

**Dipartimento di Elettronica Informatica e Sistemistica
Università di Bologna**

Caratteristiche della propagazione in ambiente reale

Franco Fuschini
e-mail: ffuschini@deis.unibo.it

Definizioni preliminari

- Onda: operata una perturbazione su una grandezza fisica in una regione limitata dello spazio, si dice che si ha un'onda quando tale perturbazione si propaga nelle altre zone dello spazio con velocità e modalità che dipendono dal mezzo e dal tipo di grandezza perturbata.

$$\nabla^2 f(x, y, z, t) - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 f(x, y, z, t)}{\partial t^2} = 0 \quad \begin{array}{l} \text{Equazione delle onde} \\ \text{(mezzo senza perdite)} \end{array}$$

- Superficie d'onda: luogo geometrico dei punti dello spazio nei quali la grandezza fisica perturbata varia “concordemente” nel tempo (punti in cui la grandezza perturbata *oscilla in fase*)
- Raggio: data un'onda che si propaga in un dato mezzo, si definisce raggio ogni linea dello spazio perpendicolare in ogni punto alla superficie d'onda passante per quel punto.
- Onda monocromatica (sinusoidale): quando la grandezza perturbata (ogni sua componente, nel caso vettoriale può essere descritta in ogni punto dello spazio come funzione sinusoidale del tempo

Onda Elettromagnetiche

- Quando cariche elettriche vengono sollecitate a muoversi di moto accelerato in zone limitate dello spazio (sorgenti elettromagnetiche), si genera un'onda cosiddetta ElettroMagnetica che si propaga nello spazio circostante
- L'onda EM è sempre associata a due campi vettoriali (elettrico e magnetico) che assumono valori differenti nello spazio e nel tempo
- Nella cosiddetta regione di “campo lontano” della sorgente, il campo elettrico ed il campo magnetico sono in ogni punto ed in ogni istante ortogonali fra loro ed ortogonali alla direzione di propagazione in quel punto

Propagazione in ambiente reale

- Lo “spazio libero” rappresenta lo scenario propagativo ideale: il segnale ricevuto risulta indistorto e l’attenuazione subita può essere facilmente calcolata per mezzo della formula di Friis:

$$P_R = P_g \cdot g_T(\theta, \phi) \cdot g_R(\theta', \phi') \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \cdot \tau$$

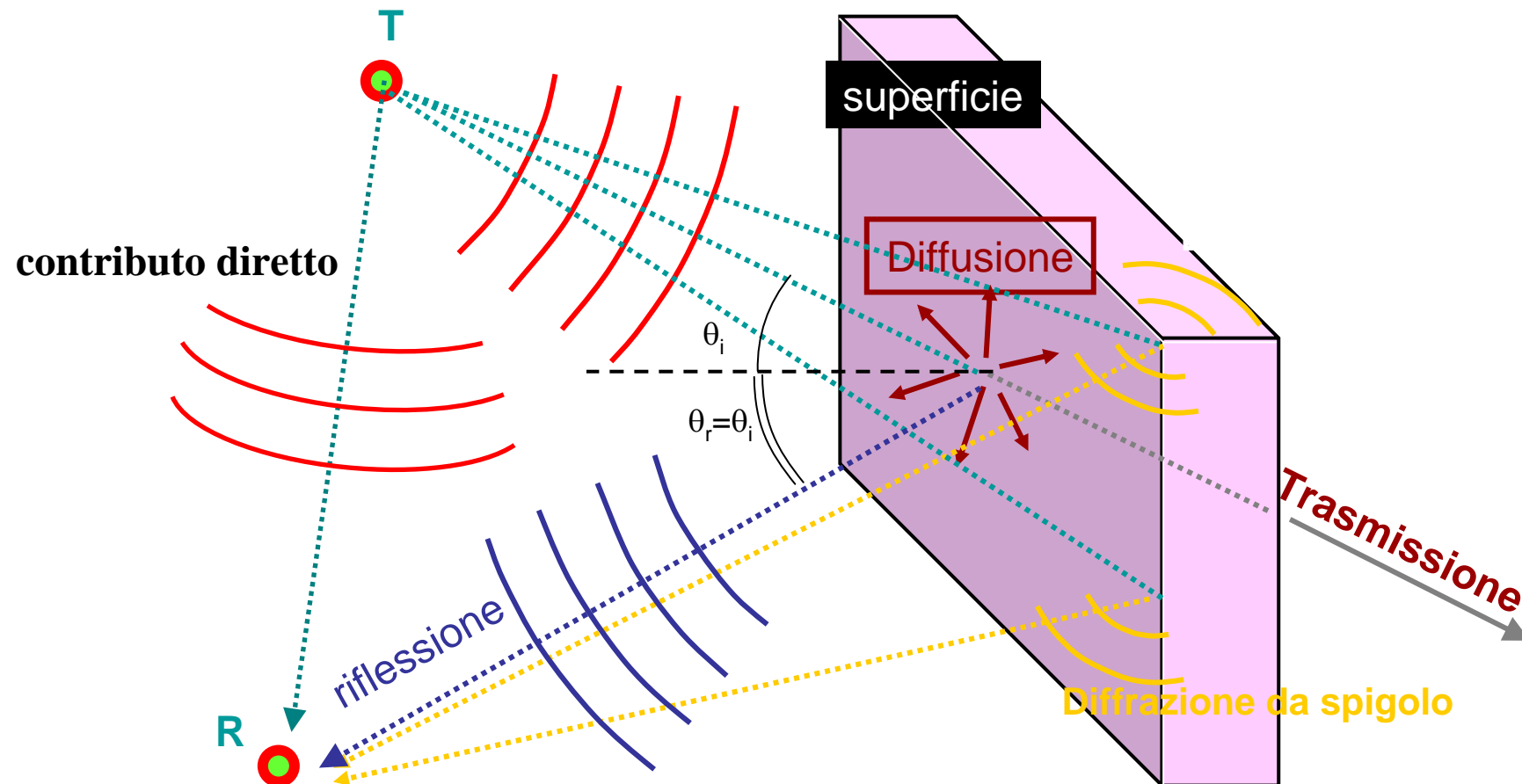
- Nella quasi totalità dei radio-collegamenti reali, TX ed RX sono “circondati” da “oggetti” (edifici, colline, vegetazione, suolo, ecc.) che rendono lo scenario di propagazione assai diverso dallo spazio libero
- L’onda EM “interagisce” con gli oggetti dello scenario (riflessioni sulle pareti, diffrazioni sugli spigoli, ecc.); l’effetto di tale interazione dipende dalle caratteristiche geometriche ed elettromagnetiche dell’ambiente.

Le caratteristiche della propagazione in un radio-collegamento reale

a. dipendono sensibilmente dalle proprietà dello scenario propagativo

b. hanno un impatto molto significativo sulle caratteristiche del segnale ricevuto (potenza ricevuta, dispersione temporale, *shift* in frequenza dovuto a spostamento *Doppler*, ...)

Esempio: interazione onda EM - singolo ostacolo:



Il campo totale ricevuto è dato dall'interferenza dei singoli contributi che giungono al ricevitore

Obiettivi della lezione

- 1.** Analizzare e descrivere le caratteristiche della propagazione EM in uno scenario reale complesso (es. ambiente urbano)
- 2.** Definire grandezze e funzioni opportune di ausilio alla rapida identificazione e comprensione delle proprietà propagative di un dato scenario

Quali strumenti ?

1. Campagne di misura

- 😊 dati accurati e precisi
- 😞 per una descrizione dettagliata della propagazione sono necessari strumenti e procedure piuttosto complesse
- 😞 costi elevati \Rightarrow pochi dati disponibili

2. Equazioni di Maxwell

- 😊 soluzioni esatte e rigorose
- 😞 ... ma difficili da calcolare
- 😞 difficile valutazione delle caratteristiche della propagazione

3. Modelli euristici (esempio: formula di Hata)

- 😊 molto semplici e di facile utilizzo
- 😞 troppo semplici (solo valutazioni a “banda stretta”)
- 😞 considerano troppo pochi parametri ambientali

4. Modelli a Raggi (Teoria geometrica della propagazione)

- 😊 descrizione a raggi intuitiva
- 😊 potenzialmente precisi ed accurati
- 😞 richiedono descrizione molto accurata dell'ambiente

Equazioni di Maxwell

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} + \vec{J}_c + \vec{J}_i = j\omega\varepsilon_c\vec{E} + \vec{J}_i$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Mezzo normale
(lineare, isotropo, tempo invariante)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + j\omega\rho = 0$$

(Equazione di continuità)

Formula di Hata

- Formula analitica per valutare il valore medio dell'attenuazione
- È stato sviluppato a partire da misure realizzate da Okumura a Tokio nel 1968. La formula è stata poi fornita da Hata nel 1980.

$$L = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_{BS} - a(h_{MS}) + 44.9 - 6.55 \log h_{BS} \log R^n$$

f: frequenza, in MHz

h_{BS} : altezza della BS in m (si tiene conto della irregolarità del terreno)

$a(h_{MS})$: parametro legato all'altezza sul terreno del MS (di solito trascurabile)

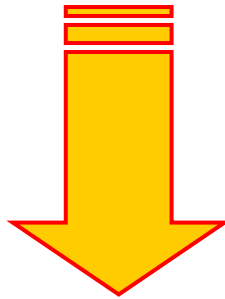
R: distanza fra i terminali, in km

$$n = \begin{cases} 1 & \text{per } R \leq 20 \text{ km} \\ 1 + \left(0.14 + 1.87 \cdot 10^{-4} * f + 1.07 \cdot 10^{-3} * h_{BS} \right) * (\log R / 20)^{0.8} & \text{per } R > 20 \text{ km} \end{cases}$$

- I limiti di applicabilità del modello sono:

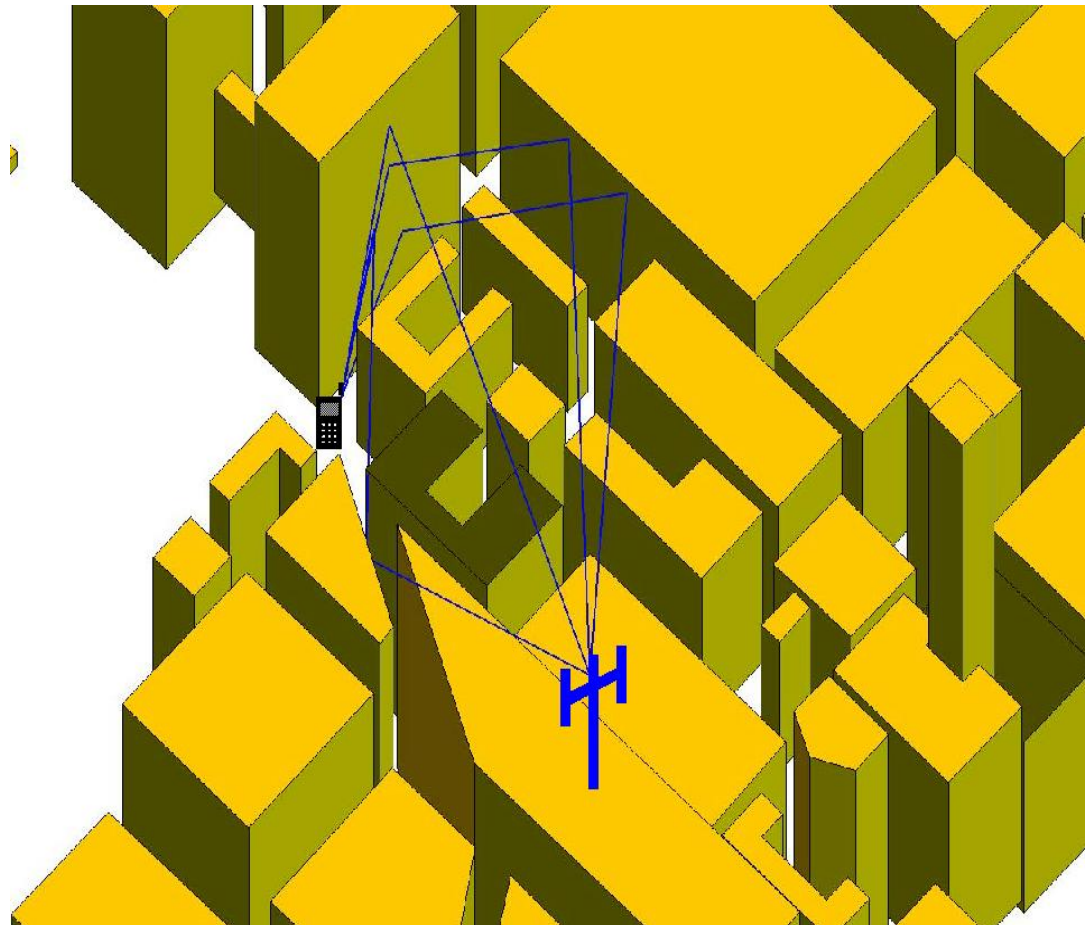
$$\begin{aligned} R &\geq 1 \text{ km} \\ h_{BS} &\geq 30 \text{ m} \end{aligned}$$

Teoria Geometrica della propagazione = descrivere la propagazione per mezzo di raggi elettromagnetici (ottici) che partono dal trasmettitore e giungono al ricevitore interagendo con gli oggetti dello scenario



Per calcolare il campo associato ad ogni singolo raggio ricevuto occorre:

- Individuare le traiettorie dei raggi (obbediscono a ben precise leggi !!)
- Descrivere come il campo elettromagnetico “evolve”, si trasforma lungo i raggi ottici



Calcolo delle traiettorie: il principio di Fermat

- Si considerino in un dato mezzo 2 punti P_1 e P_2 ed un percorso che li colleghi; si definisce *cammino ottico* il seguente integrale:

$$L \equiv \int_{P_1}^{P_2} n(s) \, ds \quad (\text{Il valore di } L \text{ dipende ovviamente da } P_1, P_2 \text{ e dal percorso scelto})$$

- Vale allora il **principio di Fermat**: "Il cammino ottico e' stazionario per raggi effettivi", ovvero **la traiettoria effettiva di un raggio minimizza il cammino ottico**.

- Esempio: mezzo omogeneo privo di ostacoli (caso ideale)

In un mezzo omogeneo ($n=\text{costante}$), L può essere ri-scritto come

$$L \equiv \int_{P_1}^{P_2} n \, ds = n \int_{P_1}^{P_2} ds = n \cdot \ell$$

dove ℓ rappresenta la lunghezza del percorso scelto; e' allora evidente che il percorso a lunghezza minima e' quello rettilineo \Rightarrow traiettorie rettilinee.

