

Corso di Laboratorio di misure ad alta frequenza

Misure di campo elettromagnetico

Esempi di sorgenti di campo: antenne radio e TV, ponti radio, stazioni radio base



Antenne a riflettore parabolico per collegamento in ponte radio

Cortina di antenne per trasmissioni radio e TV

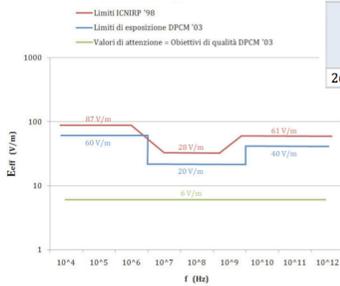


Antenne a pannello per stazioni radio base GSM

Normative

- Limiti per la protezione dall'esposizione

- Limiti per immunità di dispositivi medici

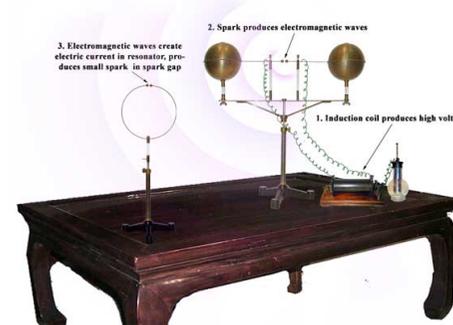


Frequenza f	Dispositivi salvavita E (V/m)	Dispositivi non-salvavita E (V/m)
$26\text{MHz} < f \leq 2,5\text{GHz}$	10	3

(CEI EN 60601-1-2, 2003)

Il dipolo di Hertz (o dipolo corto)

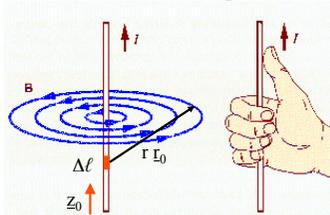
- È una struttura radiante costituita da un sistema di correnti impresse che scorrono assialmente in un volume cilindrico sottile di lunghezza $l \ll \lambda$



Heinrich Hertz
XIX secolo

Campo magnetico prodotto da un dipolo corto

- Il campo magnetico è puramente circonferenziale
- È presente un contributo proporzionale a r^{-2} e uno proporzionale a r^{-1}
- Il primo termine è legato al [contributo quasi-statico dovuto alla corrente](#) e domina "vicino" al dipolo



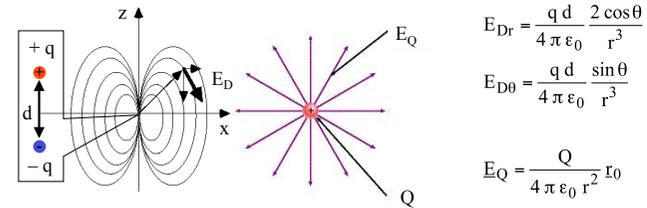
- Considerando un tratto elementare Δl di filo percorso da corrente, il contributo di campo ad esso associato è dato dalla legge di Biot e Savart

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I \Delta l (\mathbf{z}_0 \times \mathbf{r}_0)}{4 \pi r^2}$$

- Il secondo termine è legato al [contributo elettrodinamico di campo magnetico irradiato](#) e domina "lontano" dal dipolo

Campo elettrico prodotto da un dipolo corto

- Il campo elettrico ha una componente radiale e una diretta lungo θ_0
- Sono presenti contributi proporzionali a r^{-3} , r^{-2} e r^{-1}
- I primi due termini sono legati, rispettivamente, al [contributo quasi-statico dovuto al dipolo elettrico](#) e al [contributo quasi-statico dovuto alla carica elettrica](#). Essi dominano "vicino" al dipolo



$$E_{Dr} = \frac{q d}{4 \pi \epsilon_0} \frac{2 \cos \theta}{r^3}$$

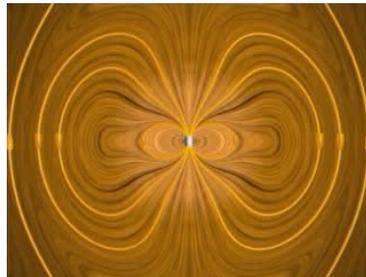
$$E_{D\theta} = \frac{q d}{4 \pi \epsilon_0} \frac{\sin \theta}{r^3}$$

$$E_Q = -\frac{Q}{4 \pi \epsilon_0} \frac{\mathbf{r}_0}{r^2}$$

- Il terzo termine è legato al [contributo elettrodinamico di campo elettrico irradiato](#) e domina "lontano" dal dipolo

Campo vicino e campo lontano del dipolo corto

- Per "piccole" distanze dal dipolo il campo è dominato dai contributi quasi-statici: siamo nella [zona di campo vicino reattivo](#)
- Per distanze $r \gg \lambda$ ($r \geq 10 \lambda$) i contributi quasi-statici diventano trascurabili e il campo elettromagnetico è dominato dal contributo radiativo: siamo nella [zona di campo lontano radiativo](#)



Caratteristiche del campo radiativo del dipolo corto

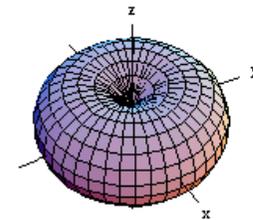
- Nella regione di campo lontano radiativo

$$E_r \approx 0 \quad E_\varphi = 0$$

$$E_\theta \approx j k \zeta \frac{I l e^{-j k r}}{4 \pi r} \sin \theta$$

$$H_r = 0 \quad H_\theta = 0$$

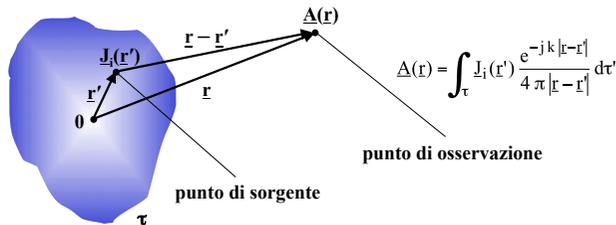
$$H_\varphi \approx j k \frac{I l e^{-j k r}}{4 \pi r} \sin \theta$$



