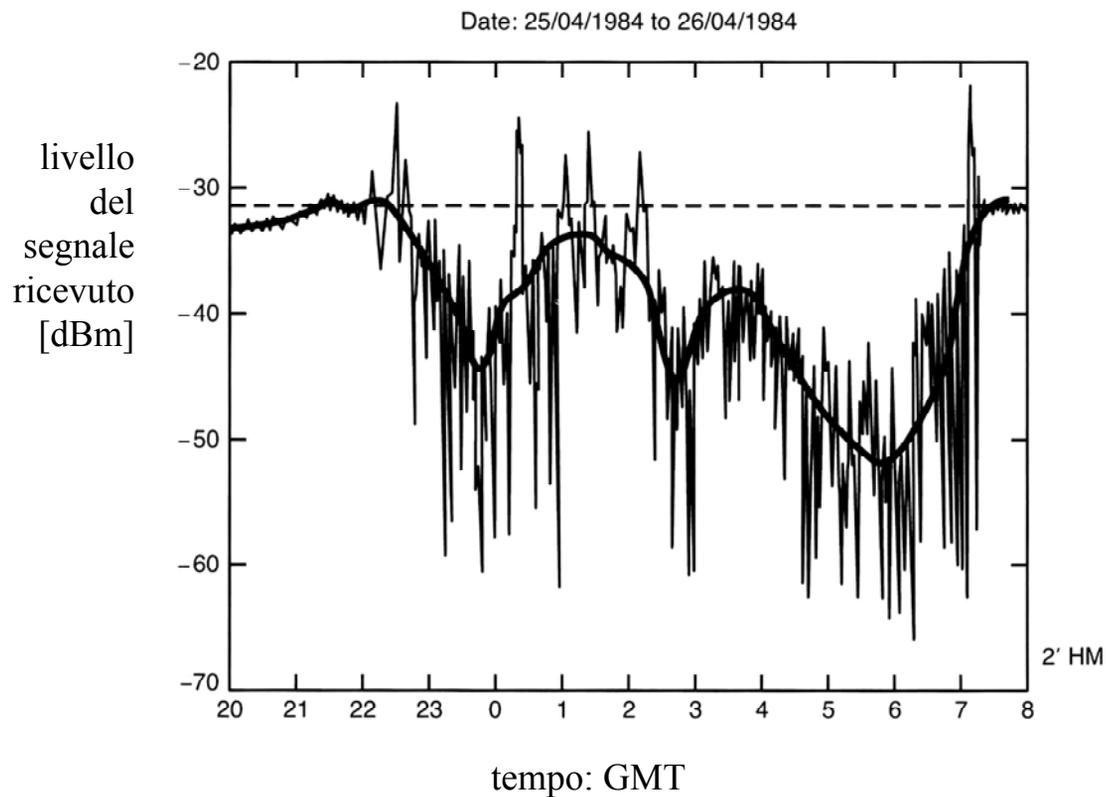


# Affievolimenti (fading)



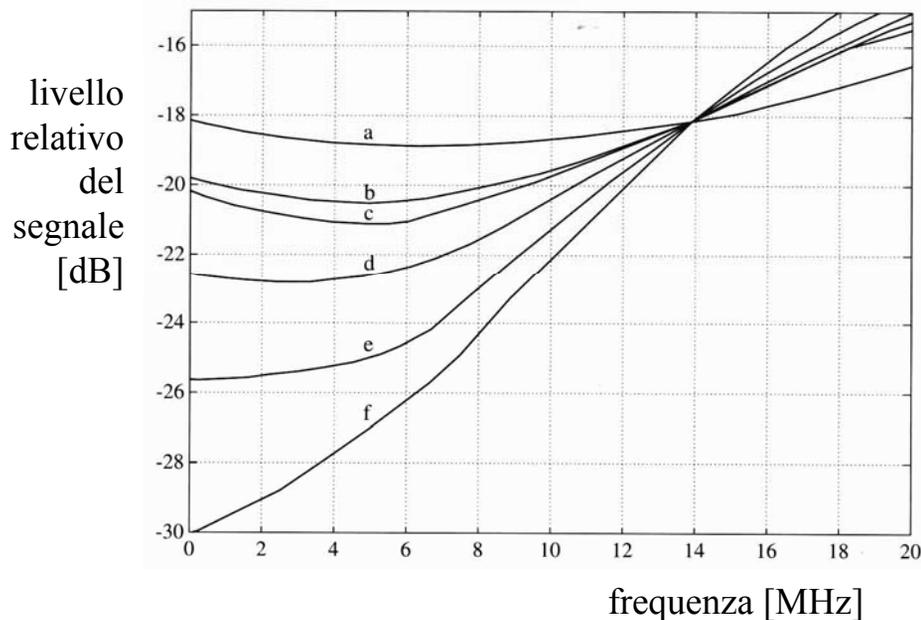
componente a lungo termine  
componente a tempi brevi

## affievolimenti a breve termine

sono dovuti sostanzialmente a cammini multipli  
sono selettivi in frequenza

$$E e^{j\psi} = \sum_i A_i e^{j\varphi_i}$$

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R_i \quad \text{fortemente dipendente dalla frequenza se } \Delta R_i \gg \lambda$$



andamento sperimentale dell'attenuazione in banda misurata sulla tratta ad 11 GHz Lugo - Bologna ( $\approx 60$  km); gli andamenti  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$  sono relativi a situazioni separate nel tempo di 200 ms

## Assenza di una componente principale

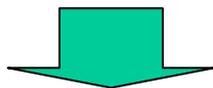
- Se il numero di contributi è superiore a qualche unità
- Se tutti i contributi sono circa della stessa intensità
- Assumendo che le fasi siano completamente scorrelate e possano assumere qualunque valore con la stessa probabilità

$$E = \sqrt{X^2 + Y^2} \qquad \psi = \arctan \frac{Y}{X}$$

$$X = \sum_i A_i \cos \varphi_i \qquad Y = \sum_i A_i \sin \varphi_i$$

X e Y risultano variabili casuali, statisticamente indipendenti e con la stessa distribuzione gaussiana di probabilità

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{X^2}{2\sigma^2}} \qquad p(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{Y^2}{2\sigma^2}}$$



$p(E)$  distribuzione di Rayleigh

$p(\psi) = \frac{1}{2\pi}$  distribuzione uniforme

# distribuzione Gaussiana (normale)

$$p(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(E-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

densità di probabilità

$$P(E) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{E-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

distribuzione cumulativa

$$\langle E \rangle = \mu$$

valore medio

$$E_{med} = \mu$$

valore mediano

$$E_{mod} = \mu$$

moda

$$\langle E^2 \rangle = \mu^2 + \sigma^2$$

valore medio del quadrato

$$\sqrt{\langle E^2 \rangle} = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2}$$

