



14 Maggio 2004

# Università degli Studi ROMA TRE

Facoltà di Ingegneria  
Dipartimento di Elettronica Applicata

## Metodi di predizione del campo elettromagnetico in area urbana

Alessandro Toscano



# SOMMARIO

1. Descrizione delle tecniche per la predizione del campo EM
2. Descrizione dei codici numerici con interfaccia visuale per l'implementazione delle tecniche di cui al punto 1

# Obiettivo

**Determinazione**  
*Curve di Propagazione*

**Soluzione ottimale:**  
approccio  
deterministico

**Soluzione sub-ottimale:**  
approccio  
statistico

# Modelli di Propagazione

## ➤ **Empirico-Statistico:**

- Modello di Okumura-Hata
- Modello COST 231-Hata
- Modello COST 231 Walfisch-Ikegami

## ➤ **Elettromagnetico-Deterministico:**

- Ray-Tracing
- GTD (Geometrical Theory of Diffraction)
- UTD (Uniform Theory of Diffraction)



# AREA URBANA



## **Regione elettricamente estesa**

Lungh.d'Onda 12,5-300 cm

## **Ambiente Multipath**

Small Scale Fading  
Path Loss e Delay Spread

## **Misure Difficoltose**

Costose  
Poco Affidabili  
Pochissimo Generalizzabili





# MOM + UTD

## **PREGI**

Metodologia consolidata

Rappresentazione fedele del sistema

## **DIFETTI**

Limitato a piccole regioni

Incognita: Corrente

Complessità computazionale elevata



# FDTD

## **PREGI**

Semplice Implementazione

Metodologia in espansione

Nessun limite intrinseco

## **DIFETTI**

Necessita 10 o più Samples per lung.h.d'onda.

In questo momento, impraticabile.



# RAY TRACING



## **Vettoriale**

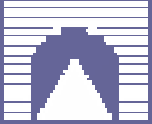
La complessità computazionale dipende dalla ricchezza della scena e dal numero dei punti di calcolo, non dalle dimensioni elettriche della scena stessa.

Nessun limite alle dimensioni della scena

**Tecnica "Full 3D"**

**Implementazione per Grafica 3D consolidata**





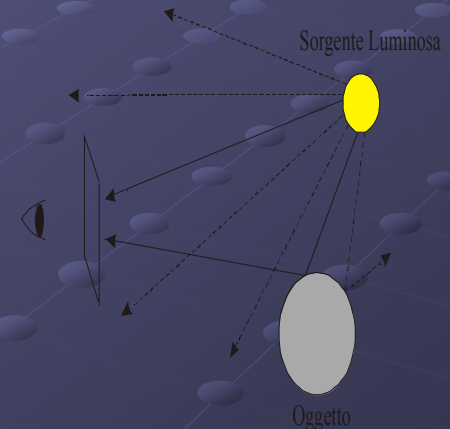
# RAY TRACING

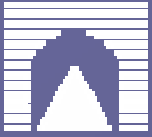
## Metodo Deterministico

● Con le tecniche di Ray Tracing è possibile determinare tutti i possibili cammini emergenti da un trasmettitore e ricevuti da un ricevitore.

● Il modo in cui un dato raggio penetra, viene riflesso o rifratto da un ostacolo, dipende tanto dalla forma geometrica degli ostacoli quanto dalle proprietà elettriche dei materiali con cui sono costruiti.

● Modellizzazione a tratti mediante superfici poligonali o “patch” degli ostacoli.



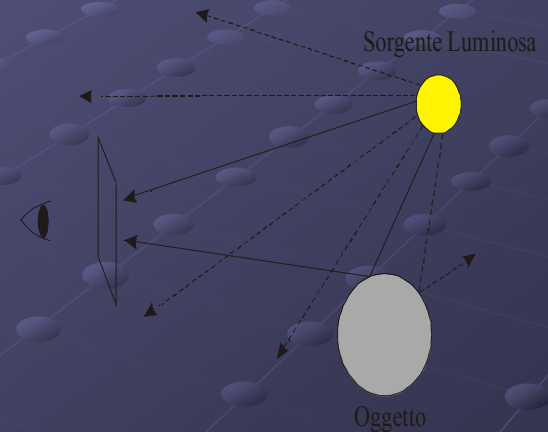


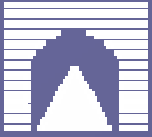
# RAY TRACING

- Si costruisce un database per registrare la locazione, lo spessore degli oggetti e la costante dielettrica di tutte le “patch”.

Esistono in letteratura tre diverse tecniche basate sul ray tracing in letteratura:

- **“ray launching”**;
- **“metodo delle immagini”**;
- **“metodi ibridi”**.





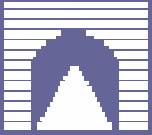
# RAY TRACING

---

## Ray Launching

Approccio di “forza bruta”:

- Programma software che controlla la presenza di un cammino diretto tra trasmettitore e ricevitore.
- In seguito lancia e traccia un raggio dal trasmettitore in una specifica direzione e scopre se questo interseca un ostacolo sul database.
- Se questo non accade il processo termina e viene lanciato un nuovo raggio in una direzione differente.
- Se viene trovata un'intersezione, il programma determina se il raggio riflesso dal punto di intersezione con l'ostacolo ha un cammino non ostruito verso il ricevitore, e i raggi trasmessi e riflessi vengono poi tracciati verso il ricevitore o su di un altro ostacolo.

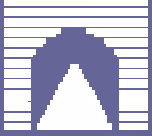


# RAY TRACING

## Ray Launching geodetico

Miglioramento del codice:

- In uno schema di Ray Launching i raggi sono emanati da una sfera centrata sul trasmettitore. La superficie viene linearizzata mediante tasselli poligonali, di solito triangoli facendo uso della tecnica di proiezione geodetica.
- Viene creato un database di tutte le possibili interazioni che consiste di una serie di poligoni piatti che rappresentano le superfici. Le superfici poligonali piatte sono facili da descrivere numericamente e permettono facili calcoli di riflessione. Inoltre bordi ben definiti facilitano calcoli sulla diffrazione.



# Ray Tracing

## Metodo delle Immagini

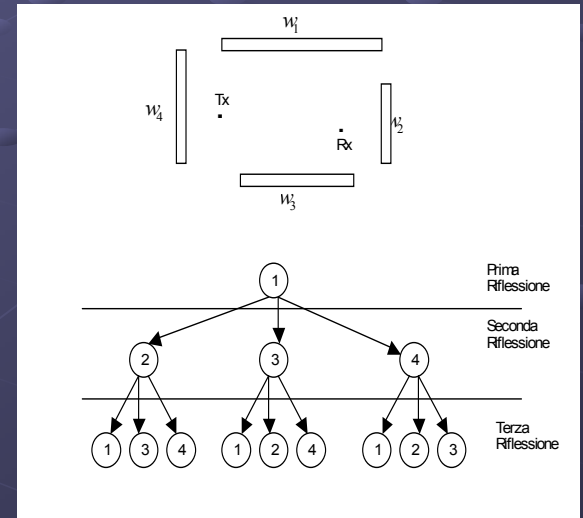
### Miglioramento

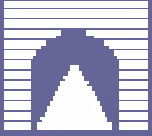
Questa tecnica considera tutti gli ostacoli presenti come possibili riflettori e calcola il loro effetto usando il “*principio delle immagini*”.

### ● Algoritmo con una struttura ad albero

L'algoritmo trova tutti i cammini dei raggi che arrivano all'osservatore con un'intensità di campo maggiore ad un certo livello di soglia, non preoccupandosi del modo in cui avvengono le riflessioni.