- Si vede come il campo elettromagnetico sia quello di un'onda sferica (localmente piana che si propaga in direzione radiale)
- In particolare si ha: $E_\theta = \zeta H_\varphi$
- L'energia viene irradiata nello spazio con intensità massima nelle direzioni ortogonali all'asse del dipolo e con intensità nulla in direzione assiale

Campo elettromagnetico generato da un'antenna generica

- Considerando una generica antenna, che sia schematizzabile per mezzo di una distribuzione di correnti elettriche impresse $\mathbf{J}_i(\mathbf{r}')$ che occupano un volume finito τ , il potenziale vettore magnetico da essa generato nello spazio libero si può ricavare come sovrapposizione di dipoli Hertziani (funzione di Green)



- Anche per $\mathbf{J}_i(\mathbf{r}')$ semplici, la valutazione dell'integrale è resa complicata dalla presenza del termine $|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|$ nel modulo e nella fase della funzione di Green

Approssimazioni sulla fase della funzione di Green: Fraunhofer e Fresnel

- R risulta dato dalla somma di due contributi (del primo e secondo ordine)
 - il primo contributo è il contributo di **Fraunhofer**: esso predomina a “grande” distanza
 - il secondo contributo è il contributo di **Fresnel**: esso corregge il termine di Fraunhofer per distanze piccole (ma non troppo!!!)
- Il termine di Fresnel introduce una correzione di fase $\Delta\phi$. Generalmente si ritiene valida l'approssimazione di Fraunhofer quando la correzione di fase di Fresnel è inferiore a $\pi/8$
- La distanza a partire dalla quale si può usare l'approssimazione di Fraunhofer risulta pari a:

$$r_F = \frac{2D^2}{\lambda}$$

Approssimazioni sul modulo della funzione di Green

- Il termine $R = |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|$ compare anche nel modulo della funzione di Green
- Nel caso della fase l'utilizzo di un'approssimazione del primo ordine (Fraunhofer) consente di contenere l'errore entro $\pi/8$ per $r > r_F$
- Nel caso del modulo è in genere sufficiente un'approssimazione di ordine 0 (ovvero $R \approx r$)
- Se $r > 10D$ è possibile utilizzare l'approssimazione di ordine zero per il modulo della funzione di Green contenendo l'errore commesso entro il 5 %
- Per poter trascurare i termini reattivi (quasi-statici) è inoltre sempre necessario, come per il dipolo Hertziano, porsi a distanza $r > 10\lambda$

Espressione del campo elettromagnetico nella regione di Fraunhofer

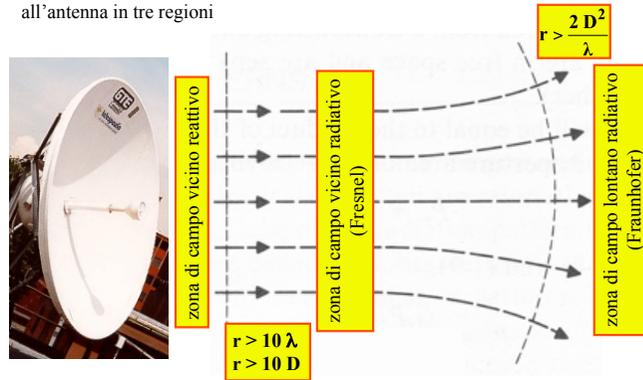
- Sia il campo elettrico che il campo magnetico decrescono in maniera inversamente proporzionale alla distanza
- Entrambi i campi presentano un fattore di propagazione del tipo $e^{-jk r}$
- Entrambi i campi sono polarizzati su un piano ortogonale alla direzione radiale (non hanno componenti radiali)
- I due campi sono legati dalla relazione

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\zeta} \mathbf{r}_0 \times \mathbf{E}(\mathbf{r})$$

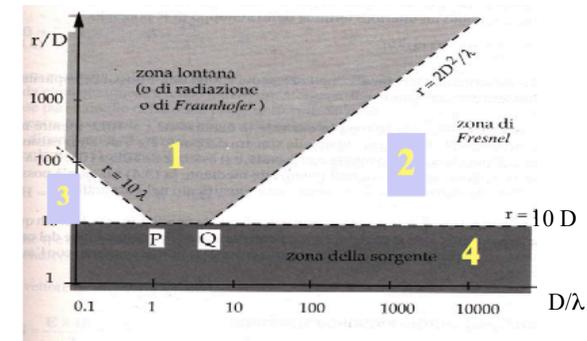
- In conclusione il campo elettromagnetico nella regione di Fraunhofer di una generica antenna ha le caratteristiche di un'onda sferica non uniforme che si propaga radialmente rispetto ad un determinato punto che viene detto **centro di fase** dell'antenna

Campo vicino e campo lontano di una generica antenna

- Sulla base delle precedenti osservazioni si divide la zona di spazio intorno all'antenna in tre regioni



Campo vicino-campo lontano



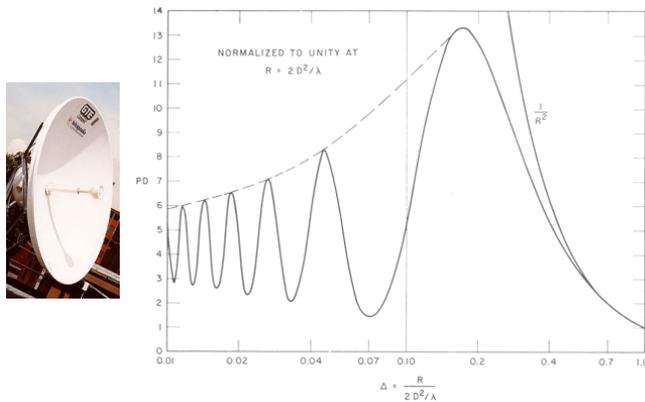
Caratteristiche del campo nella zona di campo vicino reattivo

