



## Lezione 20

# Antenne per Misure di EMC

Giuseppe Pelosi - Stefano Selleri  
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni  
Università di Firenze



- ❖ Introduzione
- ❖ Antenna Biconica
- ❖ Antenna Log-Periodica
- ❖ Altri Sensori



## Introduzione

La FCC prevederebbe di usare un dipolo risonante per la misura di campo.

Se però desideriamo fare misure su un'ampia banda (30MHz-1GHz e più) la soluzione a dipolo risonante non è pratica.

Inoltre alla frequenza inferiore della banda (30MHz) la lunghezza d'onda è 10m e di conseguenza l'antenna sarebbe di 5m.

Per non parlare della difficoltà di fare le misure previste a quota da 1m a 4m!!!

La via più pratica è quella di usare un'antenna a ***larga banda*** che funzioni su tutta la gamma di frequenze di interesse.



## Introduzione

il “che funzioni su tutta la gamma di frequenze di interesse” merita di essere spiegato.

L'antenna deve:

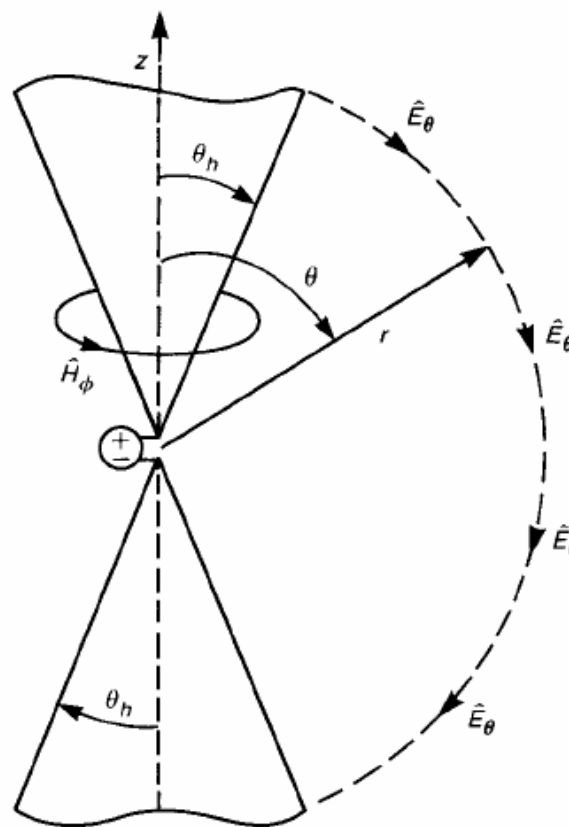
1. **Avere un'impedenza di ingresso ragionevolmente costante su tutta la banda**
2. **Avere un pattern di radiazione ragionevolmente costante su tutta la banda**

La misura viene quindi effettuata utilizzando un'*antenna biconica* nel range 30-200MHz e un'*antenna log-periodica* da 200MHz a 1GHz



## Antenna Biconica

L'antenna biconica è, idealmente, una struttura infinita formata da due coni perfettamente conduttori opposti al vertice





## Antenna Biconica

Si può supporre, data la simmetria della struttura, che i campi *non* dipendano da  $\phi$ .

Supponiamo inoltre che la struttura del campo sia

$$\mathbf{E} = E(r, \theta) \mathbf{i}_\theta$$

$$\mathbf{H} = H(r, \theta) \mathbf{i}_\phi$$

Questa scelta è plausibile in quanto soddisfa le condizioni al contorno.

Le equazioni di Maxwell, come ricorderete, dicono:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon\mathbf{E}$$



## Antenna Biconica

In coordinate sferiche il rotore è

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{A} = & \frac{1}{r \sin \theta} \left( \frac{\partial}{\partial \theta} (A_\phi \sin \theta) - \frac{\partial}{\partial \phi} A_\theta \right) \mathbf{i}_r + \\ & + \frac{1}{r} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} A_r - \frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi) \right) \mathbf{i}_\theta + \\ & + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial}{\partial \theta} A_r \right) \mathbf{i}_\phi\end{aligned}$$

Con l'ipotesi considerata:

$$\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} E_\theta = 0 \Rightarrow E_\theta \text{ non dipende da } \phi$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\theta) = -j\omega\mu H_\phi \Rightarrow \frac{\partial}{\partial r} (r E_\theta) = -j\omega\mu r H_\phi$$

$$\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (H_\phi \sin \theta) = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial \theta} (H_\phi \sin \theta) = 0$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) = j\omega\epsilon E_\theta \Rightarrow \frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) = -j\omega\epsilon r E_\theta$$



## Antenna Biconica

Derivo la quarta e vi sostituisco la seconda

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}(rH_\phi) = -j\omega\epsilon \frac{\partial}{\partial r}(rE_\theta) = -\omega^2\epsilon\mu(rH_\phi)$$

ovvero

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}(rH_\phi) + k^2(rH_\phi) = 0$$

Che è un'onda in  $r$ :

$$rH_\phi = f(\theta)(A^+e^{jkr} + A^-e^{-jkr})$$

Una  
funzione di  
 $\theta$

Onda che  
dall'infinito  
va ai  
morsetti

Onda che  
dai morsetti  
va  
all'infinito





## Antenna Biconica

Quindi

$$H_{\phi} = f(\theta) A^{-} \frac{e^{-jkr}}{r}$$

Dalla terza

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (H_{\phi} \sin \theta) = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial \theta} \left( f(\theta) A^{-} \frac{e^{-jkr}}{r} \sin \theta \right) = 0 \Rightarrow f(\theta) \sin \theta = \text{cost}$$

Quindi

$$H_{\phi} = A^{-} \frac{e^{-jkr}}{r \sin \theta}$$

E

$$E_{\theta} = \frac{k}{\omega \epsilon} A^{-} \frac{e^{-jkr}}{r \sin \theta} = \zeta_0 H_{\phi}$$



## Antenna Biconica

L'onda è quindi TEM (i campi sono ortogonali fra loro e ortogonali alla direzione di propagazione)

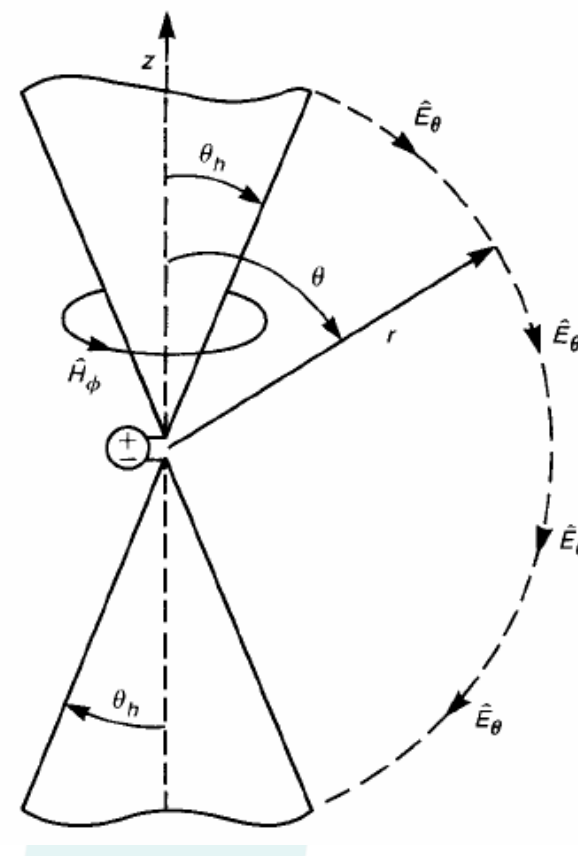
Posso quindi definire tensione e corrente!