S'impone in pratica la condizione che il raggio riflesso sia preso in considerazione solo se la potenza che arriva al ricevitore è più grande di – 30 dB rispetto alla potenza del raggio diretto





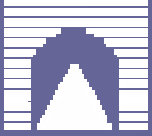
# RAY TRACING

---

## Metodi Ibridi

Per la simulazione di ostacoli con complicate strutture o di piccole dimensioni comparate con le lunghezze d'onda in gioco si usano dei metodi ibridi, ovvero si combinano:

- metodi di ray tracing e
- “Finite Element Methods” (FEM) e
- “Finite Difference Time Domain” (FDTD).

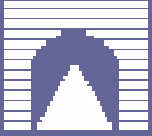


# RAY TRACING

---

I metodi per interpretare l'informazione sui raggi tracciati che arrivano al ricevitore sono essenzialmente due:

- modello della sfera di ricezione;
- modello dei fronti d'onda distribuiti.



# RAY TRACING

Ogni raggio, un'onda piana.

$$E(r, J, j) = E_0 f(J, j) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

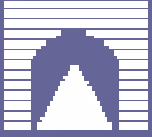
## Ray Tracing FORWARD

Ogni raggio uscente dalla sorgente viene seguito lungo tutto il suo percorso, includendo i fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione

## Ray Tracing BACKWARD

Viene eseguito un tracciamento "all'indietro" del percorso tra punto di osservazione e punto di sorgente



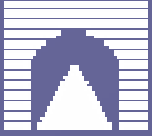


# RAY TRACING

---

## Ray Tracing FORWARD

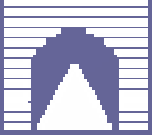
- Approccio generale e computazionalmente efficiente
- Facile implementazione dell'antenna trasmittente
- Necessità di implementare algoritmi per la gestione delle entità geometriche



# RAY TRACING

---

- Motore Ray Launching
- Differenti caratteristiche della View Window
- Grandezza Scalare vs Grandezza Vettoriale
- Scarsa ottimizzazione per ricevitore mobile

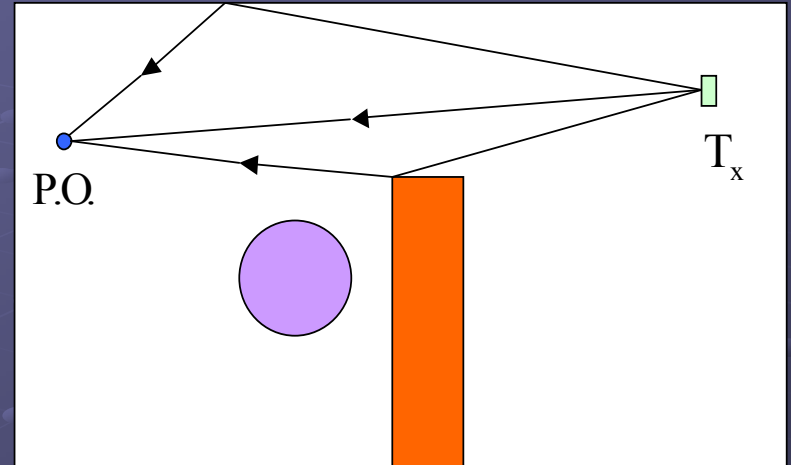


# RAY TRACING

## Geometria del Problema

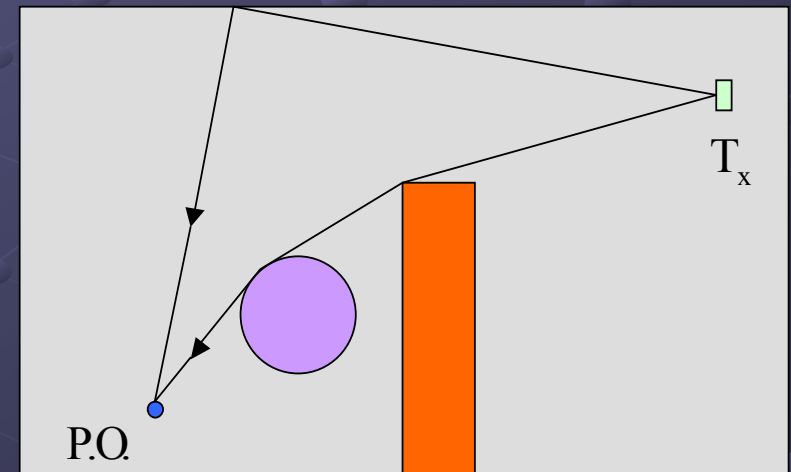
## LOS

- Segnale trasmesso monocromatico a frequenza  $F_c$  e stazionario nel tempo;



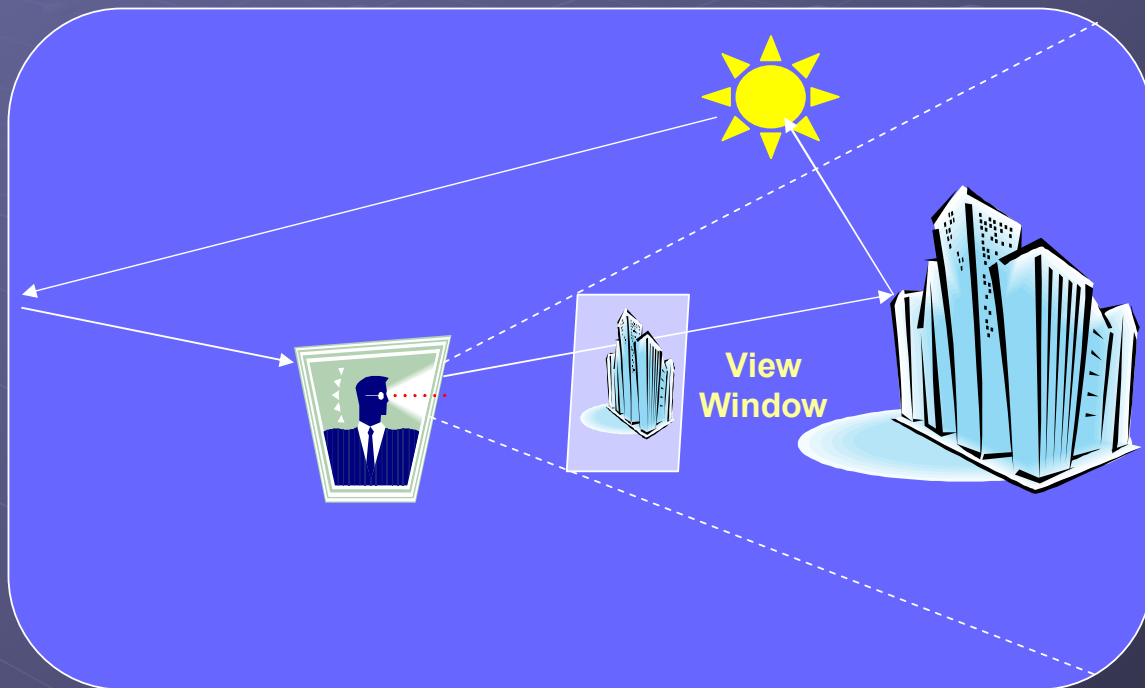
## non-LOS

- Contributi principali:
  - raggio diretto
  - raggio riflesso
  - raggio diffratto