- La zona di campo vicino reattivo è la più vicina all'antenna e si estende fino a distanze dall'antenna pari a qualche lunghezza d'onda
- Dominano i termini quasi-statici di campo elettrico e di campo magnetico (andamento proporzionale a r^{-3} e r^{-2})
- È la zona in cui l'antenna "immagazzina" energia elettrica e magnetica che viene scambiata, sotto forma di potenza reattiva, con il generatore che la alimenta
- Il campo elettrico e il campo magnetico non sono correlati tra di loro per mezzo dell'impedenza caratteristica ζ
- La presenza di un corpo estraneo altererebbe fortemente le caratteristiche dell'antenna a causa del forte accoppiamento
- È difficile e poco significativo fare misure di campo in questa regione. Occorre fare altri tipi di misure (ad es. di SAR per la conformità dei telefoni cellulari)**

Caratteristiche del campo nella zona di campo vicino radiativo

- La zona di campo vicino radiativo parte da distanze dall'antenna pari a qualche lunghezza d'onda e comunque sufficientemente più grandi delle dimensioni dell'antenna e si estende fino alla distanza di Fraunhofer
- Per antenne poco estese ($D < \lambda$) questa zona non esiste (si passa direttamente da campo vicino reattivo a campo lontano radiativo, come nel caso del dipolo hertziano)
- I contributi quasi-statici dovuti ai campi reattivi sono ormai trascurabili
- Il campo elettrico e il campo magnetico sono abbastanza correlati tra di loro a mezzo dell'impedenza caratteristica ζ
- Il campo presenta fluttuazioni spaziali dovute alle interferenze di fase tra i contributi di campo provenienti dalle diverse zone dell'antenna
- Si possono effettuare misure di campo elettrico e/o magnetico, prestando attenzione alla forte variabilità spaziale del campo**

Tipico andamento del campo nella zona di campo vicino radiativo



Caratteristiche del campo nella zona di campo lontano radiativo

- La zona di campo lontano radiativo parte dalla distanza di Fraunhofer, e comunque per distanze superiori a qualche λ , e si estende fino all'infinito
- Il campo elettromagnetico ha le caratteristiche di un'onda sferica non uniforme
- La distribuzione angolare (sull'angolo solido) e la polarizzazione del campo elettrico sono indipendenti dalla distanza
- Il campo elettrico e il campo magnetico sono correlati tra di loro per mezzo dell'impedenza caratteristica ζ
- Il campo decresce con la distanza dall'antenna in maniera proporzionale a $1/r$
- La densità di potenza decresce con la distanza dall'antenna in maniera proporzionale a $1/r^2$

Antenna come elemento ricevente: area efficace

- Ipotizzando che sull'antenna incida un'onda piana proveniente dalla direzione angolare (θ, φ) , caratterizzata da una densità di potenza pari a S_{inc} e da un campo elettrico polarizzato secondo il versore \underline{p}_{0inc} , la potenza P_{ric} captata dall'antenna e ceduta al carico (ricevitore), che si suppone essere adattato all'antenna, è data da

$$P_{ric} = S_{inc} A_{eff}(\theta, \varphi) \eta \left| \underline{p}_0(\theta, \varphi) \cdot \underline{p}_{0inc} \right|^2$$

- La quantità $A_{eff}(\theta, \varphi)$ [m²] prende il nome di [area efficace](#) dell'antenna
- È come se l'antenna "catturasse" la densità di potenza incidente comportandosi come un'apertura di area pari a A_{eff}
- L'area efficace varia generalmente con l'angolo di incidenza
- L'antenna riceve massimamente nella sua [direzione di puntamento](#)
- Un'antenna per la quale l'area efficace è indipendente dall'angolo di incidenza si dice [isotropa](#)

Efficienza in ricezione

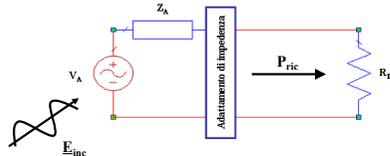
- Riprendendo l'espressione della potenza ricevuta

$$P_{ric} = S_{inc} A_{eff}(\theta, \varphi) \eta \left| \underline{p}_0(\theta, \varphi) \cdot \underline{p}_{0inc} \right|^2$$

- L'efficienza dell'antenna in ricezione può essere limitata da due fattori
 - l'efficienza dovuta alle perdite (η): tiene conto del fatto che parte della potenza "captata" dall'antenna viene dissipata su quest'ultima, per effetto delle perdite nei conduttori e dielettrici, e non giunge pertanto al ricevitore
 - l'efficienza di polarizzazione $\left| \underline{p}_0(\theta, \varphi) \cdot \underline{p}_{0inc} \right|^2$: tiene conto del fatto che solo la parte di densità di potenza incidente trasportata dalla componente di campo elettrico co-polarizzata rispetto all'antenna viene captata da quest'ultima
- La presenza del fattore che tiene conto della polarizzazione mostra, in particolare, come l'antenna si comporti da "filtro di polarizzazione"

Altezza efficace dell'antenna

- Un classico utilizzo delle antenne come elementi riceventi è quello della misura dei livelli di campo ambientali
- Riportando lo schema dell'antenna connessa a un ricevitore...