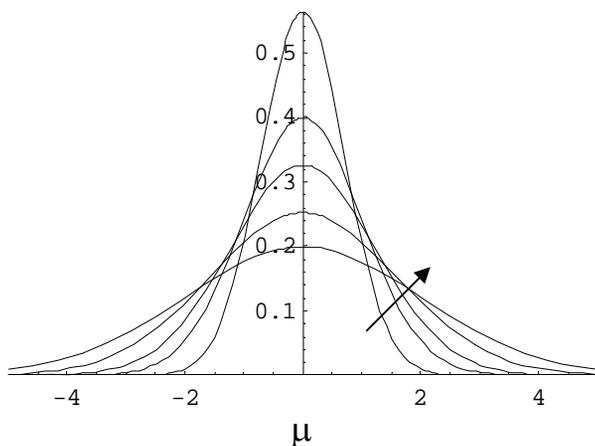
valore quadratico medio

$$\langle (E-\mu)^2 \rangle = \sigma^2$$

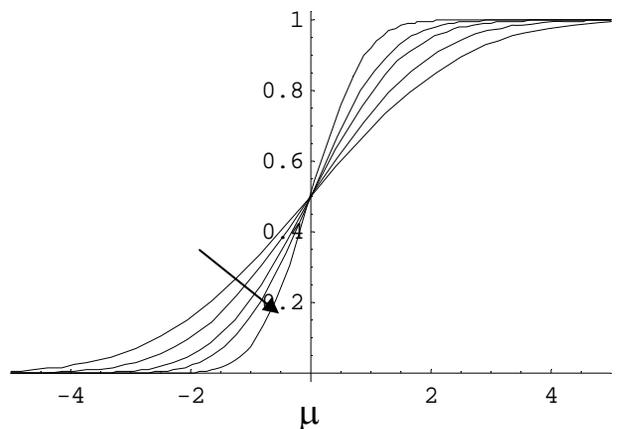
varianza

$$\sqrt{\langle (E-\mu)^2 \rangle} = \sigma$$

deviazione standard



$\sigma^2 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$



→  $\sigma$  crescenti

# distribuzione di Rayleigh

$$p(E) = \frac{E}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{E^2}{2\sigma^2}\right)$$

densità di probabilità

$$P(E) = 1 - \exp\left(-\frac{E^2}{2\sigma^2}\right)$$

distribuzione cumulativa

$$\langle E \rangle = \sqrt{\pi/2} \sigma$$

valore medio

$$E_{med} = \sqrt{2 \ln 2} \sigma$$

valore mediano

$$E_{mod} = \sigma$$

moda

$$\langle E^2 \rangle = 2 \sigma^2$$

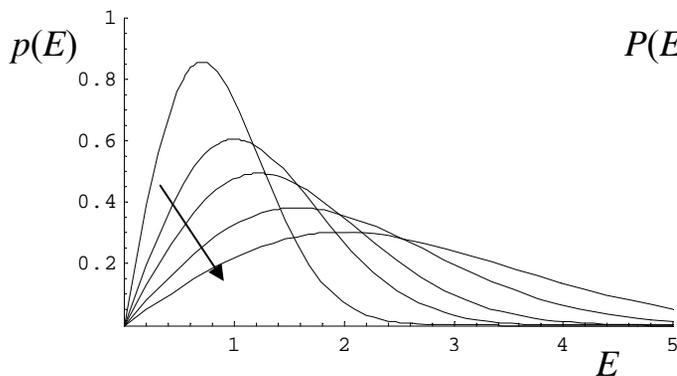
valore medio del quadrato

$$\sqrt{\langle E^2 \rangle} = \sqrt{2} \sigma$$

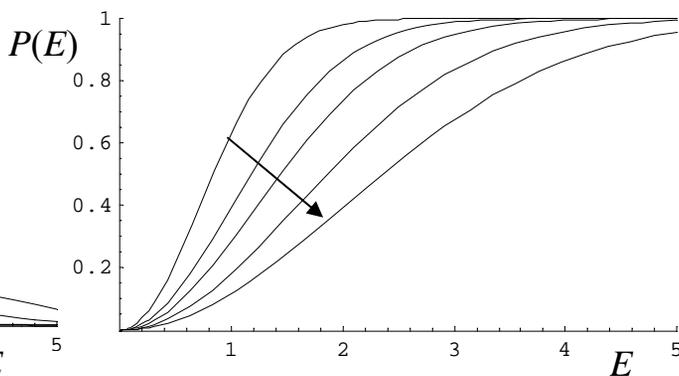
valore quadratico medio

$$\langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle = (2 - \pi/2) \sigma^2$$

varianza



$\sigma^2 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$



→  $\sigma$  crescenti

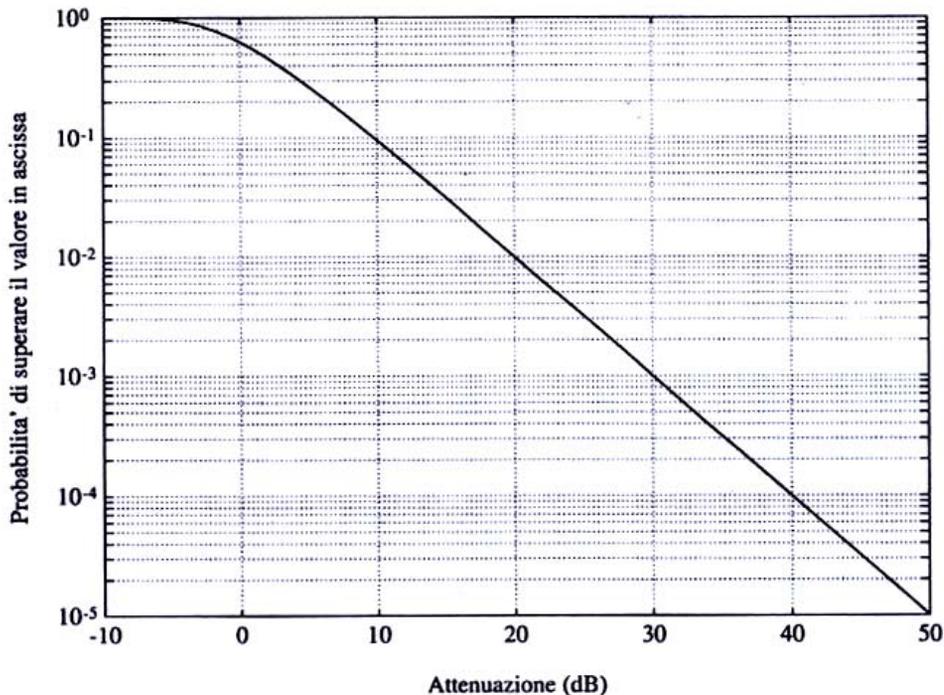
## distribuzione cumulativa di Rayleigh in termini di attenuazione

il rapporto  $A = E^2 / (2\sigma^2)$  rappresenta l'attenuazione istantanea della potenza rispetto al suo valore medio  $\langle E^2 \rangle = 2\sigma^2$ .

Per ciascun valore di potenza media assegnato, la probabilità dell'attenuazione coincide con la probabilità di  $E$ , risulta pertanto:

$$P(A) = P(E) = 1 - \exp(-A) = 1 - \exp\left(-10^{-\frac{A_{dB}}{10}}\right)$$

probabilità cumulativa di Rayleigh in funzione dell'attenuazione

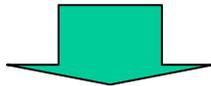


## Presenza di una componente principale

Se, oltre ai contributi con le caratteristiche prima assunte esiste una componente dominante (assunta come riferimento di fase) di ampiezza  $A_0$

$$E = \sqrt{(A_0 + X)^2 + Y^2} \qquad \psi = \arctan \frac{Y}{A_0 + X}$$

$$X = \sum_i A_i \cos \varphi_i \qquad Y = \sum_i A_i \sin \varphi_i$$



$p(E)$  distribuzione di Rice

$$p(\psi) = \frac{e^{\frac{A_0 E}{\sigma^2} \cos \psi}}{2\pi I_0(A_0 E / \sigma^2)} \approx \frac{1}{2\pi} \quad \text{per} \quad \frac{A_0 E}{\sigma^2} \ll 1$$

# distribuzione di Rice

$$p(E) = \frac{E}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{E^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{AE}{\sigma^2}\right)$$

