

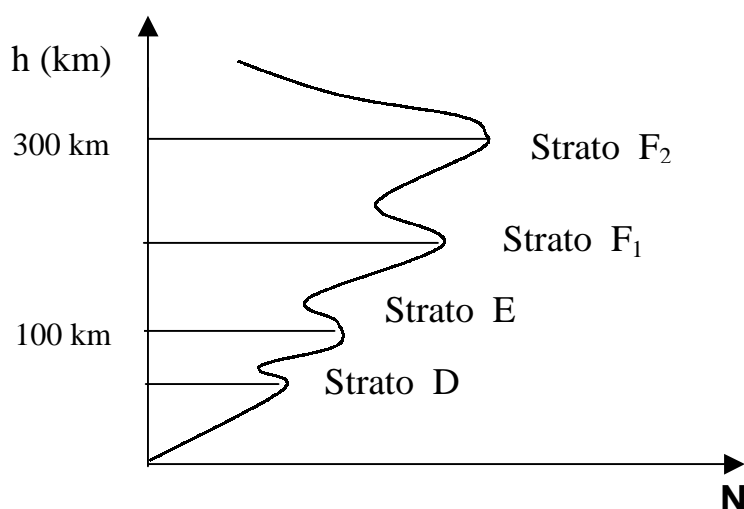
## PROPAGAZIONE DELLE ONDE RADIO

Le onde radio possono propagarsi in vari modi i principali sono

### Onda ionosferica (Sky wave)

Il campo elettromagnetico raggiunge l'antenna ricevente grazie alla riflessione su strati ionizzati posti tra 80 e 300 km, che riflettono l'onda verso il terreno.

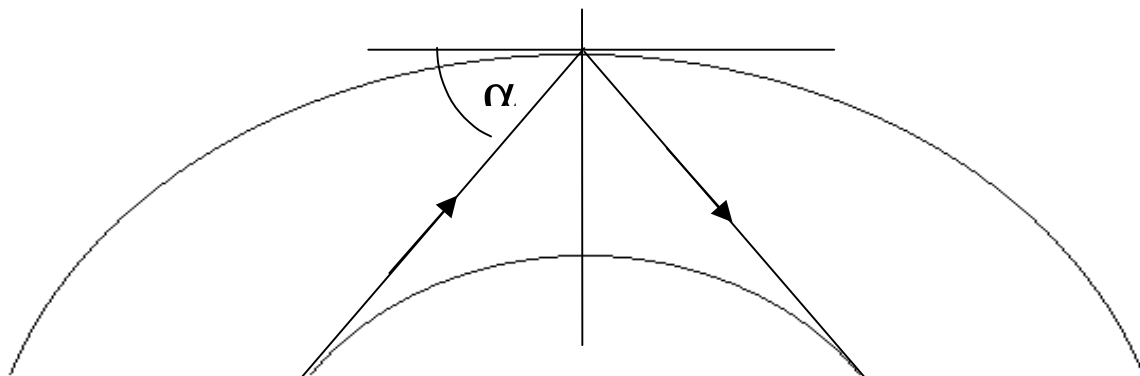
Un'onda che si propaga verso gli alti strati dell'atmosfera incontra degli strati a forte intensità di ionizzazione N (numero di cariche libere per unità di volume) che subiscono variazioni tra giorno (Fig) e notte (solo Fe E) ed al variare delle stagioni.



Si ha un incurvamento delle traiettorie e si può ottenere una riflessione totale.

Per ogni condizione di ionizzazione atmosferica (strato N) e per una certa  $f$  esiste un angolo  $\alpha_0$  tale che per  $\alpha < \alpha_0$  si ha riflessione totale.

Viceversa fissato un angolo che corrisponde ad un'irradiazione tangente alla superficie terrestre si ha una frequenza massima per cui si ha riflessione. Tale valore si aggira sui 30 MHz.



## **Onda di terra (Ground wave)**

Il campo è guidato prevalentemente dalla discontinuità suolo aria.

L'onda di terra viene indebolita per effetto dell'energia assorbita dal terreno solo in parte compensata dalla diffrazione verso terra di una parte dell'onda che non viaggia a contatto del terreno del terreno

Questo tipo di collegamento ha interesse alle frequenze più basse per radiodiffusione circolare(onde medie) e radioaiuti alla navigazione.

Si usa la polarizzazione verticale

## **Onda spaziale o troposferica**

Il campo si propaga attraverso la troposfera. Il campo ricevuto consiste di almeno due componenti: una componente che corrisponde ad un'onda diretta e una che corrisponde alla riflessione da parte della superficie terrestre. L'onda spaziale può giungere al ricevitore anche per riflessione e rifrazione per variazione delle caratteristiche elettriche della troposfera e per diffrazione.

Il modello di canale fa riferimento alla presenza di un'onda diretta e una riflessa su suolo buon conduttore.

Onda diretta:

In base alla formula di trasmissione la densità di potenza ricevuta in un punto P a distanza  $d_r$  da un'antenna con guadagno  $G_T$  che trasmette una potenza  $P_T$

$$S_R = \frac{G_T P_T}{4\pi d_r^2} = \frac{|E_0|^2}{2\eta}$$

Dalla quale si può ricavare  $E_0$

## GAMME DI FREQUENZA PER LE COMUNICAZIONI RADIO

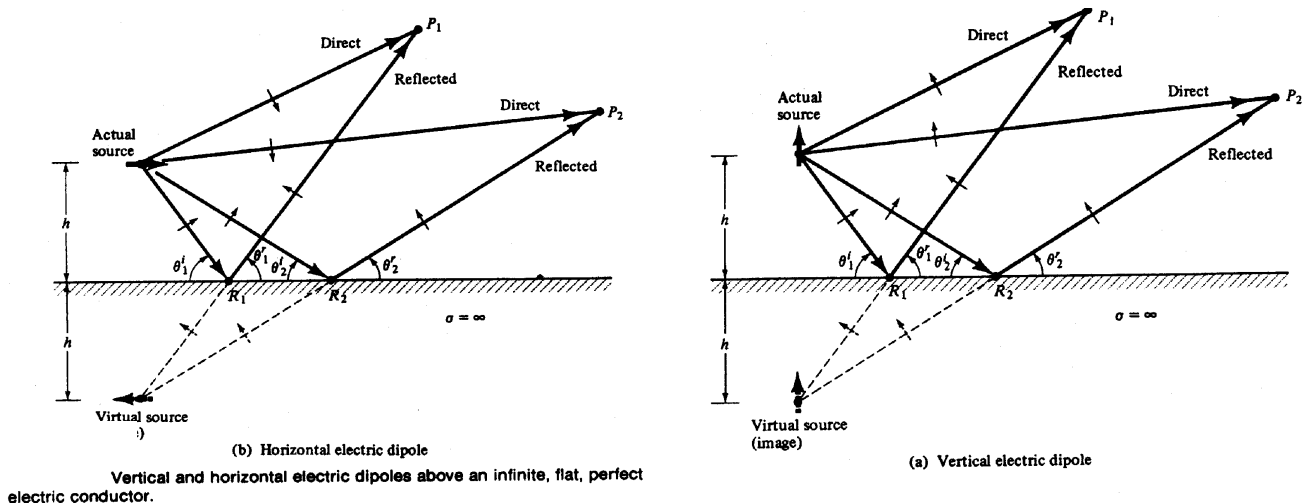
FREQUENZE	$\lambda$	ONDA DIRETTA	ONDA DI SUOLO	ONDA RIFLESSA	ONDA DIFFRATTA	ONDA DI CIELO	DIFFUSIONE IONOSFERICA	DIFFUSIONE TROPOSPERICA	PERCORSI MULTIPLI	ASSORBIMENTI
< 30 KHz VLF	> 10 Km		si			si				
30 KHz - 300 KHz LF (LUNGHE)	1 ÷ 10 Km		si			si				
300 KHz - 3 MHz MF (MEDIE)	0,1 ÷ 1 Km		si			si			INTERFERENZA CON ONDA DI CIELO	
3 MHz - 30 MHz HF (CORTE)	10 ÷ 100 m		si FINO POCHI KM			si			NELLA IONOSPHERA	NELLA IONOSPHERA
30 MHz - 300 MHz VHF	1 ÷ 10 m	si		si	si		si (30 ÷ 60 MHz)	si	RIFLESSIONE SU OSTACOLI EDIFICI ECC.	DA OSTACOLI
0,3 GHz - 3 GHz UHF	0,1 ÷ 1 m	si		si	si			si	NELLA TROPOSPHERA E CONDOTTI	DA OSTACOLI
3 GHz - 30 GHz EHF	1 ÷ 10 cm	si		si sul mare					NELLA TROPOSPHERA E CONDOTTI	DA OSTACOLI E ATMOSFERICI

## SUOLO PERFETTAMENTE CONDUTTORE E PIANO

Si tiene conto della presenza del suolo mediante la teoria delle immagini che rappresenta un caso particolare del teorema di equivalenza.

Secondo questo procedimento si sostituisce il piano perfetto conduttore con una distribuzione di correnti equivalenti tali da annullare le componenti tangenziali di  $E$  e quelle normali di  $H$ .

Per far questo si prendono le immagini delle correnti reali cioè alla stessa distanza dal piano conduttore (ora rimosso) e con la stessa direzione della corrente reale se essa è ortogonale al piano; stessa distanza e direzione opposta se la corrente reale era parallela al piano (Polarizzazioni verticali e orizzontali delle antenne).

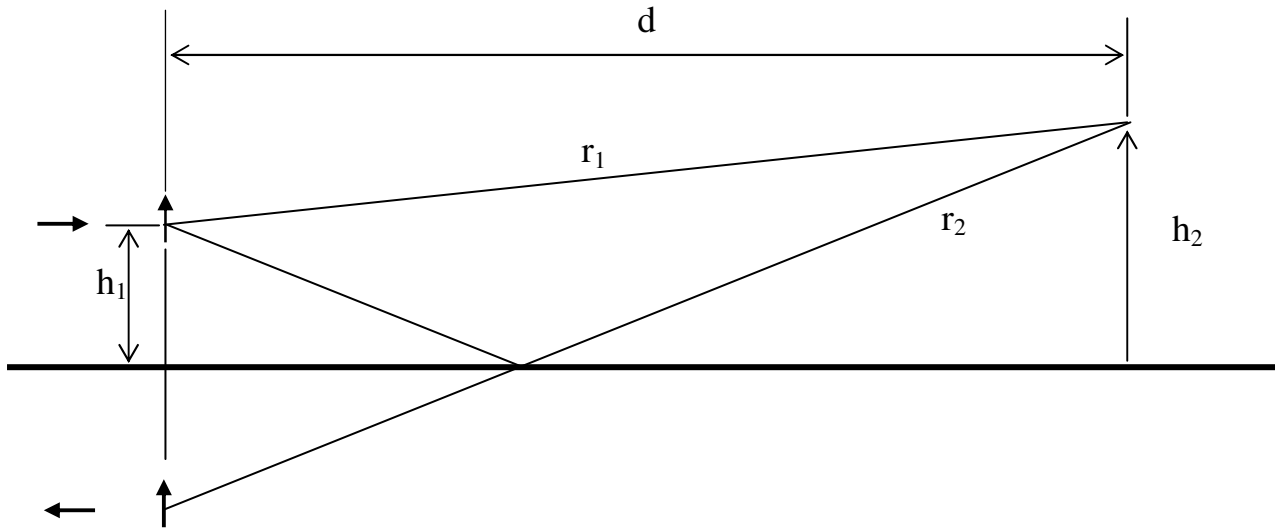


La trattazione viene facilitata quando le antenne sono abbastanza direttive ed elevate sul suolo, in buona visibilità e quindi abbastanza vicine, ma a distanza tale da considerare la condizione di campo lontano, e le frequenze sufficientemente elevate (VHF almeno).