- Si può porre

$$V_A = h_{\text{eff}}(\theta, \varphi) \cdot E_{\text{inc}} = h_{\text{eff}}(\theta, \varphi) E_{\text{inc}} \underline{p}_0(\theta, \varphi) \cdot \underline{p}_{\text{inc}}$$

- $h_{\text{eff}}(\theta, \varphi)$ [m] è detta altezza efficace dell'antenna
- L'antenna "integrata" il campo incidente su una lunghezza pari a h_{eff}

Misura del livello di campo (1/2)

- La precedente formula mostra come, a causa del "filtraggio" di polarizzazione dell'antenna, è possibile misurare solo la componente di campo co-polarizzata rispetto all'antenna ($E_{0\text{inc}}$)
- Se si misura direttamente V_A , è immediato risalire al valore della componente di campo co-polarizzata rispetto all'antenna
- Se, invece, si misura la potenza ricevuta in condizioni di adattamento (P_{ric}), bisogna legare quest'ultima a $E_{0\text{inc}}$

$$P_{\text{ric}} = \frac{|V_A|^2}{8 R_A} = \frac{h_{\text{eff}}^2(\theta, \varphi)}{8 (R_R + R_P)} E_{\text{inc}}^2 \left| \underline{p}_0(\theta, \varphi) \cdot \underline{p}_{\text{inc}} \right|^2 = \frac{h_{\text{eff}}^2(\theta, \varphi)}{8 (R_R + R_P)} E_{0\text{inc}}^2$$

- Poiché la misura si effettua sempre sulla resistenza di riferimento $R_0 = R_L = 50 \Omega$, conviene trasformare la precedente espressione

$$P_{\text{ric}} = \frac{h_{\text{eff}}^2(\theta, \varphi)}{8 (R_R + R_P)} \frac{R_0}{R_0} E_{0\text{inc}}^2 = \frac{|V_{\text{ric}}|^2}{2 R_0} \quad \text{con} \quad |V_{\text{ric}}|^2 = \frac{h_{\text{eff}}^2(\theta, \varphi) R_0}{4 (R_R + R_P)} E_{0\text{inc}}^2$$

- V_{ric} è la tensione "misurata" ai capi del ricevitore

Misura del livello di campo (2/2)

- Passando alle grandezze rms (le normative fanno sempre riferimento al valore efficace del campo elettrico)

$$P_{\text{ric}} = \frac{h_{\text{eff}}^2(\theta, \varphi) R_0}{4 (R_R + R_P)} \frac{1}{R_0} E_{0\text{inc eff}}^2$$

- Passando ai logaritmi e considerando $R_0 = 50 \Omega$

$$10 \log_{10} P_{\text{ric}} = 10 \log_{10} \frac{h_{\text{eff}}^2(\theta, \varphi) R_0}{4 (R_R + R_P)} - 10 \log_{10} R_0 + 20 \log_{10} E_{0\text{inc eff}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{0\text{inc eff}} \Big|_{\text{dB}_{V/m}} = P_{\text{ric}} \Big|_{\text{dB}_W} + \text{AF} \Big|_{\text{dB}_{1/m}} + 17 \Big|_{\text{dB}_\Omega} = P_{\text{ric}} \Big|_{\text{dB}_m} + \text{AF} \Big|_{\text{dB}_{1/m}} + 17 \Big|_{\text{dB}_\Omega} - 30$$

- Il parametro AF, fornito dal costruttore, viene detto antenna factor (fattore d'antenna)

$$\text{AF} = 10 \log_{10} \frac{4 (R_R + R_P)}{h_{\text{eff}}^2(\theta, \varphi) R_0}$$

Misure a banda larga

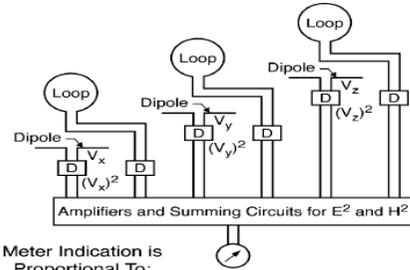
- Le misure a banda larga forniscono indicazioni sul valore efficace (RMS) complessivo (integrale), nella banda del sensore, del campo nel punto di misura.

☺ Sono semplici ed economiche

☹ Non si hanno indicazioni sui singoli contributi in frequenza

☹ È difficile estrapolare dei valori cautelativi di campo (valori massimi raggiungibili)

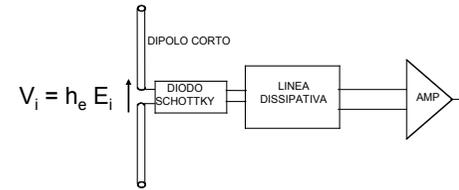
Misuratori di campo a banda larga



Meter Indication is Proportional To:
 $k_E^2 |E|^2; k_H^2 |H|^2$

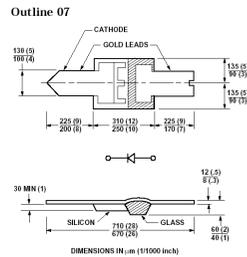
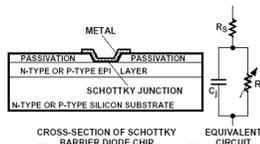
Note:
 D - Square Law Detector

Sensore di campo elettrico (versione mono-assiale)

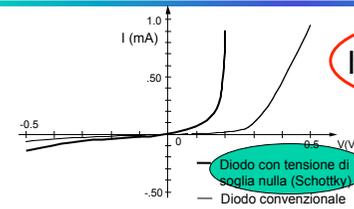


Diodi Schottky - Fisica

HSCH-5300 Series

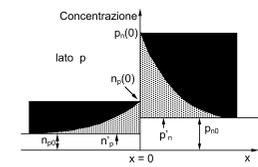


Diodi Schottky - Equazioni



$$I(t) = I_S (e^{V(t)/nV_t} - 1)$$

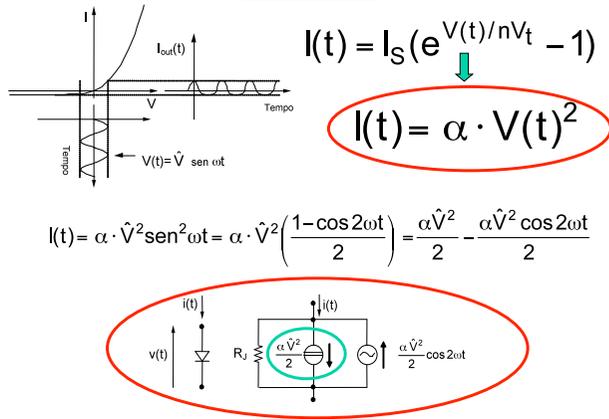
Non si ha accumulo di portatori di minoranza