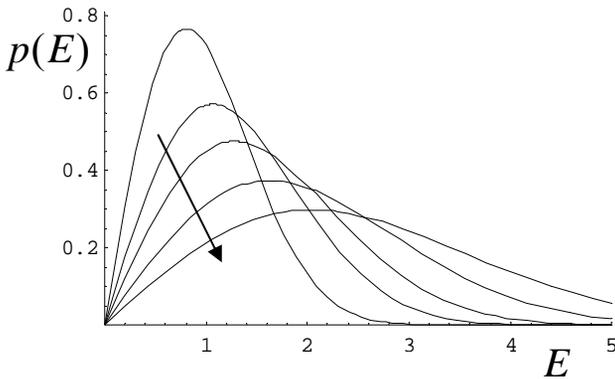
densità di probabilità

$$P(E) = \int_0^E p(\xi) d\xi$$

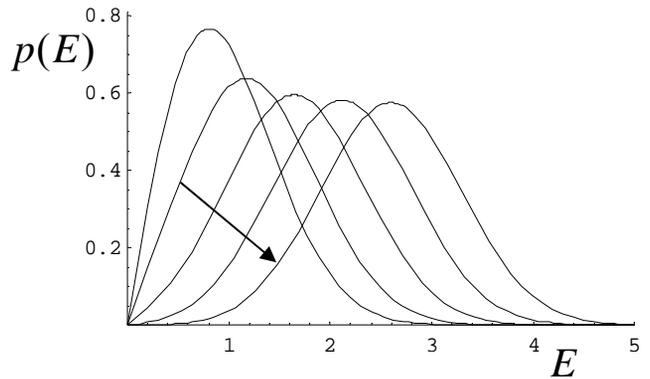
distribuzione cumulativa

$$\langle E^2 \rangle = A^2 + 2\sigma^2$$

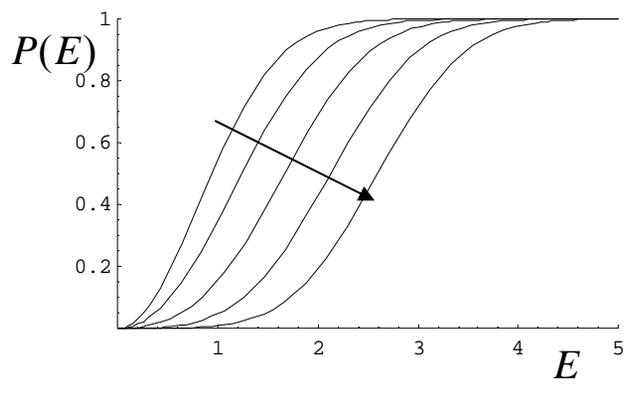
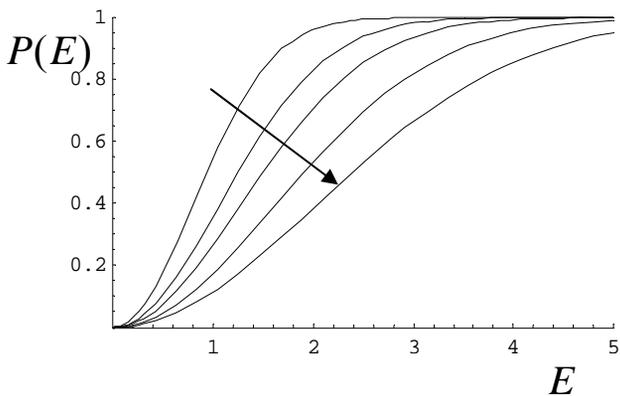
valore medio del quadrato