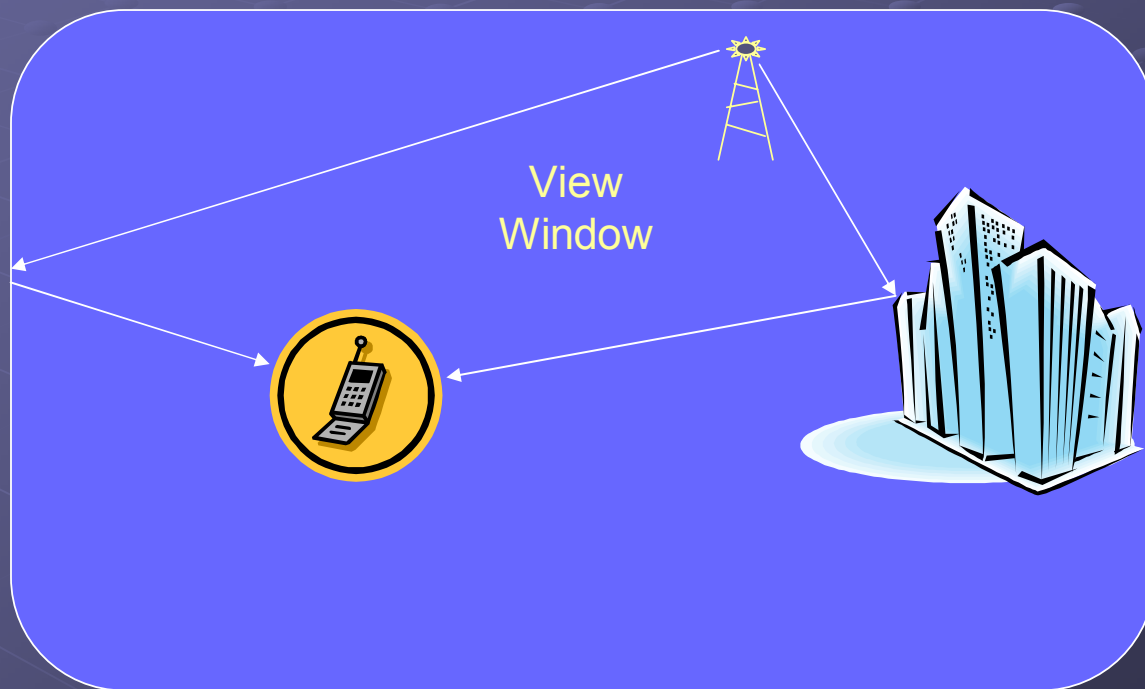


# DALLA GRAFICA 3D AL CAMPO EM



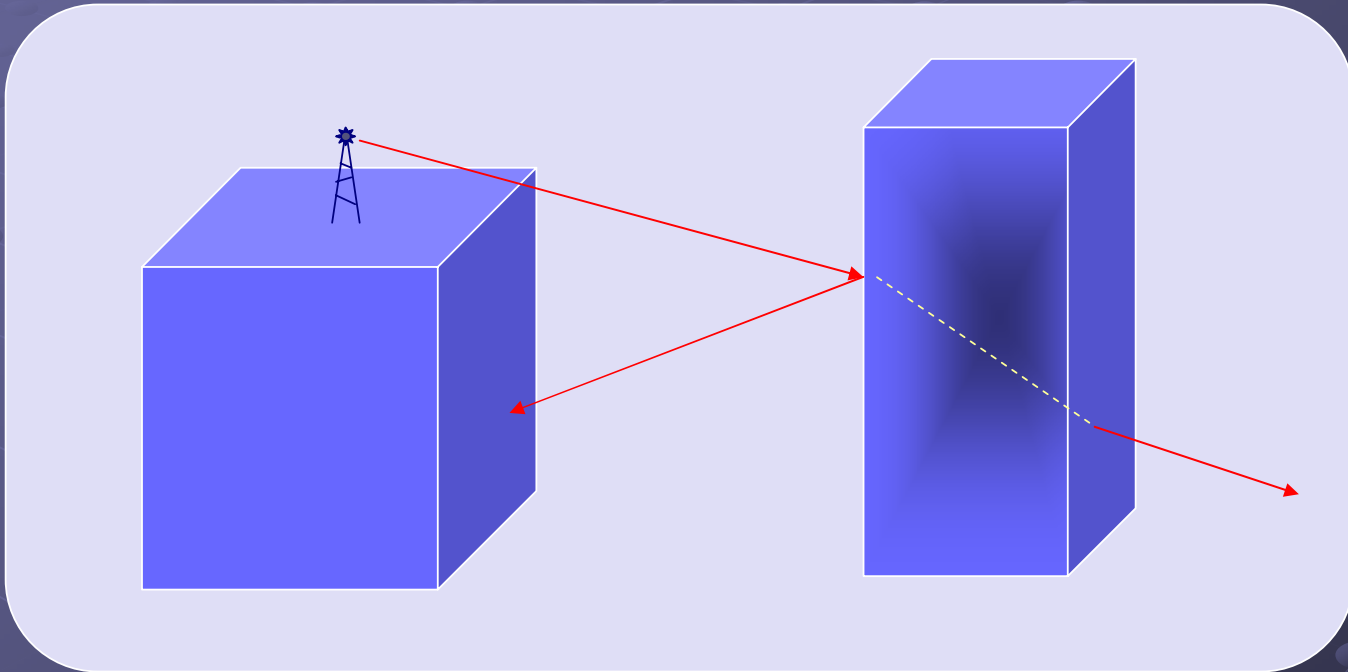


# DALLA GRAFICA 3D AL CAMPO EM





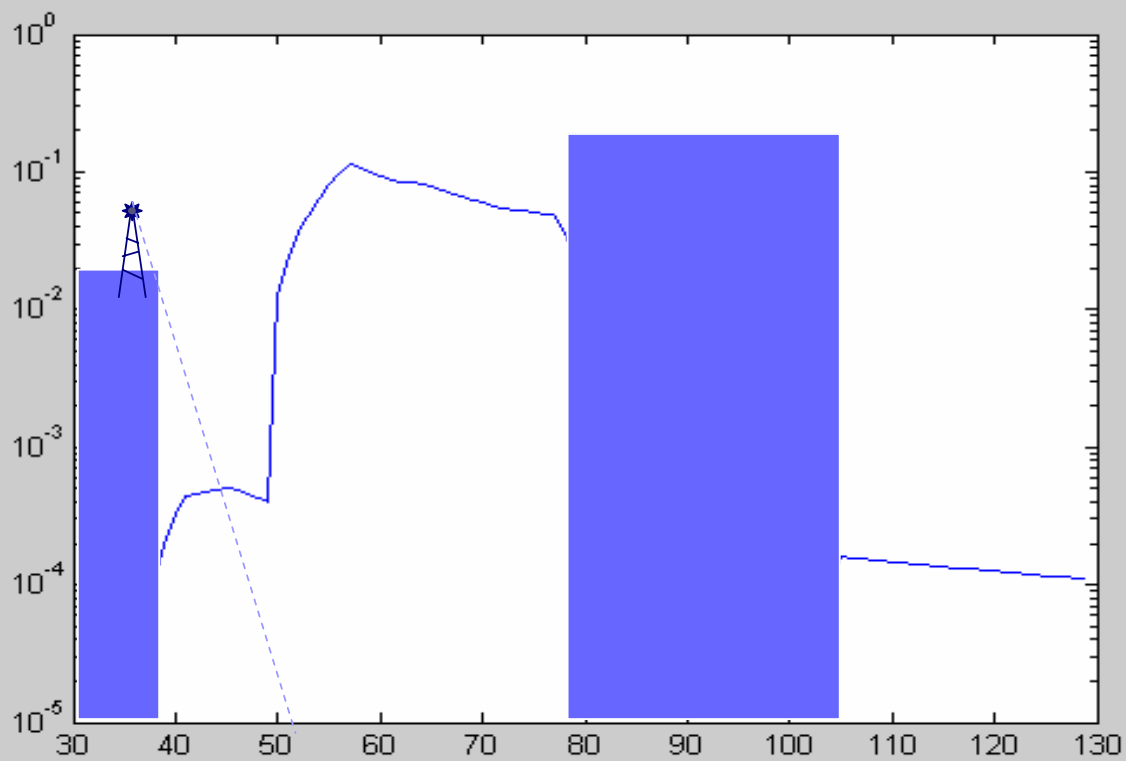
# RIFLESSIONE e RIFRAZIONE



Principio di Fermat, leggi di Snell e coefficienti di Fresnel



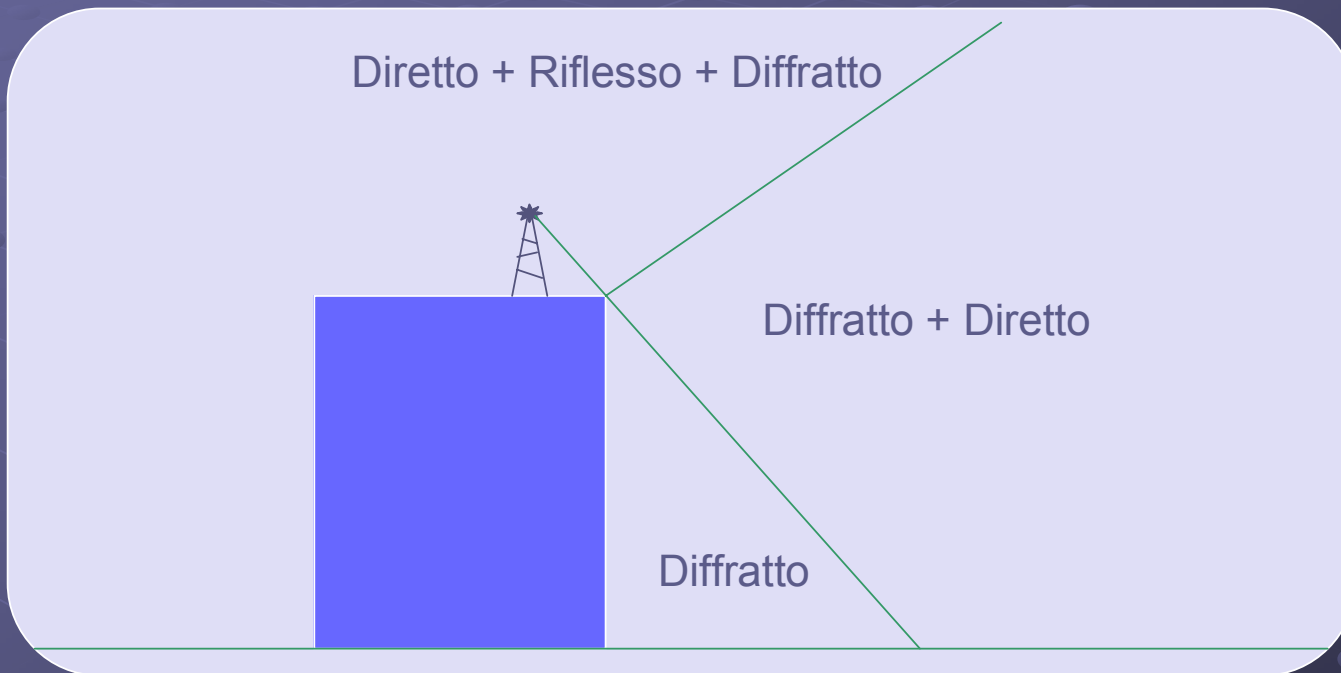