La tensione la integro su un percorso a  $r$  (e  $\phi$ ) costante

$$\begin{aligned} V &= \int_{\pi-\theta_h}^{\theta_h} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \zeta_0 A^- \frac{e^{-jkr}}{r} \int_{\pi-\theta_h}^{\theta_h} \frac{1}{\sin \theta} r d\theta = \\ &= \zeta_0 A^- e^{-jkr} 2 \ln(\cot(\theta/2)) \end{aligned}$$

Analogamente la corrente

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{2\pi} \mathbf{H} \cdot \mathbf{r} d\mathbf{l} = A^- \frac{e^{-jkr}}{r \sin \theta} \int_0^{2\pi} r d\phi = \\ &= 2\pi A^- e^{-jkr} \end{aligned}$$





## Antenna Biconica

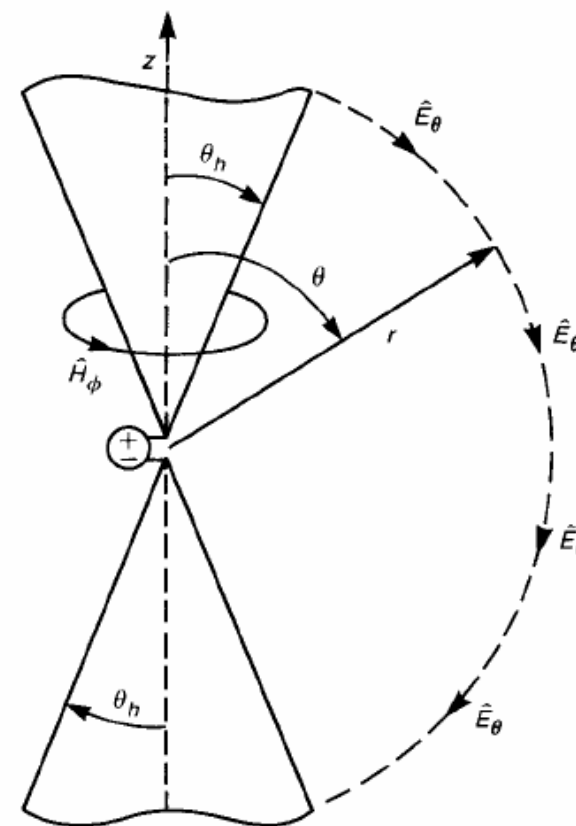
Evidentemente l'impedenza è

$$Z_0 = \frac{V}{I} = \frac{\zeta_0 A^- e^{-jkr} 2 \ln(\cot(\theta_h / 2))}{2\pi A^- e^{-jkr}} = \frac{\zeta_0}{\pi} \ln(\cot(\theta_h / 2)) = 120 \ln(\cot(\theta_h / 2))$$

Questa, oltre a essere l'impedenza della struttura guidante, valendo ovunque è anche evidentemente l'impedenza di ingresso dell'antenna.

Essa è puramente reale e indipendente dalla frequenza!

Non solo, si può dimostrare che essa è anche la resistenza di radiazione!





## Antenna Biconica

Infatti

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \oint_S \frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* dS = \int_0^{2\pi} \int_{\theta}^{\pi-\theta} \frac{|E_{\theta}|^2}{2\zeta_0} r^2 \sin \theta d\theta d\phi = \\ &= \frac{\pi}{\zeta_0} \int_{\theta}^{\pi-\theta} \left| \zeta_0 A^- \frac{e^{-jkr}}{r \sin \theta} \right|^2 r^2 \sin \theta d\theta d\phi = \\ &= \pi \zeta_0 (A^-)^2 \int_{\theta}^{\pi-\theta} \frac{1}{\sin \theta} d\theta d\phi = \\ &= \pi \zeta_0 (A^-)^2 2 \ln(\cot(\theta_h / 2)) \end{aligned}$$

Ma, per definizione

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \frac{1}{2} |I(0)|^2 R_{rad} = \\ &= \frac{1}{2} (2\pi A^-)^2 R_{rad} \end{aligned}$$

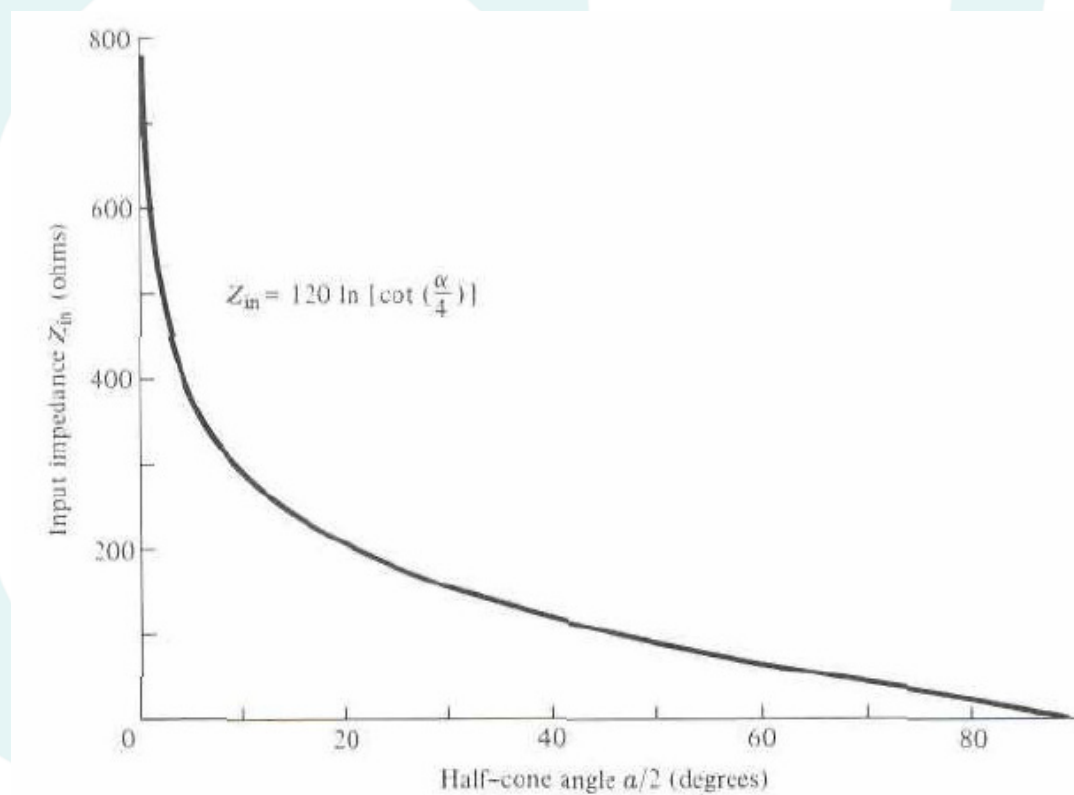
Quindi

$$Z_{in} = R_{rad}$$



## Antenna Biconica

Impedenza di ingresso...





