q(x) = x_k$  con  $k = 1, 2, \dots, K$  Quantizzatore di livello di segnale di suscettibilità

$$\sigma^2 = \sum_k \int_{I_k} (x - \hat{x}_k)^2 f(x) dx \quad \text{Errore quadratico medio}$$

**Minimizzazione dell'errore quadratico medio**

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial \hat{x}_k} = \int_{I_k} (x - \hat{x}_k) f(x) dx = 0$$

$$\hat{x}_k = \frac{1}{\int_{I_k} f(x) dx} \int_{I_k} x f(x) dx$$

**Valore di soglia stimata che minimizza l'errore quadratico medio**

# Incertezza nella prove di immunità

$$\hat{X}_k = \frac{1}{\int_{x_k}^{x_{k+1}} f(x) dx} \int_{x_k}^{x_{k+1}} xf(x) dx$$

**Nel caso di piccolo intervallo di campionamento**

$$\hat{X}_k \cong \frac{f(\tilde{x}_k)}{f(\tilde{x}_k) \int_{x_k}^{x_{k+1}} dx} \int_{x_k}^{x_{k+1}} x dx = \frac{X_{k+1} + X_k}{2} = \tilde{X}_k$$

# Incertezza nella prove di immunità

$$h(x) = \frac{1}{Kf^{1/3}(x)} \int_{x_1}^{x_{K+1}} f^{1/3}(x) dx$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{12K^2} \left[ \int_{x_1}^{x_{K+1}} f^{1/3}(x) dx \right]^3$$

**Nel caso di densità di probabilità uniforme si ha**

$$h(x) = \frac{(x_{K+1} - x_1)}{K} = \Delta$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{12} \Delta^2$$

# Incertezza nella prove di immunità

- Incertezza della soglia di suscettibilità

$$\frac{u_{ST_E}}{ST_E} = \sqrt{\left(\frac{u_{E_{\max}}}{E_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{12} K \hat{x}_k}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{u_{E_{\max}}}{E_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{12} (k - \frac{1}{2})}\right)^2}$$

# Incertezza nella prove di immunità

Analoghe considerazioni valgono per l'incertezza della frequenza della soglia di suscettibilità che è data da

$$\frac{u_{ST_F}}{ST_F} = \sqrt{\left(\frac{u_{FR}}{FR}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{12}\left(k - \frac{1}{2}\right)}\right)^2}$$

dove  $ST_F$  è la soglia di suscettibilità della frequenza,  $FR$  è l'intero campo di frequenza e  $u_{FR}$  è l'incertezza della frequenza in  $FR$

# Ripetibilità delle Prove EMC (Requisito Sinal)

- Si eseguono due misure e si determinano i corrispondenti valori  $x_1$  e  $x_2$ .
- Occorre verificare che sia verificata la seguente relazione
- $$|x_1 - x_2| \leq \sqrt{2} s_r t_{p=1-\alpha; v=n-1}$$
- dove  $s_r$  è lo scarto tipo della serie dei risultati ottenuti in sede di convalida del metodo
- $t$  è la variabile di Student;  $p$  è il livello di probabilità;  $v$  il numero di gradi di libertà
- $t_{0.95;9} = 2.26$ ;  $t_{0.90;9} = 1.83$ ;  $t_{0.95;19} = 2.09$ ;  $t_{0.90;19} = 1.73$

# Conclusioni

- Le prove di immunità mancano di una chiara definizione non solo poiché i risultati sono qualitativi (criterio passa/non passa) ma anche poiché i test setup di prova non sono definiti per garantire ripetibilità e riproducibilità
- Il fattore di uniformità può servire per rendere le prove riproducibili (badando a controllare le componenti spurie)
- L'incertezza della prova, correttamente calcolata, consente di garantire la ripetibilità
- L'introduzione del concetto di uniformità garantisce la riproducibilità della prova