$A = 0.5$   
 $\sigma^2 = 0.5, 1., 1.5, 2, 2.5$

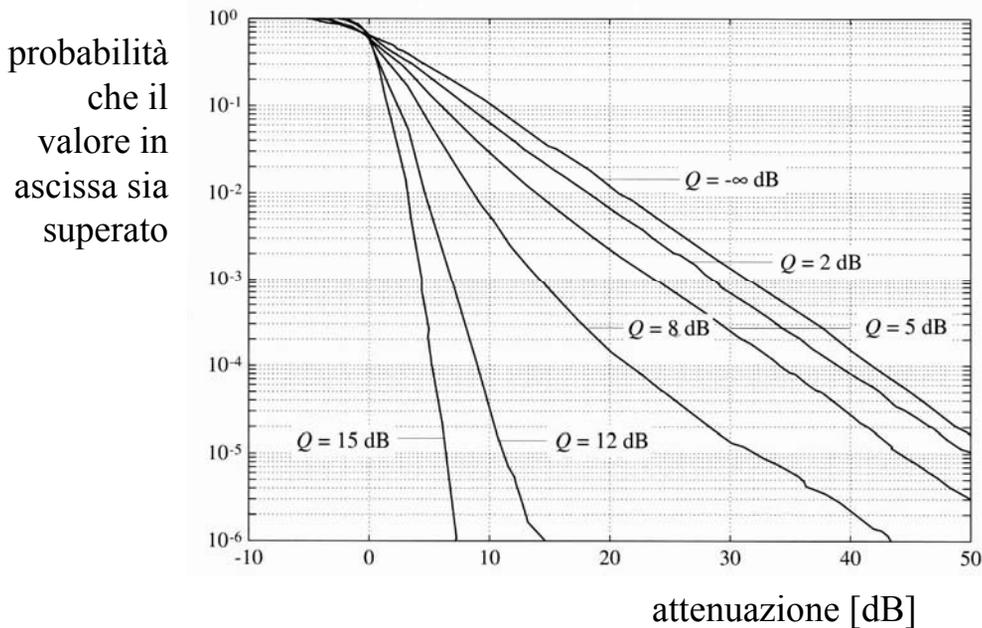


$A = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5$   
 $\sigma^2 = 0.5$



→ valori crescenti

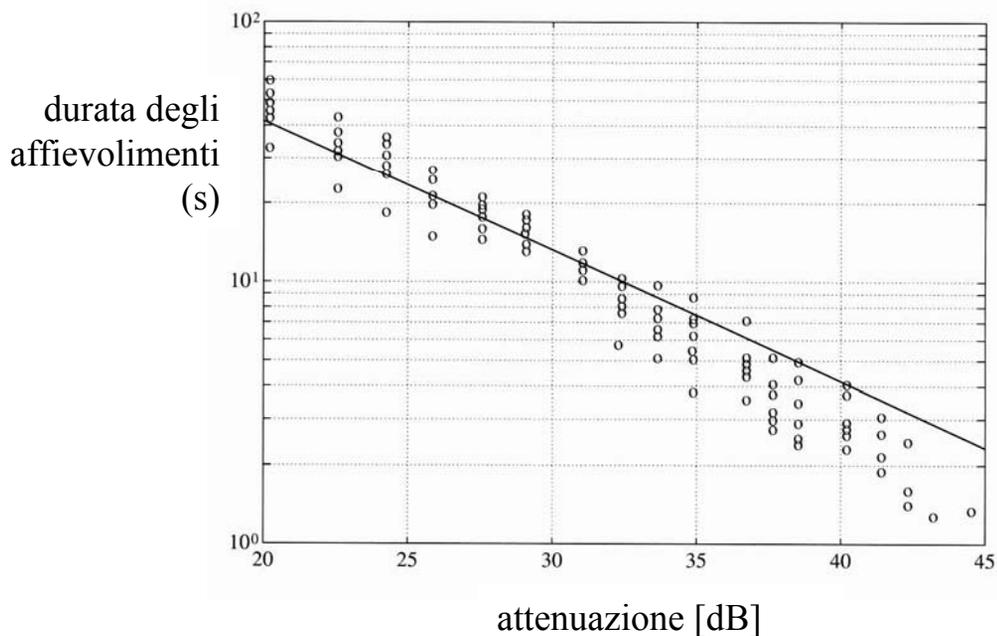
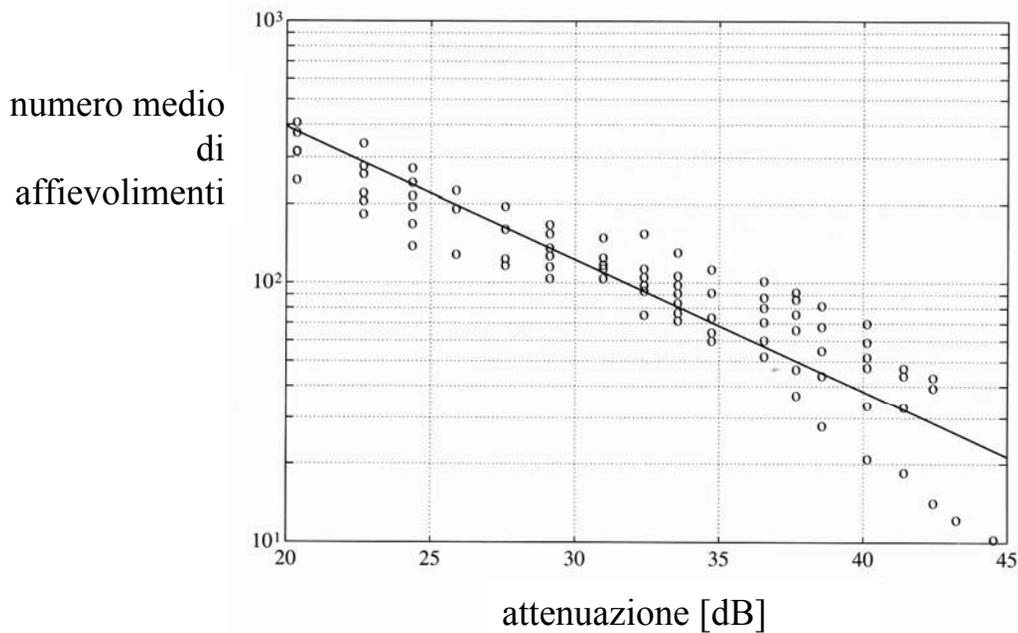
## distribuzione cumulativa di Rice riferita all'attenuazione



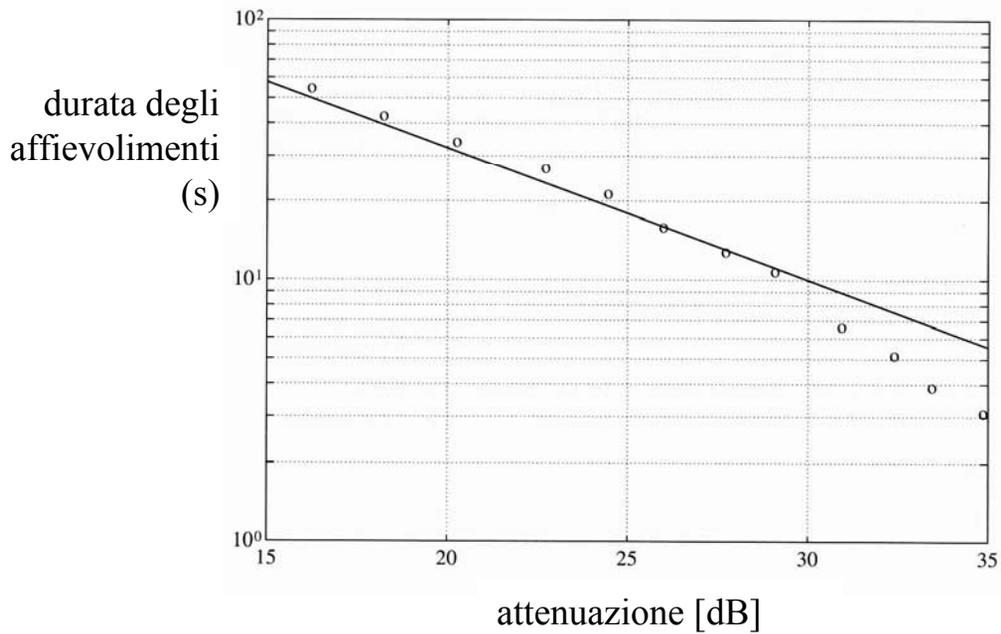
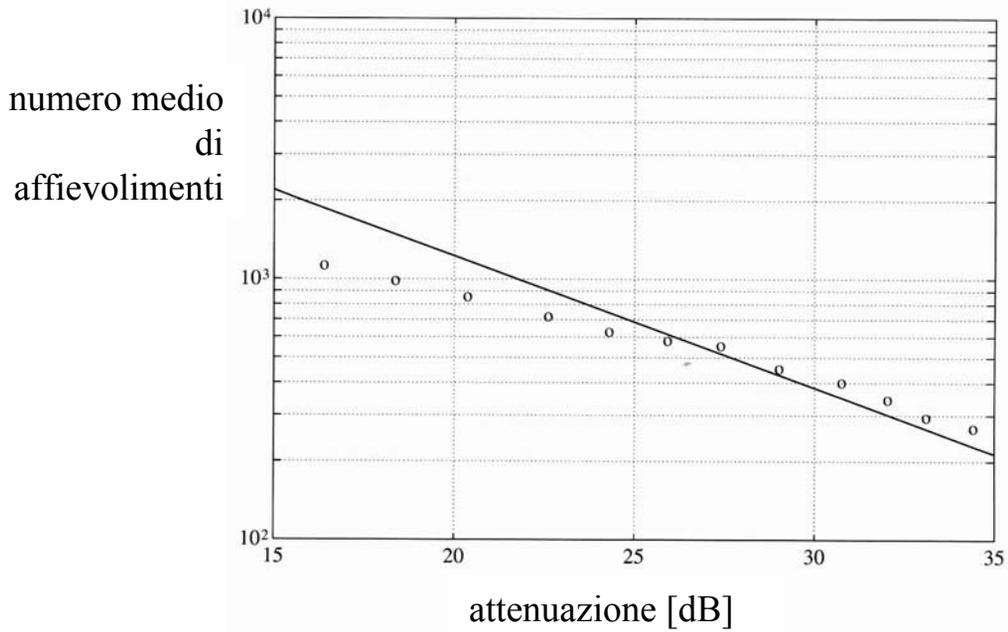
il parametro  $Q$  indica il rapporto tra la densità di potenza associata alla componente dominante con la densità di potenza associata alle componenti rapidamente variabili

$$Q = \frac{A_0^2}{2\sigma^2}$$

# caratteristiche dinamiche degli affievolimenti a breve termine

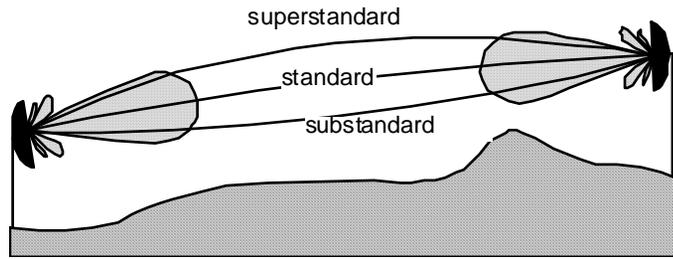


valori sperimentali su una tratta a 4 GHz di 45 km rilevati su una base temporale di  $5.26 \cdot 10^6$  s.