Curvatura delle traiettorie

In pratica 2 possono essere le cause di disomogeneità del mezzo (e quindi di curvatura delle traiettorie):

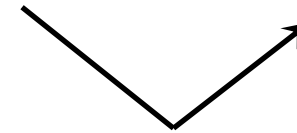
1. Disomogeneità dei gas che compongono l'atmosfera

- Indice di rifrazione lentamente variabile
- Leggera curvatura delle traiettorie (sempre verso la regione più densa)
- Propagazione troposferica (ponti radio)



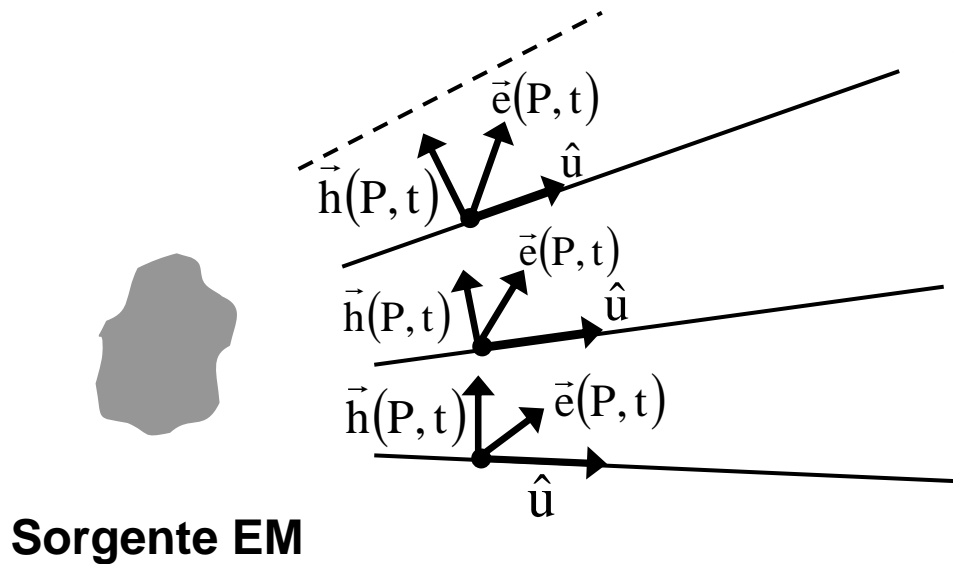
2. Presenza di ostacoli

- Brusca variazione dell'indice di rifrazione (discontinuità)
- Brusca variazione della traiettoria



Nella maggior parte dei casi (analisi dei sistemi di telerilevamento e di radiolocalizzazione) le disomogeneità dei gas atmosferici possono essere trascurate, mentre è importante conoscere e valutare l'interazione dell'onda EM con gli oggetti dello scenario

Vettore di Poynting e raggi ottici

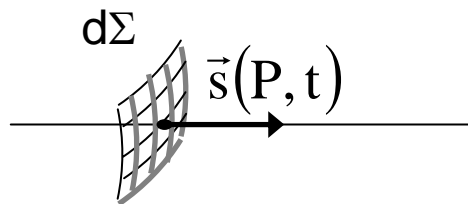


- Il campo elettrico, il campo magnetico e la direzione del raggio formano in ogni punto P ed in ogni istante t una terna ortogonale

$$\vec{h}(P, t) = \frac{\hat{u}(P) \times \vec{e}(P, t)}{\eta}$$

Analoga relazione vale per i fasori complessi associati

- Per definizione $\vec{s}(P, t) = \vec{e}(P, t) \times \vec{h}(P, t) \Rightarrow \boxed{\vec{s}(P, t) // \hat{u}(P)}$



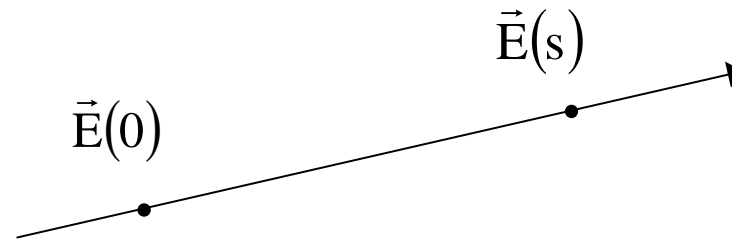
$$dP = |\vec{s}(P, t)| \cdot d\Sigma$$

L'energia si propaga lungo i raggi ottici

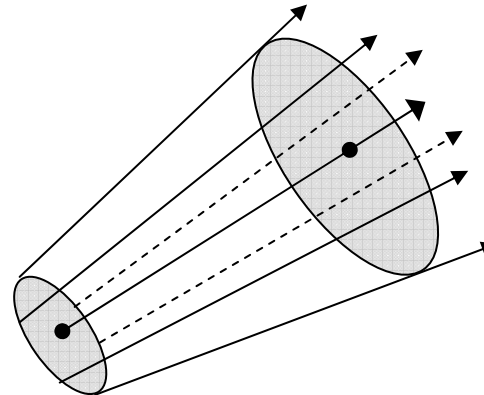
Espressione del campo EM (1/2)

- Detta s l'ascissa curvilinea lungo il generico raggio, l'espressione generale del campo è la seguente

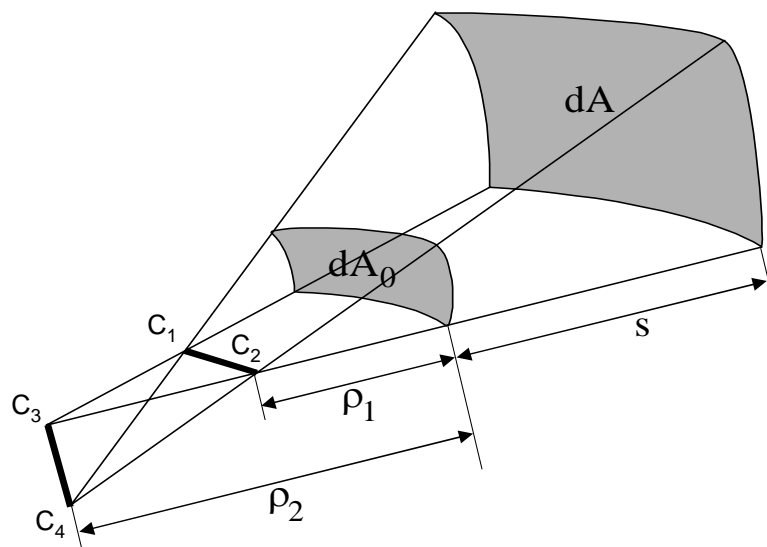
$$\vec{E}(s) = \vec{E}(0) \cdot A \cdot e^{-j\beta s}$$



- **A** rappresenta il **fattore di divergenza**: esso tiene conto dell'attenuazione dovuta all'allargamento del fronte d'onda con la propagazione. La potenza portata da ogni raggio diminuisce in generale con la distanza poiché, man mano che l'onda avanza, l'energia viene distribuita su una superficie sempre più ampia.



Espressione del campo EM (2/2)



➤ Se propagazione per raggi rettilinei e onda generica (cioè sorgente generica), si può dimostrare che:

$$A(\rho_1, \rho_2, s) = \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{(\rho_1 + s) \cdot (\rho_2 + s)}}$$

→ ρ_1, ρ_2 : raggi di curvatura principali

→ $C_1 C_2$, $C_3 C_4$: caustiche dell'onda

➤ In particolare:

a) Onda piana: $\rho_1 = \rho_2 = \infty \Rightarrow A = 1$

b) Onda sferica: $\rho_1 = \rho_2 = \rho_0 \Rightarrow A = \rho_0 / (\rho_0 + s)$

$$\vec{E}(s) = \underbrace{\vec{E}(0)}_{\text{Field at reference point (s=0)}} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{(\rho_1 + s) \cdot (\rho_2 + s)}}}_{\text{Spreading factor}} \cdot \underbrace{e^{-j\beta s}}_{\text{Phase factor}}$$

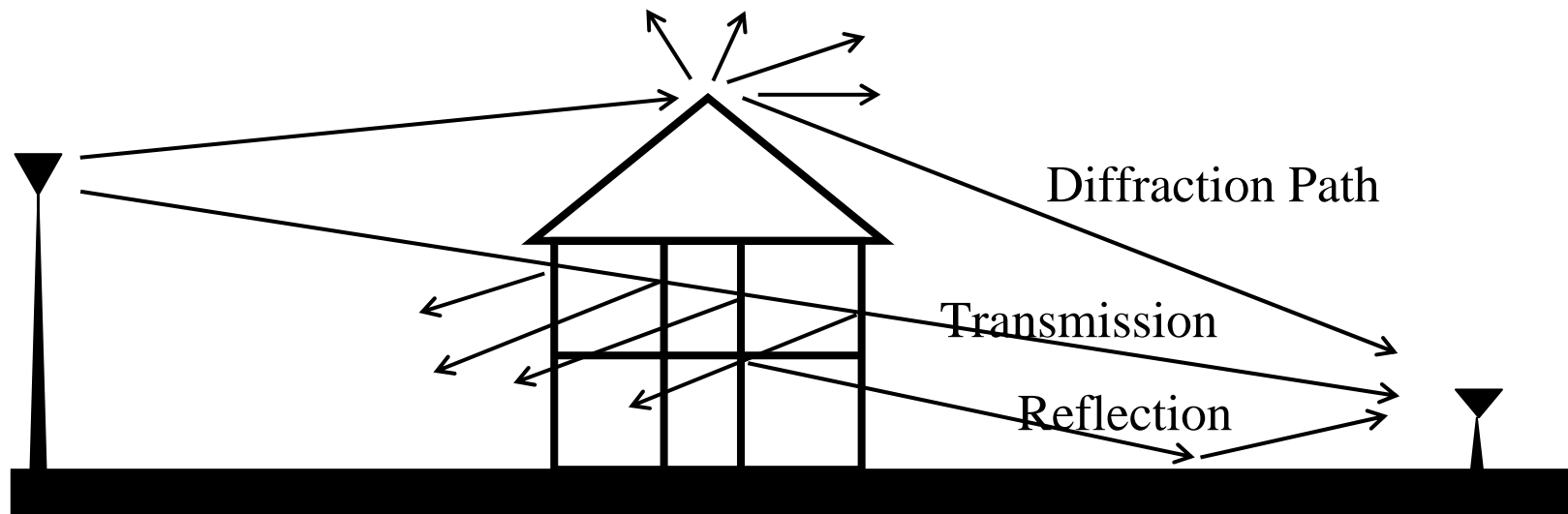
Espressione **vettoriale** per la propagazione del campo lungo il raggio

Propagazione in presenza di ostacoli

L'onda elettromagnetica subisce diverse interazioni con l'ambiente reale di propagazione prima di giungere al ricevitore. I meccanismi di propagazione più importanti sono:

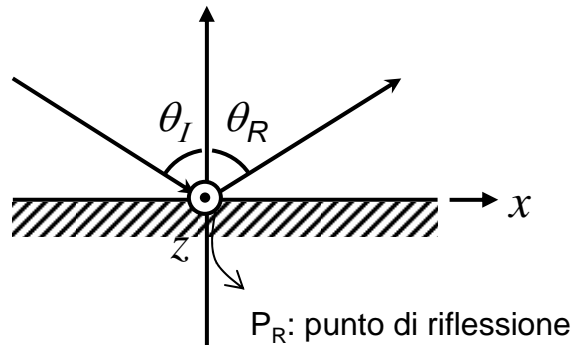
- 1) *Riflessione*;
 - 2) *Trasmissione (Rifrazione)*;
 - 3) *Diffrazione*;
- } Ottica Geometrica classica

[4) *Diffusione (Scattering)*;]



Raggio riflesso e raggio trasmesso (onda piana e superficie piana)

➤ Raggio Riflesso

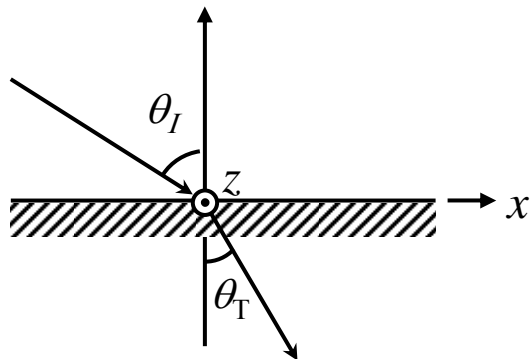


⇒ Direzione e verso : principio di Fermat (o legge di Snell della riflessione) $\Rightarrow \theta_i = \theta_r$

⇒ Polarizzazione e fase:

$$\vec{E}_r(s) = \vec{E}_r^{TE}(s) + \vec{E}_r^{TM}(s) = \begin{bmatrix} \Gamma_{TE} & 0 \\ 0 & \Gamma_{TM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_i^{TE}(T_x) \\ \vec{E}_i^{TM}(T_x) \end{bmatrix}$$

➤ Raggio Trasmesso

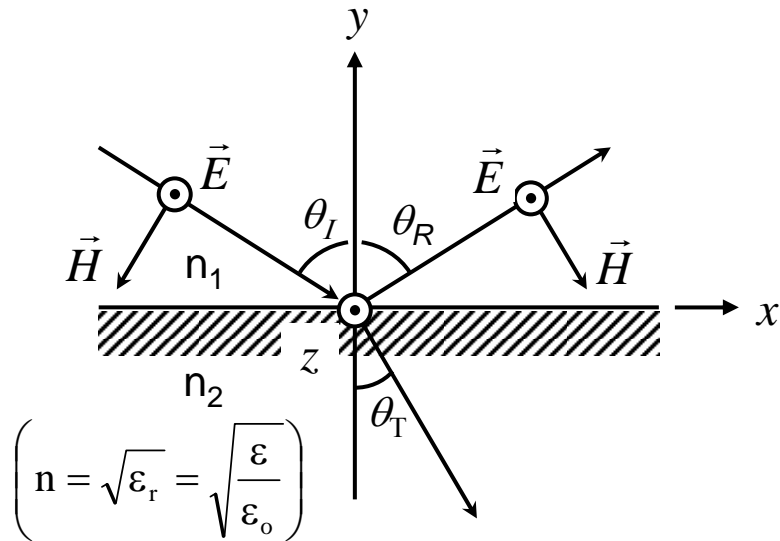


⇒ Direzione e verso : principio di Fermat (legge di Snell della rifrazione) $\Rightarrow n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$

⇒ Polarizzazione e fase:

$$\vec{E}_t(s) = \vec{E}_t^{TE}(s) + \vec{E}_t^{TM}(s) = \begin{bmatrix} \tau_{TE} & 0 \\ 0 & \tau_{TM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_i^{TE}(T_x) \\ \vec{E}_i^{TM}(T_x) \end{bmatrix}$$