In questo caso si possono adottare i metodi dell'ottica geometrica per cui si possono considerare le onde localmente piane o almeno con raggi di curvatura del fronte d'onda molto grandi rispetto a  $\lambda$ )

All'antenna ricevente arriva un raggio diretto che la collega all'antenna trasmittente e un raggio riflesso dal suolo che si può immaginare provenga dall'antenna immagine.

## Modello di collegamento in presenza del suolo



### Antenne su piano perfetto conduttore

Il campo ricevuto è la somma del campo diretto e del campo riflesso

In base ai teoremi di equivalenza detto  $E_0$  il campo che sarebbe ricevuto nello spazio libero

Il campo totale ricevuto è la somma di  $E_0$  e di quello generato dall'immagine della sorgente (equivalente a quello riflesso dal piano conduttore perfetto)

$$\bar{E}_R = \bar{E}_0 + \Gamma \bar{E}_0 e^{-j \Delta\phi} = \bar{E}_0 + \bar{E}_0 |\Gamma| e^{j\phi} e^{-j \Delta\phi}$$

$\Delta\phi$  è l'angolo dovuto alla differenza di percorso  $r_2 - r_1$

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1)$$

$$\left. \begin{aligned} r_2 &= \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2} \cong d + \frac{1}{2} \frac{(h_1 + h_2)^2}{d} \\ r_1 &= \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + d^2} \cong d + \frac{1}{2} \frac{(h_2 - h_1)^2}{d} \end{aligned} \right\} r_2 - r_1 = \frac{2h_1 h_2}{d}$$

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_1 h_2}{d} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{d}$$

Il coefficiente di riflessione  $\Gamma$  ha

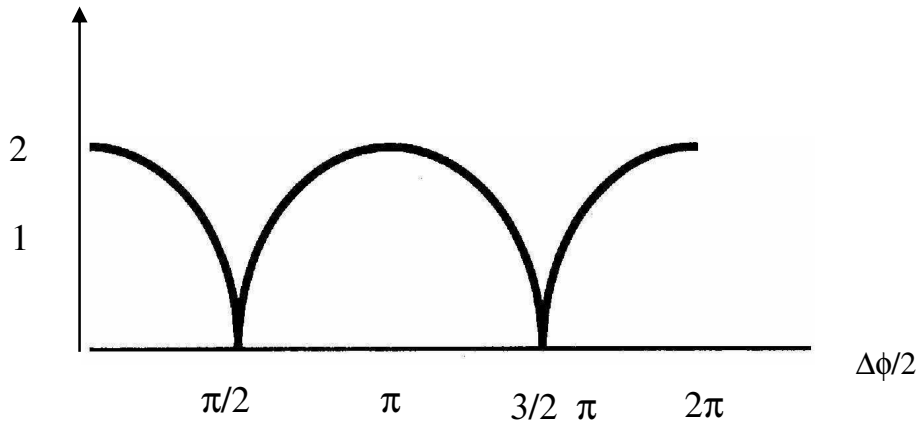
$|\Gamma| = 1$  e  $\phi = 0$  Polarizzazione verticale

$\phi = \pi$  Polarizzazione orizzontale

$\phi = 0$  Polarizzazione verticale

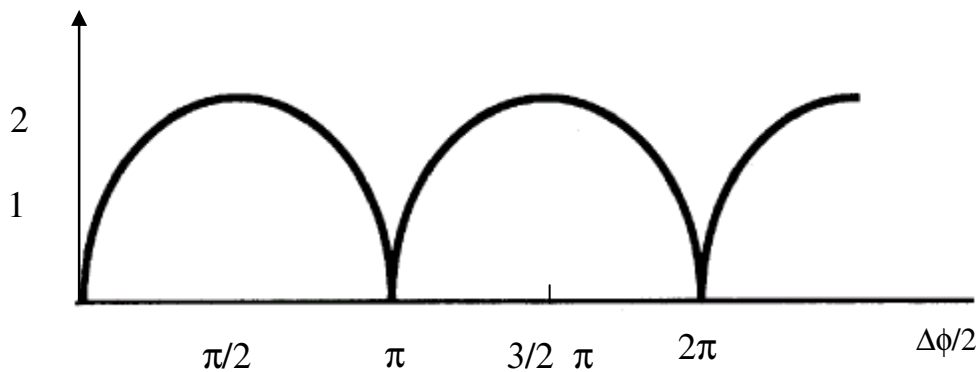
$$\frac{\bar{E}_R}{\bar{E}_o} = \left| 1 + e^{-j \Delta \phi} \right| = \sqrt{(1 + \cos \Delta \phi)^2 + (\sin \Delta \phi)^2} = \sqrt{2(1 + \cos \Delta \phi)} = 2 \left| \cos \frac{\Delta \phi}{2} \right|$$

per  $\frac{\Delta \phi}{2} \rightarrow 0 \quad |\bar{E}| \rightarrow 2|\bar{E}_o|$



$\varphi = \pi$  Polarizzazione orizzontale

$$\left| \frac{\bar{E}_R}{\bar{E}_o} \right| = \left| 1 - e^{-j \Delta \phi} \right| = \sqrt{(1 - \cos \Delta \phi)^2 + (\sin \Delta \phi)^2} = \sqrt{2(1 - \cos \Delta \phi)} = 2 \left| \sin \frac{\Delta \phi}{2} \right|$$

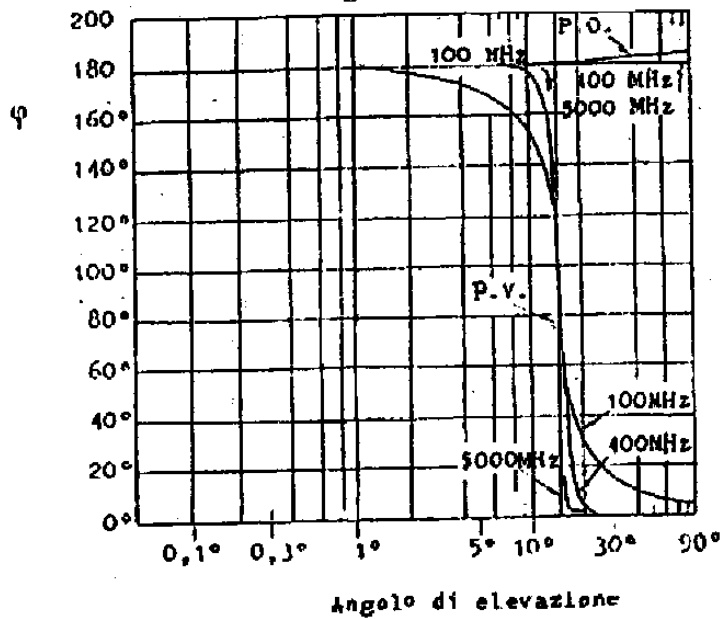
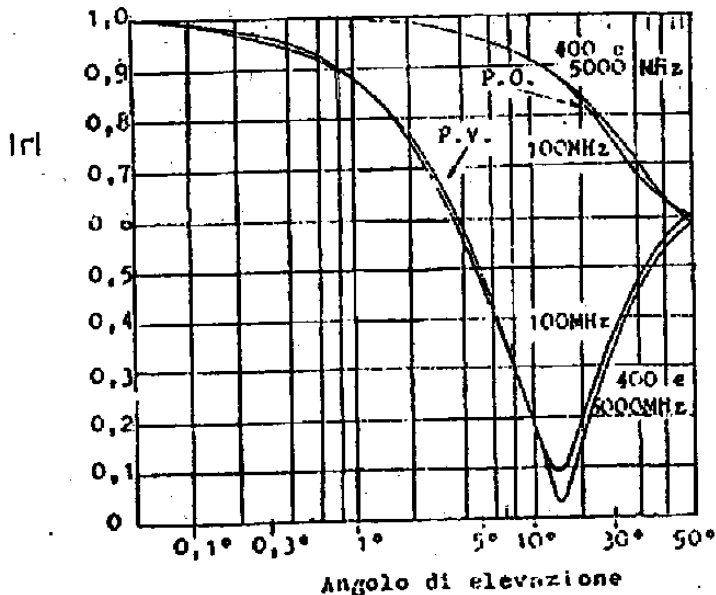


Quando  $d$  è grande rispetto a  $h_1$  e  $h_2$

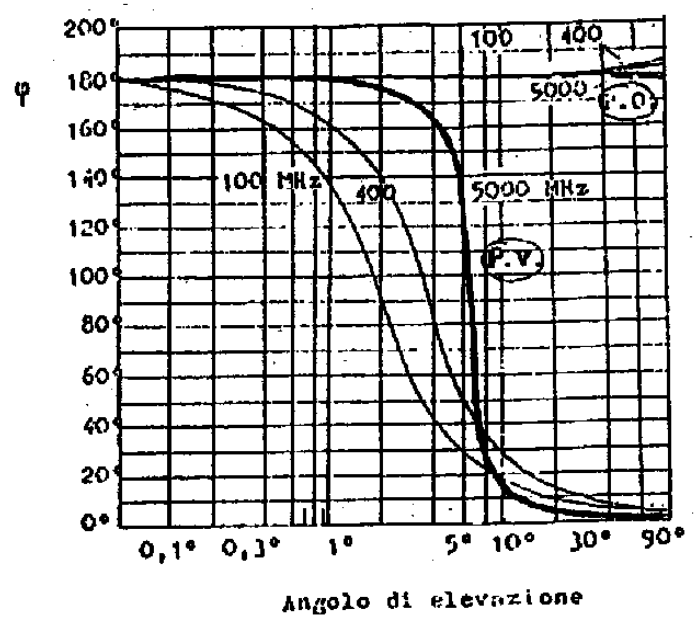
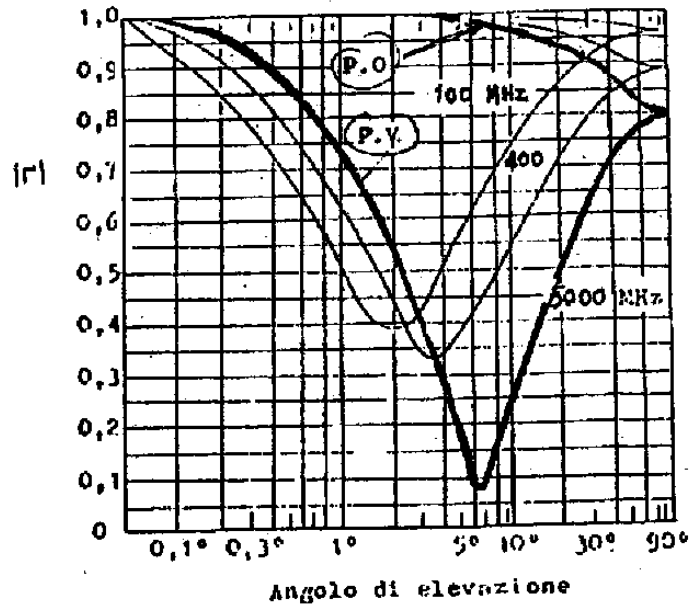
$$\sin \frac{\Delta \phi}{2} \Rightarrow \frac{\Delta \phi}{2}$$