## Antenna Biconica

Oltre all'impedenza anche il pattern è (teoricamente) indipendente dalla frequenza.

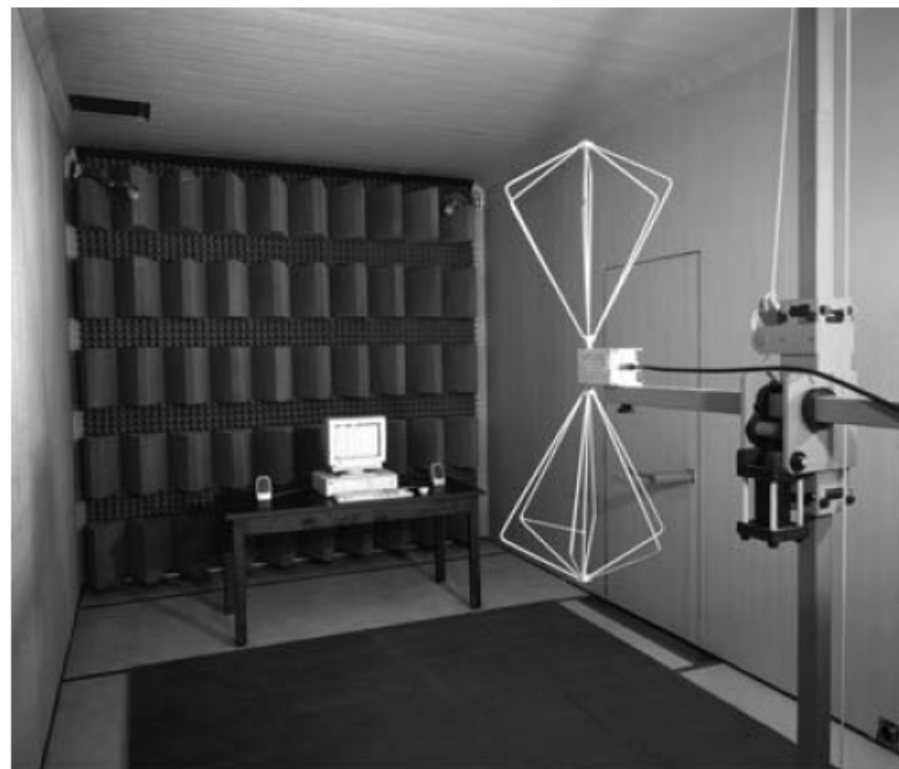
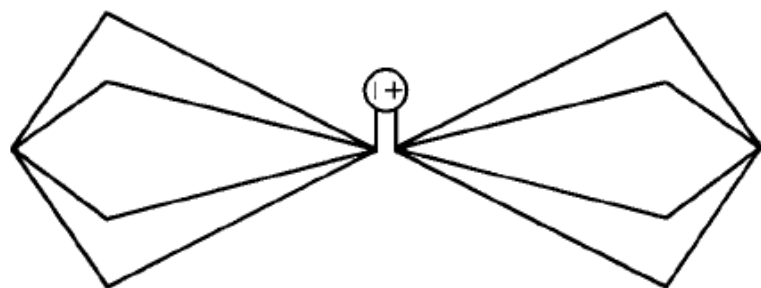
All'atto pratico però i coni non possono essere infiniti. Questo comporta che alla discontinuità geometrica del troncamento del cono nasca un'onda riflessa.

L'onda riflessa implica che l'impedenza d'ingresso non è più puramente reale ma presenta una parte immaginaria. Inoltre la stazionarietà che si genera implica che l'impedenza non sia più indipendente dalla frequenza.



## Antenna Biconica

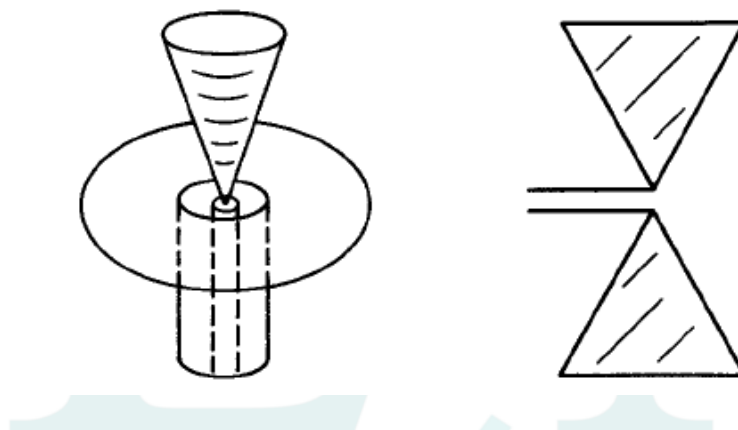
L'antenna biconica può essere realizzata a fili





## Antenna Biconica

Altre variazioni sul tema sono l'antenna disco-cono, che è sbilanciata e quindi non necessita di BalUn, e l'antenna a farfalla







## Antenna Log-Periodica

Un altro metodo per ottenere un'antenna a larga banda è quello di costruire una struttura *autoscalata* ovvero tale per cui, moltiplicando le dimensioni per un certo coefficiente l'antenna resti uguale a se stessa.

In questo modo al variare della frequenza vi sarà sempre una zona dell'antenna deputata alla radiazione, e questa zona avrà sempre la stessa forma e le stesse “condizioni al contorno”

Il concetto di autoscalatura tramite un coefficiente implica che anche le caratteristiche elettriche risultino scalate di tale coefficiente.