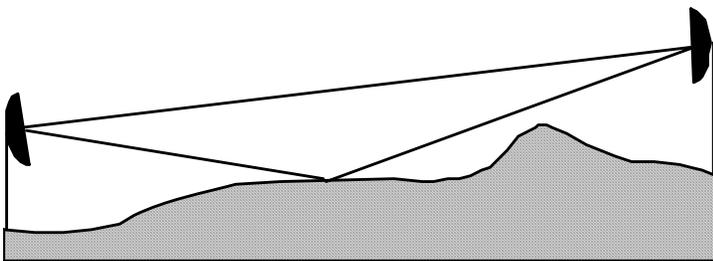


valori sperimentali su una tratta a 11 GHz di 45 km rilevati su una base temporale di  $5.26 \cdot 10^6$  s.

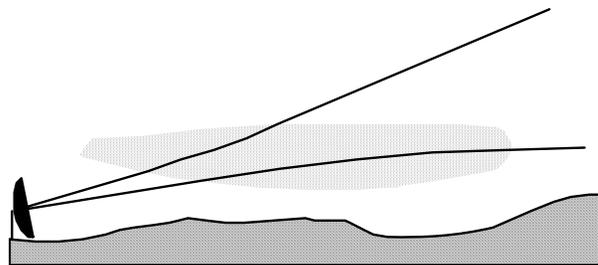
# affievolimenti a lungo termine



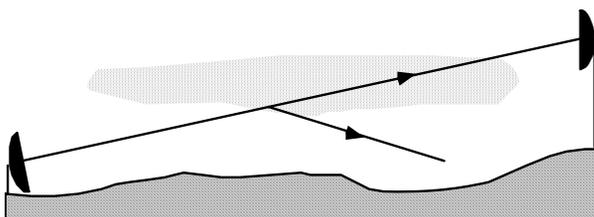
affievolimenti di tipo  $k$  (spuntamento)



affievolimenti da riflessione sul suolo

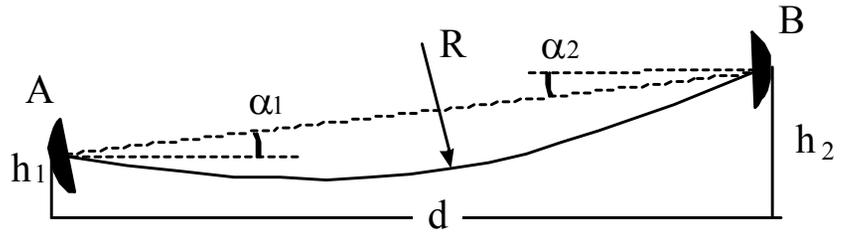


affievolimenti per defocalizzazione



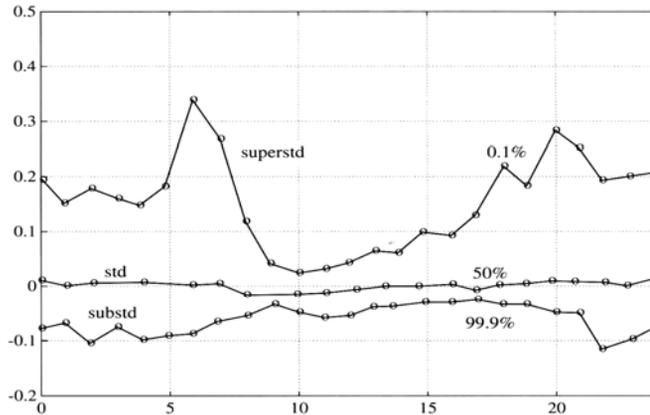
affievolimenti per strato riflettente

# affievolimenti tipo $k$



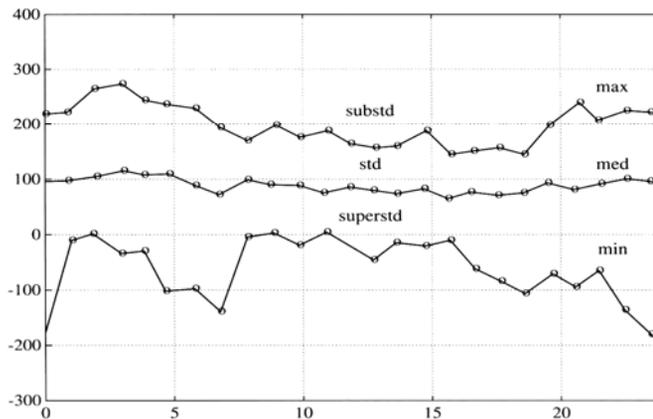
$$\alpha_{1,2} = -\frac{d}{2} \frac{\partial M}{\partial h} 10^{-6} \pm \frac{h_2 - h_1}{d}$$

variazione dell'angolo d'incidenza



ora del giorno

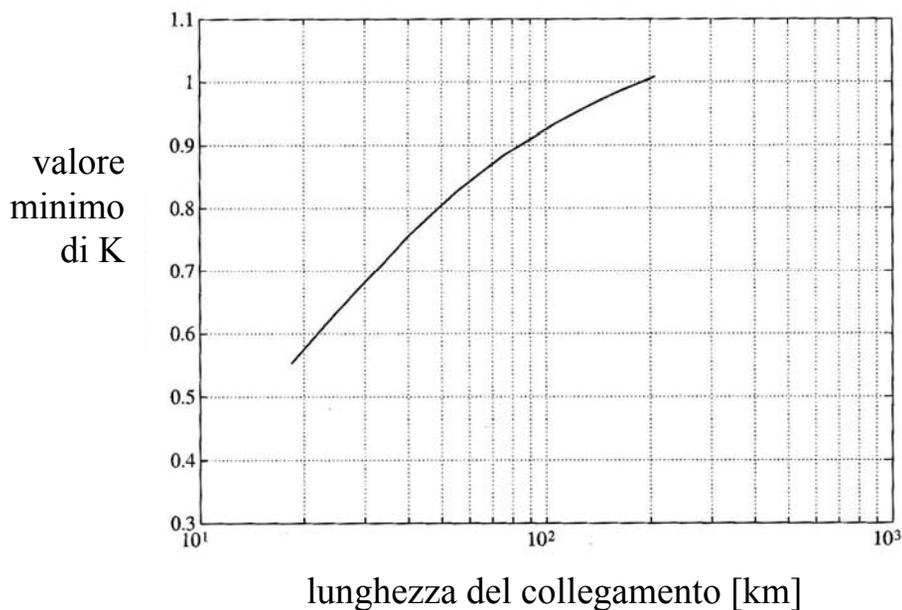
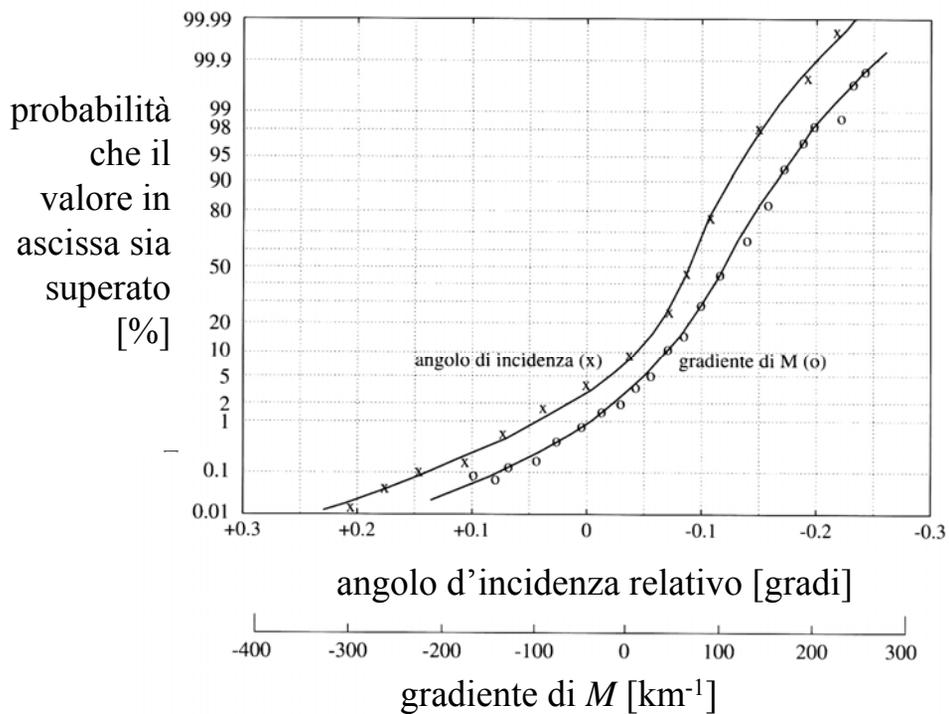
$dM / dh$  [km<sup>-1</sup>]