L'attenuazione supplementare

$$\left| \frac{\bar{E}_o}{\bar{E}_R} \right|^2 = L_s = \left( \frac{\lambda d}{4\pi h_1 h_2} \right)^2$$

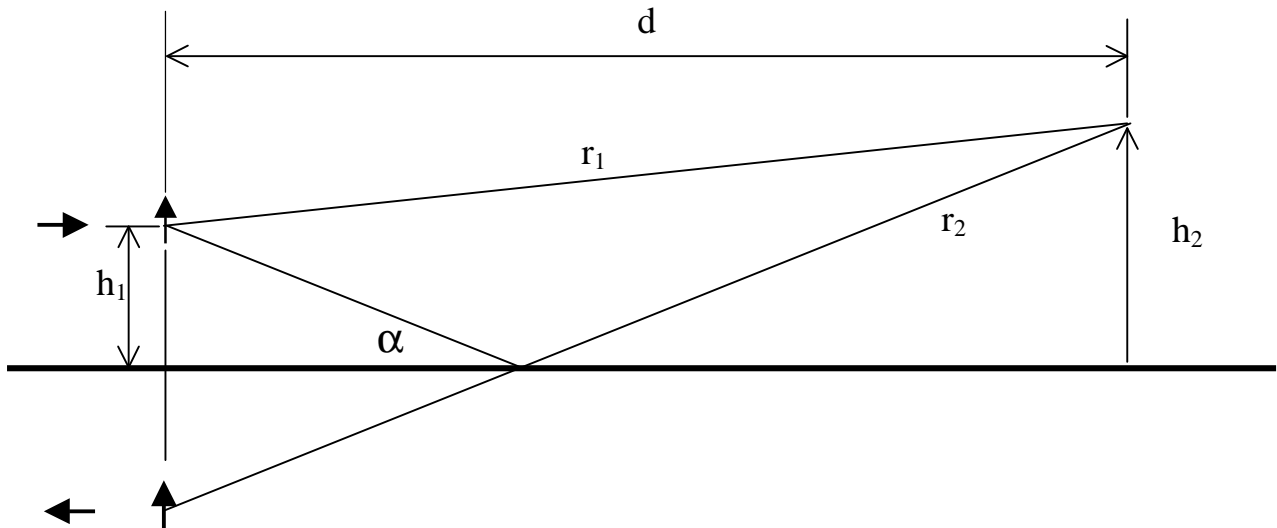


Modulo e fase del coefficiente di riflessione su terreno medio.



Modulo e fase del coefficiente di riflessione dell'acqua marina.

## MODELLO DI COLLEGAMENTO IN PRESENZA DI SUOLO BUON CONDUTTORE



Il campo ricevuto è la somma del **campo diretto** e del **campo riflesso**

In base ai teoremi di equivalenza detto  $E_o$  il campo che sarebbe ricevuto nello spazio libero

Il campo totale ricevuto è la somma di  $E_o$  e di quello generato dall'immagine della sorgente (equivalente a quello riflesso dal piano conduttore perfetto)

$$\bar{E}_R = \bar{E}_o + \Gamma \bar{E}_o e^{-j \Delta\phi} = \bar{E}_o + \bar{E}_o |\Gamma| e^{j \phi} e^{-j \Delta\phi}$$

$\Delta\phi$  è l'angolo dovuto alla differenza di percorso  $r_2 - r_1$

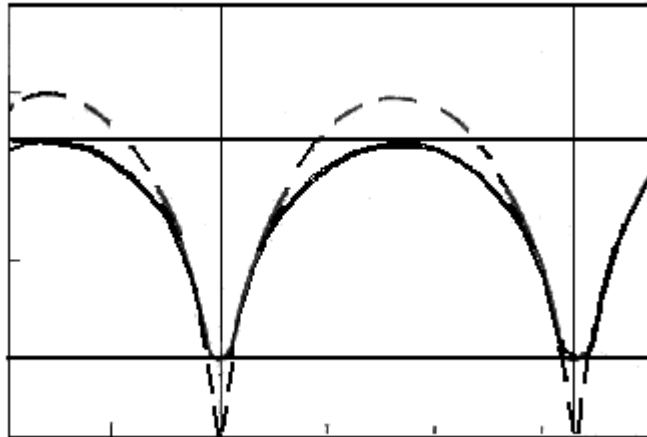
$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1)$$

$$\left. \begin{aligned} r_2 &= \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2} \cong d + \frac{1}{2} \frac{(h_1 + h_2)^2}{d} \\ r_1 &= \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + d^2} \cong d + \frac{1}{2} \frac{(h_2 - h_1)^2}{d} \end{aligned} \right\} r_2 - r_1 = \frac{2h_1 h_2}{d}$$

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_1 h_2}{d} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{d}$$



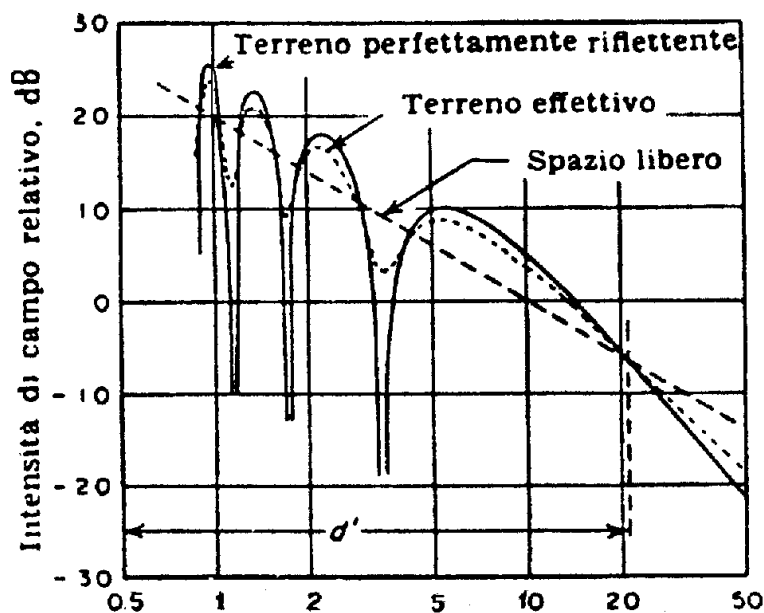
$$\left| \frac{\bar{E}_R}{\bar{E}_0} \right|$$



$$\Delta\Phi - \phi$$

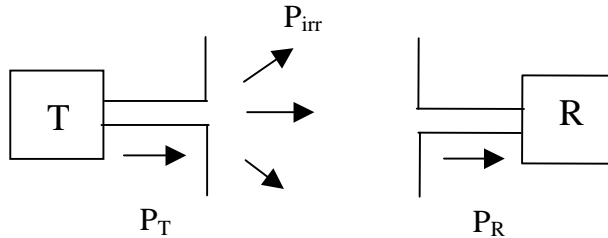
$$\begin{aligned} \left| \frac{\bar{E}_R}{\bar{E}_0} \right| &= \left| 1 + |\Gamma| e^{j \arg \Gamma} e^{-j \Delta\phi} \right| = \sqrt{(1 + |\Gamma| \cos(\Delta\phi - \phi))^2 + |\Gamma|^2 (\sin \Delta\phi - \phi)^2} = \\ &= \sqrt{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos(\Delta\phi - \phi)} \end{aligned}$$

Per piccoli valori di  $\alpha$  polarizzazione orizzontale e verticale hanno  $|\Gamma| = 1$  e  $\arg \Gamma = \pi$ . Altrimenti vanno dedotti da apposite tabelle o grafici. Andamento effettivo in funzione della distanza



## POTENZA TRASMESSA E POTENZA IRRADIATA

Le antenne sono elementi di adattamento fra trasmettitore e mezzo radio  
Alimentate con il segnale da trasmettere diventano sorgenti di campo  
elettromagnetico.



$$P_{irr} = \int_S \frac{\bar{\mathbf{E}} \wedge \bar{\mathbf{H}}^*}{2} \times \hat{\mathbf{r}} dS = \int_S p dS = \int_S p r^2 d\Omega$$

$p$  è la densità di potenza

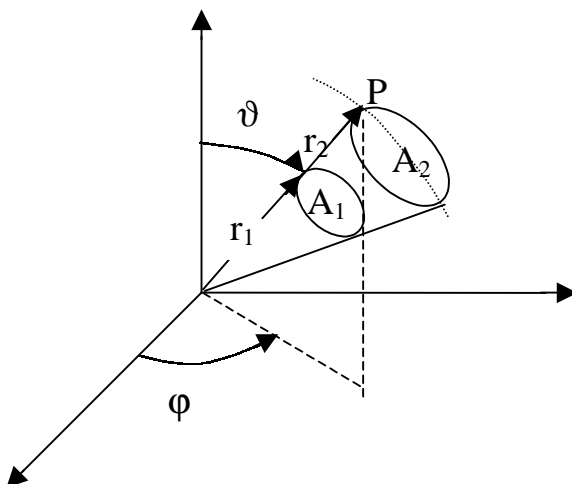
$$p = \frac{|\bar{\mathbf{E}}|^2}{2\eta} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Si definisce anche

$$I_r(\vartheta, \varphi) = \text{Intensità di radiazione in } \frac{\text{Watt}}{\text{Steradiane}}$$

$$p r^2 = \frac{|\bar{\mathbf{E}}|^2}{2\eta} r^2 = I_r(\vartheta, \varphi)$$

Lo steradianne è l'angolo solido per cui  $A = r^2$

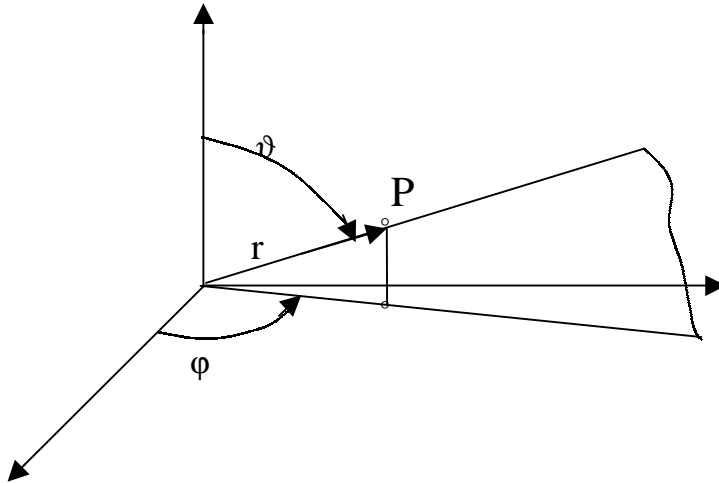


$$\frac{A_1}{r_1^2} = \frac{A_2}{r_2^2}$$

## GUADAGNO DI DIRETTIVITA'

In P si vuole ottenere una intensità di radiazione  $I_r$

Per rappresentare la funzione di radiazione e i guadagni nelle diverse direzioni si usa un sistema di coordinate sferiche