# RIFLESSIONE e RIFRAZIONE



Il principio di Fermat, legge di Snell e coefficienti di Fresnel



# DIFFRAZIONE

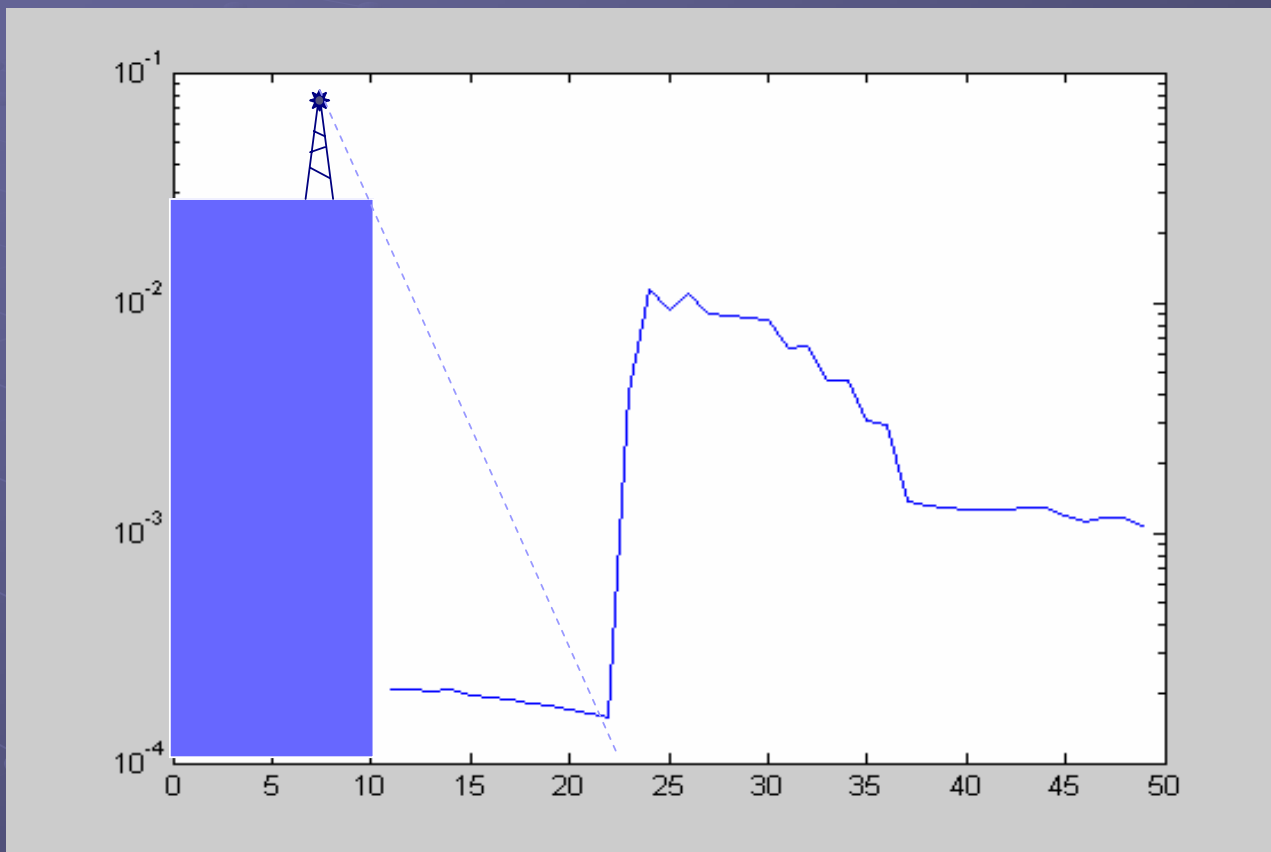


Coefficienti di Diffrazione UTD



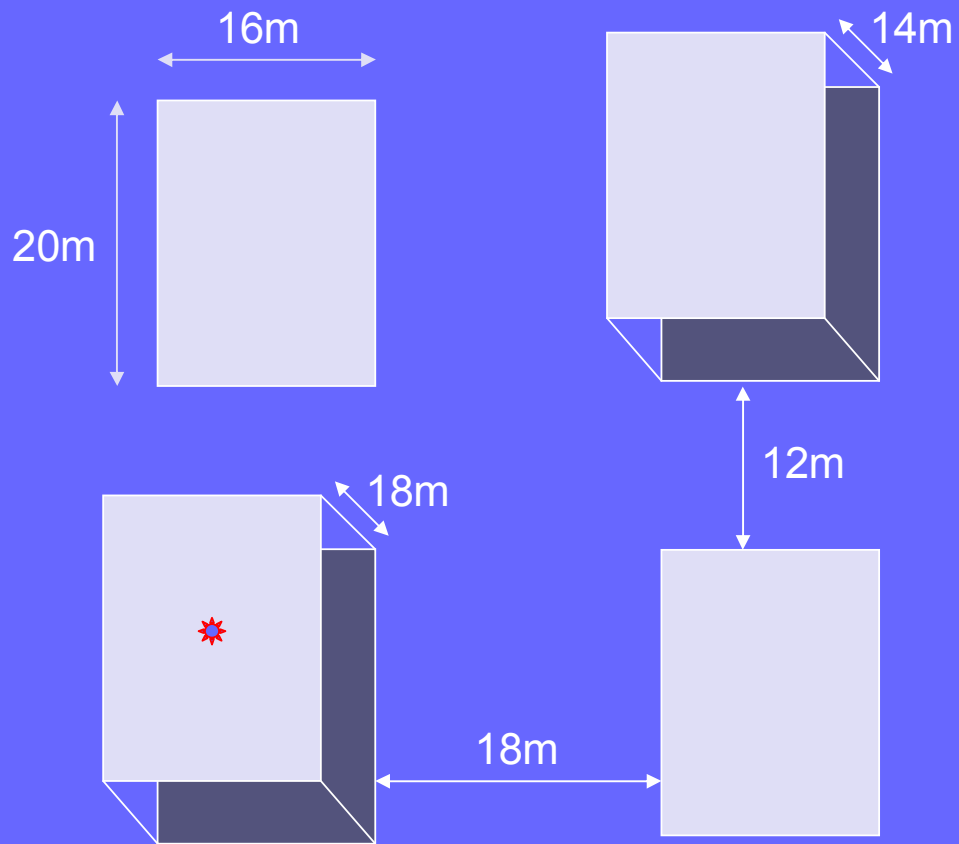


# DIFFRAZIONE

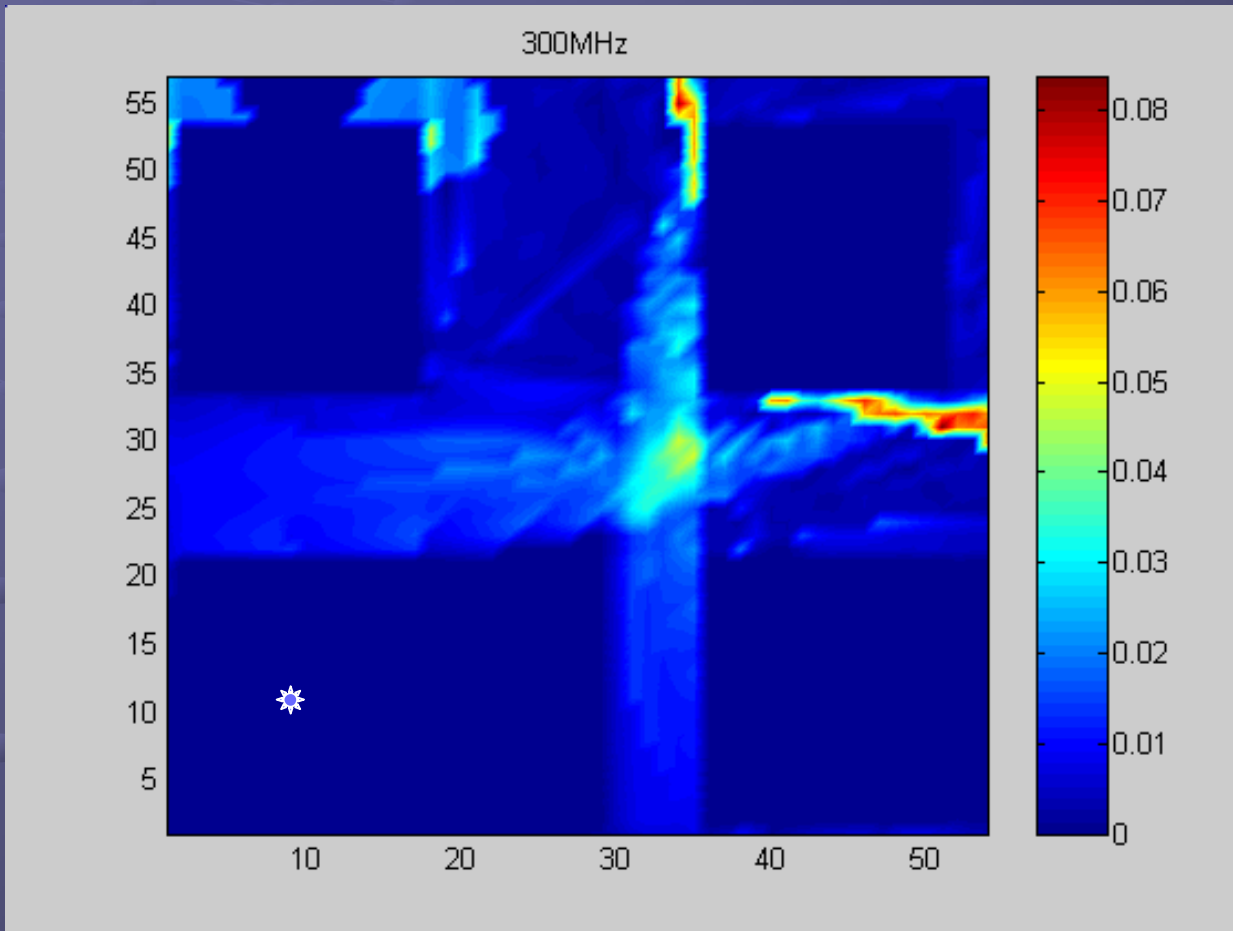


Coefficienti di Diffrazione UTD

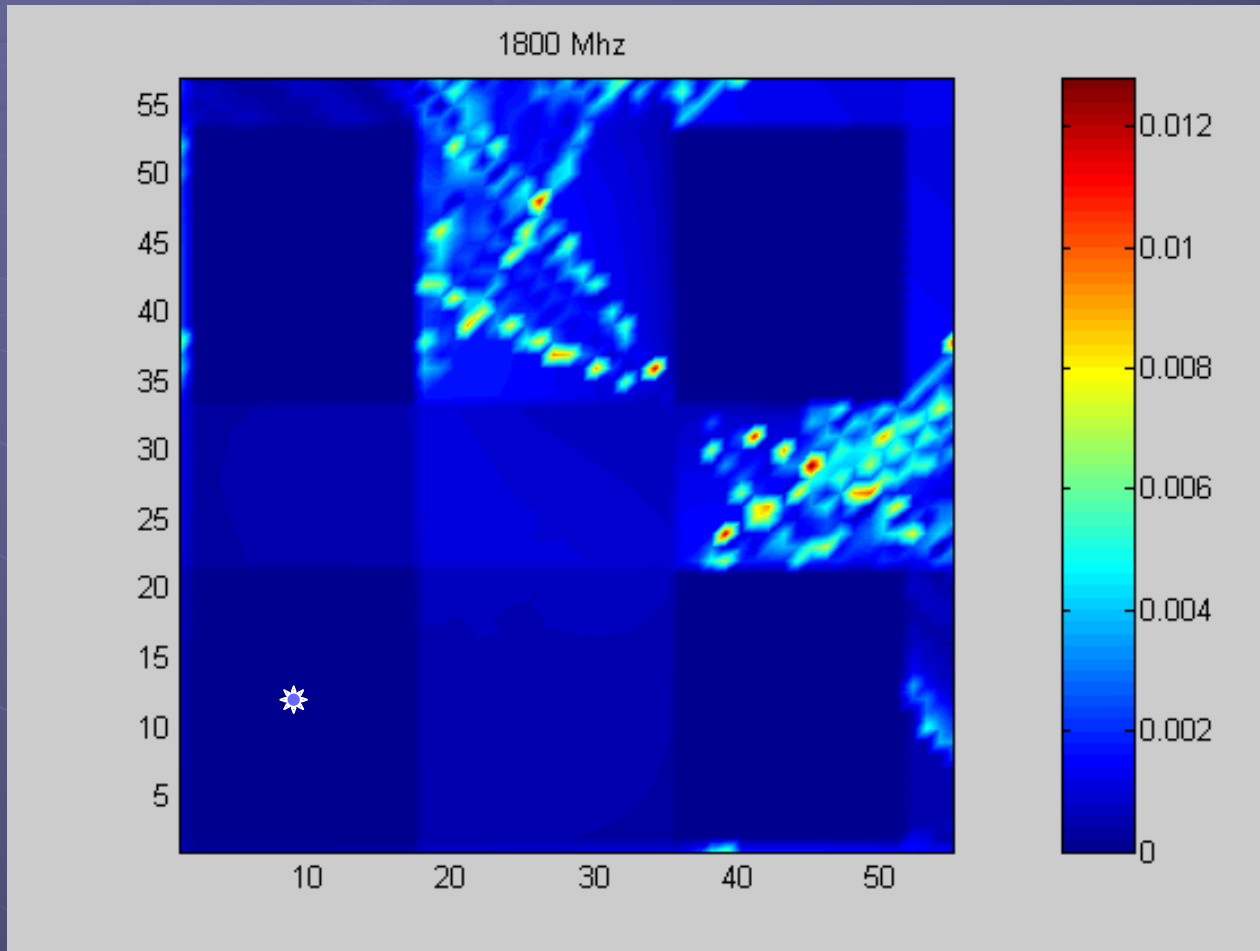