ora del giorno

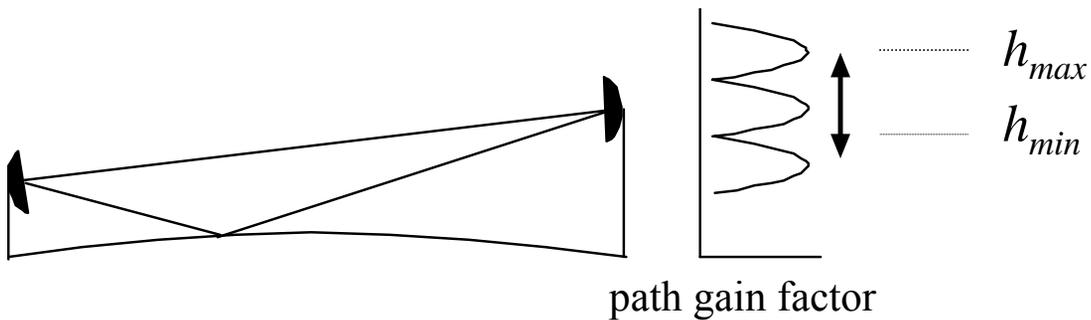
valori sperimentali:  $f = 11$  GHz,  $d = 29$  km

# distribuzioni statistiche



valori sperimentali:  $f = 11$  GHz,  $d = 29$  km

# affievolimenti da riflessione

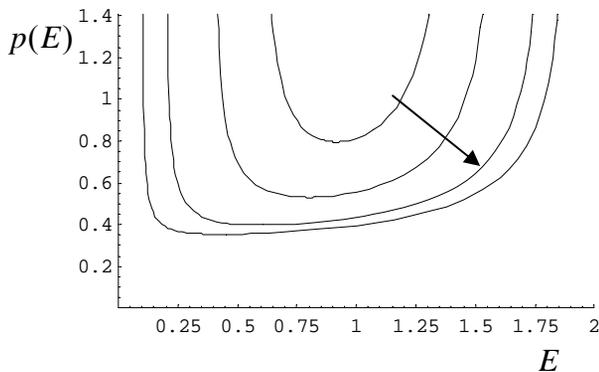


$$E e^{j\psi} = A + B e^{j\varphi}$$

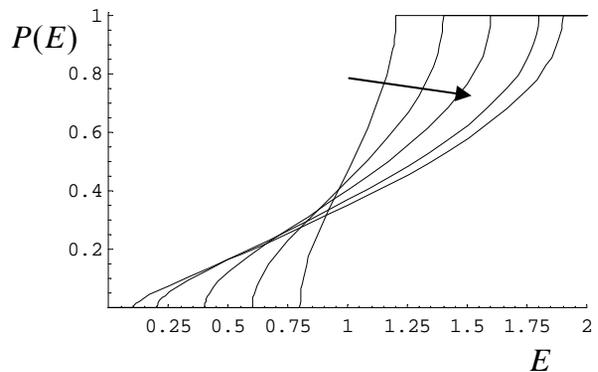
$$E = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos \varphi}$$

A e B praticamente costanti,  
 $\varphi$  variabile casuale con  
 distribuzione di probabilità  
 uniforme

$$p(E) = \frac{2E}{\pi \sqrt{(E^2 - (A-B)^2)((A+B)^2 - E^2)}} \quad (|A-B| < E < A+B)$$

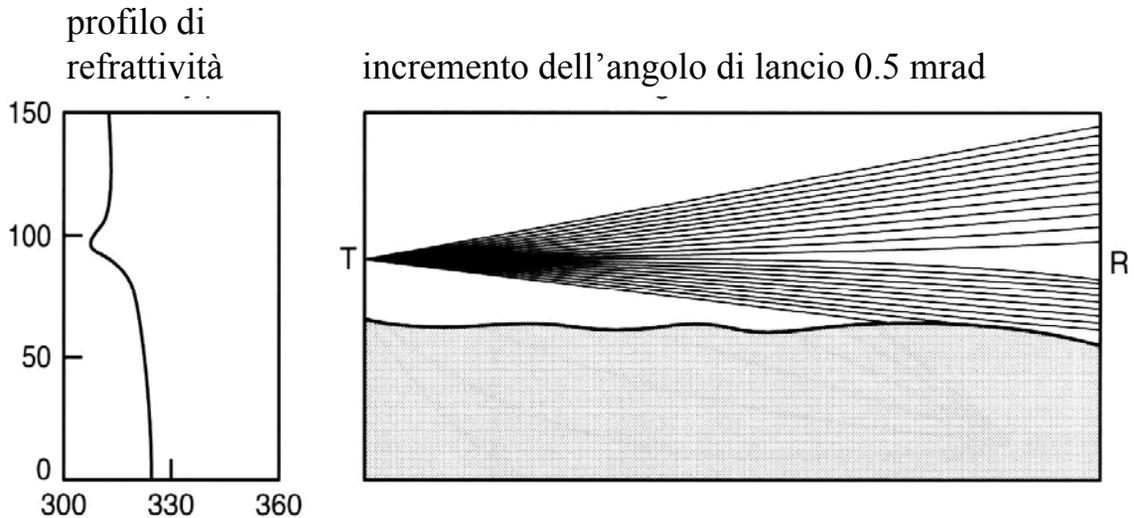


$A = 1, B = 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$



→ B crescente

## affievolimenti per defocalizzazione



## affievolimenti per strato riflettente

nelle stesse condizioni di profilo di refrattività, se l'angolo d'incidenza supera l'angolo limite si possono avere riflessioni quasi totali con attenuazioni supplementari estremamente elevate ma molto rare

## caratteristiche statistiche degli affievolimenti lenti distribuzione log-normale

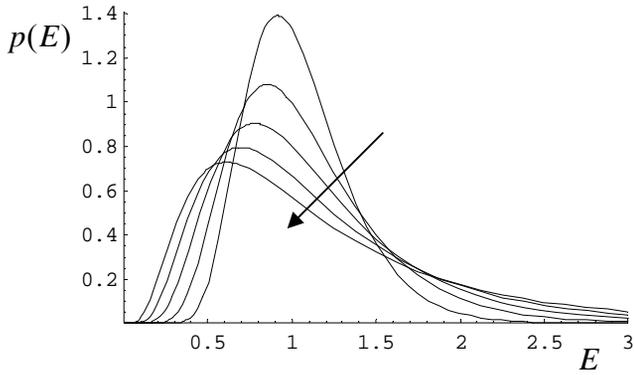
$$p(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{(\ln E - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{densità di probabilità}$$

$$P(E) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(-\frac{\ln E - \mu}{\sqrt{2} \sigma}\right) \quad \text{distribuzione cumulativa}$$

