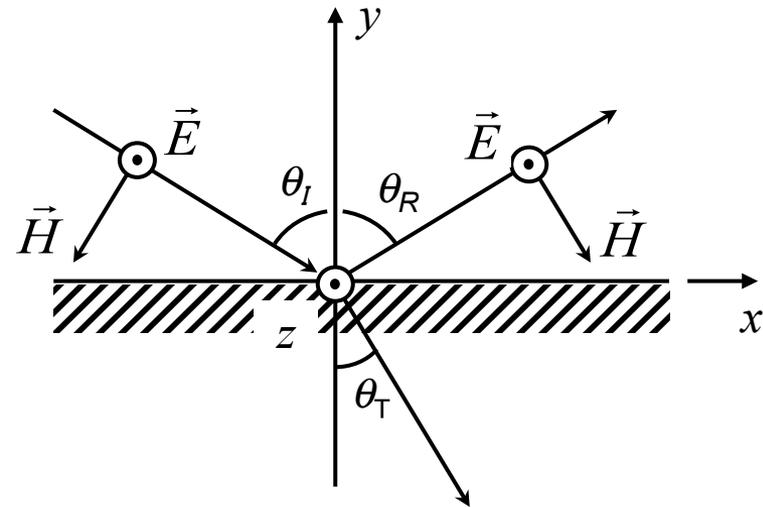


# A - TEORIA DELLA PROPAGAZIONE RADIO IN AMBIENTE REALE

- Effetto di gas atmosferici e idrometeore
  - Attenuazione supplementare da gas atmosferici
  - Attenuazione supplementare da pioggia
  - Propagazione ionosferica, troposcatter
- Propagazione in mezzi con disomogeneità distribuita – Propagazione troposferica
  - Cenni di ottica geometrica in mezzi con  $n$  debolmente variabile.
  - Propagazione in mezzi a stratificazione piana e sferica. Propagazione troposferica, orizzonte radio e rettificazione del suolo/raggio
- Propagazione in mezzi con disomogeneità concentrate – Propagazione in presenza di ostacoli
  - Riflessione del suolo, diffrazione da knife-edge, ellissoide di Fresnel
  - Metodi per il calcolo della diffrazione da ostacoli
  - Teoria geometrica della propagazione: trasmissione attraverso uno strato, diffrazione da spigolo. Propagazione multicammino.

# Coefficienti di Riflessione/Rifrazione (1/3)



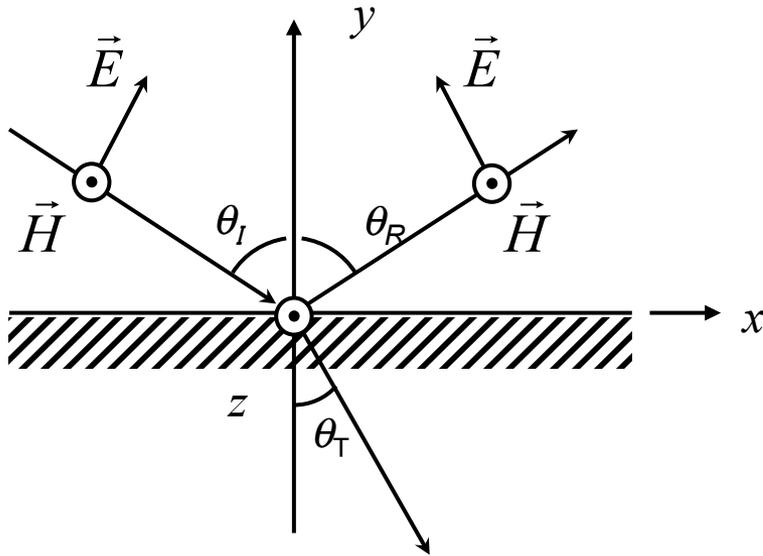
- **Polarizzazione TE** = campo elettrico polarizzato linearmente in direzione perpendicolare al piano di incidenza.
- In sistemi radio terrestri: TE=pol. orizzontale

$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}} = \underset{n=\sqrt{\epsilon_r}}{=} \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} - \sin^2 \theta_i}} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\frac{\epsilon_{c2}}{\epsilon_1} - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\frac{\epsilon_{c2}}{\epsilon_1} - \sin^2 \theta_i}}$$

$$\tau_{TE} = 1 + \Gamma_{TE}$$

Per ipotesi mezzo 1 privo di perdite → permittività elettrica necessariamente reale