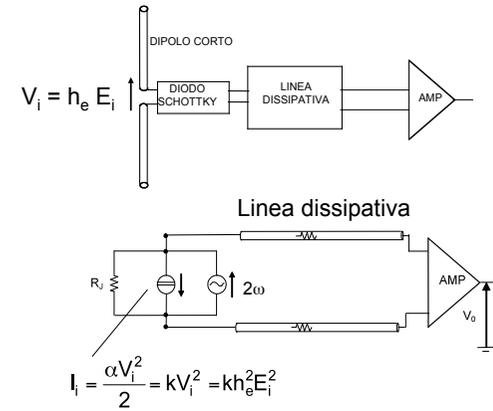
$$C_D = \frac{dQ}{dV} \quad C_D < 0.1 \text{ pF}$$

tempo di recupero inverso ≈ 50 ps
 Bassa tensione di soglia
 Raddrizzano basse tensioni a frequenze elevate

Rivelatore quadratico - Modello



Sensore di campo elettrico: circuito equivalente



Sensore di campo elettrico: funzione di trasferimento

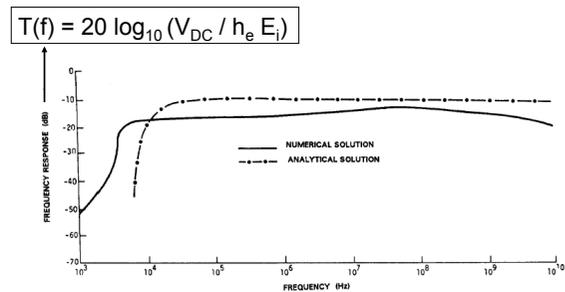
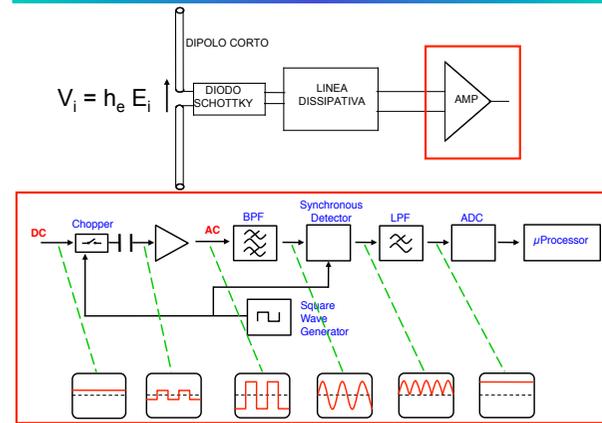
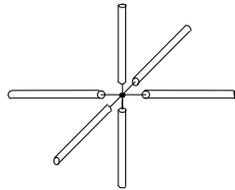


Fig. 4. Transfer function of an electrically short dipole with a Schottky barrier diode.

Sensore di campo elettrico: schema di amplificazione DC



Sensore di campo elettrico tri-assiale (isotropo)



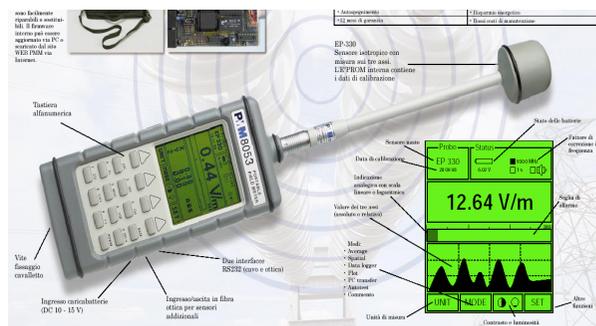
Si inviano le tre tensioni misurate ad un sommatore e si ha:

$$V_0 = V_{0x} + V_{0y} + V_{0z} = kh_e^2 (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) = kh_e^2 |E|^2$$

Misuratore Wandel & Goltermann EMR300



Misuratore PMM 8053



Modalità di misura

- **LIVE**: sia lo schermo analogico che quello digitale mostrano l'ultimo valore misurato dal probe (sonda).
- **MAX**: il display digitale mostra il più alto valore istantaneo misurato da quando è stato acceso lo strumento (on) oppure da quando è stato effettuato l'ultimo reset.
- **AVRG** (average): il display digitale mostra il corrente valore quadratico medio (RMS) di tutti quelli che sono stati acquisiti e ottenuti durante il tempo in cui è stata fatta la media (dall'accensione o dall'ultimo reset). L'intervallo temporale in cui viene fatta la media può essere impostato in steps che vanno da un minimo di 4 secondi ad un massimo di 15 minuti. Il display subisce un refresh ogni 4 secondi.
- **MAX AVRG**: il display digitale mostra il più alto valor medio misurato dall'accensione dello strumento all'ultimo reset.

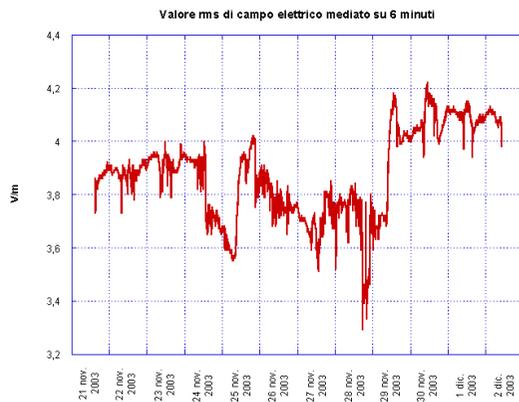
Incertezza della misura

- The **absolute error** includes the calibration method errors.
- The uncertainty due to the **frequency response** is the change of the instrument response at different frequencies of the measured field.
- The uncertainty due to **linearity** is defined as the change of the instrument's accuracy at different values of the measured field.
- The uncertainty due to **isotropic deviation** is the change of the instrument response when the instrument's direction changes.
- The **thermal response** error is the uncertainty that comes from the operation of the instrument in extreme environmental conditions (temperature, humidity, etc).
- The uncertainty due to **modulation** is the effect of the measured field modulation on the instrument response. Generally, the modulation uncertainty appears in cases where there is AM and the field intensity is greater than 20V/m.