Si dice guadagno di direttività nella direzione  $\vartheta, \varphi$

$$D(\vartheta, \varphi) = \frac{P_o(\vartheta, \varphi)}{P_{irr}}$$

$P_o$  è la potenza irradiata da un radiatore isotropo per ottenere in P  $I_r$

$$D(\vartheta, \varphi) = \frac{4\pi}{\int I_r(\vartheta, \varphi) d\Omega} \frac{I_r(\vartheta, \varphi)}{I_{rMAX}} = D_{MAX} f^2(\vartheta, \varphi)$$

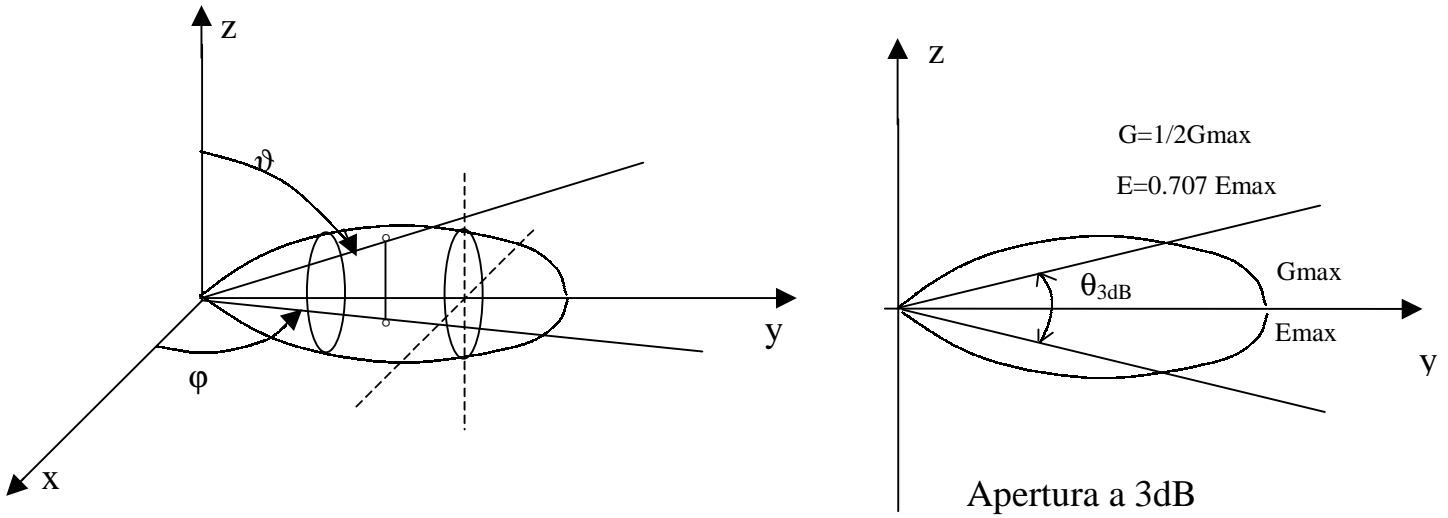
Si definisce GUADAGNO DI POTENZA

$$G(\vartheta, \varphi) = \frac{P_o(\vartheta, \varphi)}{P_T} \frac{P_{irr}}{P_{irr}} = \eta D(\vartheta, \varphi)$$

$$\eta = \frac{P_{irr}}{P_T} = \frac{P_{irr}}{P_{irr} + P_j} \quad \text{è il rendimento dell'antenna}$$

$P_j$  sono le perdite per effetto Joule

## SUPERFICI E DIAGRAMMI DI RADIAZIONE



Si definisce **funzione di radiazione**

$$f(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{I_r(\vartheta, \varphi)}{I_{r \max}}} = \frac{|\bar{E}(\vartheta, \varphi)|}{|\bar{E}|_{\max}}$$

Nel riferimento con origine sull'antenna il luogo dei punti rappresentato dall'equazione

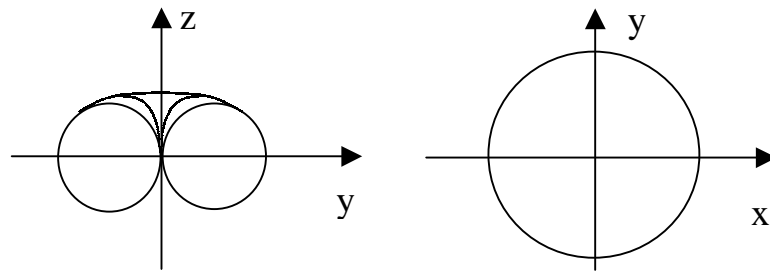
$r = f(\vartheta, \varphi)$  si dice **SUPERFICIE DI RADIAZIONE**

Si dice **DIAGRAMMA DI RADIAZIONE**

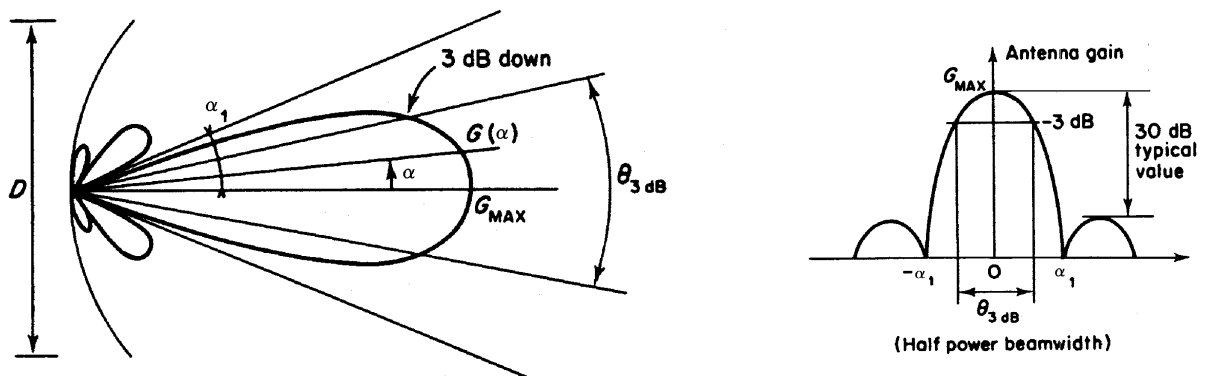
l'intersezione di questa superficie con piani passanti per l'origine

Per un dipolo elementare ( $I = \cos \vartheta$ )

$$f(\vartheta, \varphi) = \sin \vartheta$$

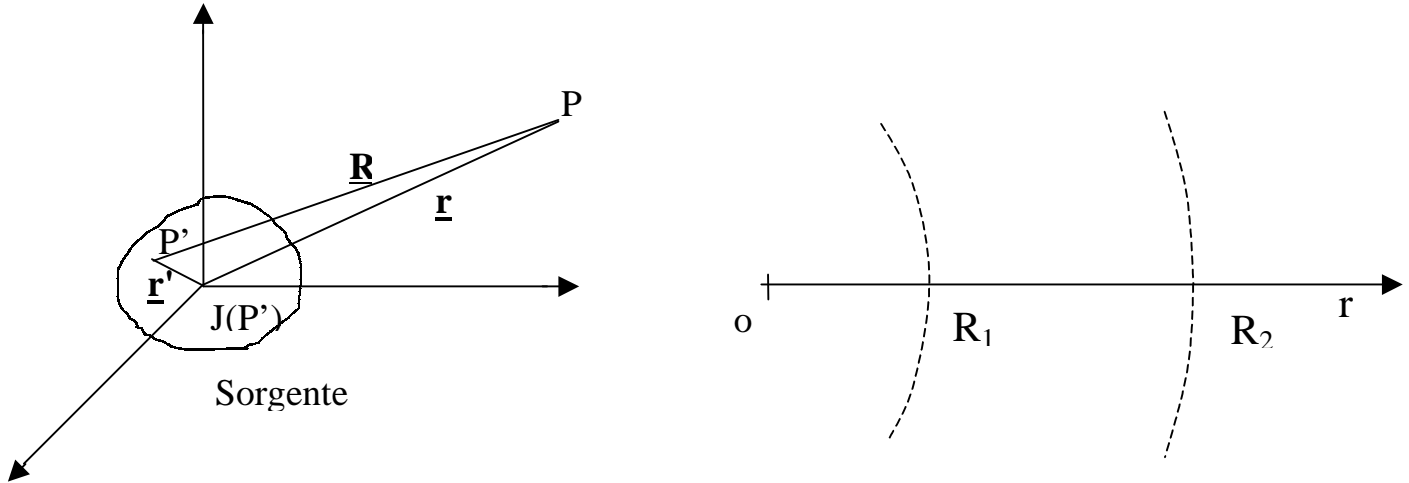


Si possono dare rappresentazioni polari o cartesiane



## CAMPO DI UNA SORGENTE

Un volume che racchiude le sorgenti (rappresentate mediante una densità di corrente  $J(P')$ ) sostiene nella regione circostante un campo elettromagnetico



Il campo prodotto da una sorgente si distingue in: reattivo e radiativo.

Il campo reattivo è caratterizzato da un'energia che viene scambiata fra la sorgente e l'ambiente circostante; tale campo è significativo in una regione prossima alla sorgente.

La dizione "campo radiativo" si riferisce al caso in cui il campo è caratterizzato da un'energia che si propaga nello spazio circostante allontanandosi dalla sorgente.

Si distingue una zona di campo vicino (zona di Fresnel) da una di campo lontano (zona di Fraunhofer) poiché nella prima, l'andamento del campo è molto complesso a causa delle forti differenze di fasi nei diversi punti e, inoltre, ai campi radiati si sommano i campi reattivi, che diventano prevalenti avvicinandosi alla sorgente.

Nella seconda zona il campo si può studiare il campo formulando l'ipotesi di campo lontano cioè come un'onda localmente piana.