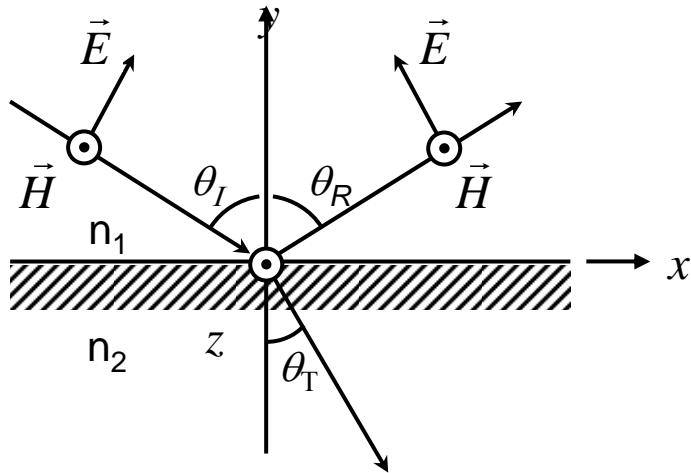
Coefficienti di riflessione e di trasmissione



➤ Polarizzazione TE

$$\Gamma_{\text{TE}} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

$$\tau_{\text{TE}} = 1 - \Gamma_{\text{TE}}$$

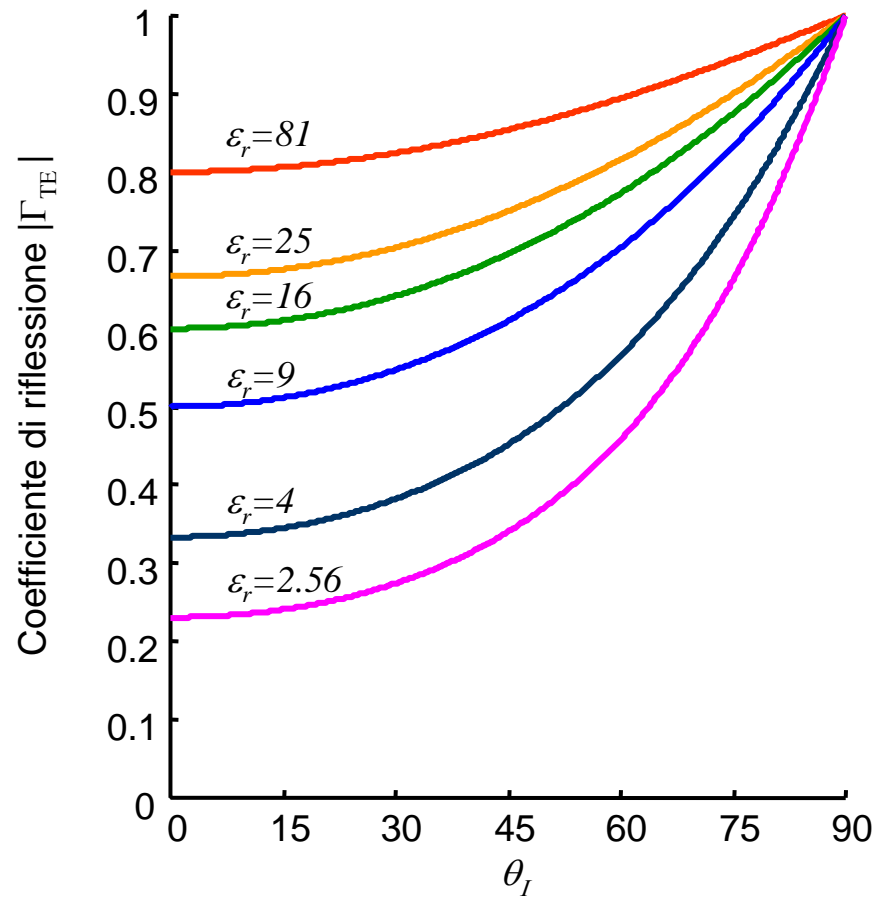


➤ Polarizzazione TM

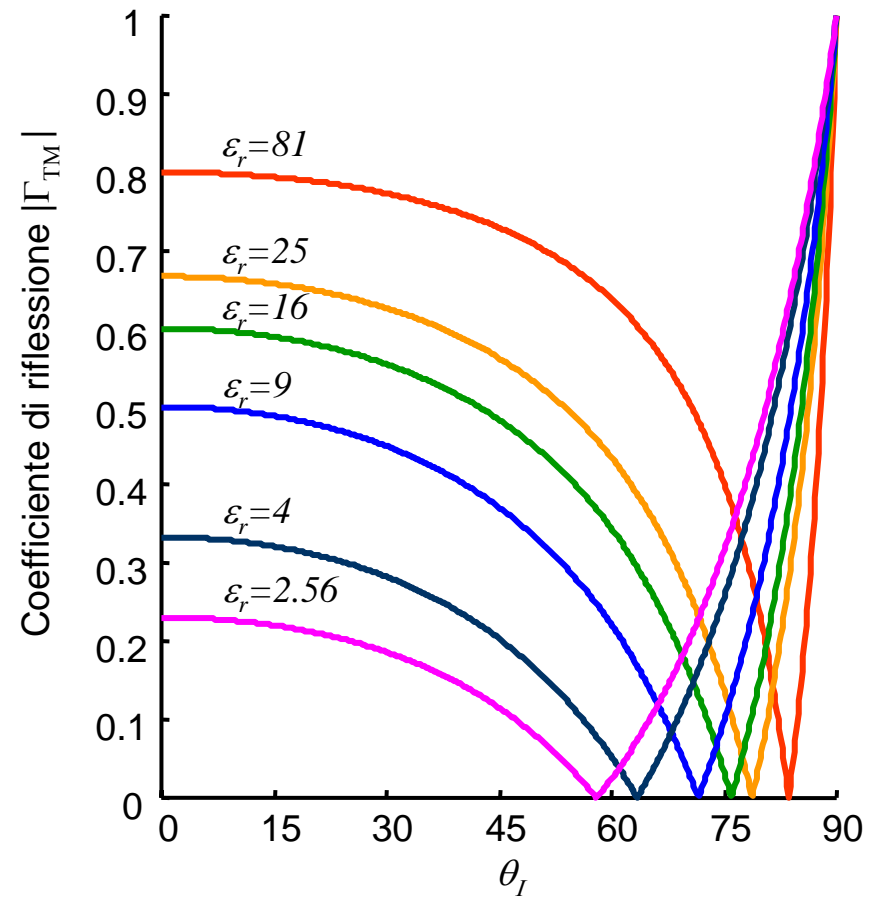
$$\Gamma_{\text{TM}} = \frac{\cos \theta_i - \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i}}$$

$$\tau_{\text{TM}} = 1 - \Gamma_{\text{TM}}$$

Andamento dei coefficienti di riflessione

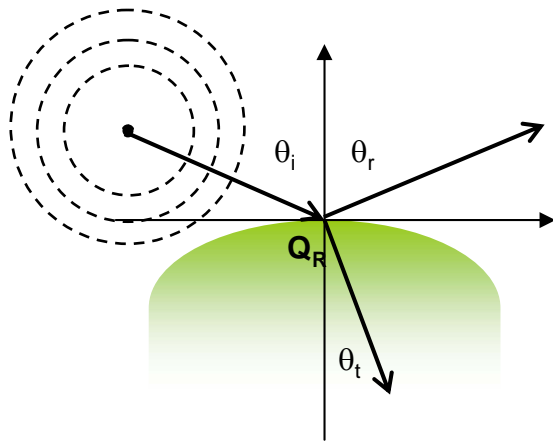


Polarizzazione TE



Polarizzazione TM

Raggio riflesso e raggio trasmesso (onda generica e superficie generica)



- I risultati ricavati nel caso piano ideale restano validi in situazioni realistiche più generali purché le superfici (d'onda e di interfaccia fra i 2 mezzi) siano *localmente piane*.



Grandezze in gioco nel sistema (e in particolare raggi di curvatura) $\gg \lambda$

- L'espressione per il calcolo del campo riflesso a distanza s dal punto di riflessione diviene pertanto (origine delle $s \equiv Q_R$):

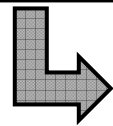
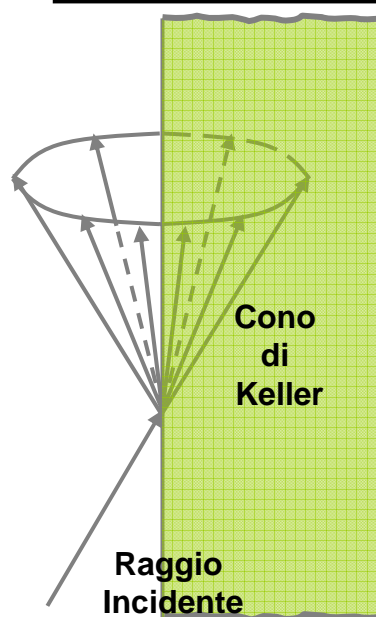
$$\vec{E}_r(s) = \vec{E}_r^{TE}(s) + \vec{E}_r^{TM}(s) = \begin{bmatrix} \Gamma_{TE} & 0 \\ 0 & \Gamma_{TM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_i^{TE}(P_R) \\ \vec{E}_i^{TM}(P_R) \end{bmatrix} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1^r \cdot \rho_2^r}{(\rho_1^r + s) \cdot (\rho_2^r + s)}} \cdot e^{-j\beta s}$$

ρ_1^r, ρ_2^r : raggi di curvatura principali dell'onda riflessa (dipendono dai raggi di curvatura dell'onda incidente e della superficie di riflessione nel punto di riflessione)

Raggio diffratto

L'estensione dell'Ottica Geometrica alla categoria dei Raggi Diffratti e' stata introdotta da J. B. Keller nel 1961 e si articola nei seguenti 2 seguenti assunti :

- I. *Si generano uno o più raggi diffratti ogniqualvolta un raggio dell'OG classica (diretto o riflesso) incide su uno spigolo o un vertice;*
- II. *Per ogni cammino diffratto vale il Principio di Fermat (Estensione del principio di Fermat al fenomeno della diffrazione)*

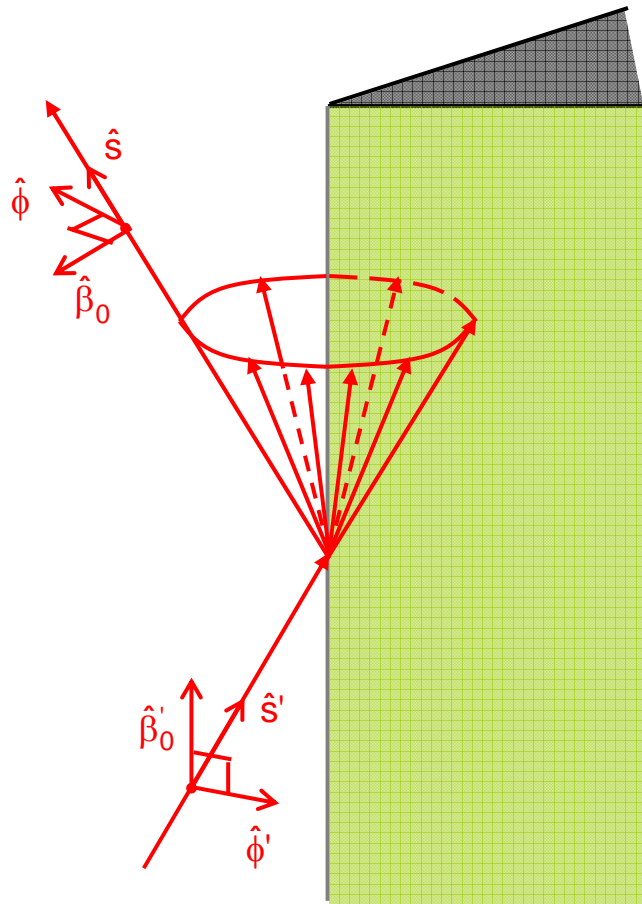


Legge della diffrazione: il raggio diffratto e quello incidente giacciono da parti opposte rispetto al piano \perp allo spigolo e passante per il punto di diffrazione; gli angoli che tali raggi formano con lo spigolo (angolo di incidenza e angolo di diffrazione) sono dati dalla “legge di Snell per la diffrazione”:

$$n_i \cdot \sin\theta_i = n_d \cdot \sin\theta_d$$

- \Rightarrow Se i raggi si propagano nello stesso mezzo, $\theta_d = \theta_i$;
 \Rightarrow Ogni raggio incidente genera una infinità di raggi diffratti \in alla superficie laterale di un cono (cono di Keller)

Il Campo Diffratto



⇒ Direzione e verso : principio di Fermat (cono di Keller)

⇒ Polarizzazione e fase:

$$\begin{bmatrix} E_{\beta_0}^d \\ E_{\phi}^d \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\beta_0'}^i(Q_D) \\ E_{\phi'}^i(Q_D) \end{bmatrix} \cdot A(s, \rho^d) \cdot e^{-j\beta s}$$

Spreading Factor

- Espressione generale del fattore di divergenza⁽⁹⁾: $A(\rho^d, s) = \sqrt{\frac{\rho^d}{s \cdot (\rho^d + s)}}$
- ρ^d (distanza della caustica dell'onda diffratta da Q_D) dipende in generale dalla curvatura dell'onda incidente, dal raggio di curvatura dello spigolo nel punto Q_D e dagli angoli di incidenza e diffrazione; in generale:

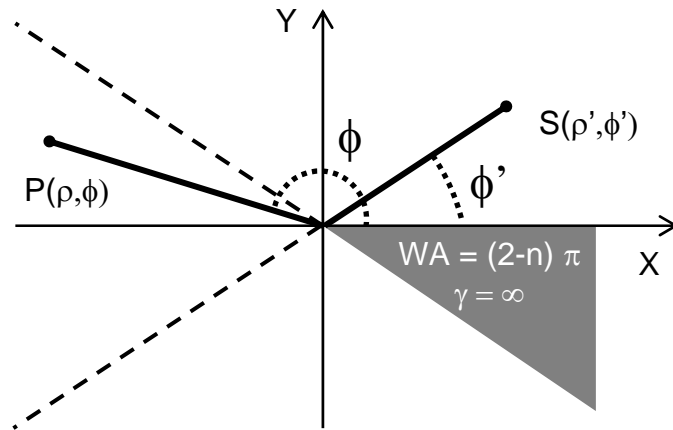
$$\frac{1}{\rho^d} = \frac{1}{\rho_e} - \frac{\hat{n} \cdot (\hat{s}' - \hat{s})}{\rho_g \cdot \sin^2 \beta_0}$$

- ρ_e : curvatura onda incidente
- ρ_g : curvatura edge

- Caso particolare: *straight edge*: $A(s, s') = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{s}} & \text{per onda incidente piana o conica} \\ \frac{1}{\sqrt{s \cdot \sin \beta_0}} & \text{per onda incidente cilindrica} \\ \sqrt{\frac{s'}{s \cdot (s + s')}} & \text{per onda incidente sferica} \end{cases}$

Coefficienti di diffrazione

(Geometrical Theory of Diffraction)