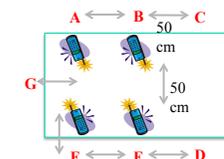
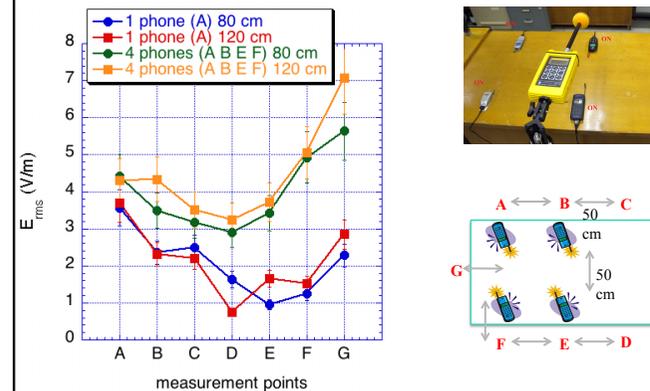
Incertezza della misura

Causa di incertezza	Valore	Distribuzione	Fattore di divisione	Incertezza standard
Taratura	15.0 %	Normale	2	7.5 %
Risposta in frequenza	5.0 %	Rettangolare	$\sqrt{3}$	2.89 %
Isotropia	1.5 %	Normale	2	0.75 %
Linearità	4.0 %	Rettangolare	$\sqrt{3}$	2.31 %
Sensibilità in temperatura	5.9 %	Rettangolare	$\sqrt{3}$	3.41 %
Errore assoluto	9.6 %	Normale	2	4.8 %
				10.3 %

Monitoraggio nei pressi di un centro di broadcasting radio e TV



Misure in uno scenario ferroviario



Misure a banda stretta

- Le misure a banda stretta forniscono indicazioni sul valore efficace (RMS) dei singoli contributi in frequenza (canali) al campo complessivo nel punto di misura.

- ⊗ Sono complesse e costose
- ⊕ Si hanno indicazioni sui singoli contributi in frequenza
- ⊕ È possibile estrapolare dei valori cautelativi di campo (valori massimi raggiungibili)

Strumentazione per misure a banda stretta



Antenne (conversione $E_i \rightarrow V$)

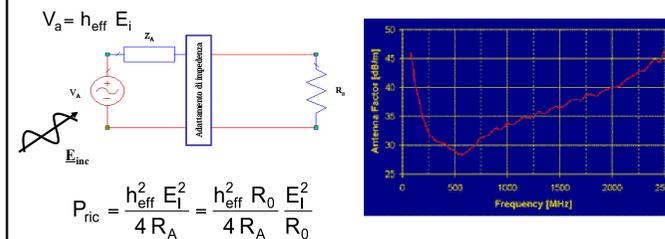


dipolo conico (80 MHz - 2500 MHz)



log periodica (80 MHz - 2000 MHz)

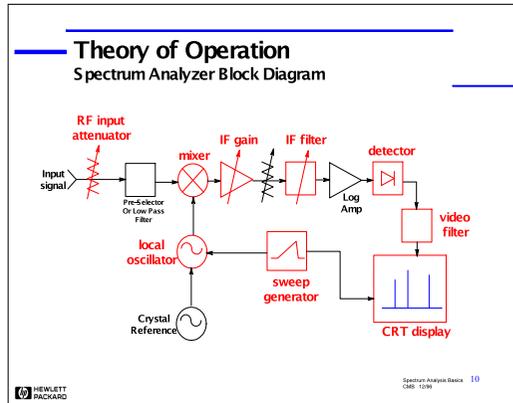
Fattore di antenna (AF)



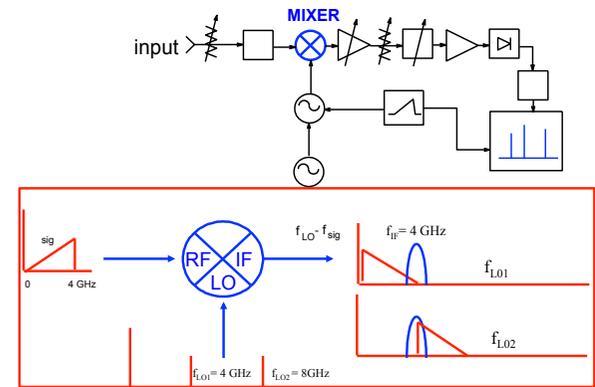
$$AF = 10 \log_{10} \frac{4 R_A}{h_{eff}^2 R_0}$$

Consente di risalire da P_{ric} a E_i

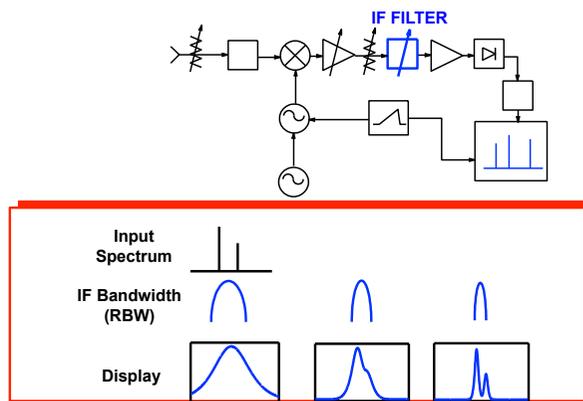
Analizzatore di spettro supereterodina (misura P_{ric})