# Coefficienti di Riflessione/Rifrazione (2/3)



- **Polarizzazione TM** = campo magnetico polarizzato linearmente in direzione perpendicolare al piano di incidenza → campo elettrico a polarizzazione lineare nel piano di incidenza
- In sistemi radio terrestri: TM ≈ pol. verticale

$$\Gamma_{TM} = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_i - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_i + \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}} \stackrel{n=\sqrt{\epsilon_r}}{=} \frac{\left(\frac{\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}}}\right) \cos \theta_i - \sqrt{1 - \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \sin^2 \theta_i}}{\left(\frac{\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}}}\right) \cos \theta_i + \sqrt{1 - \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \sin^2 \theta_i}} = \frac{\left(\frac{\sqrt{\epsilon_{c2}}}{\sqrt{\epsilon_{c1}}}\right) \cos \theta_i - \sqrt{1 - \frac{\epsilon_{c1}}{\epsilon_{c2}} \sin^2 \theta_i}}{\left(\frac{\sqrt{\epsilon_{c2}}}{\sqrt{\epsilon_{c1}}}\right) \cos \theta_i + \sqrt{1 - \frac{\epsilon_{c1}}{\epsilon_{c2}} \sin^2 \theta_i}}$$

$$\tau_{TM} = 1 + \Gamma_{TM}$$

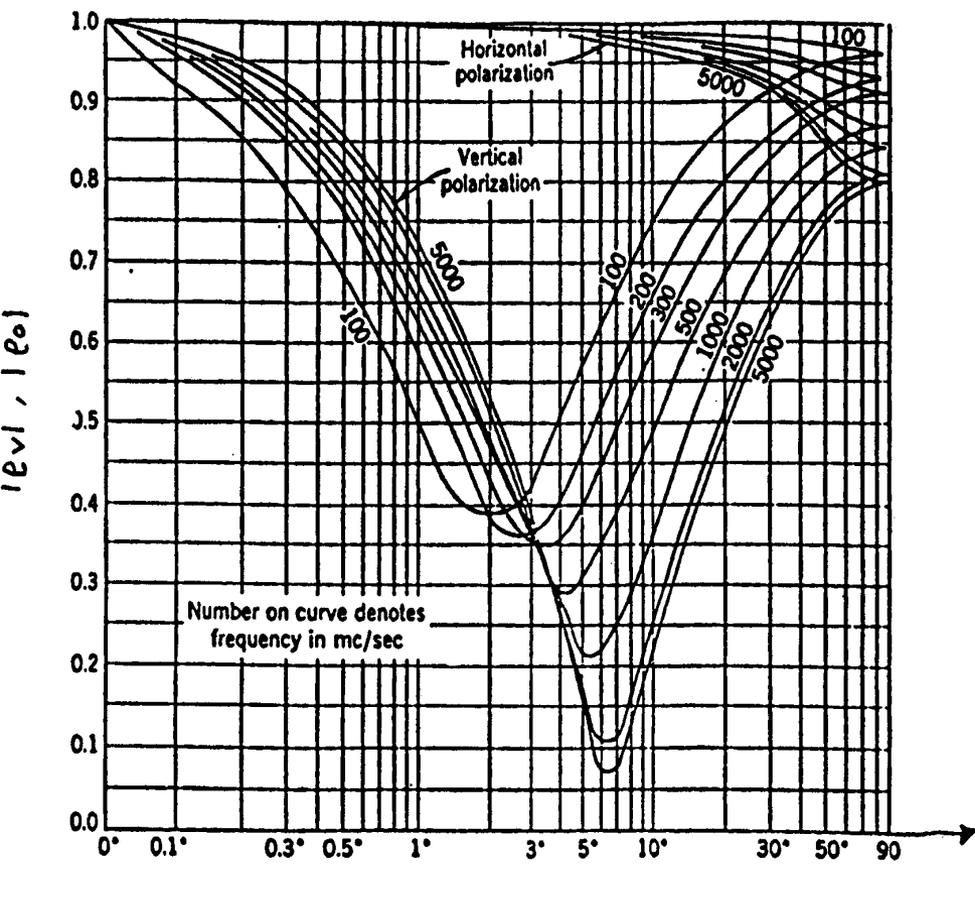
# Coefficienti di Riflessione/Rifrazione (3/3)

- Per  $\theta_i \rightarrow 90^\circ$  (incidenza radente)  $\rightarrow \Gamma_{TE}, \Gamma_{TM} \rightarrow -1$ ;
- Se il mezzo su cui incide l'onda incidente è conduttore elettrico perfetto ( $\sigma_2 \rightarrow \infty$  quindi  $|\epsilon_{c2}| \rightarrow \infty$ )  $\rightarrow \Gamma_{TE} = -1, \Gamma_{TM} = 1$
- Usualmente il mezzo in cui si propaga l'onda incidente (mezzo 1) è l'aria  $\rightarrow \epsilon_{r1} = 1 \rightarrow n_1 = 1$
- Il coefficiente  $\Gamma_{TM}$  si annulla per un particolare angolo  $\theta_{iB}$  detto di Brewster