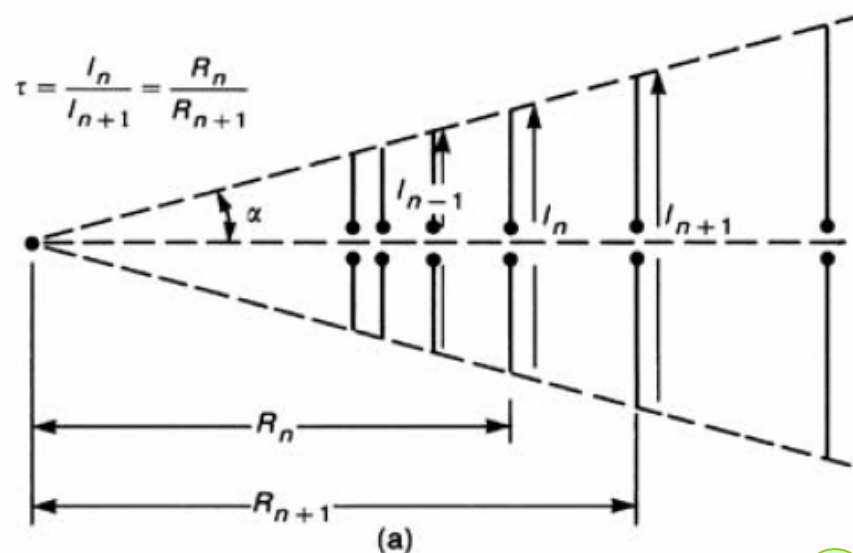
Esse presentano quindi una periodicità che però non è lineare, ma logaritmica.

Di qui il nome di *Antenne Log-Periodiche*



## Antenna Log-Periodica

L'Antenna Log Periodica più semplice e intuitiva è la Log-Periodica a dipoli o **LPDA**:



$$\tau = \frac{l_n}{l_{n+1}} = \frac{R_n}{R_{n+1}} = \frac{a_n}{a_{n+1}}$$

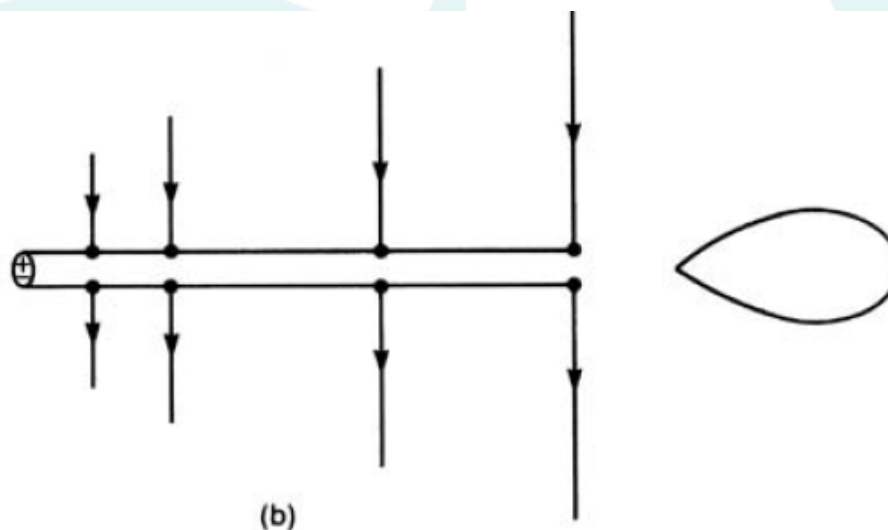
A esser  
pignoli

È il coefficiente di scala



## Antenna Log-Periodica

Il metodo più intuitivo di alimentazione è



Ma non funziona bene!

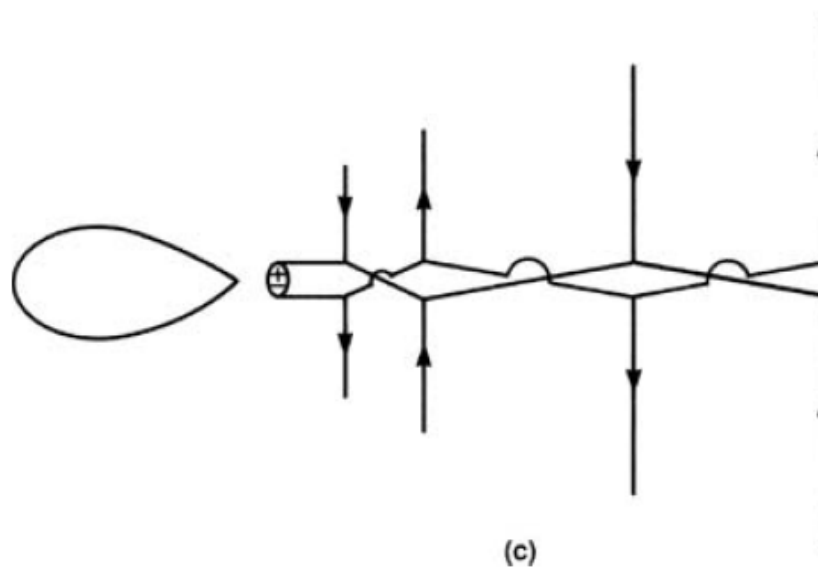
Infatti l'onda, viaggiando da sinistra a destra alimenta i dipoli con una fase tale per cui la radiazione complessiva dovrebbe avere un massimo a destra.

La mutua interazione tra i dipoli è però alta, poiché essi sono vicini, e l'effetto delle correnti indotte sarebbe quello di avere un massimo di radiazione a sinistra!



## Antenna Log-Periodica

Per farla funzionare...

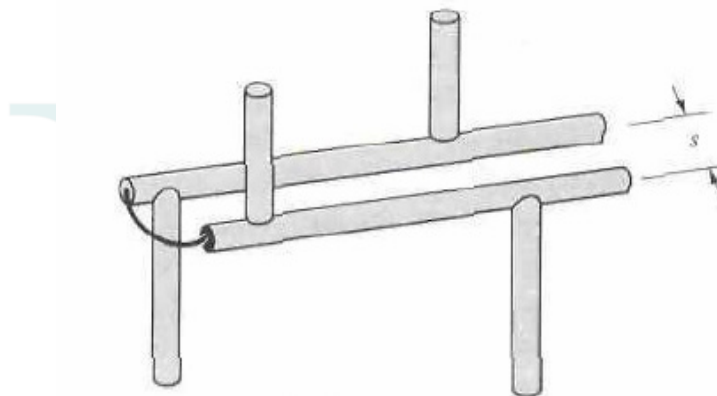


Questo mette in “controfase” i dipoli e il massimo di radiazione sia per le correnti impresse che per quelle indotte è a sinistra!