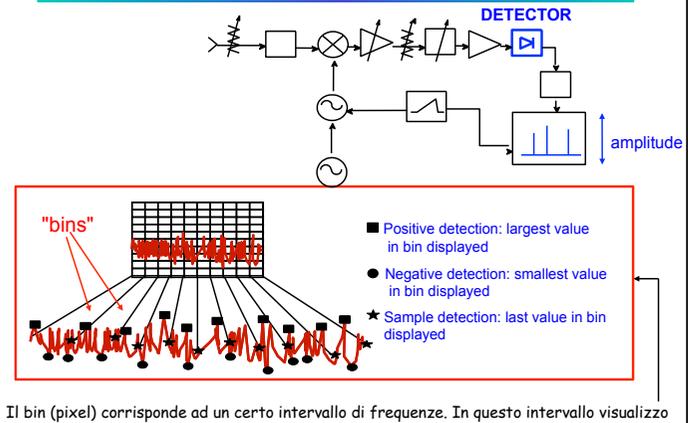
Analizzatore di spettro Mixer



Analizzatore di spettro IF Filter



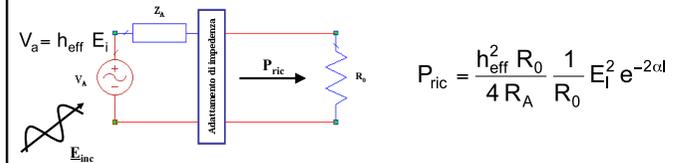
Analizzatore di spettro Detector



Analizzatore di spettro Will'tek 5101



Come si risale da P_{ric} a E_i ?



$$P_{ric} = \frac{h_{eff}^2 R_0}{4 R_A} \frac{1}{R_0} E_i^2 e^{-2\alpha l}$$

$$10 \log_{10} P_{ric} = 10 \log_{10} \frac{h_{eff}^2 R_0}{4 R_A} - 10 \log_{10} R_0 + 20 \log_{10} E_i - 20 \log_{10} e^{\alpha l} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_i |_{dBV/m} = P_{ric} |_{dBm} + AF |_{dB1/m} + A_c |_{dB} - 13$$

Come vanno impostati i parametri dell'analizzatore di spettro per effettuare correttamente una misura di campo a banda stretta?

Bisogna conoscere le caratteristiche spettrali e la variabilità in ampiezza del segnale da misurare

Le impostazioni e modalità di misura corrette dipendono dal tipo di sistema (radio FM, TV, GSM, Wi-Fi etc.) che irradia il campo che si vuole misurare!!!

Tecniche di modulazione

Ampiezza



Frequenza



Fase



Modulazione di frequenza (radio FM)

$$v(t) = A \cos(\omega_c t + m \sin \omega_m t)$$

m = indice di modulazione

$\Delta f = m f_m$ max dev. freq.

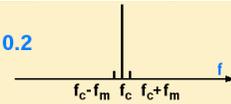
Banda del segnale

$$B = 2(m + 1)f_m$$

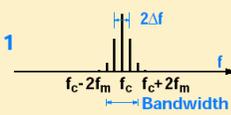
Radio FM

$$B = 2(5+1)15\text{kHz} = 180 \text{ kHz}$$

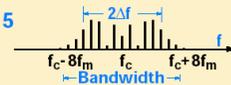
$m = 0.2$



$m = 1$



$m = 5$



$m = 10$



Misure a banda stretta

- Le singole emittenti radio FM occupano una banda di 200 kHz tra 88 e 108 MHz. Si usa:

RBW 30 kHz, VB 30 kHz, SPAN 5 MHz

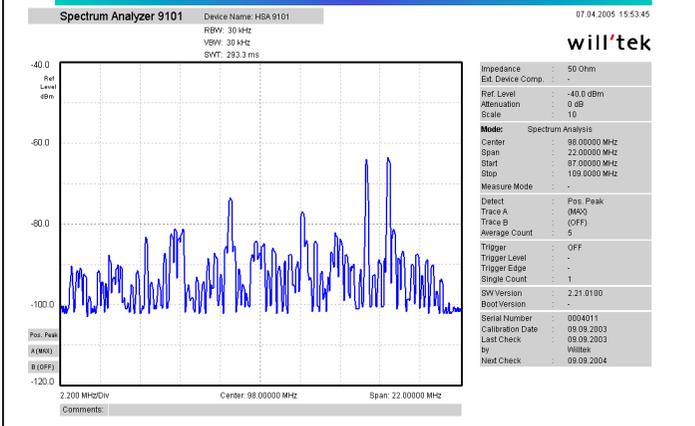
- Ogni portante dei cellulari GSM occupa una banda di 200 kHz. Si usa:

RBW 100-300 kHz, VB 100 kHz, SPAN 5-10 MHz

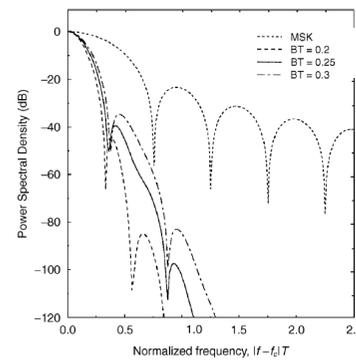
- Ogni canale del segnale Wi-Fi occupa una banda di 22 MHz. Si usa:

RBW 100 kHz, VB 1 MHz, SPAN 30 MHz

Radio FM (misure)



Modulazione GMSK (GSM)



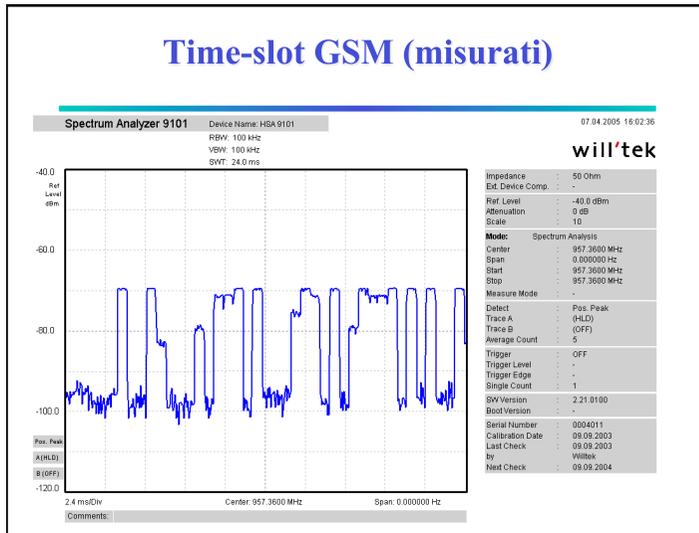
$$u(t) = A \cos \left[2\pi f_0 t + 2\pi h \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau + \varphi_0 \right]$$

BT = banda del filtro gaussiano

$v(t)$ = stringa digitale prefiltrata da un filtro gaussiano

Power density spectrum of MSK and GMSK.