Coefficienti di diffrazione di Keller

$$D^s(\rho, \phi, \phi', n) = \frac{-e^{-j\pi/4} \cdot \sin(\pi/n)}{n\sqrt{2\pi\beta}} \cdot \left[\frac{1}{\cos(\pi/n) - \cos(\xi^-/n)} - \frac{1}{\cos(\pi/n) - \cos(\xi^+/n)} \right]$$

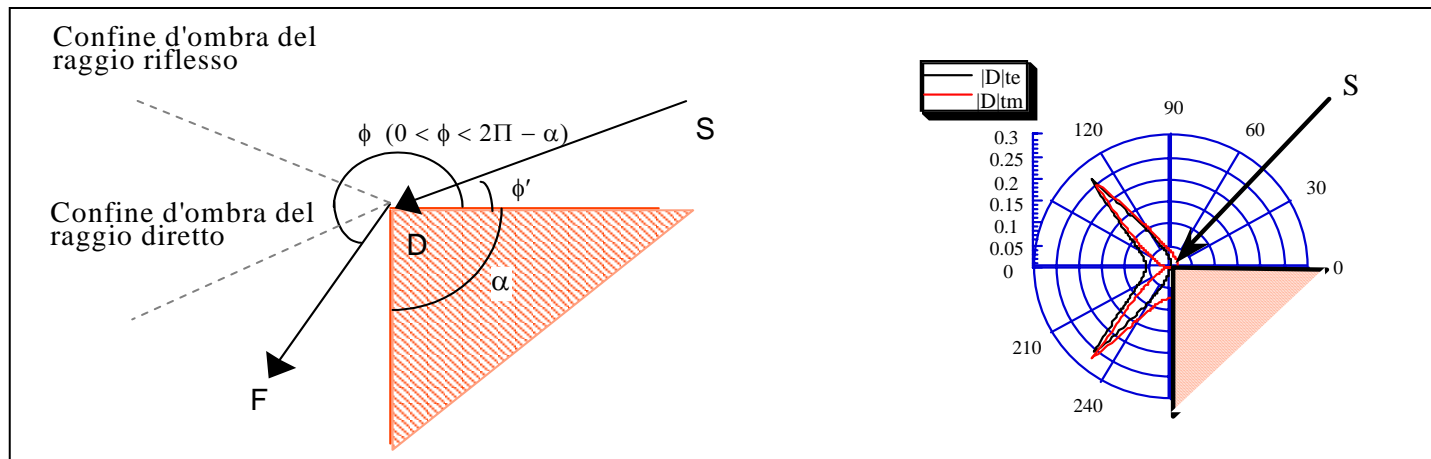
$$D^s(\rho, \phi, \phi', n) = \frac{-e^{-j\pi/4} \cdot \sin(\pi/n)}{n\sqrt{2\pi\beta}} \cdot \left[\frac{1}{\cos(\pi/n) - \cos(\xi^-/n)} + \frac{1}{\cos(\pi/n) - \cos(\xi^+/n)} \right]$$

$$\begin{aligned} \xi^- &= \phi - \phi' \\ \xi^+ &= \phi + \phi' \end{aligned}$$

Coefficienti di diffrazione

(Uniform Theory of Diffraction)

- I coefficienti della GTD presentano irrealistiche singolarità (∞) sui “confini d'ombra” \Rightarrow proprio dove la diffrazione è più forte



- Coefficienti di *Kouyoumjian-Pathak* (**Uniform Theory of Diffraction**)

$$D^{s,h}(\rho, \phi, \phi', n) = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi\beta}} \cdot \left\{ \left(\cot\left[\frac{\pi + \xi^-}{2n}\right] \cdot F[\beta\rho g^+(\xi^-)] + \cot\left[\frac{\pi - \xi^-}{2n}\right] \cdot F[\beta\rho g^-(\xi^-)] \right) + \right.$$

$$\left. + \Delta \cdot \left(\cot\left[\frac{\pi + \xi^+}{2n}\right] \cdot F[\beta\rho g^+(\xi^+)] + \cot\left[\frac{\pi - \xi^+}{2n}\right] \cdot F[\beta\rho g^-(\xi^+)] \right) \right\}$$

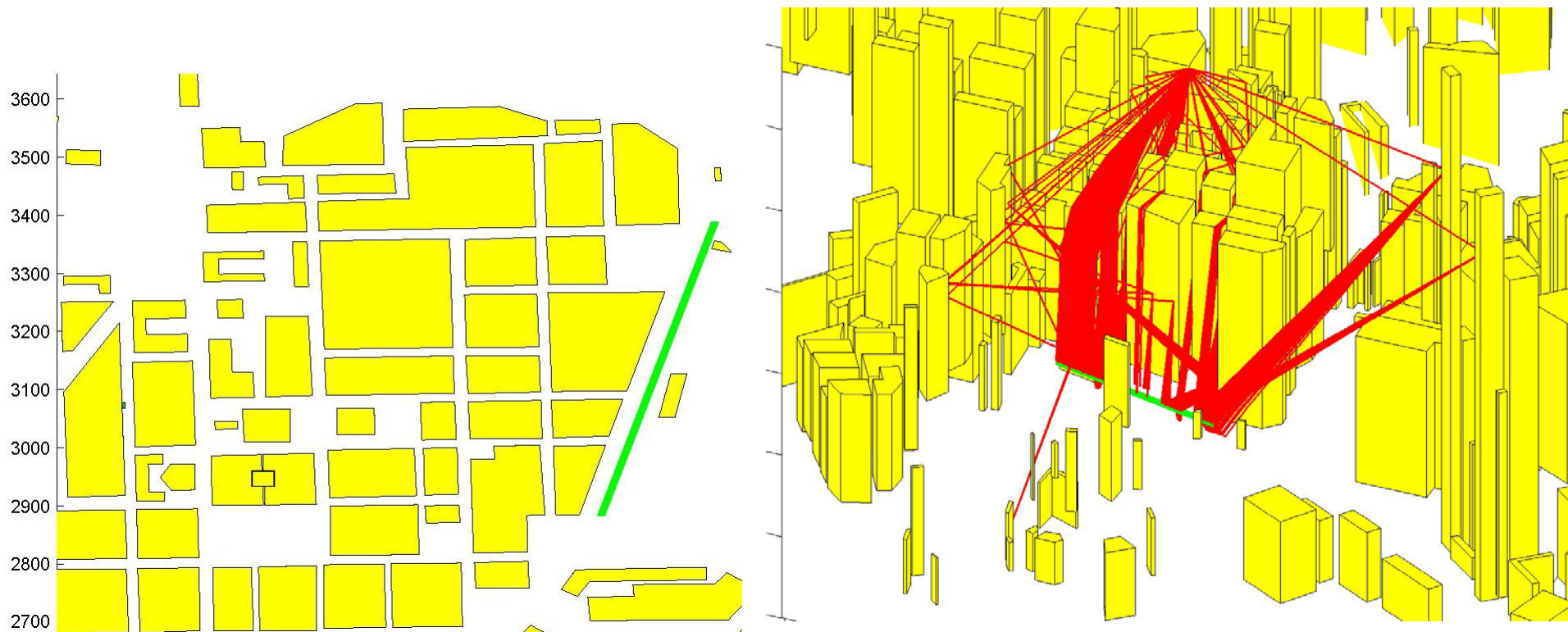
Soft polarization : $\Delta = -1$;
Hard polarization : $\Delta = +1$;

Principio del campo locale

Riflessione, rifrazione e diffrazione obbediscono al cosiddetto **Principio del campo locale**: il campo associato ai raggi riflesso, rifratto e diffratto dipende solo dalle proprietà elettromagnetiche e geometriche dell'oggetto in un intorno del punto di riflessione e dalle proprietà del campo incidente nel punto di riflessione/diffrazione

Esempio (1/2)

Note le leggi che governano le traiettorie, assegnate le posizioni di TX ed RX in un assegnato ambiente, è possibile tracciare i raggi che collegano i due terminali



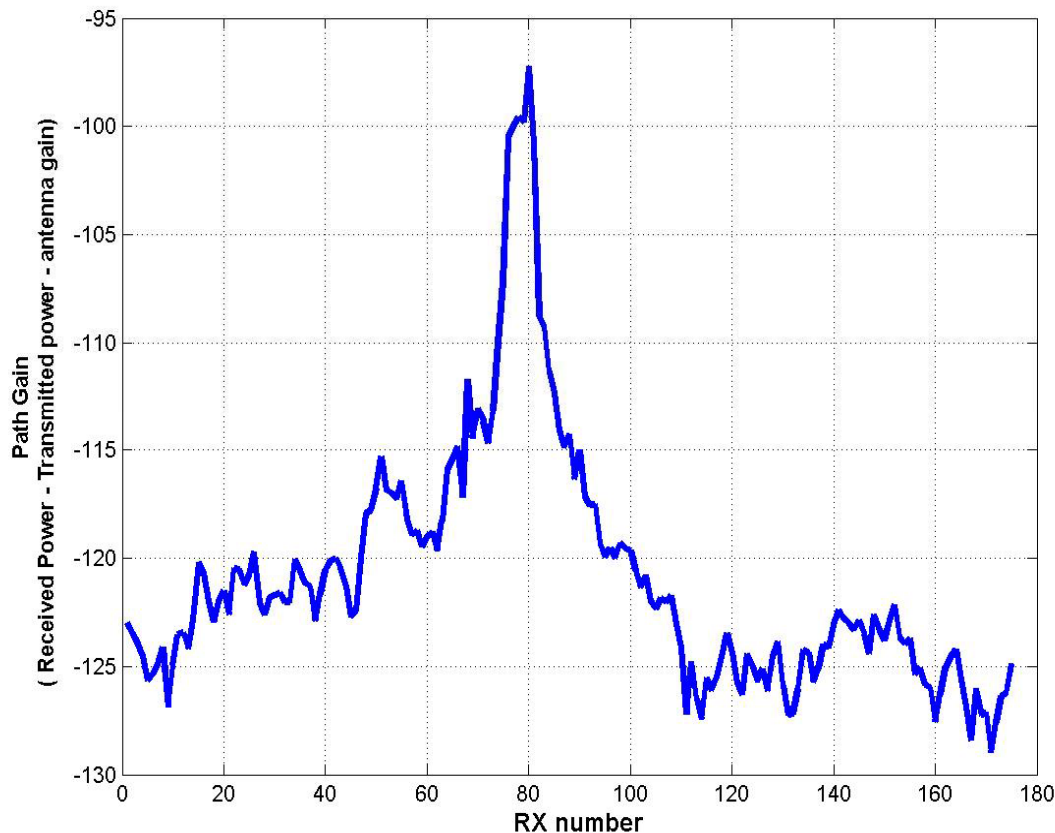
Esempio: Helsinki

Esempio (2/2)

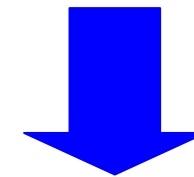
.... e calcolare il campo e la potenza *totale* ricevuti per ogni ricevitore:

$$\vec{E}_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{N_r} \vec{E}_i$$

$$P_R = \frac{\lambda^2}{8\pi\eta} \cdot \left| \sum_{i=1}^{N_r} \left(\sqrt{g_R(\theta_i, \phi_i)} \cdot \vec{p}_R(\theta_i, \phi_i) \cdot \vec{E}_i \right) \right|^2$$



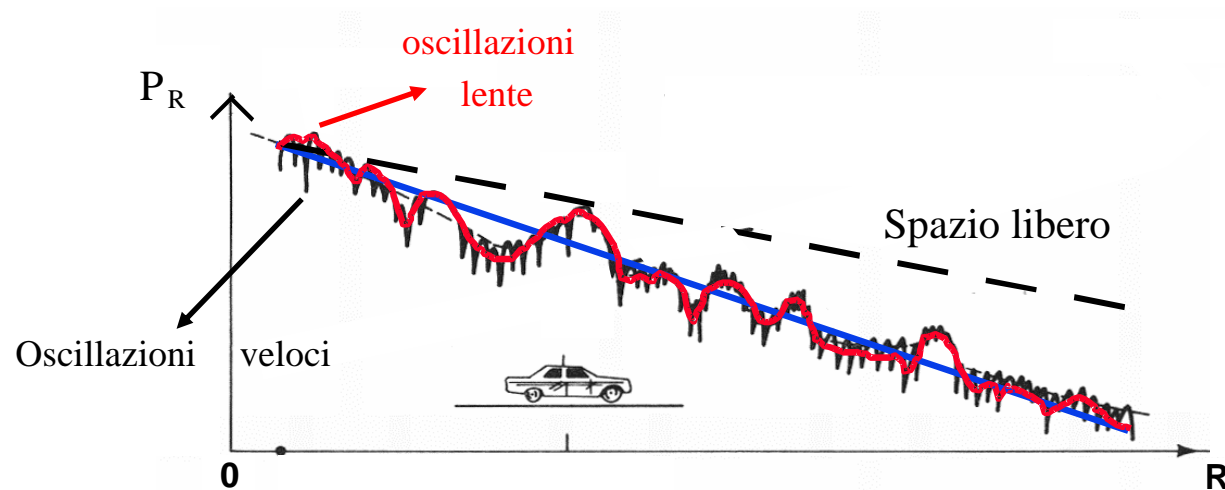
In virtù dei diversi percorsi e delle differenti interazioni subite, i campi associati ai raggi hanno fasi diverse, e la somma (vettoriale) deve tenerne conto



INTERFERENZA !!