## Antenna Log-Periodica

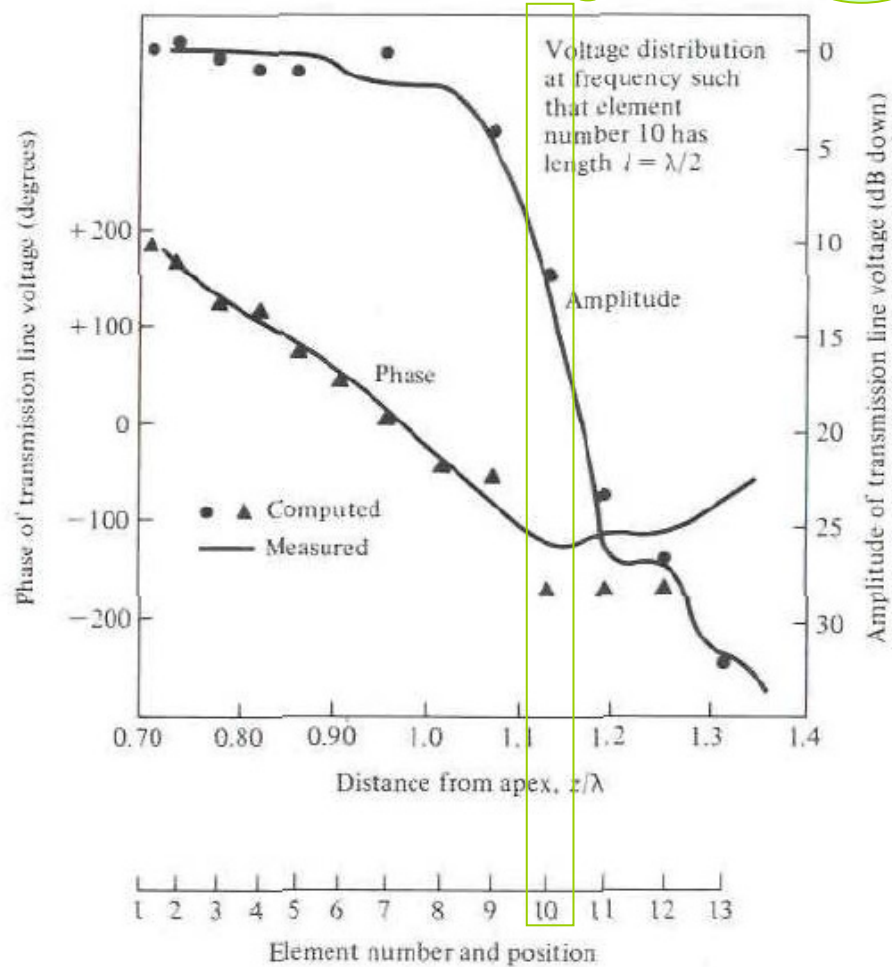
Con Auto-BalUn..





## Antenna Log-Periodica

In effetti vi è una regione attiva!

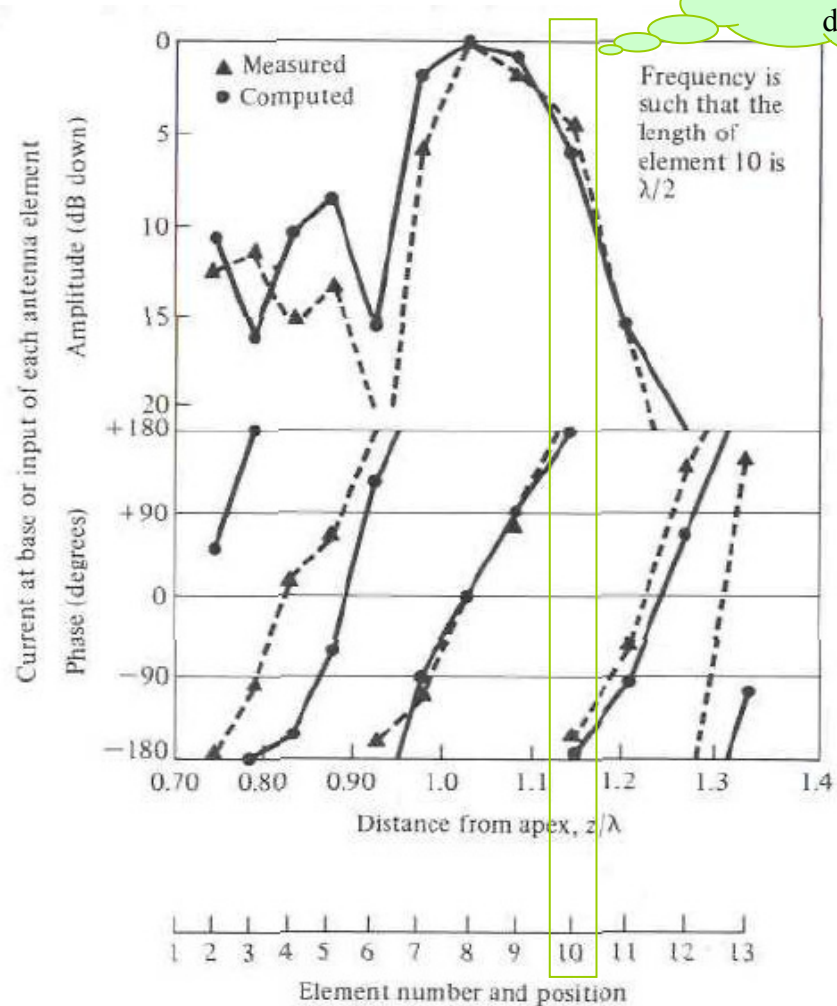


Il dipolo 10 è  
mezza lunghezza  
d'onda



## Antenna Log-Periodica

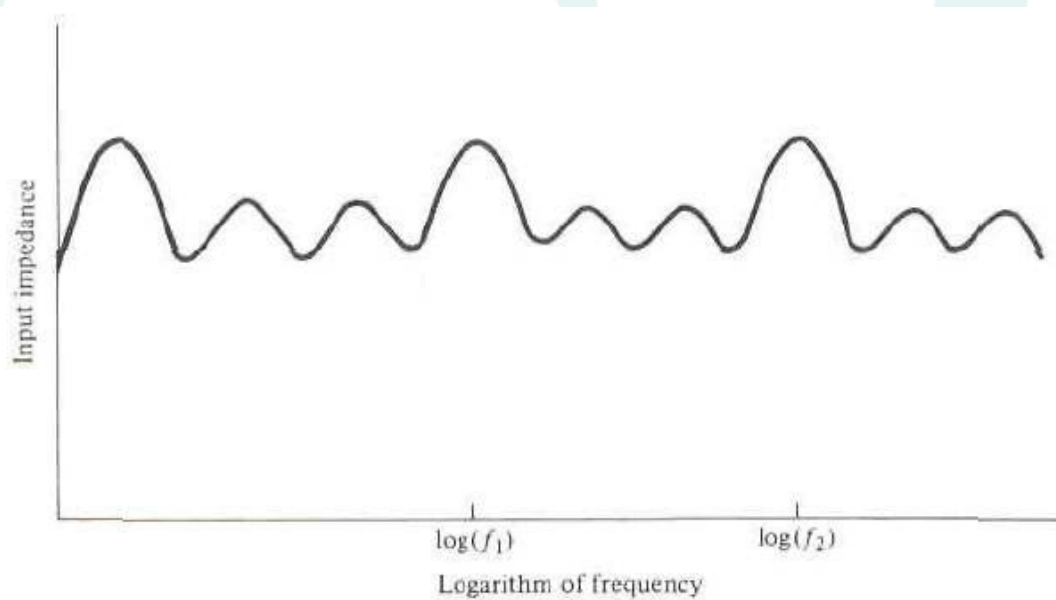
In effetti vi è una regione attiva!