Lo spazio attorno a un'antenna può essere diviso in tre regioni

- |  |  |   |
|--|--|---|
| Se $0 < r < R_1$                           |  | Reactive near field                     |
| Se $R_1 < r < R_2 = 2 \frac{D^2}{\lambda}$ |  | Radiating near field (Fresnel region)   |
| Se $r > R_2$                               |  | Radiating Far field (Fraunhofer Region) |

$D$  è la dimensione massima che caratterizza l'antenna

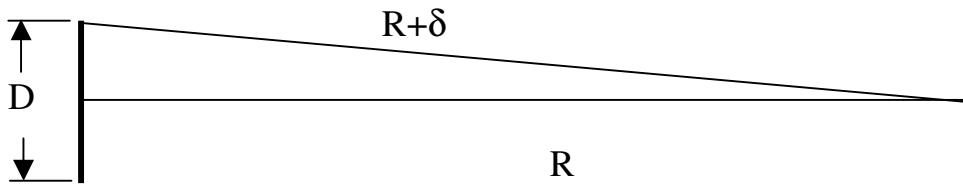
L'onda elettromagnetica a grande distanza (grande rispetto alla lunghezza d'onda)

Può essere considerata localmente piana  $(\bar{E}, \bar{H} = \frac{1}{\eta} \hat{r} \wedge \bar{E}, \text{ con } \eta \text{ impedenza d'onda})$

## REGIONE DI FRAUNHOFER

Supponiamo di avere una sorgente di dimensione  $D$ . Nella zona di campo lontano tutti i contributi al campo dovuti alla distribuzione di correnti della sorgente possono essere considerati in fase.

Per distanze minori le differenze di percorso fra le diverse parti della sorgente possono dare significative variazioni del campo ricevuto



$$R^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 = (R + \delta)^2 = R^2 + 2R\delta + \delta^2$$

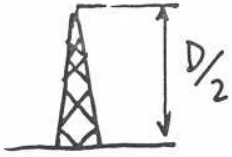
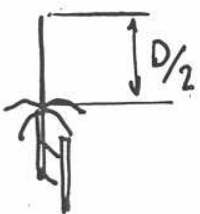
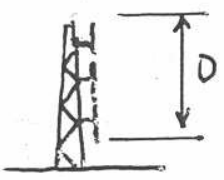
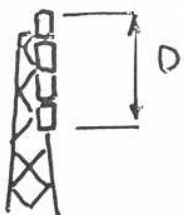
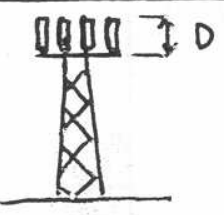
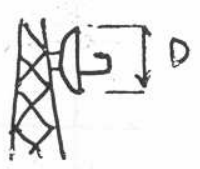
$$\text{se } \delta \ll R \quad \text{e} \quad \delta \ll D$$

$$R \cong \frac{D^2}{8\delta}$$

a seconda del valore considerato accettabile per la differenza di percorso si hanno valori diversi per lo sfasamento e condizioni diverse sulla distanza  $R$

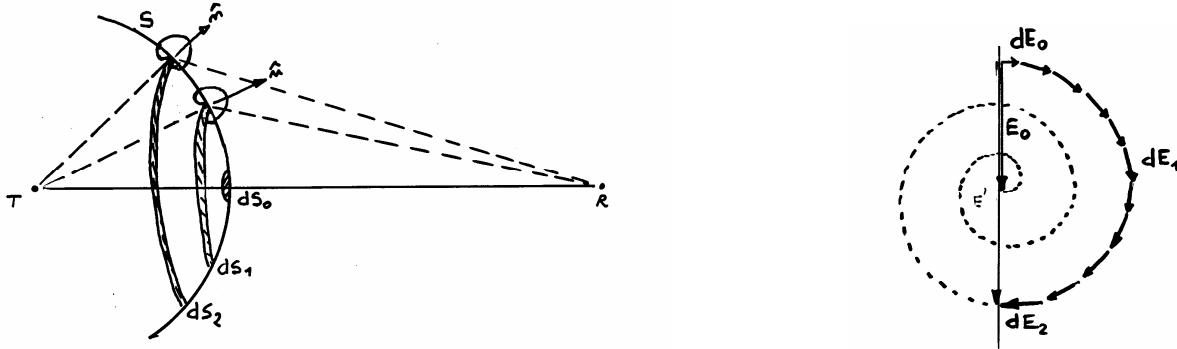
La più comunemente accettata è

$$\delta \leq \frac{\lambda}{16} \quad \text{dacui} \quad R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{o} \quad \text{più in generale} \quad R \geq K \frac{D^2}{\lambda}$$

	$f$ (MHz)	$\lambda$ (m)	$D$ (m)	$D^2/\lambda$ (m)	$R_2$ (m)
	0.650	461.5	230 ( $0.5\lambda$ )	115	230
	144	2.08	1 ( $0.5\lambda$ )	0.5	1
	100	3	3	3	6
	600	0.5	4	32	64
	950	0.31	1.5	7.25	14.5
	2000	0.15	3	60	120

## DIFFRAZIONE DA OSTACOLI ELLISSOIDI DI FRESNEL

Se ho in T una sorgente isotropa posso sostituire tale sorgente con una distribuzione di sorgenti equivalenti di Huygens su di una superficie chiusa (ad esempio sferica) che racchiude T.



Le sorgenti equivalenti su S danno contributi diversi (per ampiezza e fase) a seconda della loro posizione

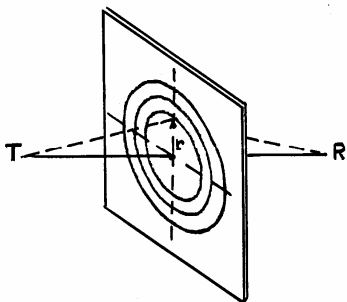
Il campo in R è dato dalla somma di tutti i contributi elementari dovuti alle singole sorgenti equivalenti

Nella sommatoria i contributi sono pesati secondo il diagramma di radiazione delle sorgenti di Huygens

A partire dalla zona centrale sulla congiungente T-R i contributi si sommano con sfasamenti per differenza di percorso via via crescenti fino al valore  $\pi$ . Ulteriori contributi diminuiscono il valore della risultante finchè lo sfasamento diviene  $2\pi$ . Sommando tutti i contributi il valore del campo risultante è la metà di quello corrispondente alla somma dei contributi della prima zona.

I luoghi dei punti per i quali la somma delle distanze da T e R è costante e pari a  $n\lambda/2$  danno contributi sfasati per multipli di  $p$  ( $\Delta\phi = 2\pi/\lambda * n\lambda/2$ ) sono degli ellissoidi con fuochi corrispondenti ai punti T e R.

L'intersezione degli ellissoidi di Fresnel con un piano ortogonale alla congiungente T-R dà luogo a cerchi concentrici detti "ZONE DI FRESNEL".



$$\sqrt{d_1^2 + r_n^2} + \sqrt{d_2^2 + r_n^2} = d_1 + d_2 + n \frac{\lambda}{2}$$

$$d_1 \sqrt{1 + \left(\frac{r_n}{d_1}\right)^2} + d_2 \sqrt{1 + \left(\frac{r_n}{d_2}\right)^2} = d_1 + d_2 + n \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{se } r_n \ll \begin{cases} d_1 \\ d_2 \end{cases}$$

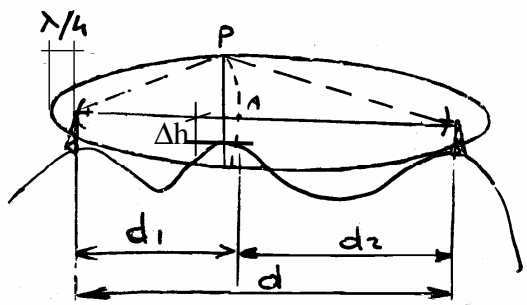
$$d_1 \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r_n}{d_1}\right)^2\right) + d_2 \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r_n}{d_2}\right)^2\right) \approx d_1 + d_2 + n \frac{\lambda}{2}$$

$$r_n = \sqrt{\frac{n \lambda d_1 d_2}{d}}$$

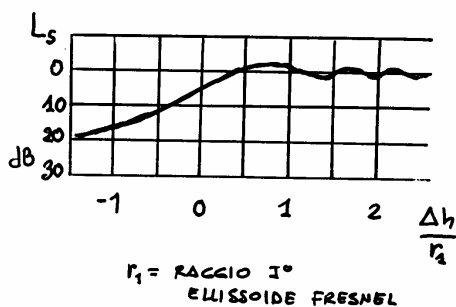
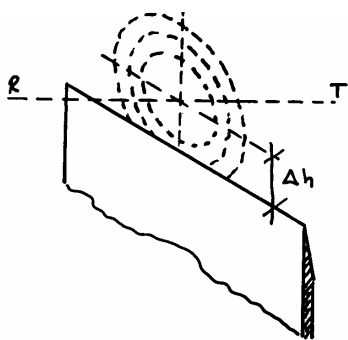


Per ogni punto della congiungente T-R si può immaginare passi una sfera su cui distribuire le sorgenti

Un eventuale ostacolo in quel punto altererà il contributo delle sorgenti introducendo una attenuazione supplementare tanto maggiore quanto più è oscurata la prima zona di Fresnel



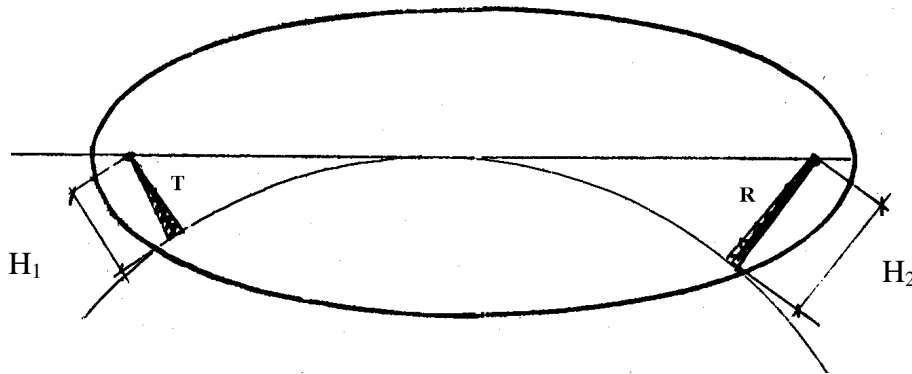
L'ostacolo può essere schematizzato come un semipiano assorbente che intercetta ( a distanza  $\Delta h$  dalla congiungente T-R) le varie zone di Fresnel



Si dice che due antenne sono in visibilità radio se non è intercettata la prima zona di Fresnel