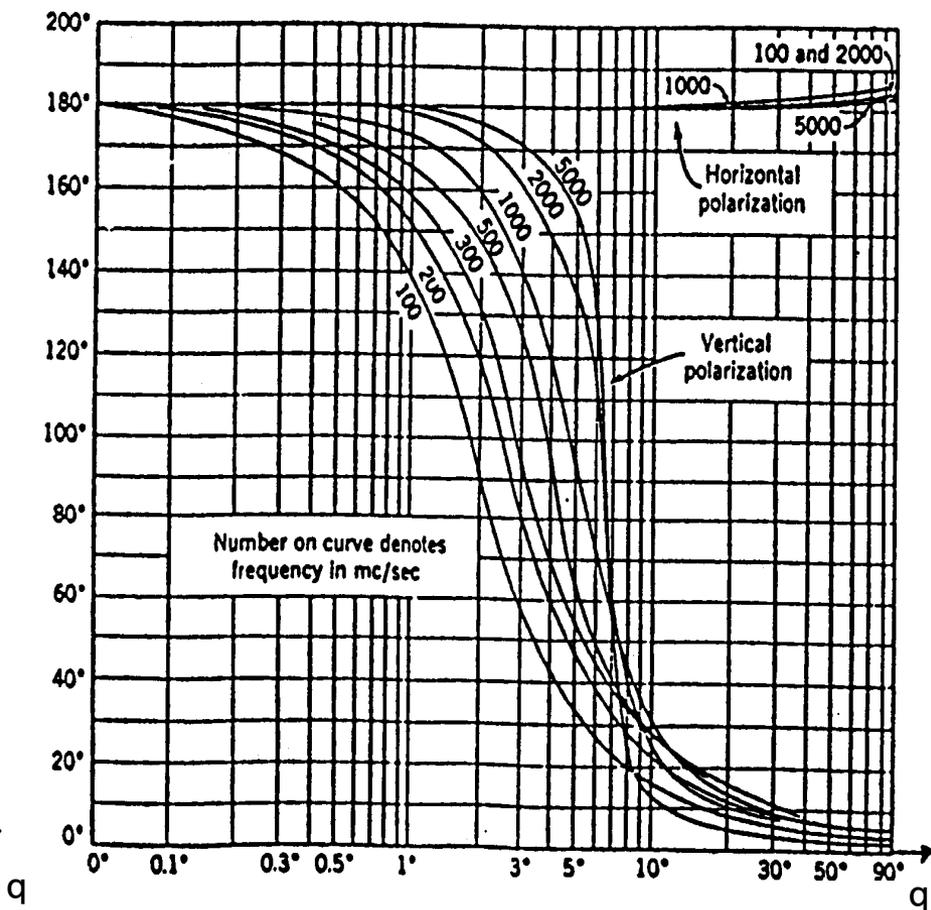
$$\Gamma_{TE} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta_i}} = \frac{\sin \theta - \sqrt{\epsilon_{r2} - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\epsilon_{r2} - \cos^2 \theta}} \quad \theta \text{ ang. di elevazione}$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{(\sqrt{\epsilon_{r2}}) \cos \theta_i - \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon_{r2}} \sin^2 \theta_i}}{(\sqrt{\epsilon_{r2}}) \cos \theta_i + \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon_{r2}} \sin^2 \theta_i}} = \frac{(\sqrt{\epsilon_{r2}}) \sin \theta - \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cos^2 \theta}}{(\sqrt{\epsilon_{r2}}) \sin \theta + \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon_{r2}} \cos^2 \theta}}$$

# Example: sea water



Module of  $\Gamma_{TE}$  and  $\Gamma_{TM}$



Phase of  $\Gamma_{TE}$  and  $\Gamma_{TM}$

# Material constants

When conductivity exists, the following constants are used

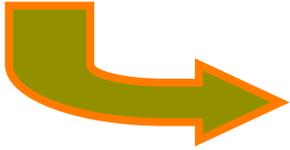
$$\epsilon_c = \epsilon_0(\epsilon_r - j\epsilon'') \text{ where } \epsilon'' = \sigma/\omega\epsilon_0 \text{ and } \epsilon_0 \cong 10^{-9}/36\pi$$

<u>Material*</u>	<u><math>\epsilon_r</math></u>	<u><math>\sigma</math> (S/m)</u>	<u><math>\epsilon''</math> at 1 GHz</u>
Lime stone wall	7.5	0.03	0.54
Dry marble	8.8		0.22
Brick wall	4.4	0.01	0.18
Cement	4 - 6		0.3
Clear glass	4 - 6		0.005 - 0.1
Metalized glass	5.0	2.5	45
Lake water	81	0.013	0.23
Sea Water	81	3.3	59
Dry soil	2.5	--	--
Earth	7 - 30	0.001 - 0.03	0.02 - 0.54