## Antenna Log-Periodica

L'Impedenza, funzione della frequenza, è

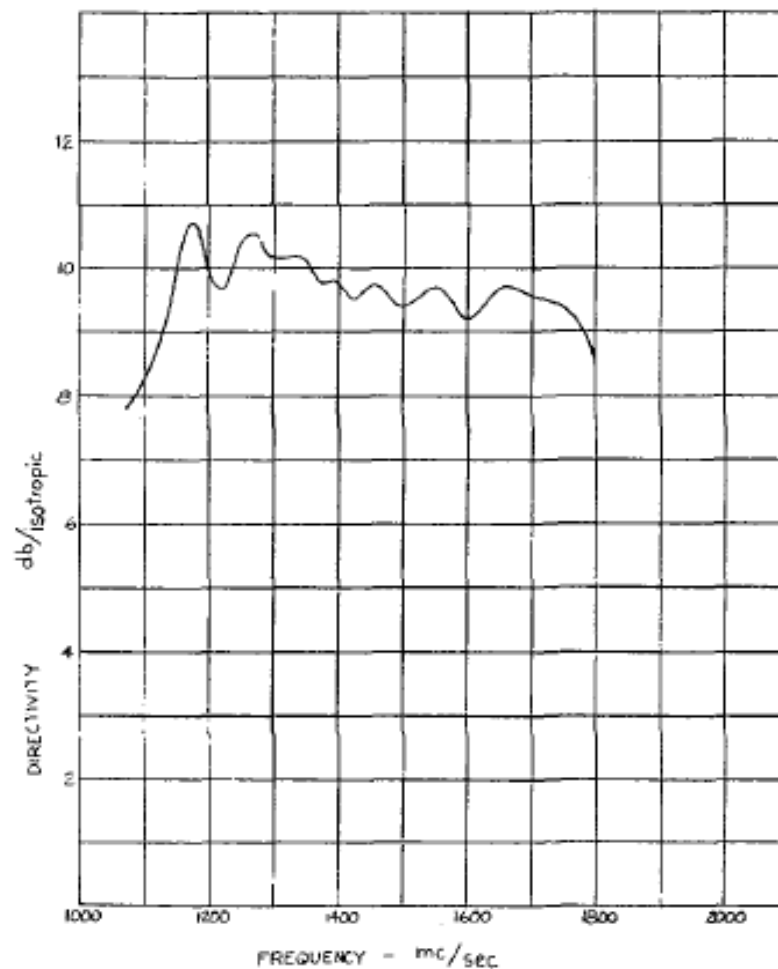






## Antenna Log-Periodica

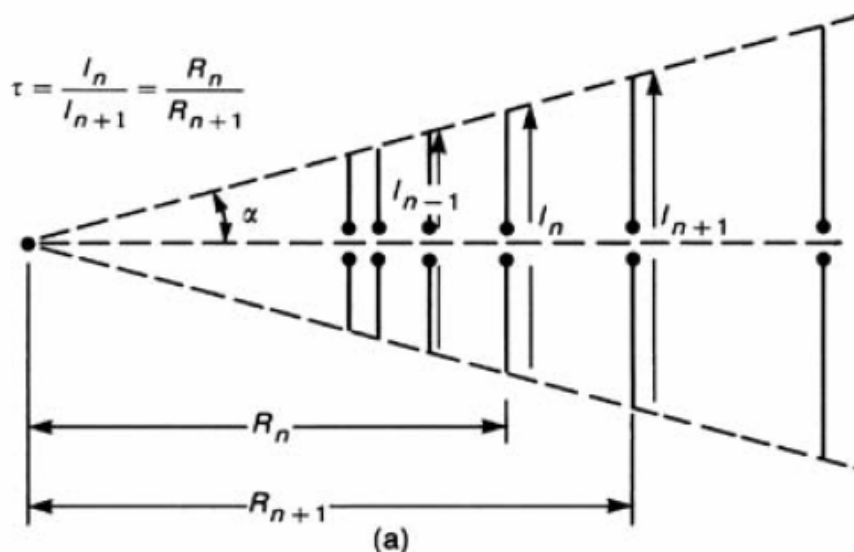
La direttività è ragionevolmente costante in frequenza





## Antenna Log-Periodica

Possiamo inoltre definire un fattore di spaziatura



$$\tau = \frac{l_n}{l_{n+1}} = \frac{R_n}{R_{n+1}}$$

$$\sigma = \frac{R_{n+1} - R_n}{2l_{n+1}}$$

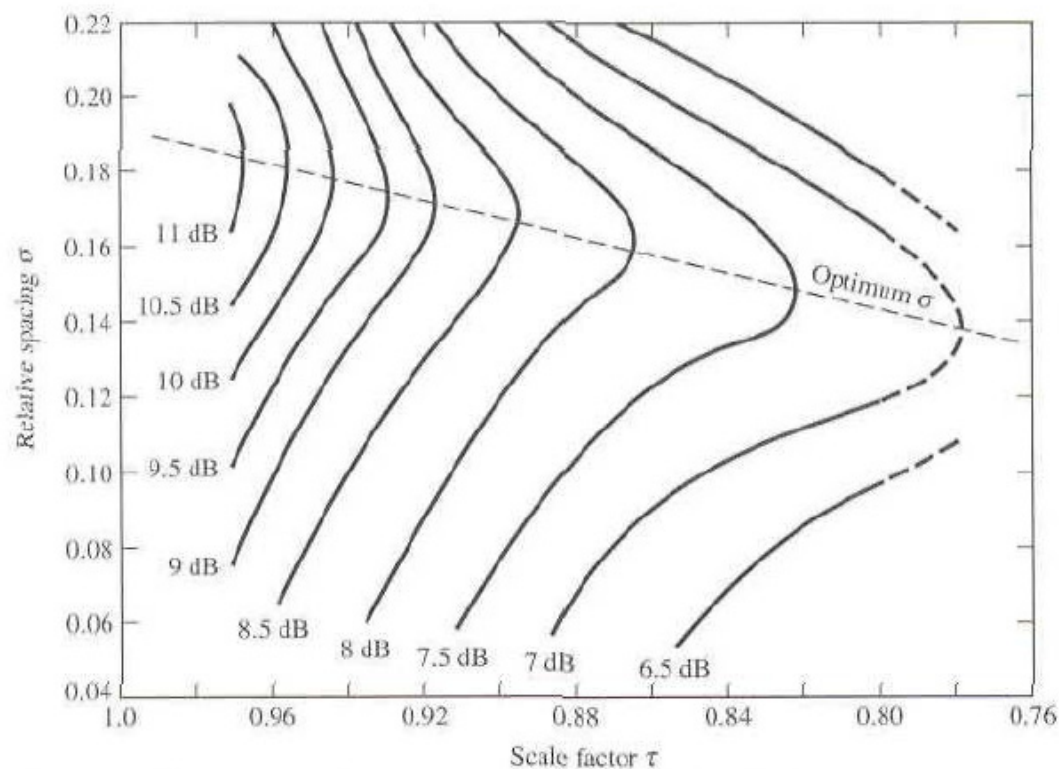
Mentre l'angolo è

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{1 - \tau}{4\sigma} \right)$$