## Curvatura terrestre-Visibilità ottica

La condizione limite di riferimento è quella indicata in figura in cui



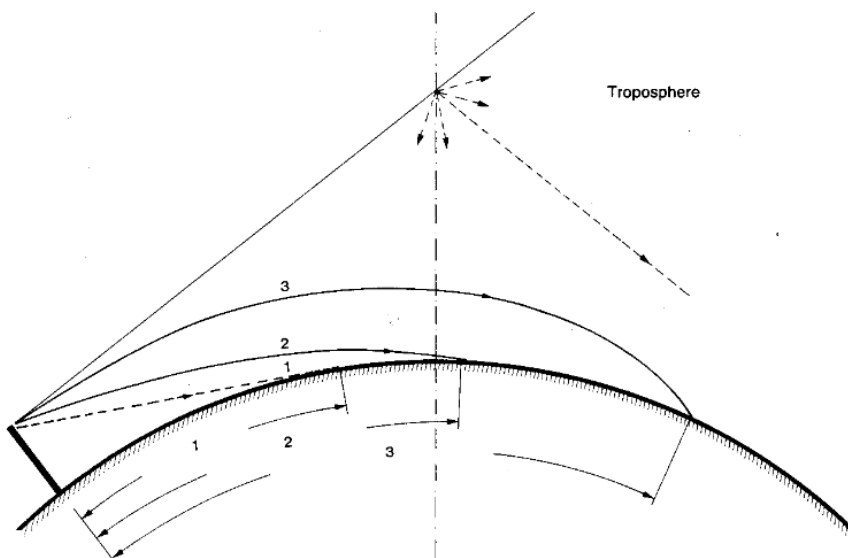
$$d = \sqrt{2rH_1} + \sqrt{2rH_2} = \sqrt{2kr_0} (\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2})$$

Dando a  $k$  il valore mediano  $4/3$  ed esprimendo  $d$  in km si arriva alla formula semplificata  $d(\text{km}) = 3\sqrt{2} (\sqrt{H_{1(m)}} + \sqrt{H_{2(m)}})$

Se  $H_1=H_2=100$  m la distanza massima per cui le antenne trasmittente e ricevente sono ancora in visibilità risulta di circa 85 km

In questa condizione metà dell'ellissoide di Fresnel risulta ostruito

A causa della tipica diminuzione di indice di rifrazione con l'altezza si ha un incurvamento dei raggi di propagazione verso la superficie per cui la zona di visibilità è più ampia di quella che si avrebbe con la propagazione in linea retta



Anche fenomeni come la pioggia la nebbia e gli assorbimenti atmosferici vanno messi in conto a seconda delle frequenze di impiego.

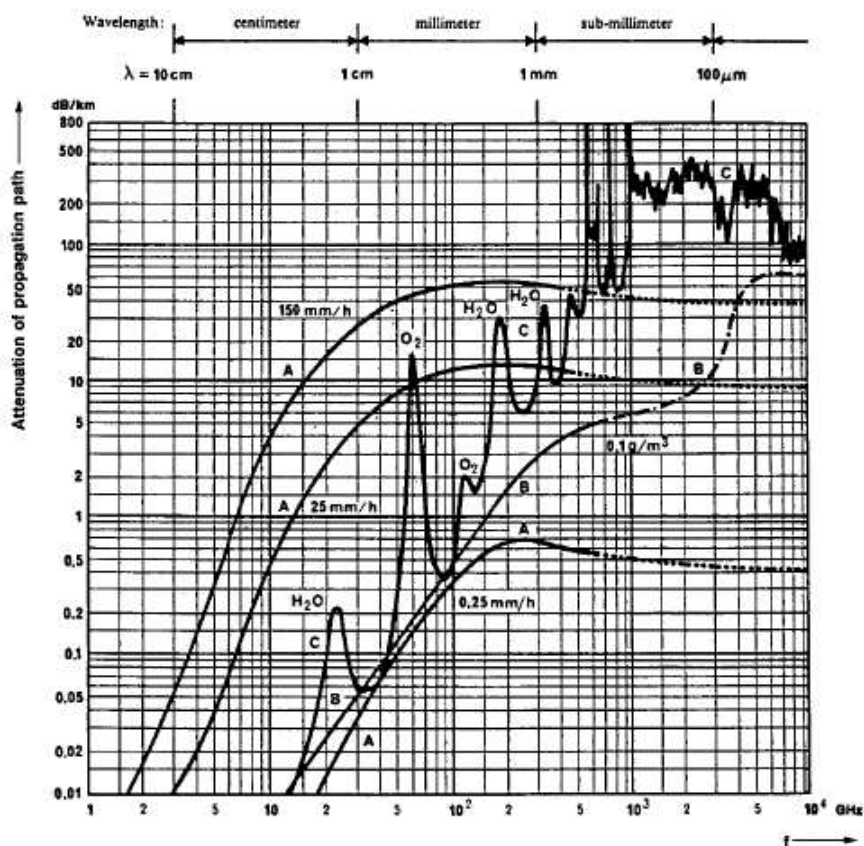


FIG 18 Additional field-strength attenuation at very high frequencies caused by A rain, B fog, C molecular absorption by water vapour and oxygen in air.

Tenendo conto delle varie cause di attenuazione si può scrivere

### Propagazione libera ( mezzo radio)

La formula di trasmissione consente di definire l'attenuazione di spazio libero

$$\frac{P_T}{P_R} = \frac{4\pi d^2}{G_T A_R} = L_o \qquad \frac{L(d_1)}{L(d_2)} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

Nelle tratte radio l'attenuazione di spazio libero cresce con il quadrato della distanza (l'attenuazione aumenta di 6dB per ogni raddoppio della distanza)

Questa attenuazione è teorica in quanto si manifesta in assenza di ostacoli alla trasmissione

In realtà  $L = L_o L_s$  con  $L_s$  termine di attenuazione supplementare che dipende dalle condizioni in cui avviene la propagazione e dipende da vari fenomeni di natura aleatoria responsabili anche di fenomeni di distorsione.

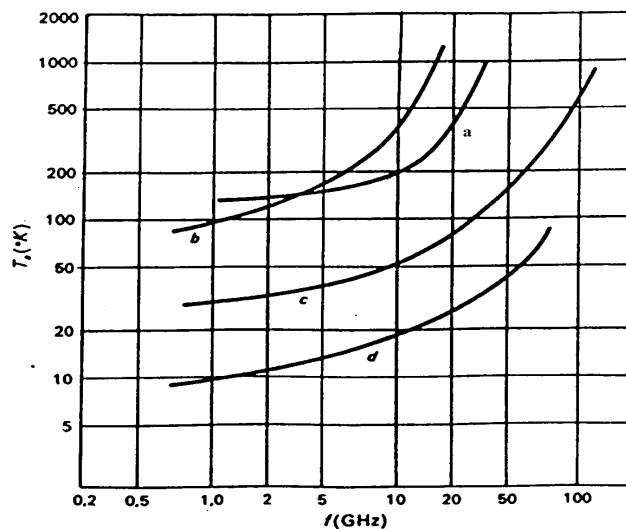
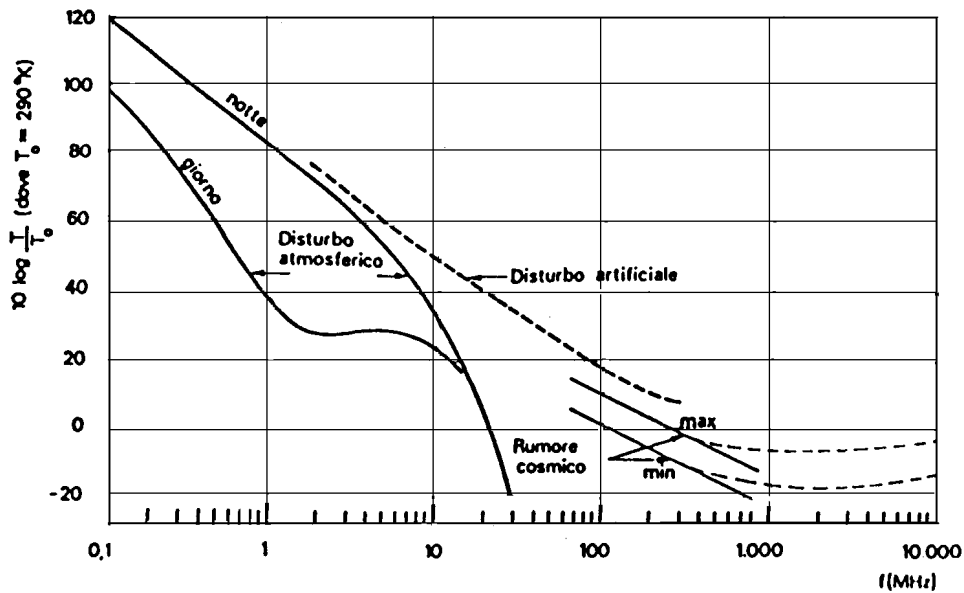
Il principale di questi fenomeni resta quello dei percorsi multipli.

## TEMPERATURA DI RUMORE DI UN'ANTENNA

Le principali componenti del rumore captato da un'antenna sono:

- rumore termico di fondo
- rumore cosmico
- rumore atmosferico
- rumore artificiale
- rumore dovuto a dissipazione d'antenna

Un'antenna capta un rumore di fondo che dipende dall'ambiente in cui è immersa  
 Le antenne di ponte radio puntate verso l'orizzonte captano un rumore dovuto al terreno e all'atmosfera dietro la quale vi è il cosmo



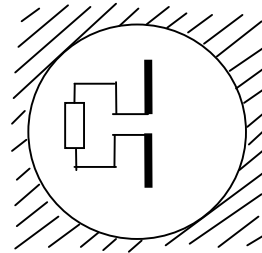
Caratteristiche di rumore di alcuni primi stadi di ricevitori: a) amplificatore a transistor a effetto di campo; b) amplificatore a transistor bipolare; c) amplificatore parametrico a temperatura ambiente; d) amplificatore parametrico raffreddato.

## RUMORE COSMICO

Si può utilizzare come modello la radiazione di corpo nero cioè si suppone l'antenna circondata da un mezzo dissipativo omogeneo e isotropo a temperatura T che emette una densità di potenza

$$B(f, T) = \lim_{\substack{\Delta S \rightarrow 0 \\ \Delta f \rightarrow 0 \\ \Delta \Omega \rightarrow 0}} \frac{\Delta N}{\Delta S \Delta f \Delta \Omega}$$

$$B(f, T) = \frac{2h}{c^2} \frac{f^3}{e^{\frac{hf}{KT}} - 1}$$



$h = 6.55 \cdot 10^{-34}$  joule/Hz costante di Planck

$K = 1.38 \cdot 10^{-23}$  joule/°K costante di Boltzman

Per  $|f| < 0.1 \text{ KT}/h < 10^{12}$

sviluppando in serie

$$e^{\frac{hf}{KT}} = 1 + \frac{hf}{KT}$$

Per cui

$$B = 2 K T \frac{f}{c^2} = \frac{2 K T}{\lambda^2}$$

L'antenna non è circondata dallo spazio cosmico come nel modello, ma

$T = T(\vartheta, \varphi)$  a seconda della zona di cielo che contribuisce al rumore captato dall'antenna

## TEMPERATURA D'ANTENNA

Le zone di cielo da cui l'antenna capta rumore hanno temperature diverse per cui  $T(\vartheta, \varphi)$

La potenza  $dN$  cioè per  $d\Omega$  e  $df$  si scrive mediando sui contributi casuali di polarizzazione

$$dN = \frac{1}{2} B d\Omega df A_{\text{eff}}(\vartheta, \varphi)$$

Ricordando la relazione tra Area efficace e Guadagno

$$A_{\text{eff}}(\vartheta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G(\vartheta, \varphi)$$