Componenti della potenza ricevuta (1/7)

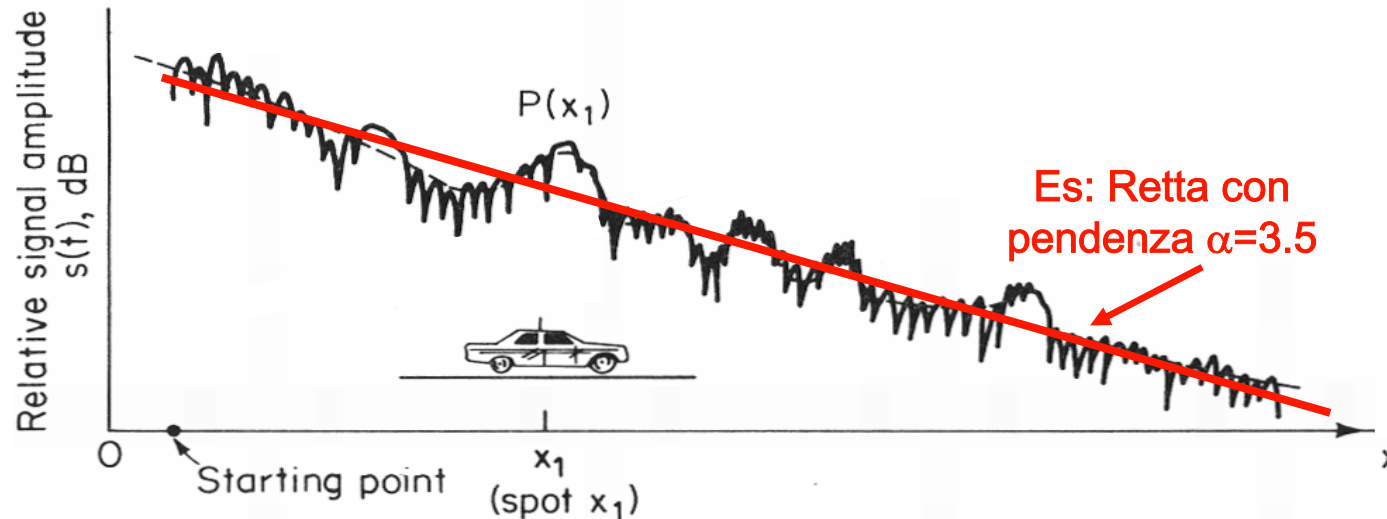
- ✓ Considerando tutte le caratteristiche reali dell'ambiente di propagazione, l'andamento della potenza ricevuta con la distanza si discosta significativamente da quello previsto dalla formula di Friis



- ✓ In ambiente reale si possono individuare 3 componenti principali:
 1. Termine dominante funzione della distanza R ;
 2. Oscillazioni lente (shadowing);
 3. Oscillazioni rapide (fast fading).

Componenti della potenza ricevuta (2/7)

1. Termine dominante funzione della distanza



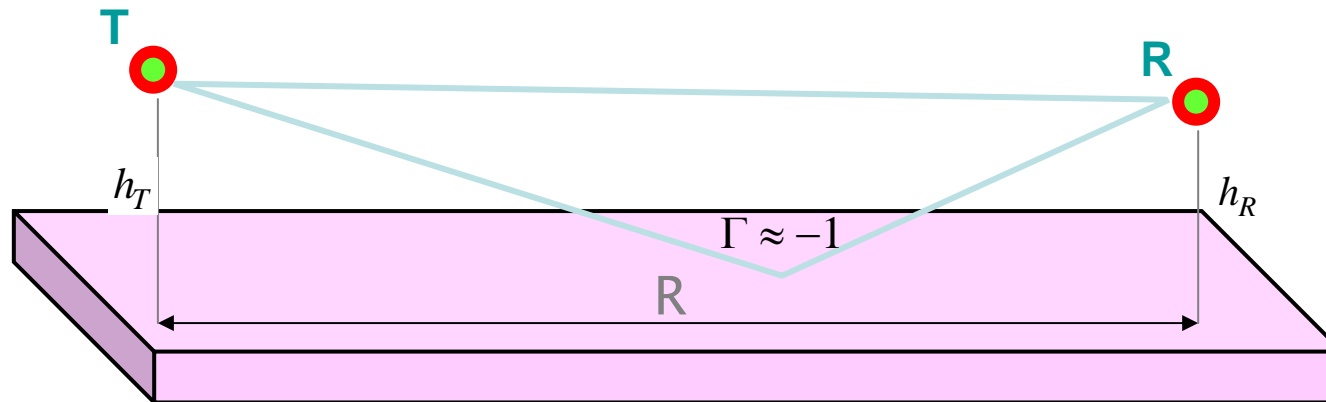
La potenza media ricevuta presenta in funzione della distanza un andamento del tipo:

$$P_R = P(R_0) \left(\frac{R_0}{R} \right)^\alpha \quad \text{con } 2 \leq \alpha \leq 4 \text{ (o più)}$$

a è detto **fattore di attenuazione** o **filtraggio spaziale**

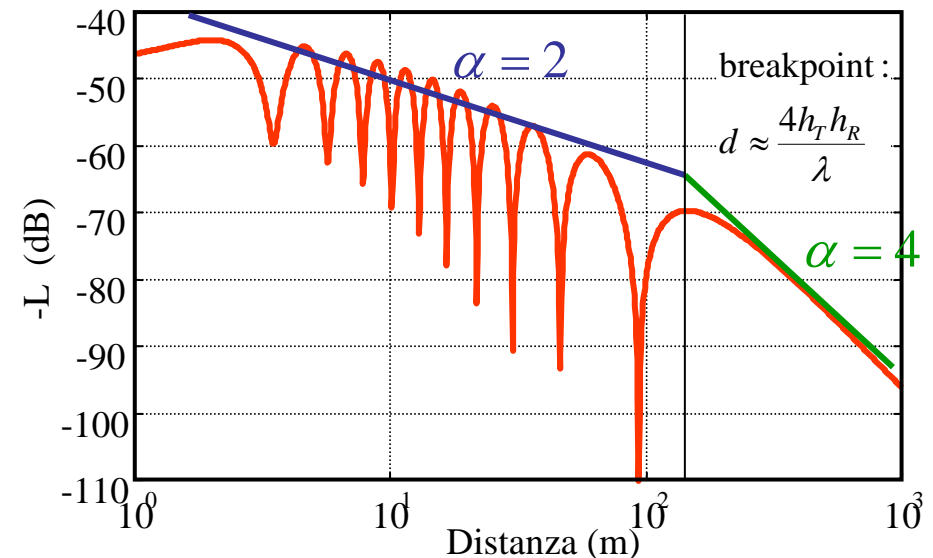
Componenti della potenza ricevuta (3/7)

✓ *Esempio: la sola presenza del suolo corrisponde al valore più penalizzante del fattore di attenuazione ($\alpha = 4$)*



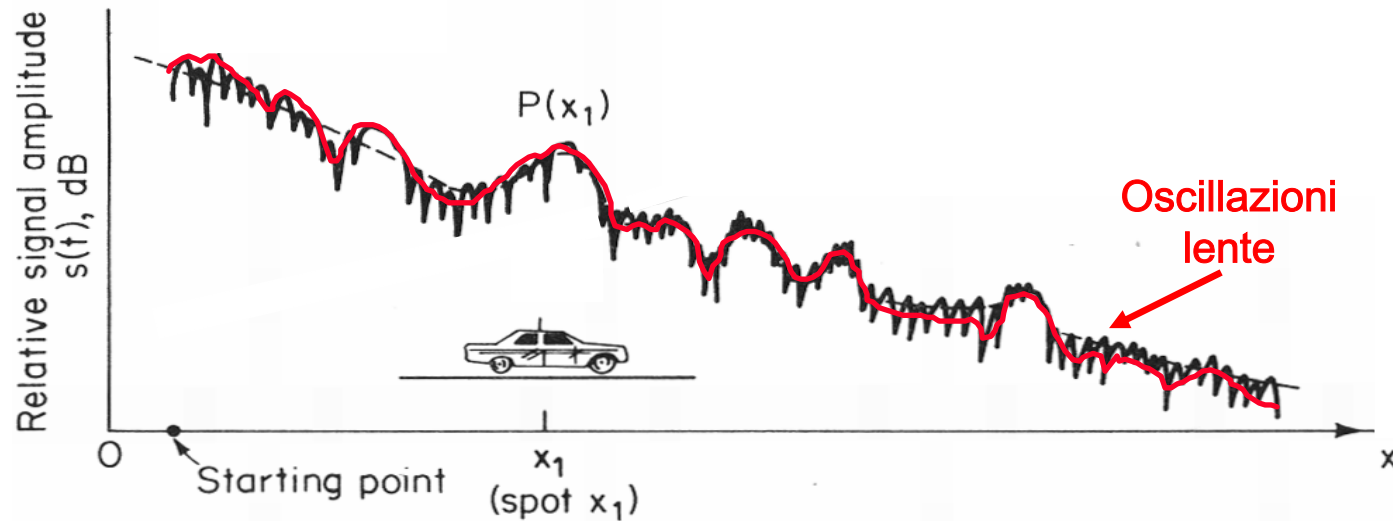
per $R \rightarrow \infty$:

$$L(R) = \frac{R^4}{G_T \cdot G_R \cdot (h_1 h_2)^2} \quad (\alpha = 4)$$



Componenti della potenza ricevuta (4/7)

2. Oscillazioni lente (1/2)



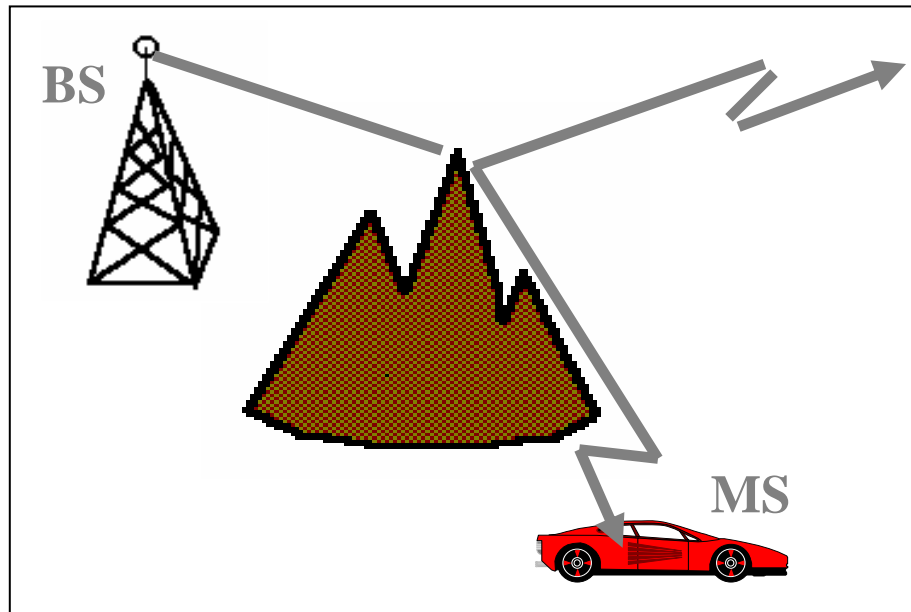
Le oscillazioni lente possono essere modellate per mezzo di una distribuzione log-normale:

$$f_L(\ell) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma \ell} \cdot e^{-\frac{(\ell - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Componenti della potenza ricevuta (5/7)

2. Oscillazioni lente (2/2)

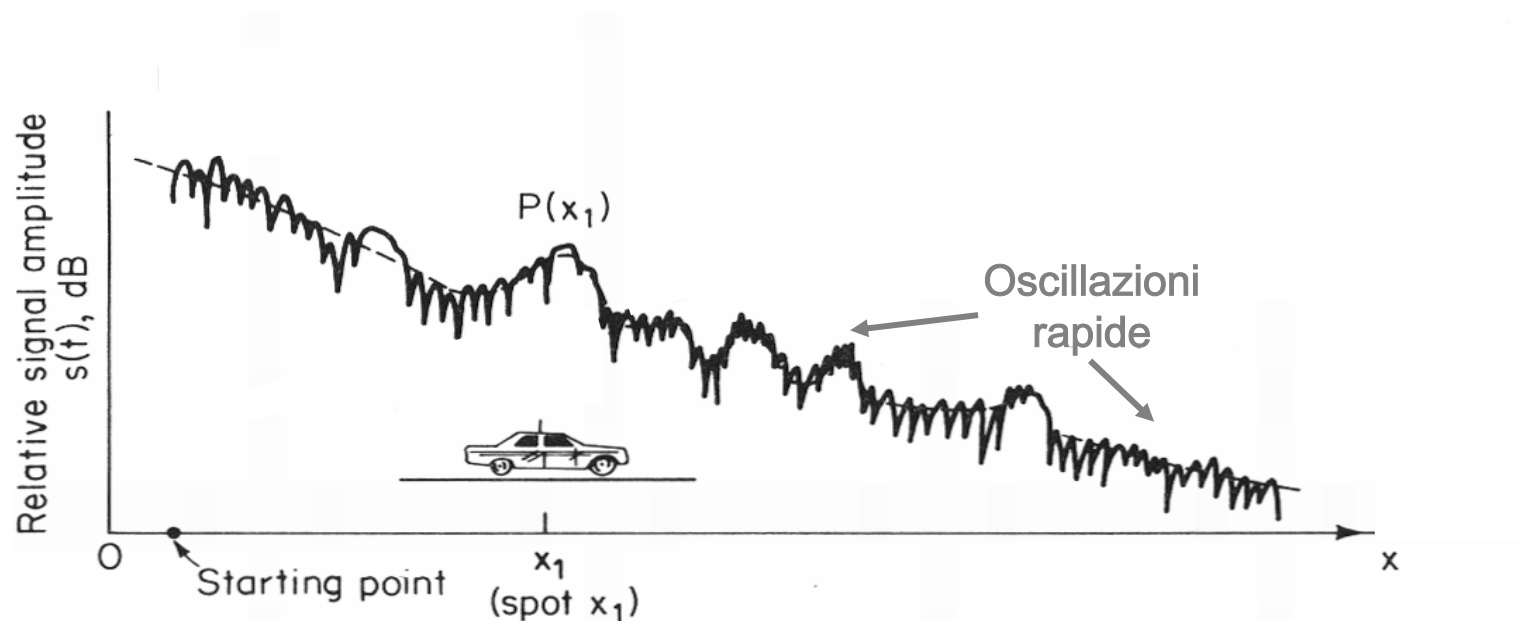
Un collegamento radiomobile è soggetto a forti ostruzioni variabili da posizione a posizione



Gli ostacoli presenti sul cammino di propagazione causano perdite per diffrazione che sono all'origine dello *shadowing lognormale*

Componenti della potenza ricevuta (6/7)

2. Oscillazioni rapide (1/2)



Le oscillazioni rapide possono essere descritte da una distribuzione di Rayleigh (o più in generale, Rice)

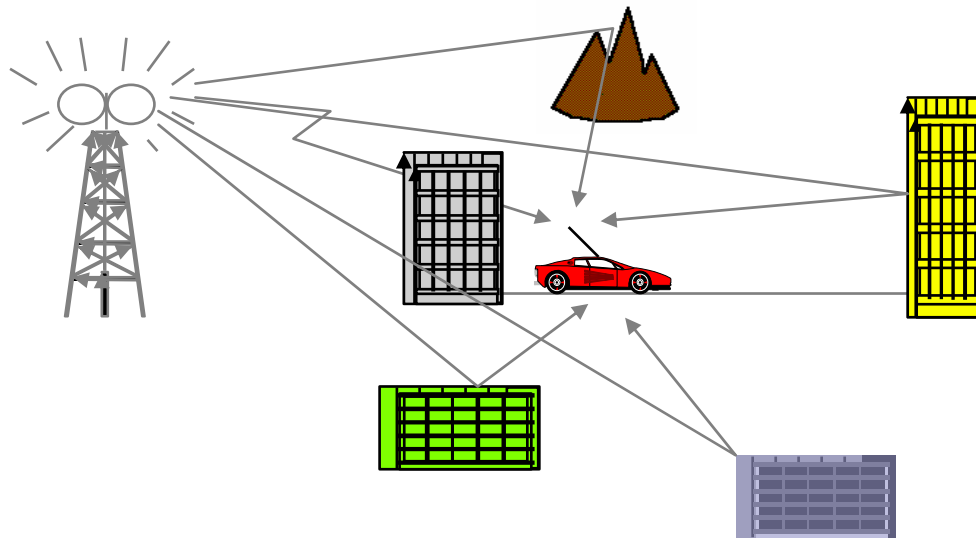
$$f_r(r) = \frac{2r}{\ell^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\ell^2}\right)$$

$$\text{Con } \ell^2 = E \{r^2\}$$

Componenti della potenza ricevuta (7/7)

2. Oscillazioni rapide (2/2)

La presenza di molti ostacoli nello scenario di propagazione fa sì che al mobile giungano numerosi contributi originati dall'interazione delle onde elettromagnetiche con l'ambiente circostante (*multipath*). Il segnale ricevuto è dato pertanto dall'*interferenza* dei segnali giungono al ricevitore dopo aver percorso cammini differenti.