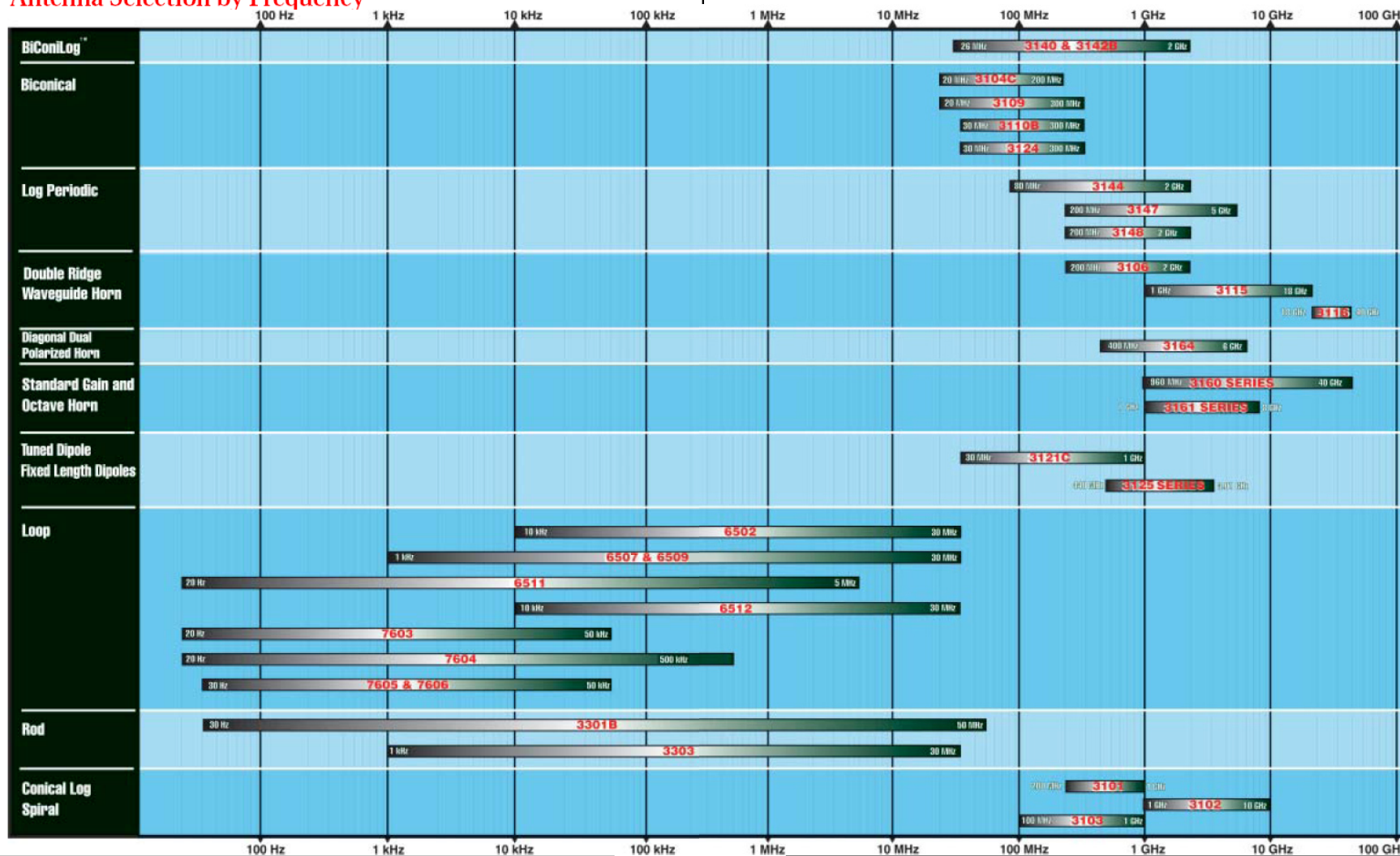
## Antenna Log-Periodica

Vi è una spaziatura ottima, relativamente alla direttività





Antenna Selection by Frequency





## Altri Sensori

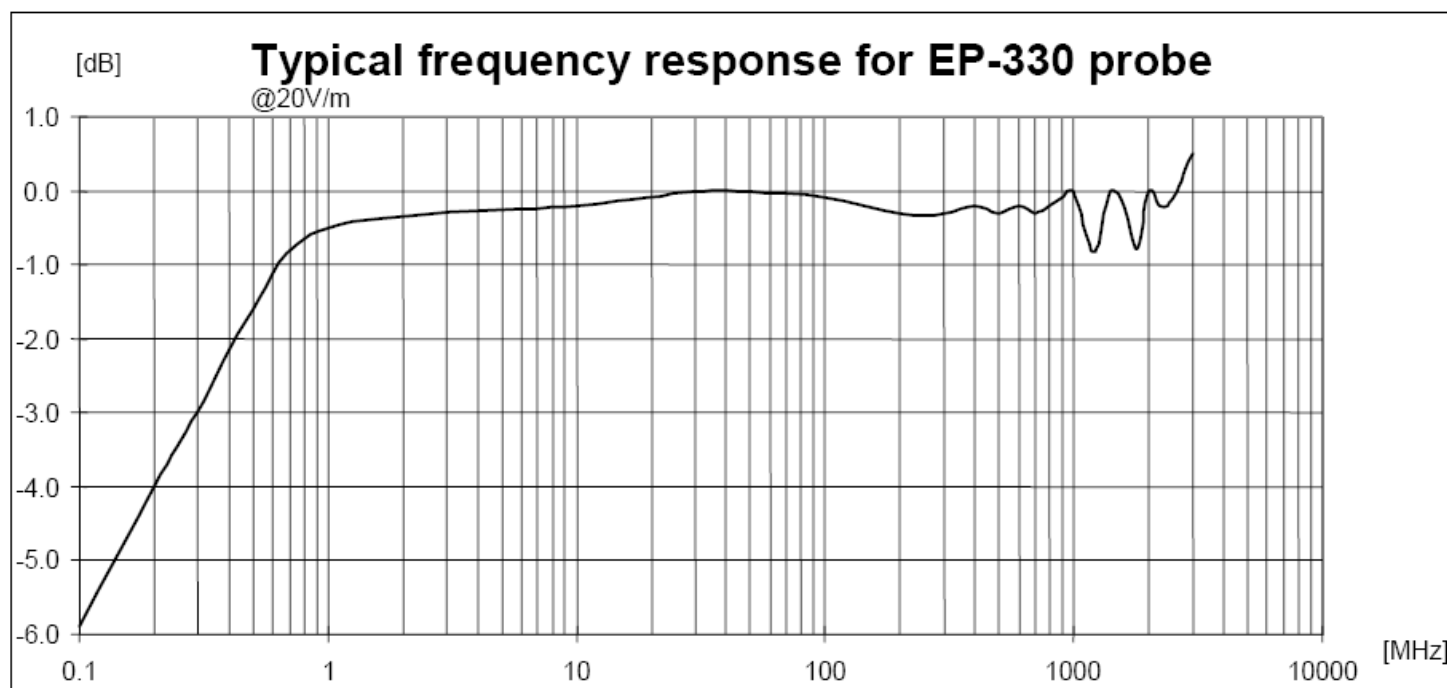
Sensore di Campo	Campo di frequenza	Portata	
Electric Field Probe EP-105	100 kHz - 1000 MHz	0.05 - 50 V/m	
Electric Field Probe EP-300	100 kHz - 3 GHz	0.1 - 300 V/m	
Electric Field Probe EP-330	100 kHz - 3 GHz	0.3 - 300 V/m	
Electric Field Probe EP-301	100 kHz - 3 GHz	1 - 1000 V/m	
Electric Field Probe EP-183	1 MHz - 18 GHz	0.8 - 800 V/m	
Electric Field Probe EP-408	1 MHz - 40 GHz	0.8 - 800 V/m	
Electric Field Probe EP-44M	100 kHz - 800 MHz	0.25 - 250 V/m	
Electric Field Probe EP-33M	700 MHz - 3 GHz	0.3 - 300 V/m	
Electric Field Probe EP-33A	925 MHz - 960 MHz	0.03 - 30 V/m	
Electric Field Probe EP-33B	1805 MHz - 1880 MHz	0.03 - 30 V/m	
Electric Field Probe EP-33C	2110 MHz - 2170 MHz	0.03 - 30 V/m	
Magnetic Field Probe HP-032	0.1 - 30 MHz	0.01 - 20 A/m	
Magnetic Field Probe HP-102	30 - 1000 MHz	0.01 - 20 A/m	
Magnetic Field Probe HP-050	10 Hz - 5 kHz	10 nT - 40 $\mu$ T	
Magnetic Field Probe HP-051	10 Hz - 5 kHz	50 nT - 200 $\mu$ T	
Electric and Magnetic Field Analyzers EHP50A/B/C	5 Hz - 100 kHz	A	100 mV/m - 100 kV/m 10 nT - 10 mT
	5 Hz - 100 kHz	B/ C	10 mV/m - 100 kV/m 1 nT - 10 mT



## Altri Sensori

### ELECTRIC FIELD PROBE EP-330

Campo di frequenza	100 kHz - 3 GHz
Portata	0,3 - 300 V/m
Sovraccarico	> 600 V/m
Dinamica	> 60 dB
Risoluzione	0,01 V/m
Sensibilità	0,3 V/m
Errore assoluto @ 50 MHz e 20 V/m	$\pm 0,8$ dB
Piattezza (10 - 300 MHz)	$\pm 0.5$ dB
Piattezza (3 MHz - 3 GHz)	$\pm 1.5$ dB
Isotropicità	$\pm 0.8$ dB (Tipico $\pm 0.5$ dB @ 930 e 1800 MHz)





## Altri Sensori



Probe EF0391		Electric (E-)Field	
Frequency range <sup>(b)</sup>	100 kHz to 3 GHz		
Type of frequency response	Flat		
Measurement range	0.2 to 320 V/m (CW) 0.2 to 10 V/m (True RMS)	10 nW/cm² to 27 mW/cm² (CW) 10 nW/cm² to 0.027 mW/cm² (True RMS)	
Dynamic range	64 dB		
CW damage level	800 V/m	170 mW/cm²	
Peak damage level <sup>(c)</sup>	8 kV/m	17 W/cm²	