Esprimendo  $G$  con il Guadagno di direttività e ricordando l'espressione del guadagno di direttività nella direzione voluta quando in  $P$  si vuole ottenere una intensità di radiazione  $I_r$

$$D(\vartheta, \varphi) = \frac{P_o(\vartheta, \varphi)}{P_{\text{irr}}} = \frac{4\pi I_r(\vartheta, \varphi)}{\int_{4\pi} I_r(\vartheta, \varphi) d\Omega} \frac{I_{r\text{MAX}}}{I_{r\text{MAX}}} = \frac{4\pi f^2(\vartheta, \varphi)}{\int_{4\pi} f^2(\vartheta, \varphi) d\Omega}$$

$P_o$  è la potenza irradiata da un radiatore isotropo per ottenere nel punto  $P$  una determinata  $I_r$  ( o un determinato campo  $E$ )

$$dN = K \left[ \frac{\int_{4\pi} T(\vartheta, \varphi) f^2(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\int_{4\pi} f^2(\vartheta, \varphi) d\Omega} \right] df = K T_B df$$

$T_B$  è la temperatura di rumore dell'antenna

Se  $T$  può essere considerata uniforme nell'angolo solido  $\Omega$  cioè nella regione di cielo verso cui l'antenna è puntata  $T_B = T$

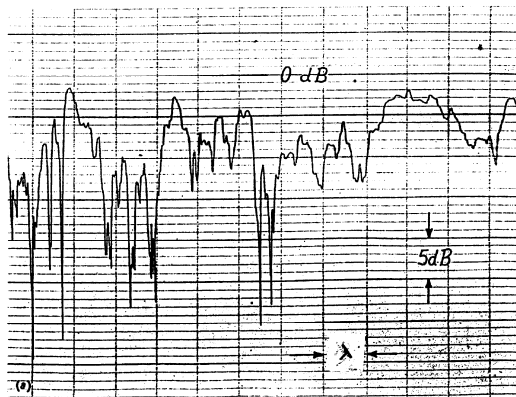
A frequenze superiori a 10 GHz crescono di intensità con la frequenza le radiazioni generate dall'atmosfera che diventa sempre più attenuativa

La temperatura di rumore cresce con il puntamento dell'antenna Il minimo Si ha per puntamento verso l'alto .il massimo per puntamento verso l'orizzonte.

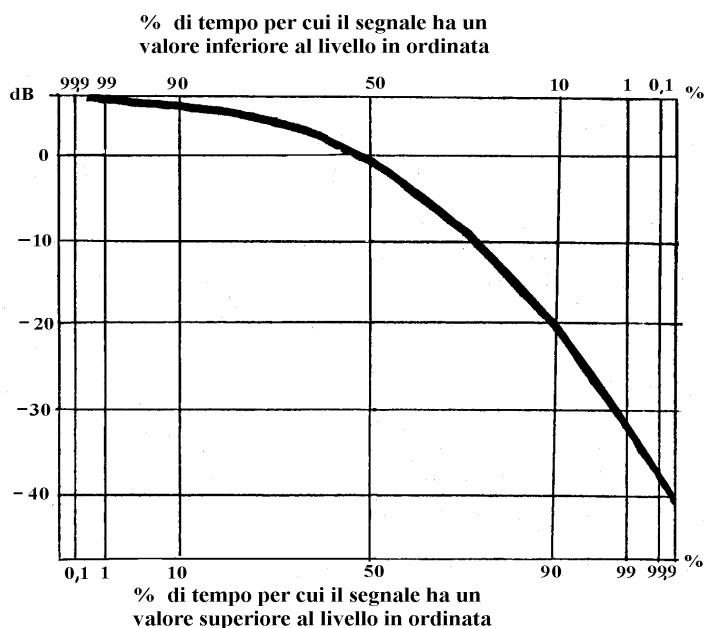
Il percorso nell'atmosfera passa da  $d=25$  km a  $d= 700$  km

## STATISTICA DEL SEGNALE RICEVUTO

A causa di fenomeni di affievolimento (fading) l'intensità del segnale ricevuto subisce forti e rapide variazioni nel tempo in un determinato punto o con la distanza in un determinato istante di tempo.



Il segnale ricevuto rappresenta la realizzazione di un processo aleatorio e il fenomeno va studiato dal punto di vista statistico



In ordinata è indicato il valore del segnale ricevuto espresso in decibel rispetto ad un valore di riferimento

Il fenomeno degli affievolimenti è un fenomeno casuale che va studiato da un punto di vista statistico.

In figura è indicata una tipica curva di distribuzione statistica tracciata sperimentalmente o calcolata partendo da determinate ipotesi sul meccanismo della propagazione.

Quando si hanno curve sperimentali la percentuale di tempo per cui il segnale supera (o non supera) un certo livello può essere interpretata come probabilità.

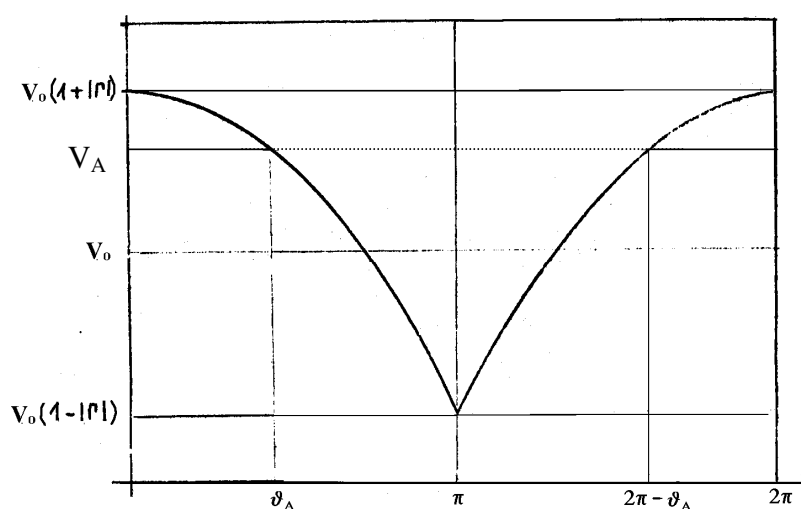
Un primo esempio di curva calcolata lo possiamo ricavare considerando gli affievolimenti dovuti all'interferenza fra onda diretta e riflessa con fase casuale.

L'ampiezza della tensione risultante  $V$  in funzione della tensione  $V_0$  dovuta alla sola onda diretta

A seconda del valore di fase si ricava un determinato valore di tensione

$$\left| \frac{V_R}{V_0} \right| = \left| 1 + |\Gamma| e^{j\varphi} e^{-j\Delta\phi} \right| = \sqrt{(1 + |\Gamma| \cos(\Delta\phi - \varphi))^2 + |\Gamma|^2 (\sin(\Delta\phi - \varphi))^2} = \sqrt{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos(\Delta\phi - \varphi)}$$

Se supponiamo che al variare delle caratteristiche dell'atmosfera e quindi delle differenze di percorso qualsiasi valore di fase ricevuta sia equiprobabile la probabilità  $P$  che  $V$  sia maggiore di un assegnato valore  $V_A$  può essere calcolata:

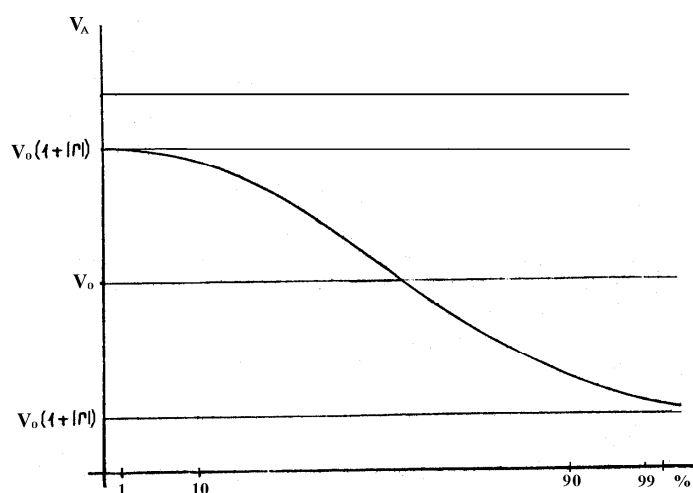


$$\vartheta = \Delta\phi - \varphi$$

$$P(\vartheta) = 1/2\pi$$

$$P(V > V_A) = \int_0^{\vartheta_A} \frac{1}{2\pi} d\vartheta + \int_{2\pi - \vartheta_A}^{2\pi} \frac{1}{2\pi} d\vartheta = \frac{\vartheta_A}{\pi}$$

$$P(V > V_A) = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{V_A^2 - 1 - |\Gamma|^2}{2|\Gamma|}$$





## MODELLI TEORICI PER IL FADING

Un caso di notevole interesse si ha quando il segnale ricevuto è dovuto all'interferenza di un elevato numero di contributi di ampiezza e fase caotici ma aventi una potenza complessiva  $P_m$  costante e molto grande rispetto alla potenza di ciascun contributo. I contributi diffusi siano statisticamente indipendenti. Con notazione complessa possiamo scrivere

$$s_R = \sum_{k=1}^N s_{Rk} = \sum_{k=1}^N a_k e^{-j\theta_k} e^{j\omega_0 t}$$

$a_k, \theta_k$  sono l'ampiezza, e la fase della  $k$ -esima componente dovuta ai percorsi multipli

$$\sum_{k=1}^N \frac{|s_{Rk}|^2}{2} = P_m \quad \text{e} \quad \frac{|s_{Rk}|^2}{2} \ll P_m$$

l'involuppo è espresso da

$$V^2 = \left[ \sum_{k=1}^N a_k \cos(\theta_k) \right]^2 + \left[ \sum_{k=1}^N a_k \sin(\theta_k) \right]^2 = u^2 + v^2 \quad 0 \leq \theta_k \leq 2\pi$$

$u, v$  sono la somma di contributi diffusi statisticamente indipendenti così che possono essere approssimati da processi casuali Gaussiani con media nulla e varianza  $\sigma_u^2 = \sigma_v^2 = P_m$   
se  $x$  è una variabile gaussiana

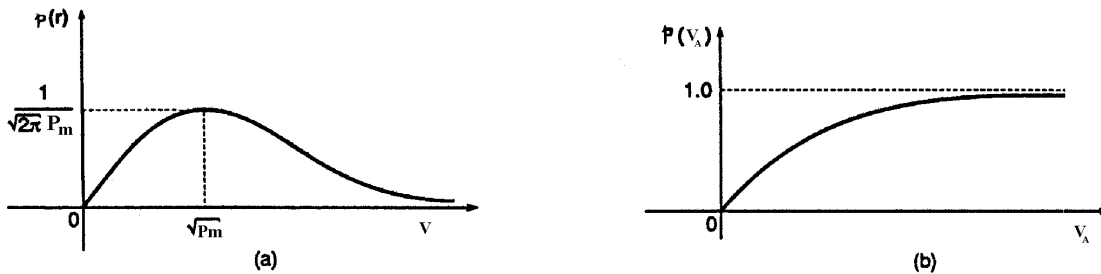
$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}}$$