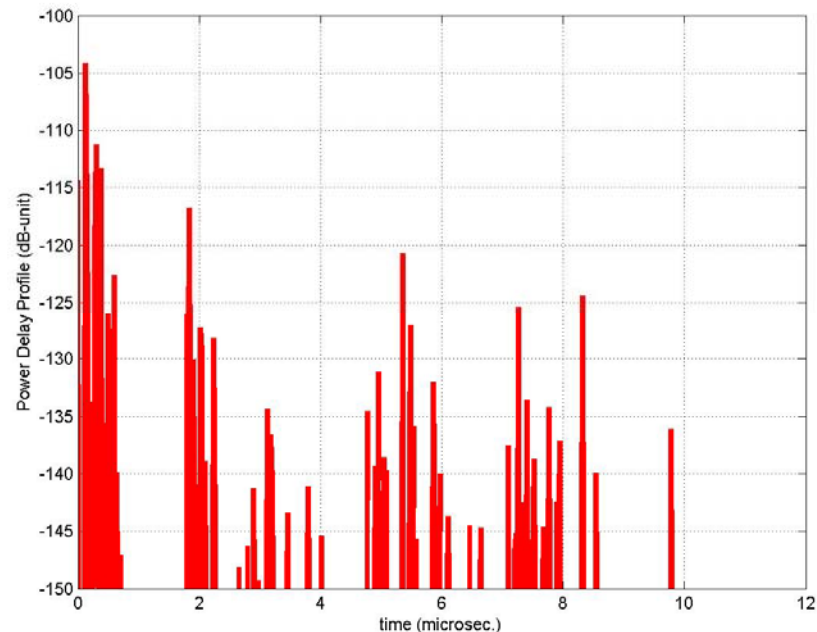


Gli oggetti dello scenario causano *riflessione, trasmissione e diffrazione* delle onde elettromagnetiche dando origine al *fast fading*

Multipath e distorsione

- In presenza di interferenza da cammini multipli, il segnale ricevuto NON subisce solo attenuazione
- Il segnale ricevuto risulta in generale **distorto**: la forma d'onda ricevuta ha un andamento differente da quello della forma d'onda trasmessa
- A causa dei diversi ritardi di propagazione dei raggi, in ricezione si può avere un allargamento temporale del segnale ricevuto (dispersione temporale)

Dispersione temporale nei sistemi numerici genera interferenza intersimbolo



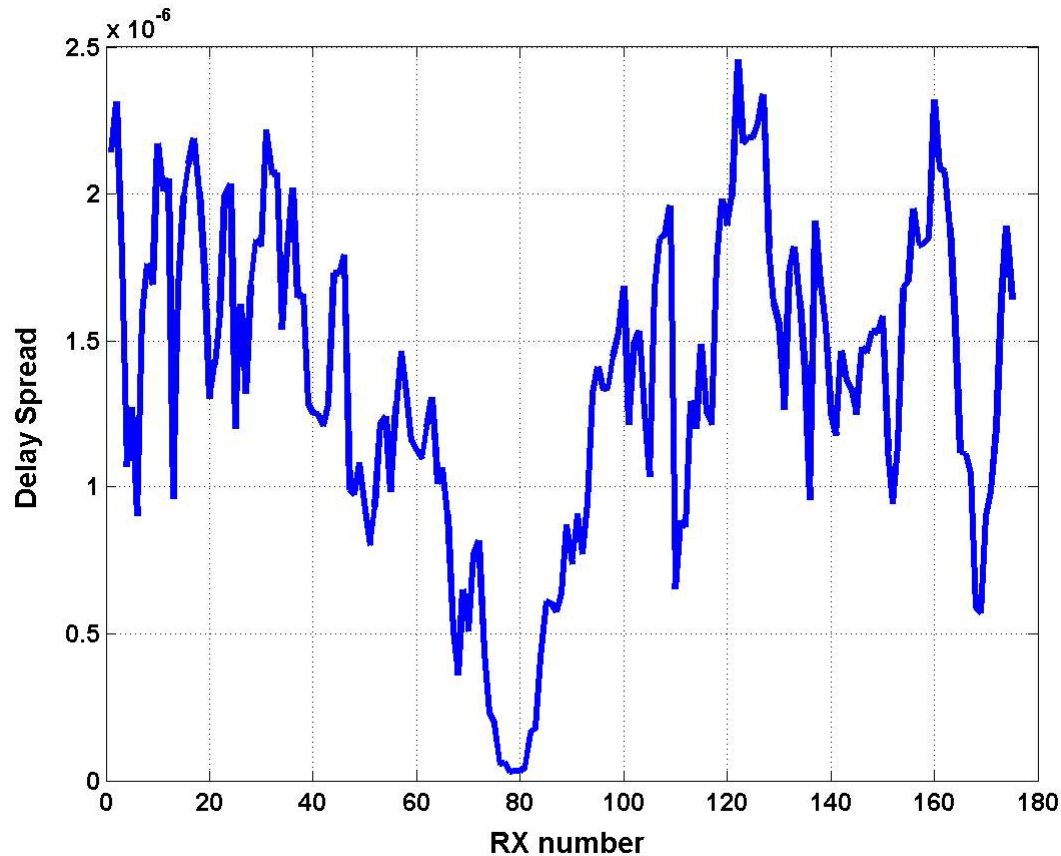
Delay Spread

- Detto τ_i il ritardo di propagazione relativo dell'i-mo raggio e P_i la sua potenza, si definisce *Delay Spread* la seguente grandezza

$$DS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_r} (\tau_i - \tau_m)^2 \cdot P_i}{\sum_{i=1}^{N_r} P_i}} \quad \text{dove} \quad \tau_m = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} \tau_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^{N_r} P_i}$$

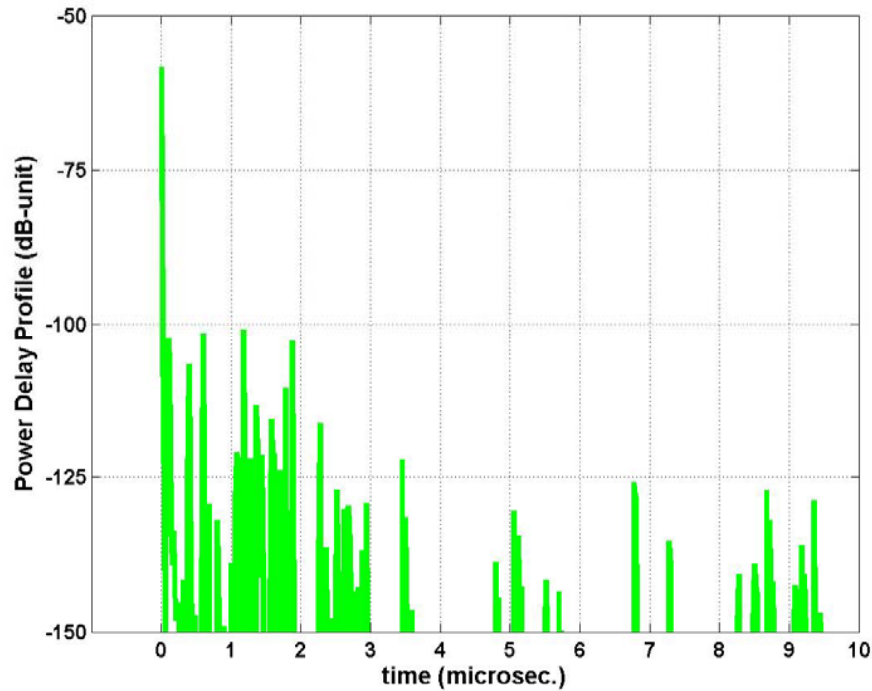
- Il *Delay Spread* dipende dalle caratteristiche del canale di propagazione e rappresenta una valutazione (non rigorosa) dell'allargamento temporale subito dal segnale ricevuto

Esempio DS: Helsinki (1/2)

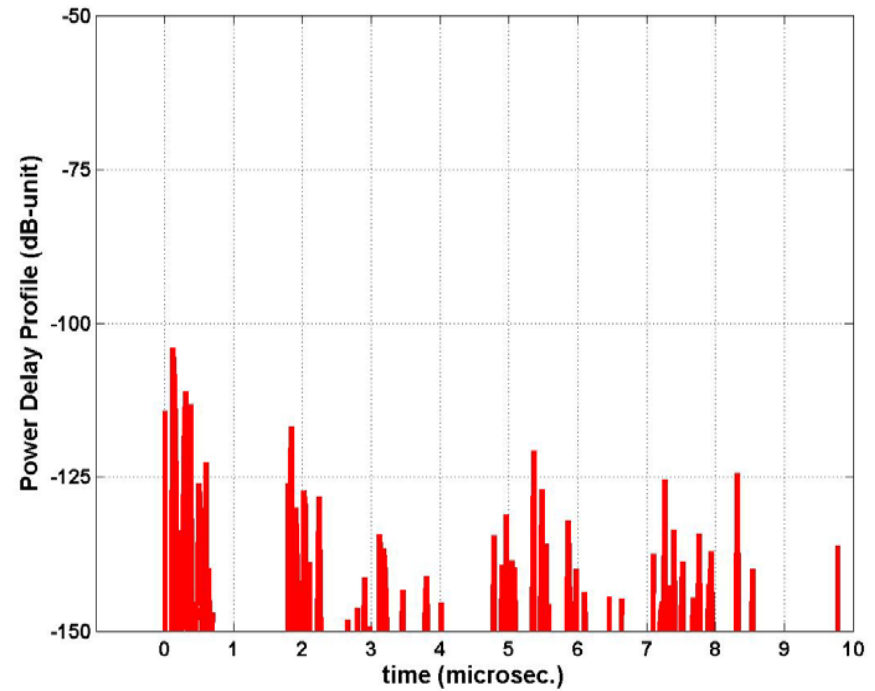


In corrispondenza dei ricevitori in *Line of Sight (LoS)*, il DS si abbassa sensibilmente poiché la potenza del raggio diretto è molto più forte della potenza associata agli altri raggi

Esempio DS: Helsinki (2/2)



Esempio LoS



Esempio NLoS

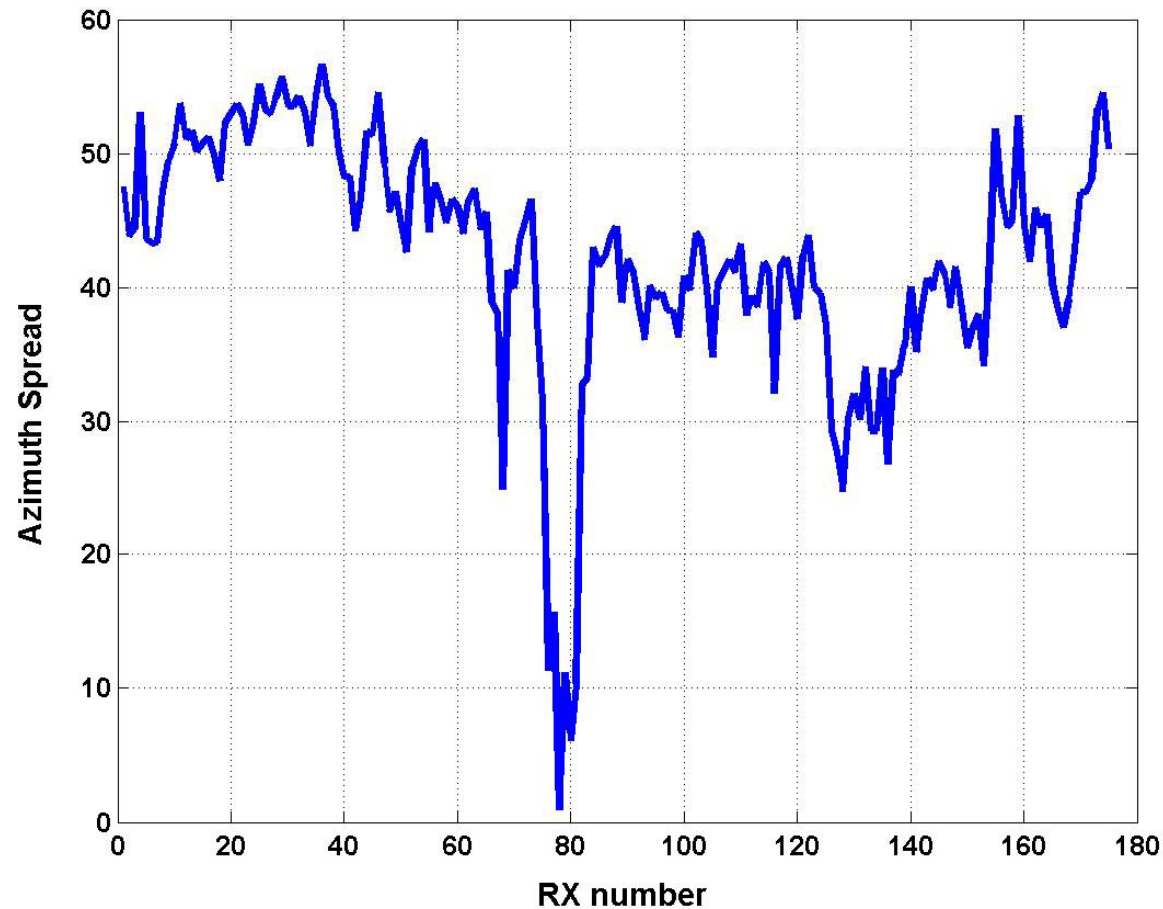
Azimuth Spread

- I cammini multipli determinano anche “dispersione angolare”: il segnale ricevuto non proviene da una unica direzione (come nel caso di spazio libero), ma è la combinazione di contributi provenienti da direzioni differenti
- Si ha quindi un “allargamento angolare” del segnale ricevuto, per descrivere il quale si fa riferimento all'*Azimuth Spread*

$$AS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_r} (\phi_i - \phi_m)^2 \cdot P_i}{\sum_{i=1}^{N_r} P_i}} \quad \text{dove } \phi_i \text{ è l'azimuth del } i\text{-mo raggio e } \phi_m = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} \phi_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^{N_r} P_i}$$