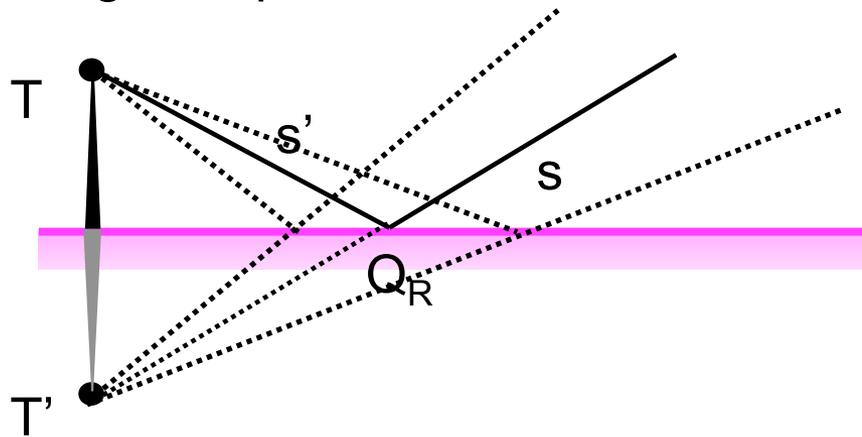
\* Common materials are not well defined mixtures and often contain water. “Effective” material properties depend on exact mixture, and on water content. These are approximate numbers taken from several sources.

# Riflessione/Rifrazione - caso reale (2/2)

- In molti casi pratici, l'onda incidente è considerata sferica e la superficie di riflessione è piana



L'onda riflessa rimane sferica e con lo stesso fattore di divergenza perchè è come avesse origine in T' :

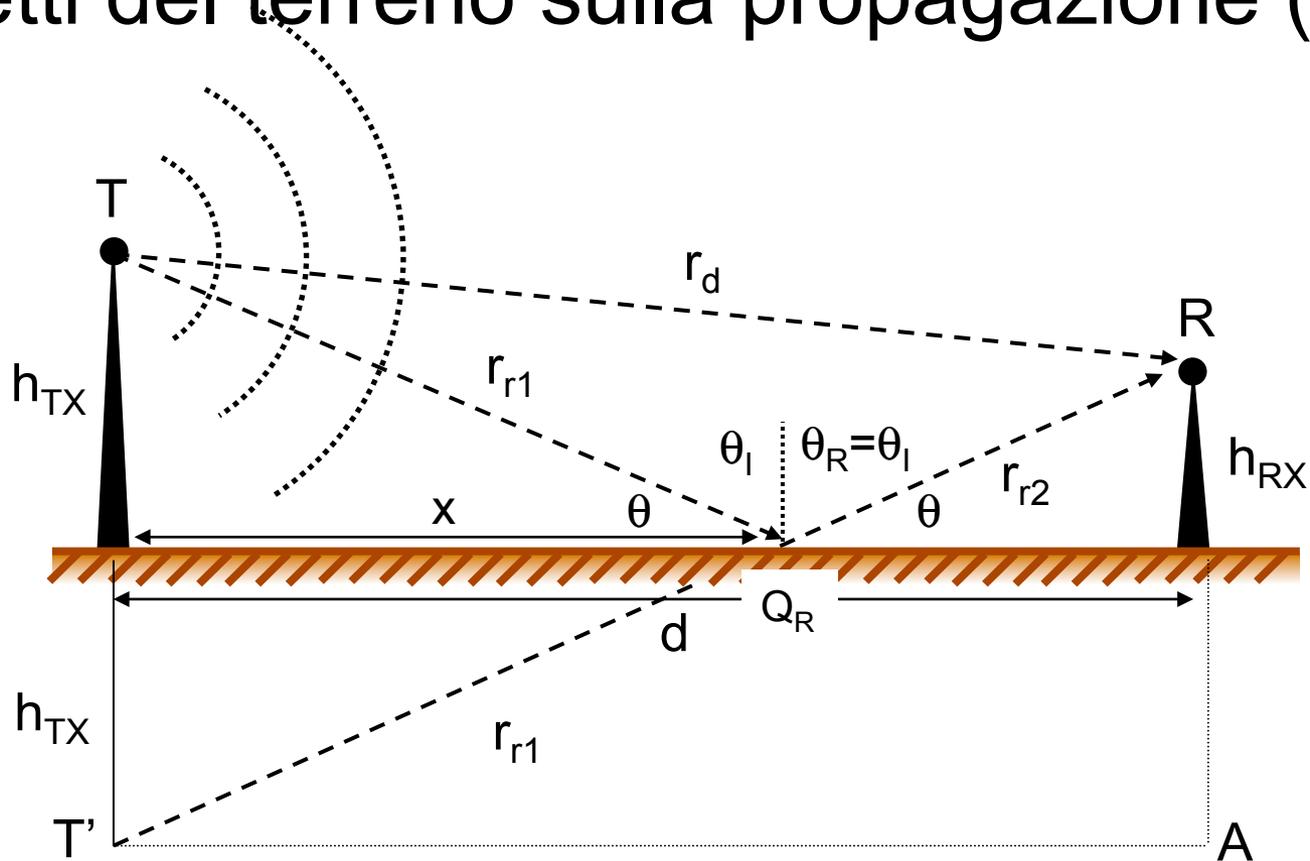


$$\vec{E}_r^{TE/TM}(s) = \Gamma_{TE/TM} \cdot \vec{E}_i^{TE/TM}(Q_R) \frac{s'}{s'+s} e^{-j\beta s}$$