Sensor type	Diode based system		
Directivity	Isotropic (Tri-axial)		
Readout mode / spatial assessment	3 separate axes		
UNCERTAINTY			
Flatness of frequency response <sup>(d)</sup> Calibration uncertainty not included	±1 dB (1 MHz to 1 GHz) ±1.25 dB (1 GHz to 2.45 GHz)		
Calibration uncertainty <sup>(e)</sup> @ 0.01 mW/cm² (6.14 V/m)	±1 dB (<400 MHz) ±1.5 dB (400 MHz to 1.8 GHz) ±1 dB (≥ 1.8 GHz)		
Linearity Referred to 0.01 mW/cm² (6.14 V/m)	±0.5 dB (1.2 to 200 V/m) ±0.7 dB (200 to 320 V/m)	±0.5 dB (0.00038 to 10.6 mW/cm²) ±0.7 dB (10.6 to 27 mW/cm²)	
Isotropic response <sup>(f)</sup>	±1 dB		
Temperature response	+0.2/ -1 dB (±0.025 dB/K)		
GENERAL SPECIFICATIONS			
Calibration frequencies	0.1/ 0.2/ 0.3/ 1/ 3/ 10/ 27.12 MHz 0.1/ 0.2/ 0.3/ 0.5/ 0.75/ 1/ 1.8/ 2.45/ 2.7/ 3 GHz		
Recommended calibration interval	24 months		
Temperature range Operating Non-operating (transport)	0 °C to +50 °C -40 °C to +70 °C		
Humidity	5 to 95 % RH @ ≤25 °C	≤23 g/m³ absolute humidity	
Size	318 mm x 66 mm Ø		
Weight	90 g		
Compatibility	NBM-500 series meters		





## Altri Sensori



Sensor Type  
Detection  
Dynamic Range  
Resolution  
Readout Units  
Frequency Response  
Accuracy

Isotropic Deviation  
Linearity  
Probe Response Time  
Overload Withstand

Physical Interface

Operating Range

Operating Time  
Battery  
Battery Charger

Dimensions

Mounting  
Weight

Electric Field  
Isotropic (X, Y and Z Axis Readings)  
0.5 – 800 V/m (>64 dB, Single Range)  
0.01 V/m  
V/m, V<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, mW/cm<sup>2</sup>  
100 kHz – 6 GHz  
± 1 dB from 26 MHz – 2 GHz  
± 0.5 dB at Calibration Frequencies  
± 0.5 dB  
5  $\mu$ sec (typical)  
>1500 V/m Continuous Field

Duplex Optical Fiber (200 micron multimode)  
FSMA Connectors  
10°C to 40°C  
5% to 95% Relative Humidity, Non-Condensing  
10 Hours Continuous Use  
Rechargeable NiMH  
100-240 VAC Universal Input  
2 Hour Charge Time from Fully-Depleted Battery  
32mm x 32mm x 32mm Cubical Housing  
43mm Sensor Protection Caps  
1/4-20 UNC Internal Thread  
80g