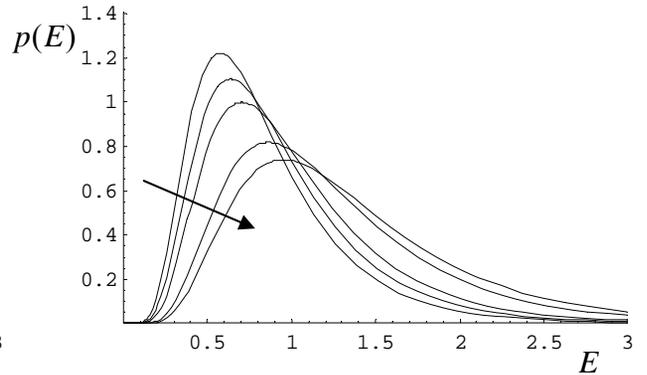
$\sigma$  e  $\mu$  sono il valore medio (= valore mediano)  
e la varianza della variabile  $\ln E$

$\langle E \rangle$	$= e^{\mu + \sigma^2/2}$	valore medio
$E_{med}$	$= e^{\mu}$	valore mediano
$E_{mod}$	$= e^{\mu - \sigma^2}$	moda
$\langle E^2 \rangle$	$= e^{2\mu + 2\sigma^2}$	valore medio del quadrato
$\sqrt{\langle E^2 \rangle}$	$= \sqrt{e^{2\mu + 2\sigma^2}}$	valore quadratico medio
$\langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle$	$= e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$	varianza

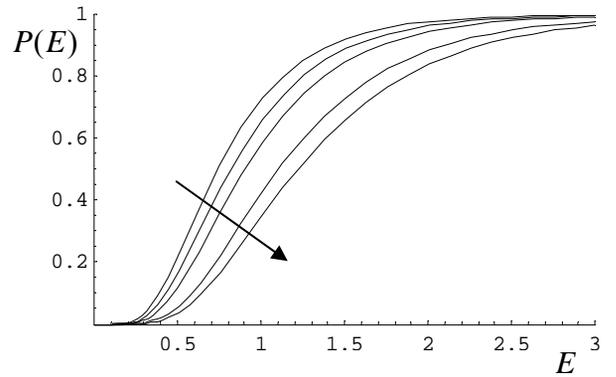
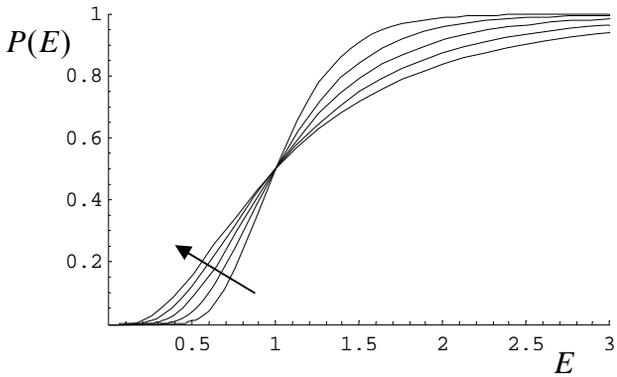
# esempi di distribuzione log-normale



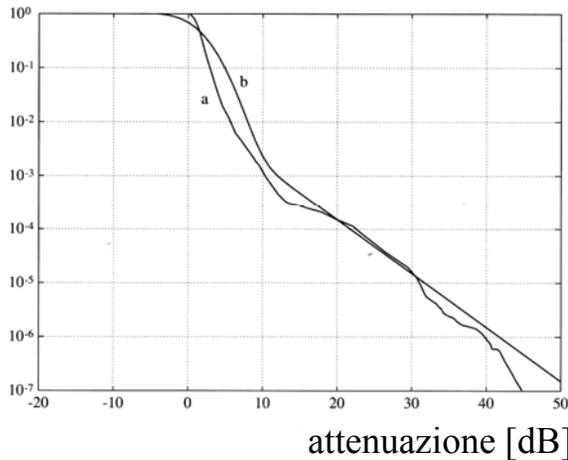
$\mu = 0$   
 $\sigma = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$



$\sigma = 0.5$   
 $\mu = -0.3, -0.2, -0.1, 0.1, 0.2$



probabilità  
 che il  
 valore in  
 ascissa sia  
 superato

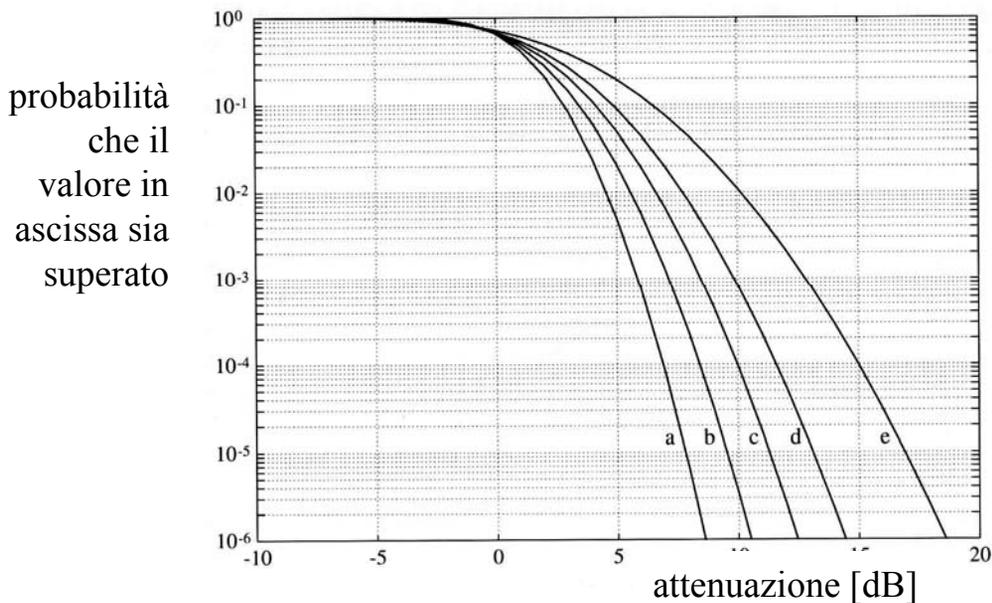


# caratteristiche statistiche degli affievolimenti lenti

## determinazione empirica dei parametri di distribuzione

$$\begin{cases} \mu = -4.18110^{-2} e^{2.14410^{-2} d} \\ \sigma = 6.67410^{-2} + 4.18310^{-3} d \end{cases} \quad d < 100 \text{ km}$$

$$\begin{cases} \mu = -4.02910^{-2} - 3.97710^{-3} d \\ \sigma = 3.05110^{-1} + 1.78510^{-3} d \end{cases} \quad d \geq 100 \text{ km}$$



distribuzione cumulativa dell'attenuazione dovuta a fenomeni lenti per lunghezze di tratta di a) 30, b) 40, c) 50, d) 60 e e) 80 km.