# GEOMETRIA DI RIFERIMENTO



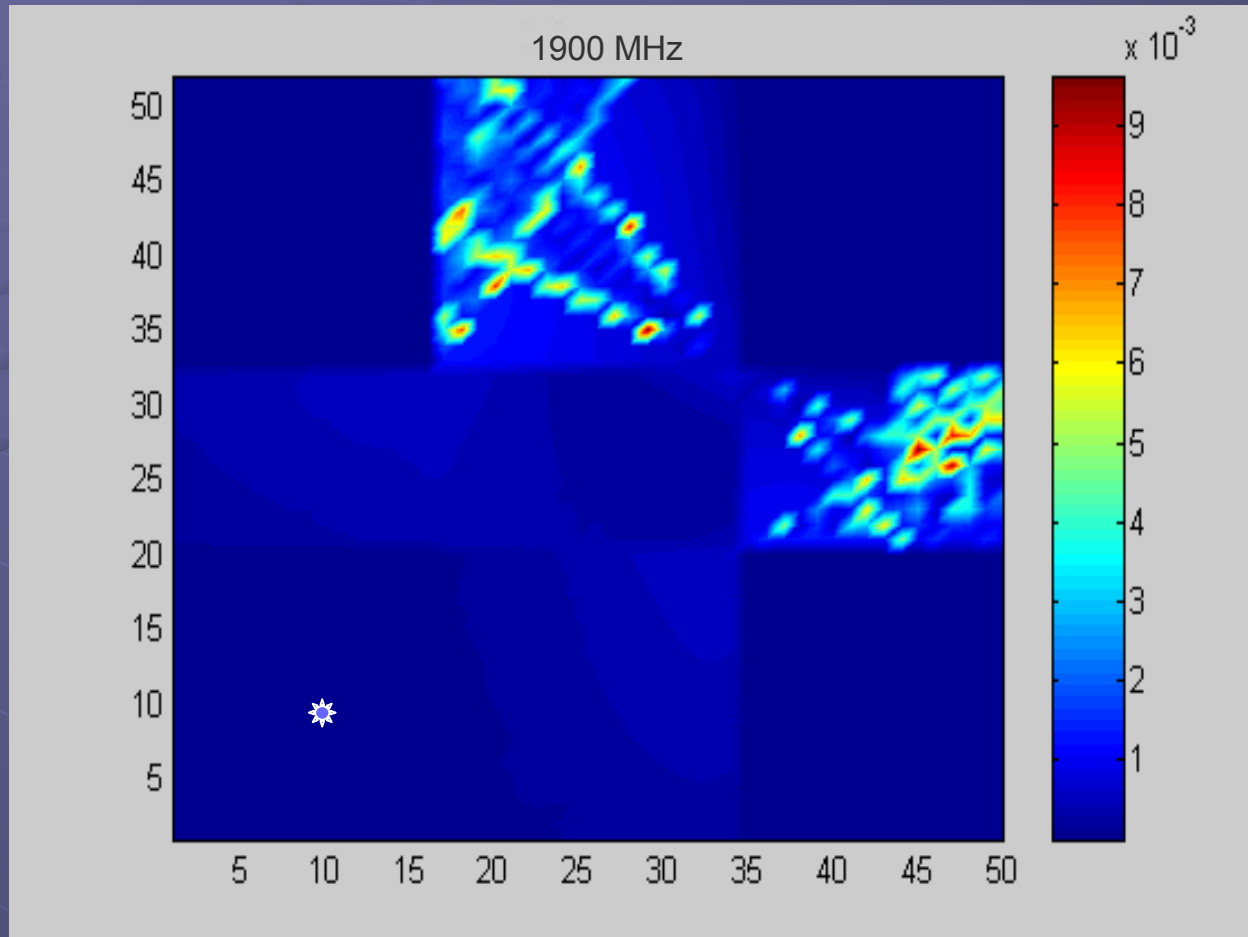
# VERIFICA DEI RISULTATI



# VERIFICA DEI RISULTATI



# VERIFICA DEI RISULTATI





# Codici Numerici



*EDX Signal Pro*



# Signal Pro

1. Gli studi vengono effettuati sulla base di un modello numerico del territorio. Incluso nel software c'è un DEM (Digital Elevation Model) con precisione di 30" di arco (circa 1km di risoluzione). È anche possibile espandere il programma con un database con precisione di 3" di arco (circa 90m di risoluzione) per tutto il territorio italiano.
2. È possibile ad esempio importare cartografia georeferenziata, mappe digitalizzate, foto da satellite, database di città, strade, fiumi, demografia, uso del terreno, ecc.