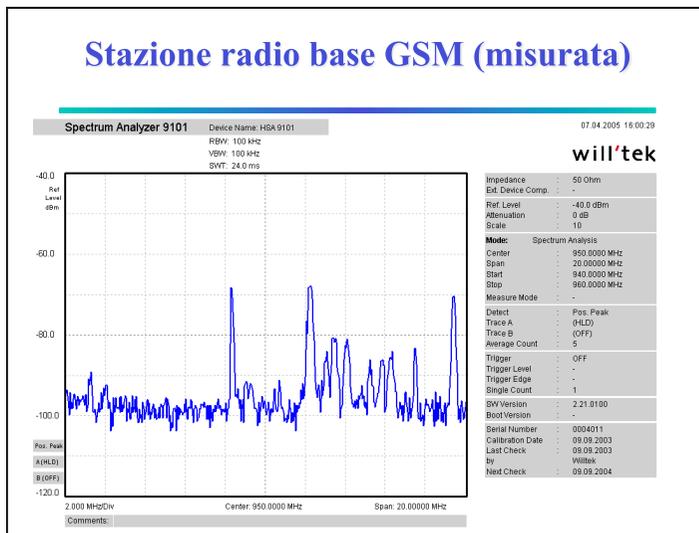
Time-slot GSM (misurati)



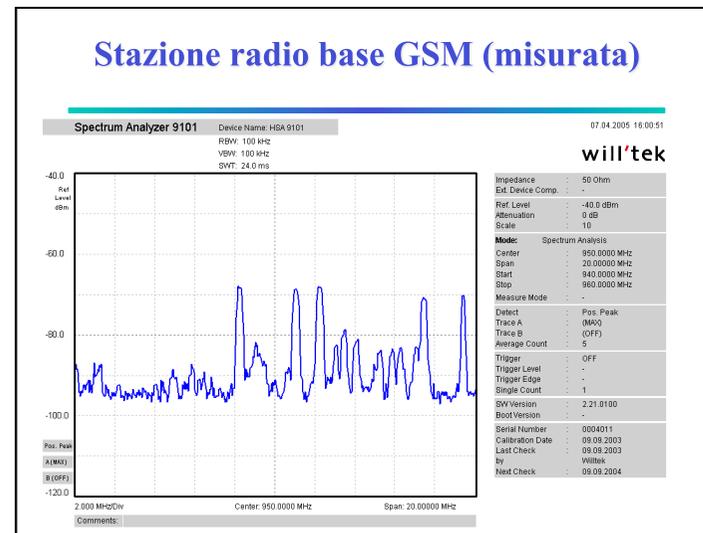
Misure a banda stretta

- Le singole emittenti radio FM occupano una banda di 200 kHz tra 88 e 108 MHz. Si usa:
RBW 30 kHz, VB 30 kHz, SPAN 5 MHz
- Ogni portante dei cellulari GSM occupa una banda di 200 kHz. Si usa:
RBW 100-300 kHz, VB 100 kHz, SPAN 5-10 MHz
- Ogni canale del segnale Wi-Fi occupa una banda di 22 MHz. Si usa:
RBW 100 kHz, VB 1 MHz, SPAN 30 MHz

Stazione radio base GSM (misurata)

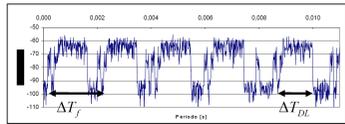
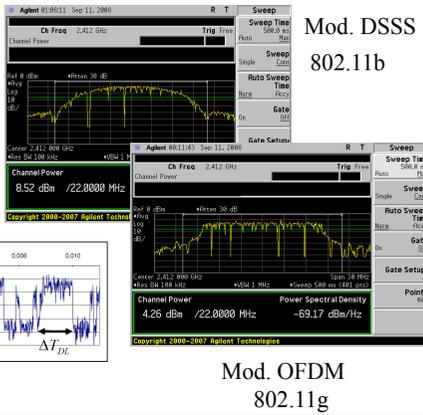


Stazione radio base GSM (misurata)



Misure segnale Wi-Fi

Il segnale WiFi è fortemente aleatorio: la sua ampiezza nella banda è molto variabile, ed assomiglia ad un rumore



Misure a banda stretta

- Le singole emittenti radio FM occupano una banda di 200 kHz tra 88 e 108 MHz. Si usa:
RBW 30 kHz, VB 30 kHz, SPAN 5 MHz
- Ogni portante dei cellulari GSM occupa una banda di 200 kHz. Si usa:
RBW 100-300 kHz, VB 100 kHz, SPAN 5-10 MHz
- Ogni canale del segnale Wi-Fi occupa una banda di 22 MHz. Si usa:
RBW 100 kHz, VB 1 MHz, SPAN 30 MHz

Misure segnale Wi-Fi

D-Link
 $E = 0,28 \text{ V/m} \pm 4,7\%$

Hamlet
 $E = 0,41 \text{ V/m} \pm 3\%$

Analizzatore di spettro	f_c	SPAN	RBW	VBW	DETECTOR	CHANNEL POWER	INT BW	SWEEP
E4440A	2.412 GHz 2.437 GHz	30 MHz	100 kHz	1 MHz	RMS	ok	22 MHz	200 ms

Camera semi-anechoica "Vecuvia" lab. di Campi EM, CR ENEA Casaccia
(di dimensioni 9,00x6,00x5,60 m³ - banda di assorbimento fino a 18 GHz)