$$\vec{E}_i^{TE/TM}(Q_R) = \frac{\vec{E}_0^{TE/TM}}{s'} e^{-j\beta s'}$$

$$\vec{E}_r^{TE/TM}(s) = \Gamma_{TE/TM} \cdot \frac{\vec{E}_0^{TE/TM}}{s'+s} e^{-j\beta(s'+s)}$$

# Effetti del terreno sulla propagazione (1/5)



- Lunghezza del cammino diretto:  $r_d = \sqrt{d^2 + (h_{TX} - h_{RX})^2}$
- Lunghezza del cammino riflesso: considerando il triangolo rettangolo  $T'AR$  si ricava immediatamente:  $r_r = \sqrt{d^2 + (h_{TX} + h_{RX})^2}$

# Effetti del terreno sulla propagazione (2/5)

- $\Delta r$  = differenza fra le lunghezze dei cammini di propagazione

$$\Delta r = r_r - r_d = \sqrt{d^2 + (h_{TX} + h_{RX})^2} - \sqrt{d^2 + (h_{TX} - h_{RX})^2}$$

$$= d \sqrt{1 + \frac{(h_{TX} + h_{RX})^2}{d^2}} - d \sqrt{1 + \frac{(h_{TX} - h_{RX})^2}{d^2}}$$



**Ipotesi 1:**  $d \gg h_{TX}, h_{RX}$   $\left( \sqrt{1+x^2} \underset{x \rightarrow 0}{\approx} 1 + \frac{x^2}{2} \right)$

$$\Delta r = d + \frac{(h_{TX} + h_{RX})^2}{2d} - \left( d + \frac{(h_{TX} - h_{RX})^2}{2d} \right) = 2 \cdot \frac{h_{TX} \cdot h_{RX}}{d}$$

- Al ricevitore giungono 2 raggi  $\rightarrow$  somma di 2 contributi di campo

$$\vec{E}_d = \frac{\vec{E}_{0d}(\theta_d, \varphi)}{r_d} \cdot e^{-j\beta r_d}$$

campo "emesso" nella direzione del cammino diretto

$$\vec{E}_r = \Gamma \cdot \frac{\vec{E}_{0r}(\theta_r, \varphi)}{r_r} \cdot e^{-j\beta r_r} = \Gamma \cdot \frac{\vec{E}_{0r}(\theta_r, \varphi)}{(r_d + \Delta r)} \cdot e^{-j\beta \cdot (r_d + \Delta r)}$$

campo "emesso" nella direzione del cammino riflesso

# Effetti del terreno sulla propagazione (3/5)

- **Ipotesi 2:** antenne omnidirezionali nel piano verticale → il campo emesso ha stessa ampiezza (complessa) in ogni direzione del piano verticale;
- Polarizzazione TE: il campo elettrico emesso ha la stessa polarizzazione in entrambe le direzioni;  
Polarizzazione TM: la polarizzazione del campo emesso *non* è rigorosamente uguale in entrambe le direzioni, ma lo si può supporre con buona approssimazione in virtù dell'ipotesi 1;
- In virtù dell'ipotesi 1 si può inoltre considerare  $r_r \cong r_d \cong d$  nei termini di ampiezza

Campo totale al ricevitore


$$\vec{E} = \vec{E}_d + \vec{E}_r = \frac{\vec{E}_0}{d} \cdot e^{-j\beta r_d} + \Gamma \frac{\vec{E}_0}{d} e^{-j\beta r_d} \cdot e^{-j\beta \Delta r} = \vec{E}_0 \cdot \frac{e^{-j\beta r_d}}{d} \cdot (1 + \Gamma \cdot e^{-j\beta \Delta r})$$

- L'effetto del terreno sul collegamento viene usualmente quantificato per mezzo del rapporto

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}_d|} = |1 + \Gamma \cdot e^{-j\beta \Delta r}|$$

# Effetti del terreno sulla propagazione (4/5)

- Posto  $\Gamma = |\Gamma| \cdot e^{j \cdot \arg(\Gamma)}$

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}_d|} = \left| 1 + |\Gamma| \cdot e^{-j[\beta\Delta r - \arg(\Gamma)]} \right| = \left| 1 + |\Gamma| \cdot \cos(\beta\Delta r - \arg(\Gamma)) - j|\Gamma| \cdot \sin(\beta\Delta r - \arg(\Gamma)) \right|$$