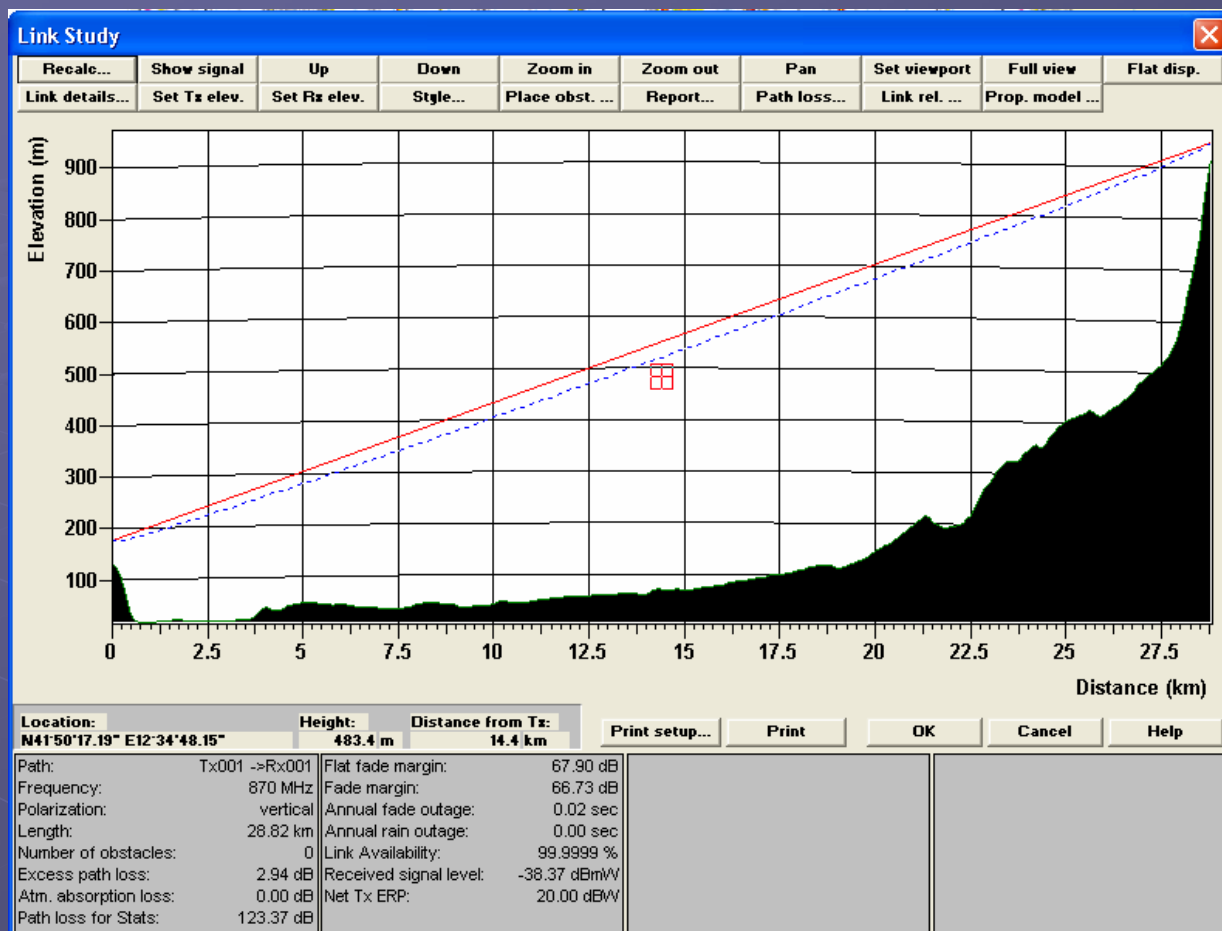
# Uscite disponibili

1. SignalPro è interfacciabile con Excel in modo da garantire una portabilità aggiuntiva degli studi effettuati.
2. Il risultato di uno studio può essere stampato o salvato come immagine; grazie alla possibilità di visualizzazione 3D del territorio potete ottenere studi di impatto e graficamente intuitivi.
3. Esempi di uscite disponibili sono mostrati di seguito nella simulazione in esame.