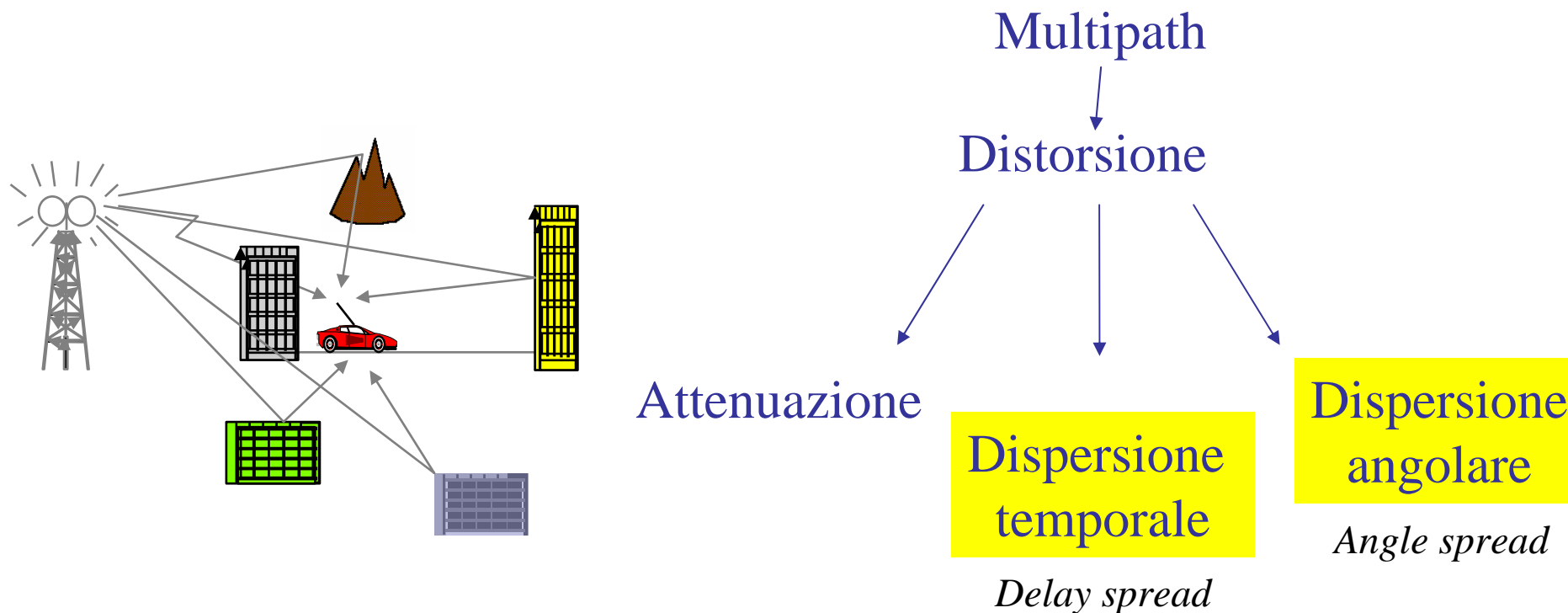
- L'*Azimuth Spread* dipende dalle caratteristiche del canale di propagazione e rappresenta l'ampiezza dell'intervallo angolare entro il quale vengono ricevuti i contributi più significativi

Esempio AS: Helsinki



In corrispondenza dei ricevitori in *Line of Sight* (LoS), l'AS si abbassa sensibilmente poiché la potenza del raggio diretto è molto più forte della potenza associata agli altri raggi

multipath e radiosistemi

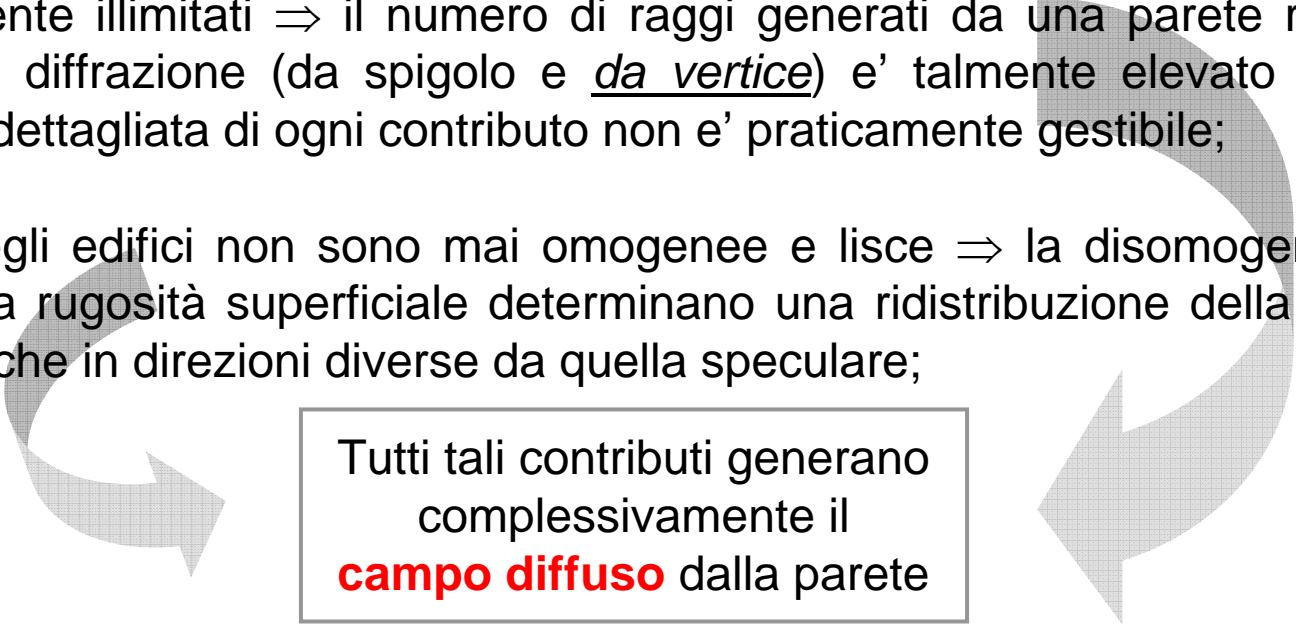


L'impatto del multipath sui radiosistemi non è sempre lo stesso:

1. Multipath = disturbo penalizzante (Es: ponti radio)
2. Multipath = “dolorosa” necessità (ES: GSM)
3. Multipath = auspicabile vantaggio (DVB, DAB in modalità SFN)

Diffusione

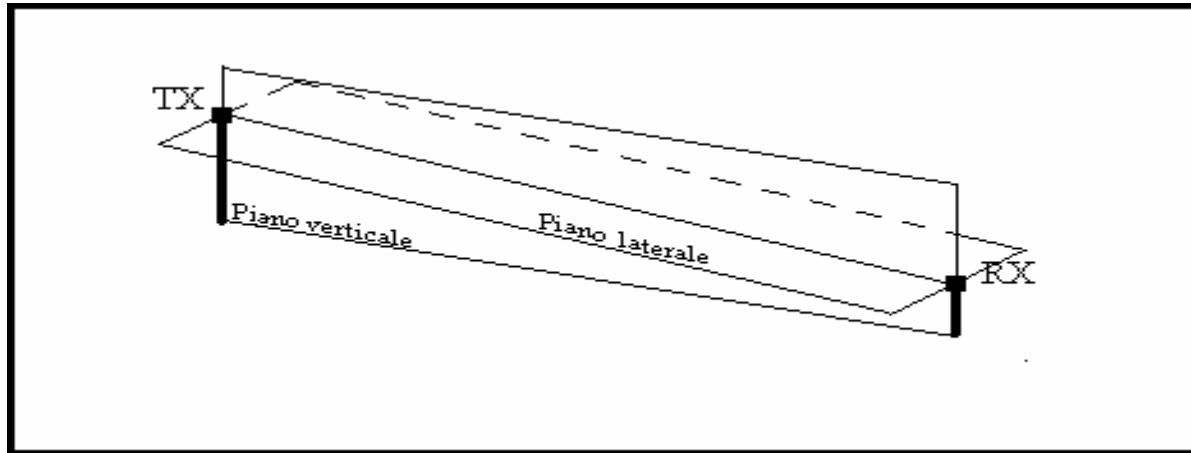
- Le pareti degli edifici non sono mai piane infinitamente estese, ne' gli spigoli sono trasversalmente illimitati \Rightarrow il numero di raggi generati da una parete reale per riflessione e diffrazione (da spigolo e da vertice) e' talmente elevato che una descrizione dettagliata di ogni contributo non e' praticamente gestibile;
- Le pareti degli edifici non sono mai omogenee e lisce \Rightarrow la disomogeneità dei materiali e la rugosità superficiale determinano una ridistribuzione della potenza incidente anche in direzioni diverse da quella speculare;



Tutti tali contributi generano complessivamente il **campo diffuso** dalla parete

- Come valutare il campo diffuso?
(es. RCS + Physical Optics, RCS + Coeff. Rugosità equivalente, ...)
E' possibile definire un *Raggio Diffuso*?
(non vale per la diffusione il principio del campo locale...)

Appendice: piano laterale e piano verticale



La propagazione reale è per sua natura un fenomeno intrinsecamente 3D, tuttavia spesso è una utile semplificazione considerare solo la propagazione nei seguenti piani geometrici:

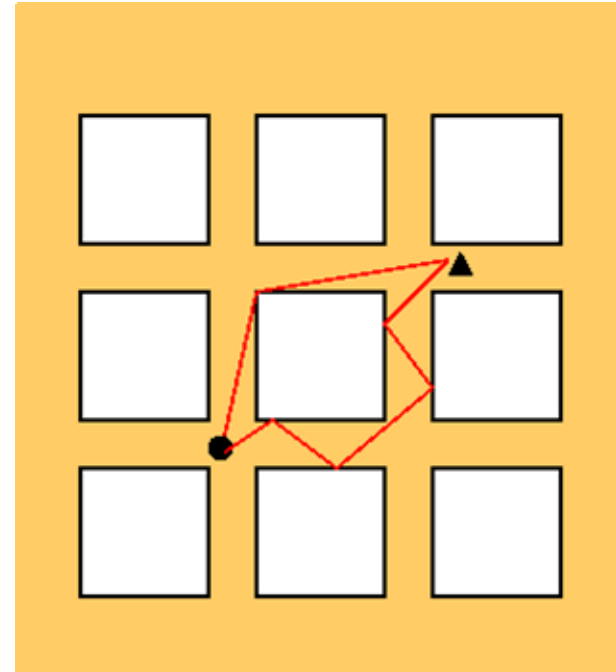
- 1) Piano verticale (PV): piano contenente le due antenne.
- 2) Piano laterale (PL): piano inclinato rispetto al suolo, comprendente le due antenne e perpendicolare al piano verticale.

La propagazione nei due piani avviene secondo modalità e meccanismi differenti

Propagazione: piano laterale

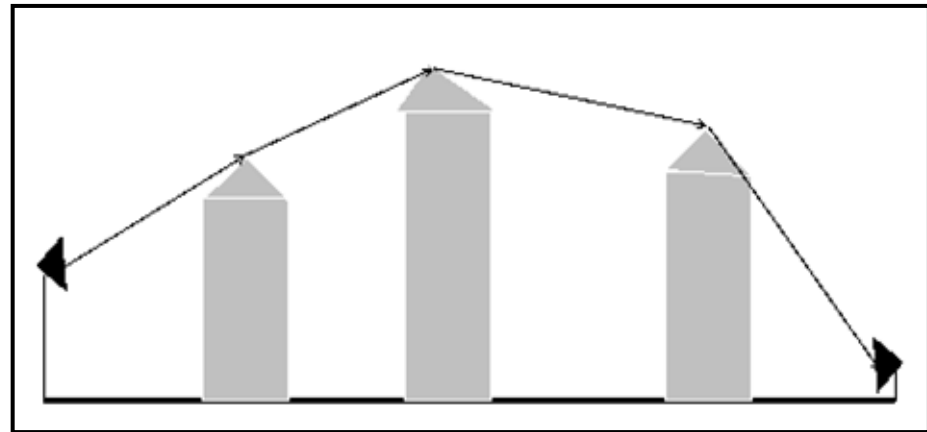
- ✓ Piano laterale caratterizzato da numerosi *cammini multipli* fra le antenne.
- ✓ Meccanismi propagativi principali:
 1. *Riflessioni* sulle pareti degli edifici
 2. *Diffrazioni* sugli spigoli degli edifici
 3. *Diffusioni* da vegetazione o pareti rugose e/o non omogenee.
- ✓ All'aumentare della distanza fra le antenne, i cammini si fanno sempre più “intricati”, aumentando così il numero di interazioni necessarie a garantire il collegamento.

L'attenuazione sul piano laterale aumenta quindi molto rapidamente con la distanza.



Propagazione: piano verticale

- ✓ Pochi cammini significativi (spesso un solo cammino).



- ✓ Meccanismo propagativo principale: *Diffrazione* sui tetti degli edifici (propagazione *Over Roof Top*).
- ✓ Numero di ostacoli significativi aumenta abbastanza lentamente con la distanza \Rightarrow attenuazione sul piano verticale aumenta con la distanza, ma meno rapidamente dell'attenuazione sul piano laterale.