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}_d|} = \sqrt{1 + |\Gamma|^2 + 2 \cdot |\Gamma| \cdot \cos\left(\frac{4\pi h_{TX} h_{RX}}{\lambda d} - \arg \Gamma\right)}$$

- Nelle ipotesi fatte, indicato con  $g_{Rv}$  il guadagno dell' antenna ricevente nel piano verticale e supponendo perfetto adattamento in ricezione ( $\tau = \rho_T = 1$ )

$$P_R = \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot g_{Rv} \right) \cdot \frac{|\vec{E}|^2}{2\eta} = \underbrace{\left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot g_{Rv} \right) \cdot \frac{|\vec{E}_d|^2}{2\eta}}_{P_{Rd} \rightarrow \text{formula di Friis}} \cdot \left( 1 + |\Gamma|^2 + 2 \cdot |\Gamma| \cdot \cos\left(\frac{4\pi h_{TX} h_{RX}}{\lambda d} - \arg \Gamma\right) \right)$$

$$P_R = \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot g_{Rv} \right) \cdot \frac{|\vec{E}|^2}{2\eta} = P_T \cdot g_{Rv} \cdot g_{Tv} \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot \left( 1 + |\Gamma|^2 + 2 \cdot |\Gamma| \cdot \cos\left(\frac{4\pi h_{TX} h_{RX}}{\lambda d} - \arg \Gamma\right) \right)$$

# Effetti del terreno sulla propagazione (5/5)

- *Path Gain* (PG) = inverso dell' attenuazione di tratta

$$PG = \frac{P_R}{P_T} = (g_{Rv} g_{Tv}) \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot \left( 1 + |\Gamma|^2 + 2 \cdot |\Gamma| \cdot \cos \left( \frac{4\pi}{\lambda} \frac{h_{TX} h_{RX}}{d} - \arg \Gamma \right) \right)$$

# Esempio pratico (1/2)

- Esempio: terreno = conduttore elettrico perfetto e polarizzazione TE  $\rightarrow \Gamma = -1$ , ma anche incidenza radente nel caso generico... In tal caso:

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}_d|} = \sqrt{1+1+2 \cdot \cos\left(\frac{4\pi h_{TX}h_{RX}}{\lambda d} - \pi\right)} = \sqrt{2 \cdot \left[1 - \underbrace{\cos\left(\frac{4\pi h_{TX}h_{RX}}{\lambda d}\right)}_{\delta}\right]}$$



$$\cos(\delta) = \cos^2(\delta/2) - \sin^2(\delta/2)$$

$\delta$

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}_d|} = \sqrt{2 \cdot \left[1 - \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\right]} = \sqrt{4 \cdot \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} = 2 \cdot \left|\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)\right|$$

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}_d|} = 2 \cdot \left|\sin\left(\frac{2\pi h_{TX}h_{RX}}{\lambda d}\right)\right| \Rightarrow PG = (g_{Rv} g_{Tv}) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot \left(4 \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi h_{TX}h_{RX}}{\lambda d}\right)\right)$$

# Esempio pratico (2/2)

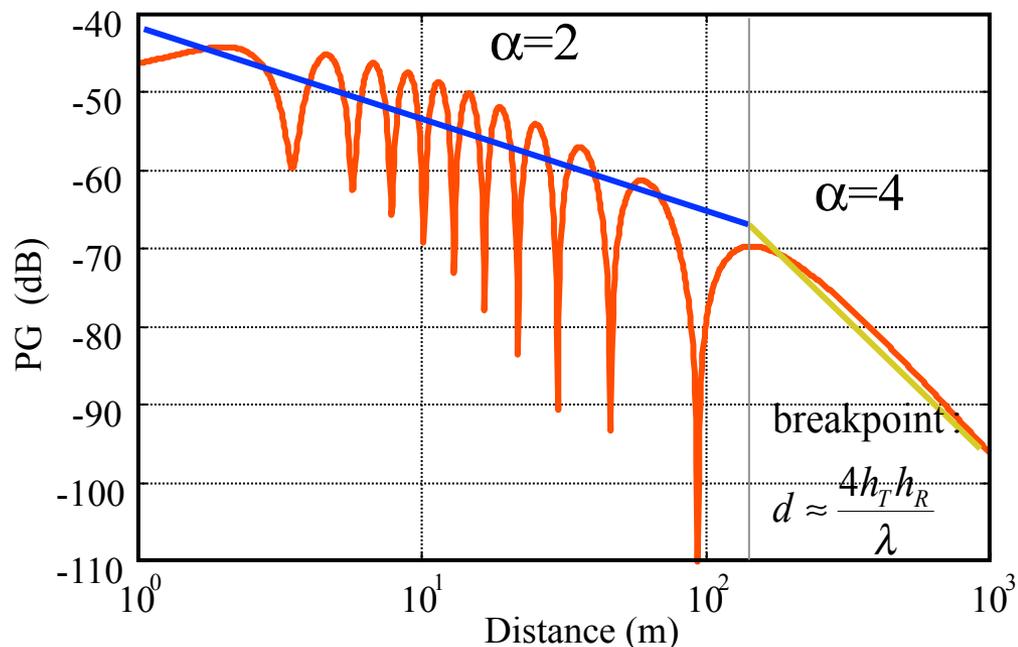
$$PG = (g_{Rv} g_{Tv}) \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot \left( 4 \cdot \sin^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_{TX} h_{RX}}{d} \right) \right)$$