$p(V, \vartheta) = |J| p(u, v)$        $|J| = V$  è lo iacobiano della trasformazione

$$p(u, v) = p(u)p(v) = \frac{1}{2\pi P_m} e^{-\frac{u^2 + v^2}{2P_m}}$$

In questo caso la statistica che descrive il fenomeno è quella di Rayleigh

a) Funzione densità di probabilità di Rayleigh b) Funzione di distribuzione di Rayleigh



$$p(V) = \int_0^{2\pi} p(V, \vartheta) d\vartheta = \frac{V}{P_m} e^{-\frac{V^2}{2P_m}}$$

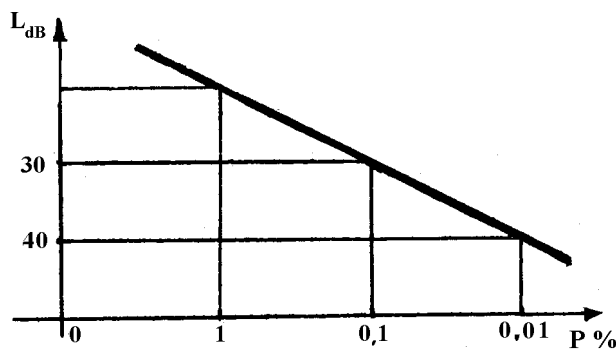
Si può calcolare la probabilità che il valore del modulo del segnale ricevuta  $V$  sia maggiore di un valore  $V_A$

$$P(V < V_A) = \int_0^{V_A} p(V) dV = 1 - e^{-\frac{V_A^2}{2P_m}}$$

$$\text{se } \frac{V_A^2}{P_m} \ll 1 \quad P(V < V_A) \cong \frac{V_A^2}{2P_m} \text{ o anche } P(L_s > L_{SA}) \cong \frac{V_A^2}{2P_m}$$

$$10 \log 1/P = 10 \log \frac{2P_m}{V_A^2} = L_{sdB}$$

Quindi riportando  $P(V < V_A)$  e l'attenuazione  $L_{dB}$  in scala logaritmica la curva di distribuzione del tipo Rayleigh è pertanto una retta e a una variazione di 10 dB del segnale corrisponde una variazione di una decade della percentuale di tempo



Quando si ritiene che il raggio diretto prevale sui contributi dovuti ai percorsi multipli  
 Identifichiamo due componenti per il segnale ricevuto:  
 la componente di visibilità diretta e la componente dovuta ai percorsi multipli

$$s_R = a_0 e^{-j\theta_0} e^{j\omega_0 t} + \sum_{k=1}^N a_k e^{-j\theta_k} e^{j\omega_0 t}$$

$$V^2 = \left[ \sum_{k=1}^N a_k \cos(\theta_k) + a_0 \right]^2 + \left[ \sum_{k=1}^N a_k \sin(\theta_k) \right]^2$$

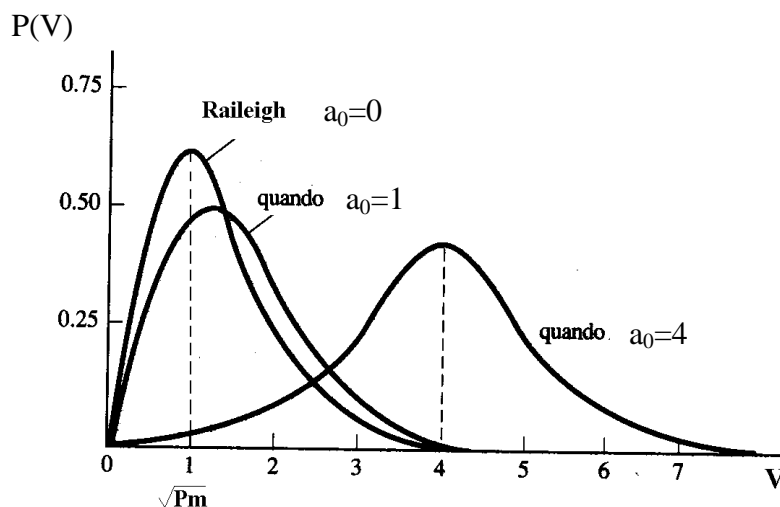
questo caso la statistica che descrive il fenomeno è quella di RICE

$$P(V) = \int_0^{2\pi} p(V, \vartheta) d\vartheta = \frac{V}{P_m} e^{-\frac{V^2 + a_0^2}{2P_m}} I_0 \left( \frac{V a_0}{P_m} \right)$$

$$I_0 \left( \frac{V a_0}{P_m} \right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{\left( \frac{V a_0 \cos \vartheta}{P_m} \right)} d\vartheta$$

è la funzione di Bessel modificata di prima specie  
 e ordine 0

La statistica di Rice che si riduce a quella di Rayleigh quando  $a_0=0$



## EVANESCENTE

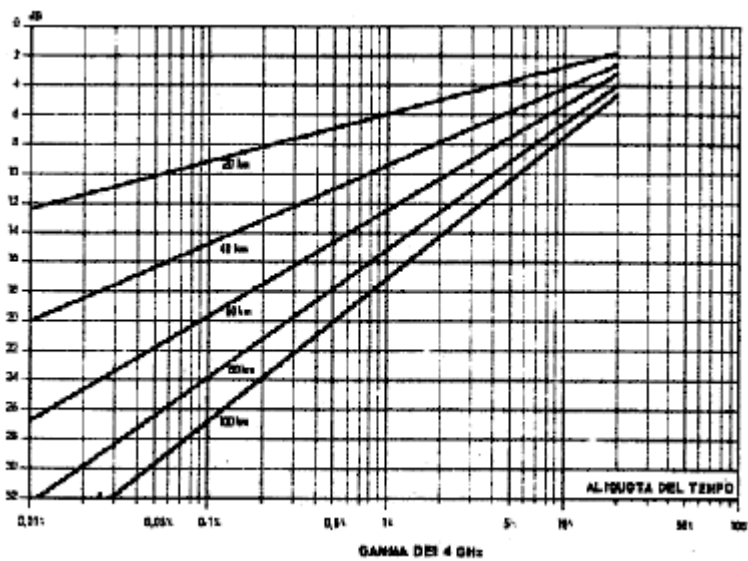
Le attenuazioni supplementari per assorbimento e diffusione e ancor più quelle per rifrazione o diffrazione danno origine ad **evanescenze a lungo termine** del segnale ricevuto cioè un tempo di correlazione che varia da minuti a ore.

La distribuzione di questo fenomeno è log -normale cioè il suo valore espresso in dB ha andamento gaussiano

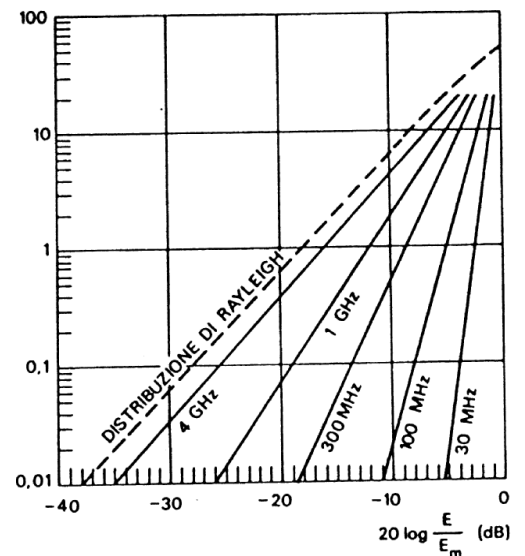
L'attenuazione supplementare dovuta ai cammini multipli dà luogo alle **evanescenze a breve termine** con tempi di correlazione tra pochi secondi e qualche minuto

La molteplicità dei cammini è dovuta a riflessioni su ostacoli e disomogeneità .Se sono numerose si tende ad una evanescenza uniforme entro la banda del segnale

La statistica delle evanescenze a spettro uniforme hanno una statistica che tende rapidamente a quella di Rayleigh all'aumentare della frequenza e della distanza



Atten. supplem superata per la percentuale di tempo in ascissa



Percentuale di tempo per cui E è inferiore al valore mediano

Quando si hanno invece poche riflessioni, al limite una sola, si ha una situazione più deterministica e un comportamento selettivo in frequenza entro la banda del segnale

## SHADOWING

Il multipath fading o affievolimento dovuto a percorsi multipli è talvolta chiamato **fast fading** per distinguerlo dallo **shadowing** che si manifesta come una lenta variazione dell'involuppo medio (mean envelope) o del valor quadratico medio dell'involuppo (mean square-envelope) ad esempio su distanze corrispondenti a diverse decine di lunghezze d'onda.

Osservazioni sperimentali hanno confermato che lo shadowing ha una distribuzione (una funzione densità di probabilità (o pdf) log-normale

Si dice che una variabile casuale  $y$  ha una distribuzione log normale se il suo logaritmo  $\ln y$  ha una distribuzione gaussiana ( $z = \log y = \ln y / \log e$ )

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln y - m_z}{\sigma_z}\right)^2}$$

dove  $m_z$  è il valor medio di  $z$  e  $\sigma_z^2$  la sua varianza

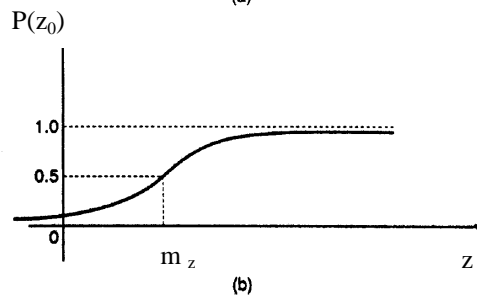
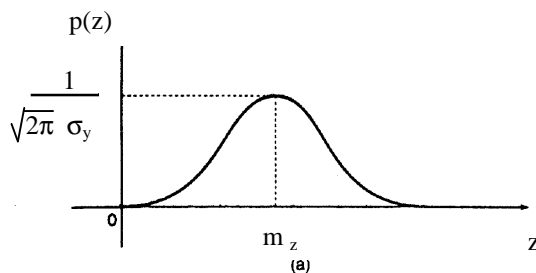
se  $z = \log y$ ,  $\sigma_z = \log \sigma_y$ ,  $m_z = \log m_y$

Se la variabile  $y$  mi rappresenta il rapporto  $E_r/E_0$  tra il campo ricevuto a seguito di un elevato numero di ostruzioni (edifici, colline, alberi) e quello che riceverei in assenza delle stesse

$$y = \frac{E_R}{E_0} = e^{-\sum_{i=1}^n \alpha_i d_i} = e^x \quad x = -\sum_{i=1}^n \alpha_i d_i$$

$$\log y = \ln e^x \log e = \ln e^x \log e = x \log e$$

$$\log m_y = m_x \log e, \quad \log \sigma_y = \sigma_x \log e$$



Long-term fading statistics: (a) the lognormal density function; (b) the lognormal cumulative distribution.