Propagazione: punto di prevalenza

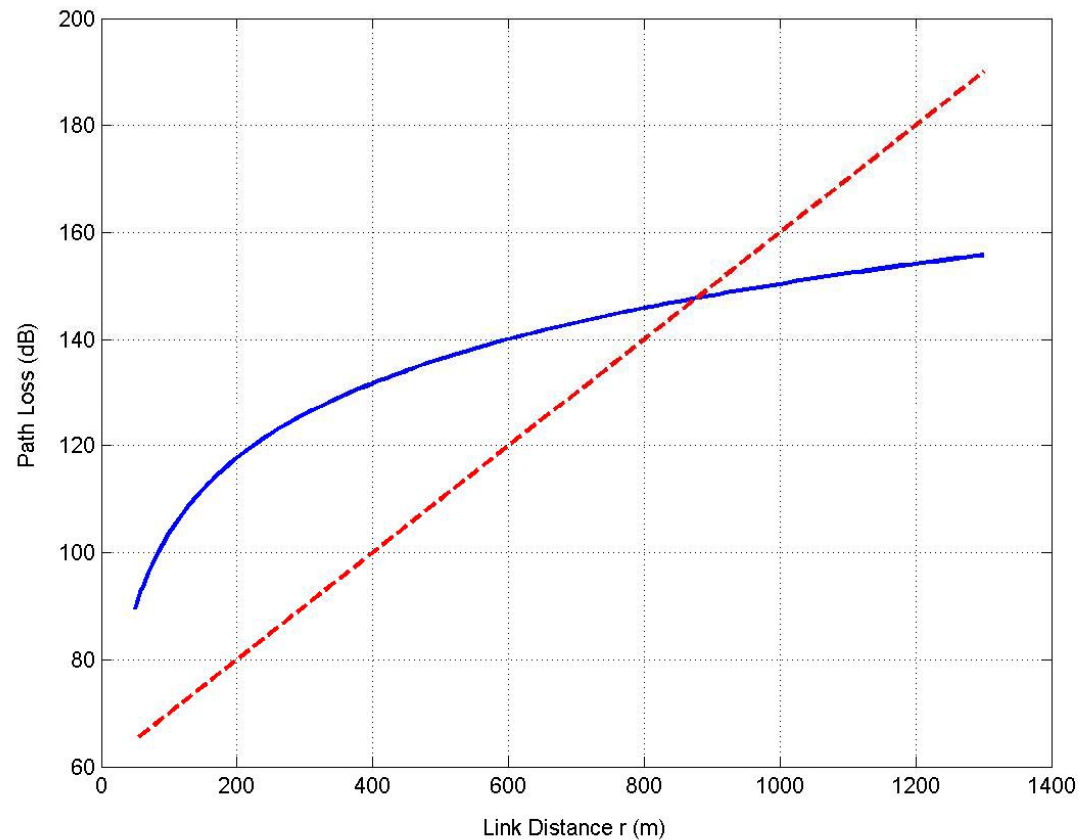
- La potenza viene sempre ricevuta da entrambi i “piani di propagazione”. Per valori limitati della distanza di tratta (tipicamente fino a qualche centinaio di m) il piano laterale porta il contributo di potenza più significativo, mentre per valori elevati è il piano verticale a svolgere un ruolo predominante

$$A_{\text{dB}}^{\text{tot}} = -10 \cdot \log \left(10^{-A_{\text{dB}}^{\text{v}}/10} + 10^{-A_{\text{dB}}^{\text{l}}/10} \right)$$

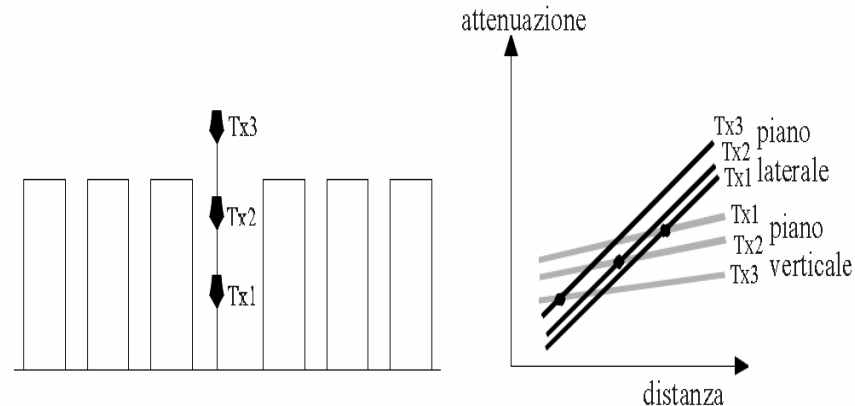
- Si definisce allora *punto o distanza di prevalenza* il valore di distanza per il quale l'attenuazione sul piano laterale coincide con l'attenuazione sul piano verticale.

Propagazione: punto di prevalenza

Contributo Qualitativo
Piano Verticale e Laterale



Propagazione: punto di prevalenza e copertura

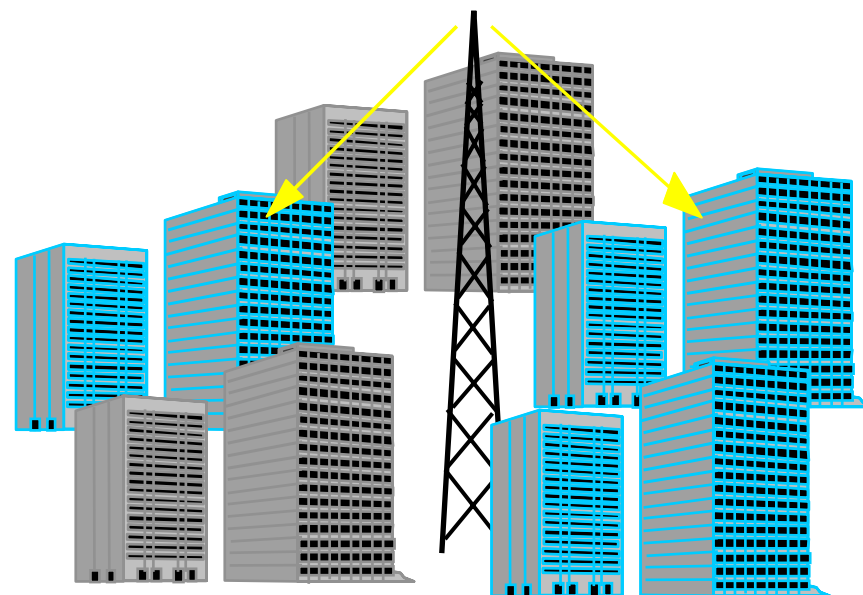
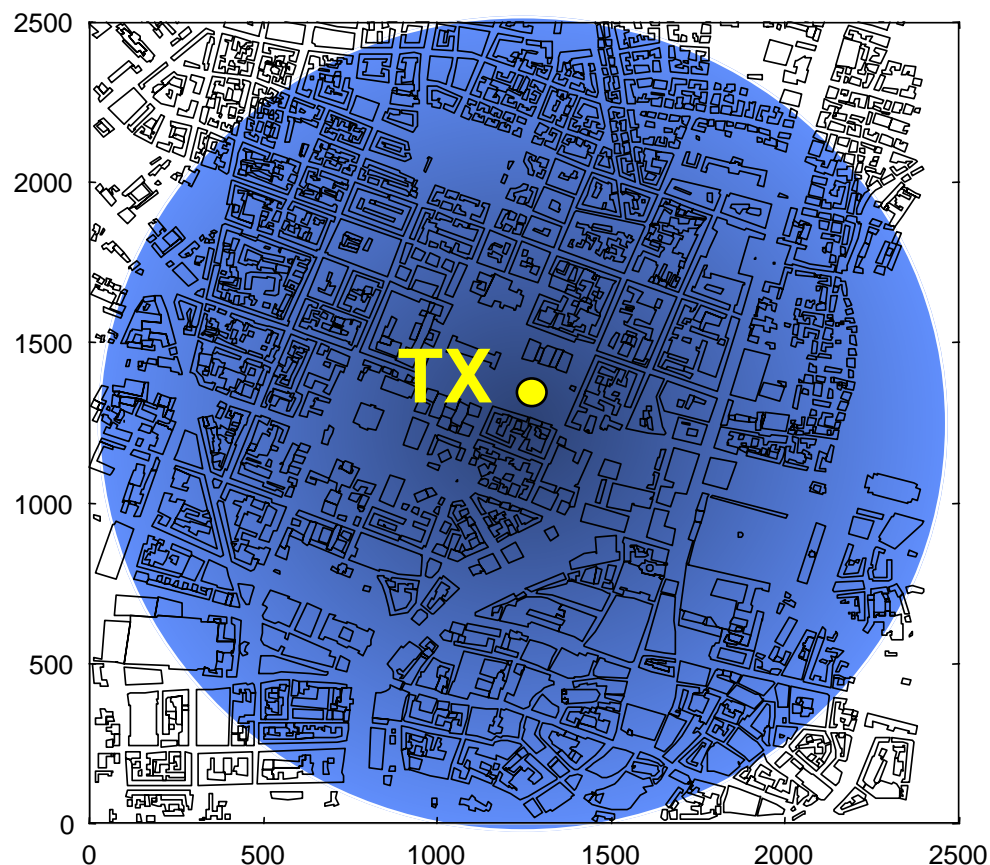


➤ Il valore della distanza di prevalenza dipende sensibilmente dall'altezza della BS. In particolare, al crescere di tale altezza migliora la propagazione nel piano verticale, poiché gli ostacoli in prossimità dell'antenna divengono meno ostruenti e, dunque, meno attenuanti.

➤ Il ruolo dei due piani di propagazione dipende quindi fortemente dal tipo di copertura:

1. MACROCELLE \Rightarrow solo Piano Verticale
2. SMALL-CELL \Rightarrow Piano Laterale e Piano Verticale
3. MICROCELLE \Rightarrow solo Piano Laterale

Copertura macrocellulare

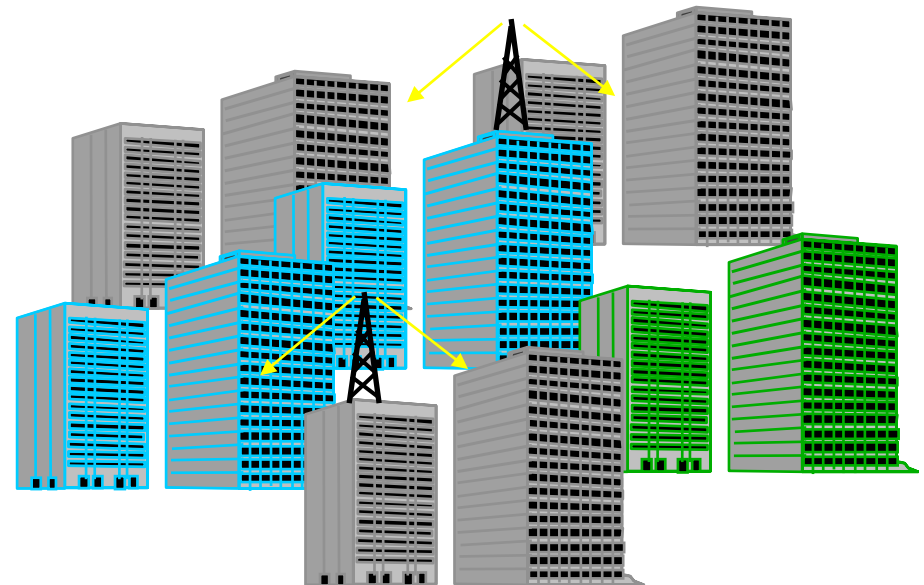
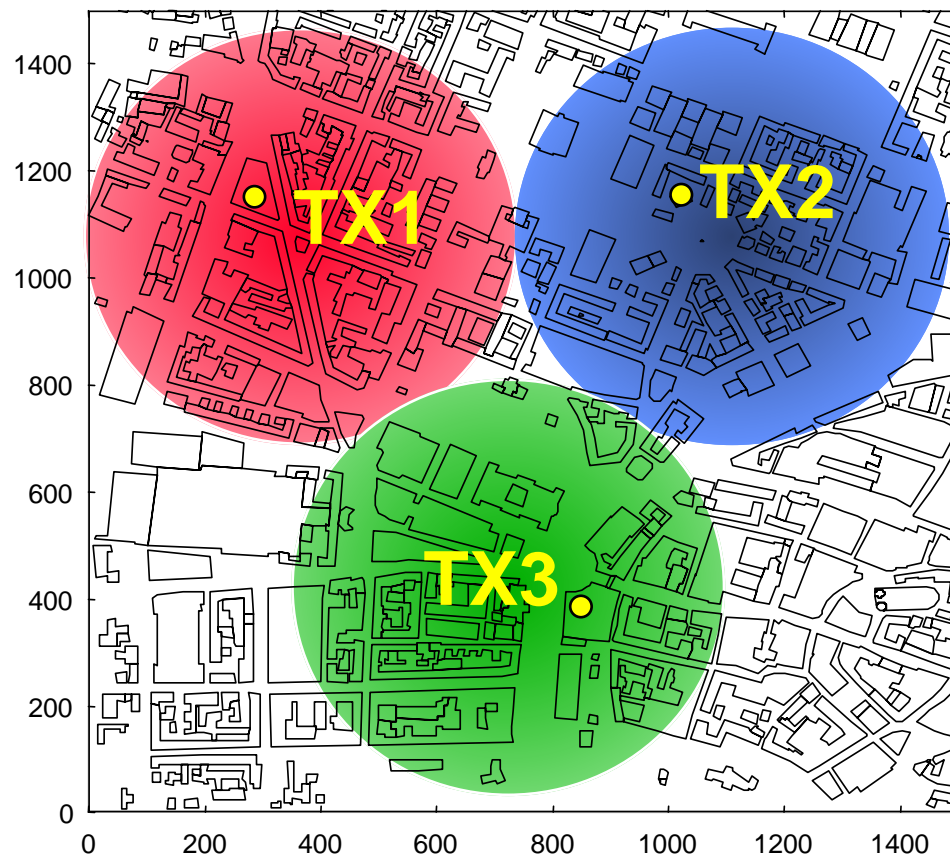


L'antenna è installata al di sopra della massima altezza degli edifici circostanti.

Raggio della : 1 ÷ 10 Km

Potenza trasmessa ~ 8 ÷ 14 Watt

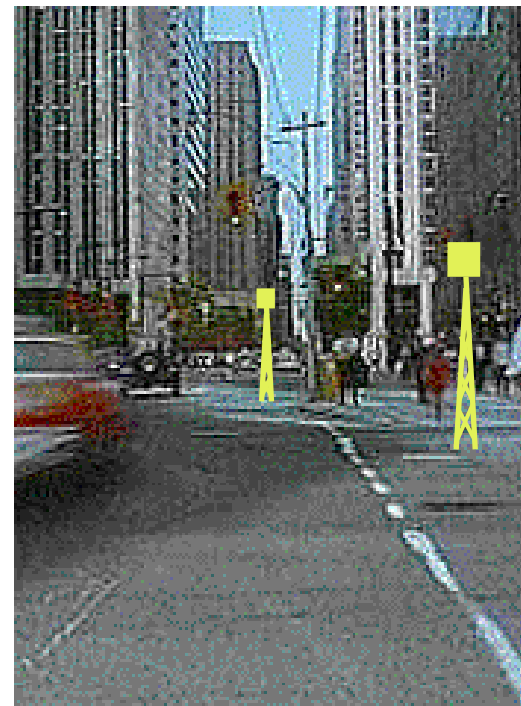
Copertura small-cell



**L'antenna è installata alla
altezza media dei degli edifici
circostanti.**

**Raggio della cella: 300 m ÷ 3 Km
Potenza trasmessa ~ 8 Watt**

Copertura microcellulare



L'antenna è installata al di sotto del tetto degli edifici.

Raggio della cella: $100 \div 500$ m

Potenza trasmessa $\sim 0.25 \div 1$ Watt