- Per distanze superiori ad un opportuno valore detto “**distanza di *break point***” ( $d_{BP}$ ), il seno può essere approssimato con il suo argomento e dunque:

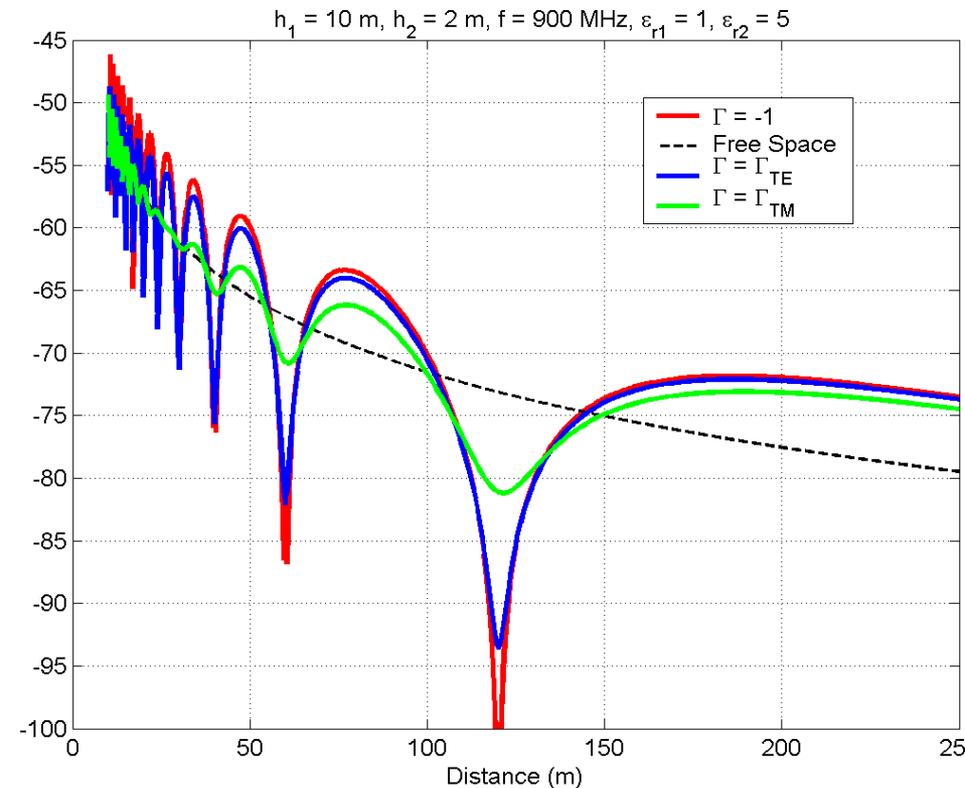
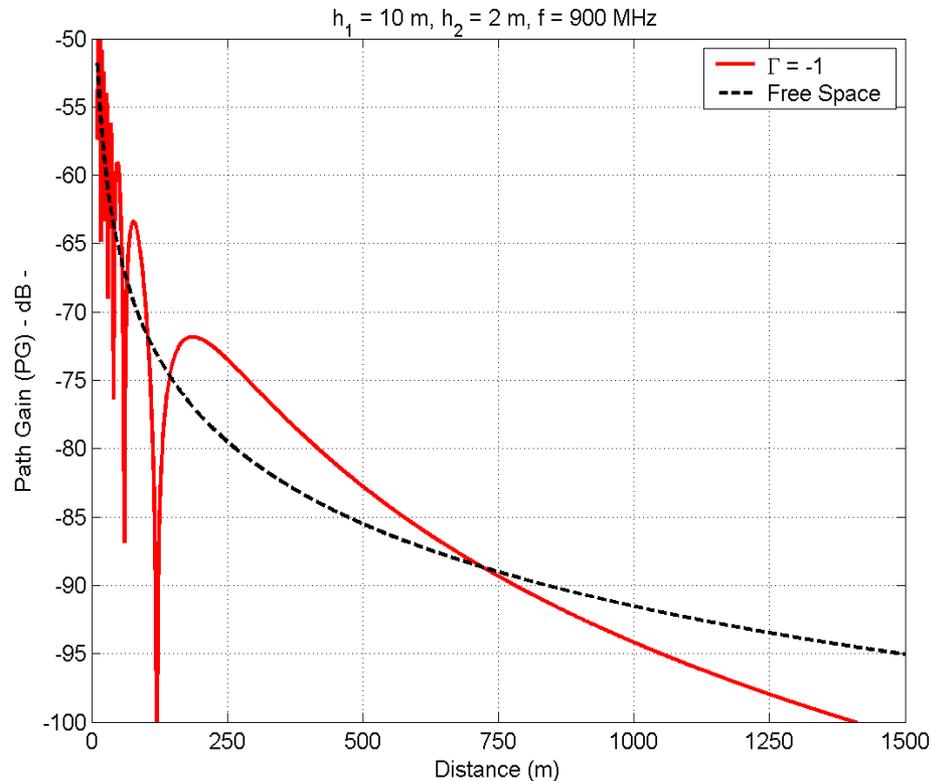
$$PG \approx (g_{Rv} g_{Tv}) \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot 4 \cdot \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_{TX} h_{RX}}{d} \right)^2 = (g_{Rv} g_{Tv}) \cdot \frac{(h_{TX} h_{RX})^2}{d^4}$$