## **caratteristiche statistiche complessive degli affievolimenti**

si assume:

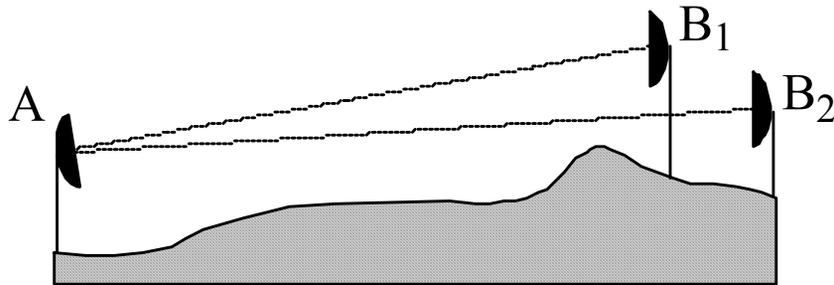
che sovrapposto ad un fenomeno di tipo lento ci sia un fenomeno a tempi brevi con una determinata probabilità, dipendente dalle condizioni ambientali; che gli affievolimenti a breve e lungo termine siano statisticamente indipendenti;

la variabile (normalizzata) che descrive il fenomeno complessivo è il prodotto delle variabili che descrivono gli affievolimenti nelle due diverse scale di tempo

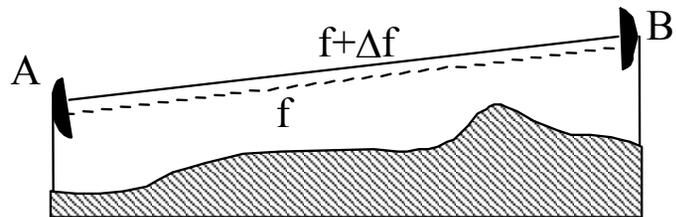
la densità di probabilità del fenomeno complessivo è data dalla somma di due termini, uno tipo Rayleigh che tiene conto dei fenomeni a tempi brevi, uno log-normale che tiene conto dei fenomeni a tempi lunghi;

i parametri che intervengono nelle densità di probabilità vengono definiti per via empirica

## Criteri per ovviare agli effetti degli affievolimenti: tecniche di diversità



diversità di spazio



diversità di frequenza

diversità di polarizzazione  
diversità di angolo  
diversità di tempo  
diversità di campo

tecnica di commutazione  
tecnica di combinazione

## affievolimenti lenti: contromisure

- accurata progettazione
- prevenzione delle attenuazioni per ostruzione (in caso di condizioni di sub-rifrazione spinta)
- uso di antenne non eccessivamente direttive
- uso di margini di potenza opportuni

$$\Delta h = \frac{\lambda d}{4 h_1}$$

$$\Delta f = \pm \frac{c d}{4 h_1 h_2}$$

incrementi di altezza e  
frequenza per passare da  
una condizione di minimo  
ad una di massimo

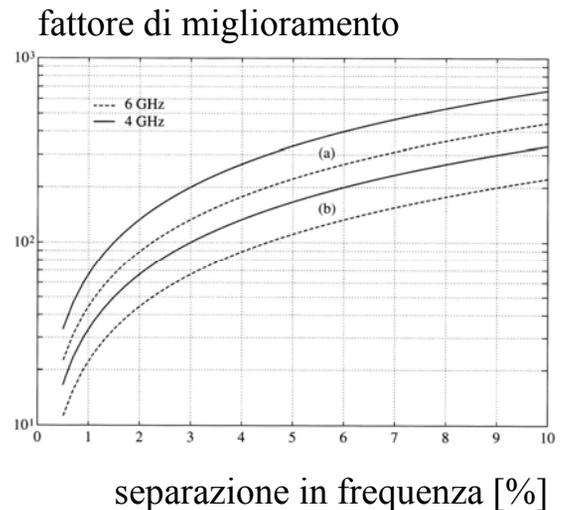
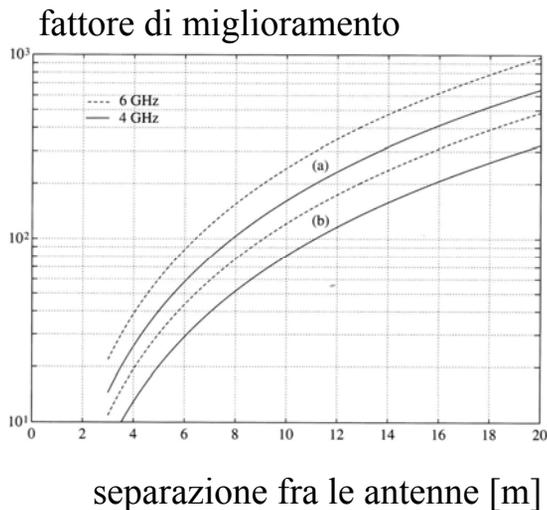
## affievolimenti rapidi: contromisure

- collegamenti in diversità

$$|k_s| = 1 - \frac{1}{2.75} \frac{(\Delta h)^2}{\lambda d}$$

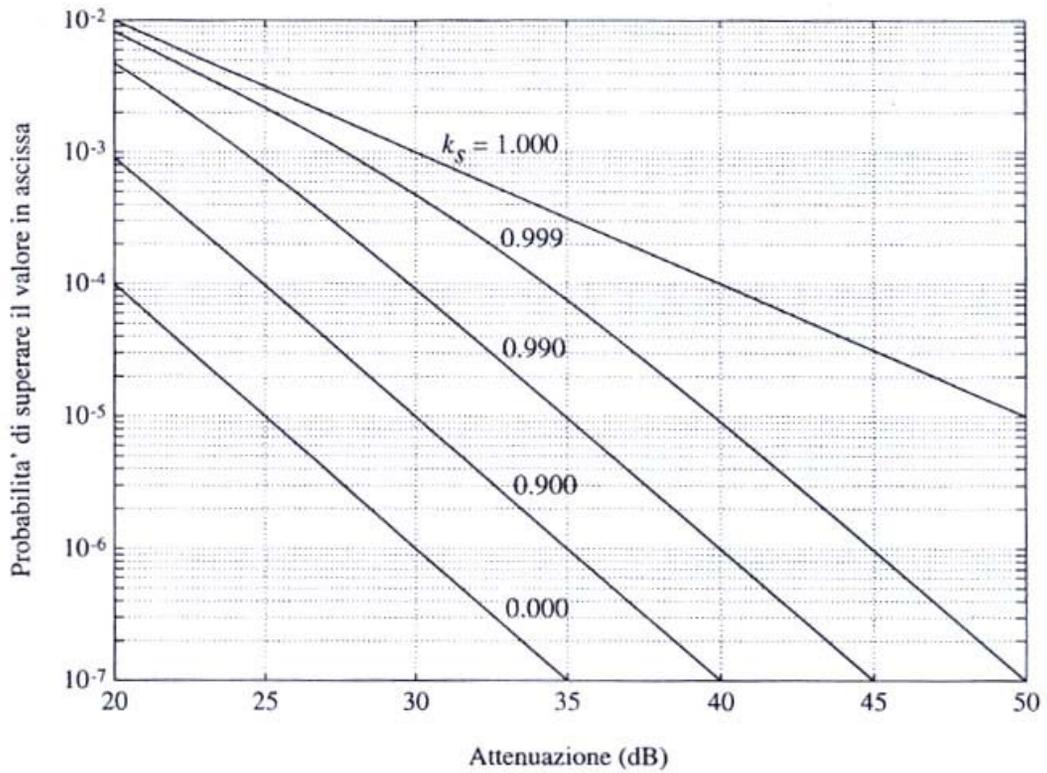
$$|k_f| = 1 - \frac{80 \Delta f / f}{f_{[\text{GHz}]} d_{[\text{km}]}}$$

relazioni empiriche tra i coefficienti di correlazione spaziale e in frequenza con le separazioni in altezza e in frequenza dei due canali in diversità



i fattori di miglioramento con la diversità sono il rapporto tra le probabilità che un livello di attenuazione sia superato con e senza l'adozione della diversità

## Probabilità cumulativa teorica nel caso di sistema in diversità, al variare del coefficiente di correlazione $k_s$



# Riduzione dell'intensità delle evanescenze mediante sistemi in diversità di spazio