fattore di attenuazione  
 $\alpha=4$

La potenza decade con la distanza come  $1/d^4$ , e dunque molto più rapidamente di quanto accade in spazio libero → la presenza del terreno è quindi sufficiente ad alterare in maniera anche molto significativa le condizioni di propagazione rispetto al caso ideale

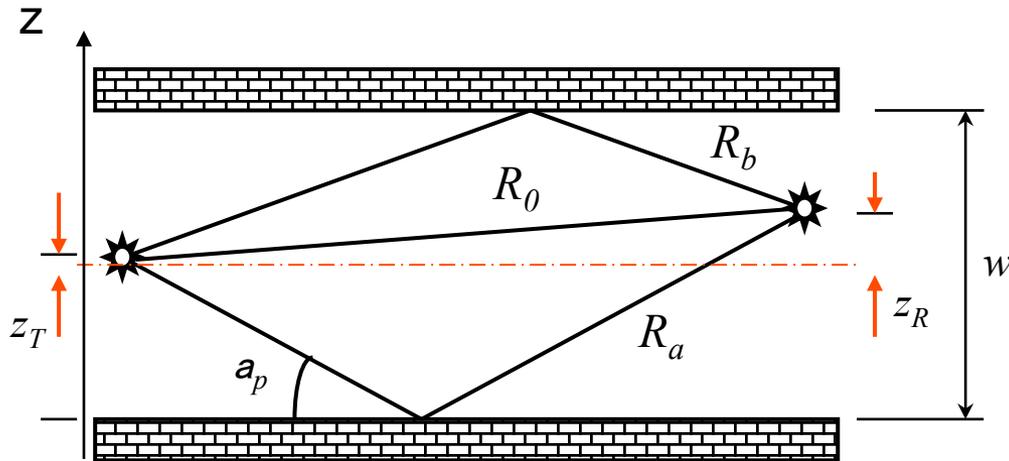


# Path Gain vs. distance



- Per  $d \leq d_{BP} \approx 240 \text{ m}$  si hanno forti ed evidenti oscillazioni dovute all'interferenza fra il contributo diretto e quello riflesso;
- Per  $d > d_{BP}$  il PG decresce con la quarta potenza della distanza, in ragione del fatto che l'interferenza fra i contributi risulta sempre significativamente distruttiva  $\rightarrow$  evidente peggioramento rispetto allo Spazio Libero

# Il modello a 6 raggi (propagazione in “*canyon urbani*”)



Top view of a street canyon showing relevant rays.

Lunghezza dei raggi mostrati in figura

$$R_0 = \sqrt{x^2 + (z_T - z_R)^2}$$

$$R_a = \sqrt{x^2 + (w + z_T + z_R)^2}$$

$$R_b = \sqrt{x^2 + (w - z_T - z_R)^2}$$

Ciascuno dei raggi rappresentati in figura (*top view*) corrisponde in realtà a 2 contributi distinti:

1. contributo diretto / riflesso dalle pareti verticali
2. contributo riflesso dal terreno

In 3D risulta

$$r_{n1,2} = \sqrt{R_n^2 + (h_T \mp h_R)^2}$$

$$n = \{0, a, b\}$$

# Modello a 6 raggi per *street canyon* - esempio

$f = 900$  MHz,  $h_1 = 10$  m,  $h_2 = 1.8$  m,  $w = 30$  m,  $z_T = z_R = 8$  m