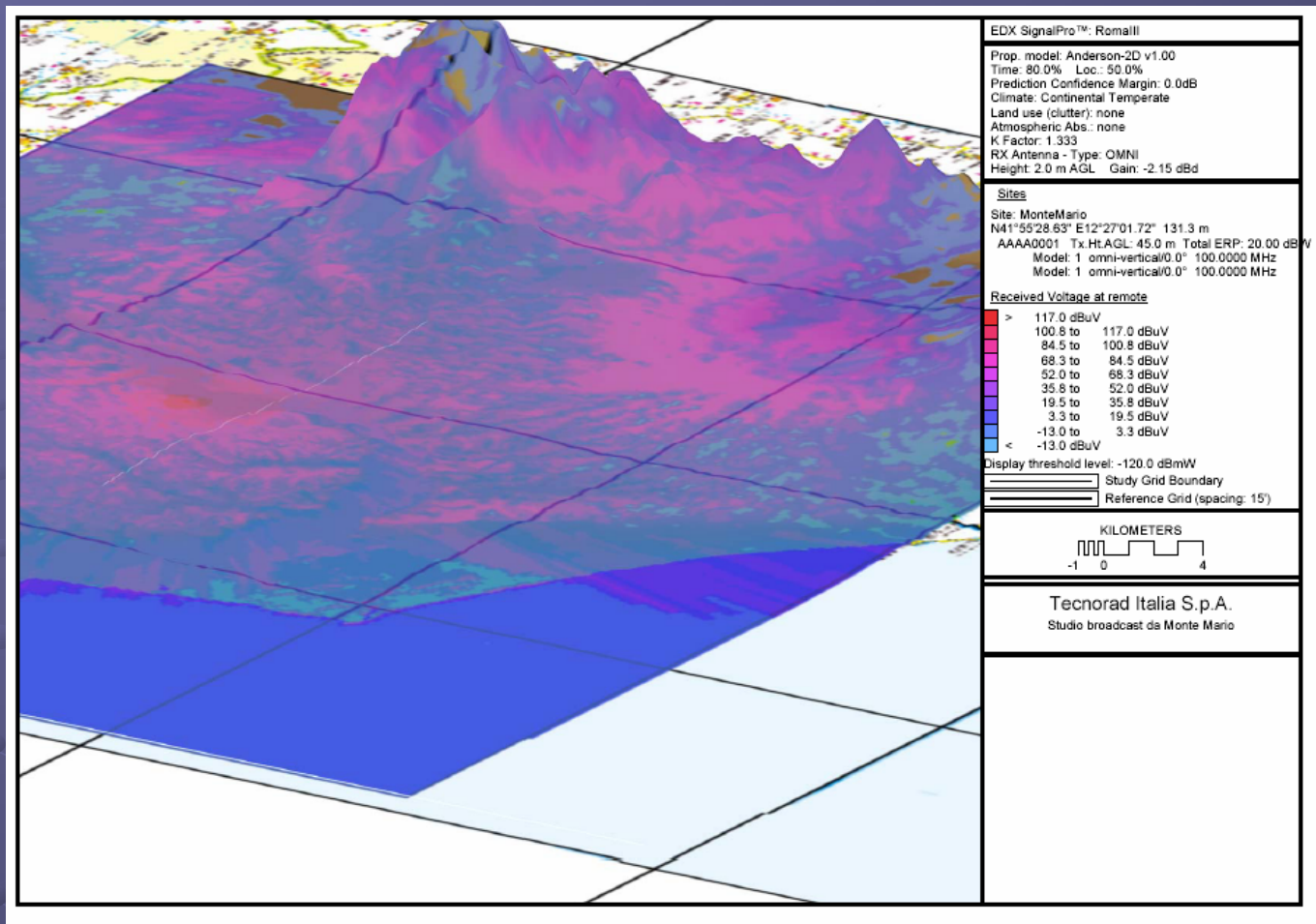


# Simulazione di un sito di riferimento

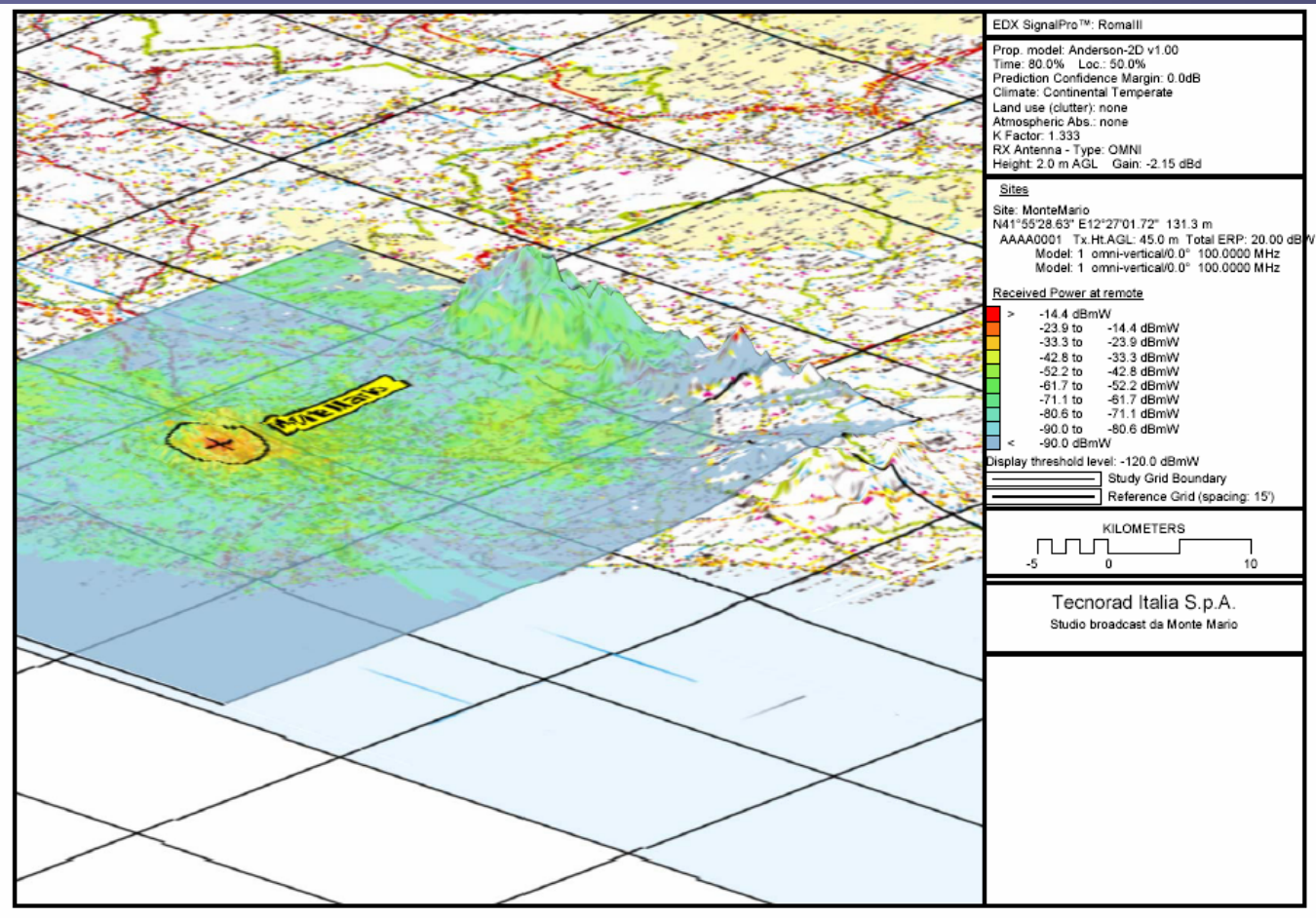
1. Il sito di riferimento scelto è quello nell'intorno di Monte Mario, schematizzato in sezione da SignalPro come nella seguente figura.
2. La frequenza di simulazione scelta è di 870 MHz, che corrisponde ad una frequenza di broadcasting televisivo UHF.



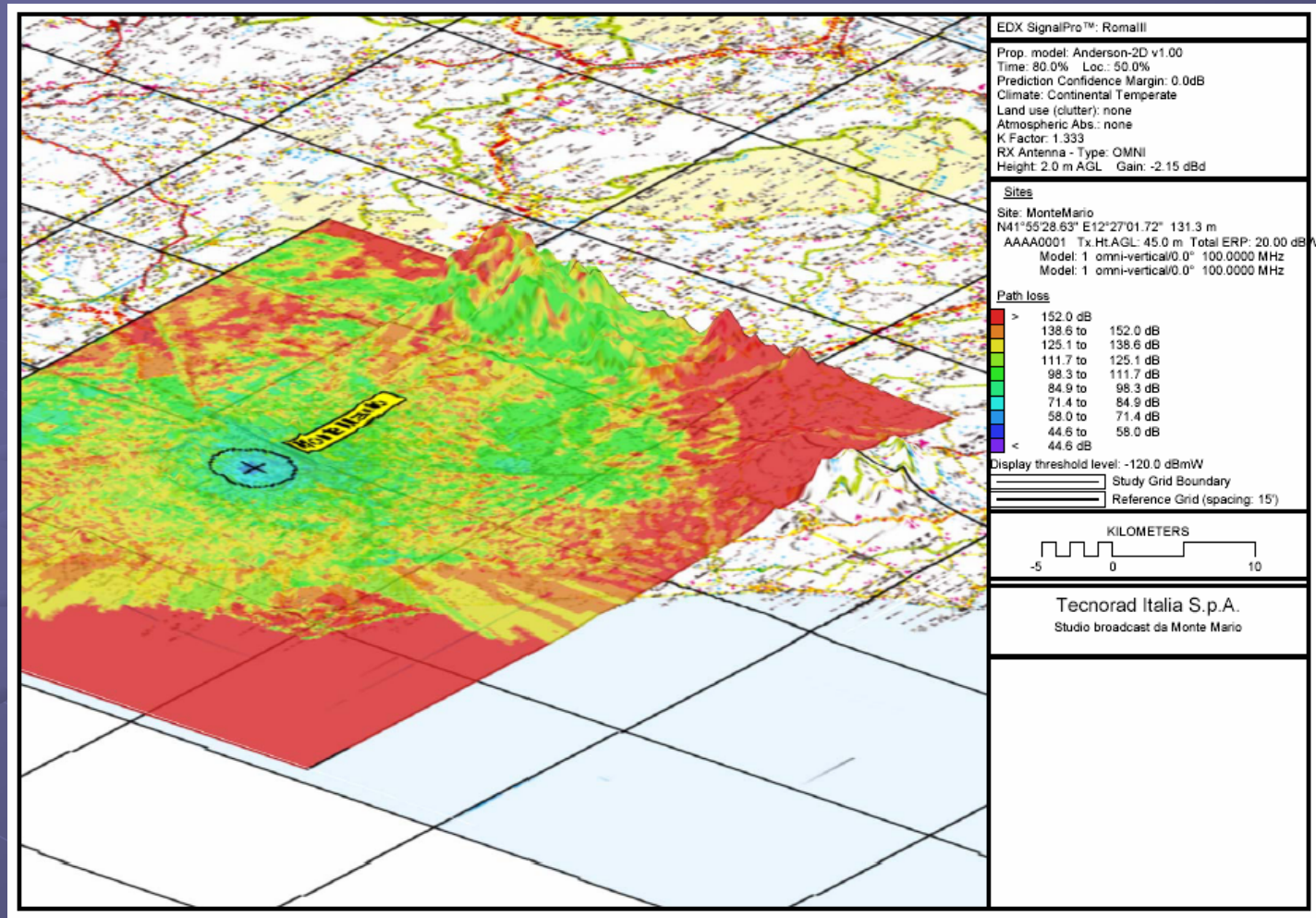
Sezione del sito di riferimento, Monte Mario (RM).



Livello di campo ricevuto in tutta l'area circostante il sistema di broadcast sotto esame.



Livello di potenza ricevuto in tutta l'area circostante il sistema di broadcast sotto esame.



Path loss nell'area circostante il sistema broadcast sotto esame.

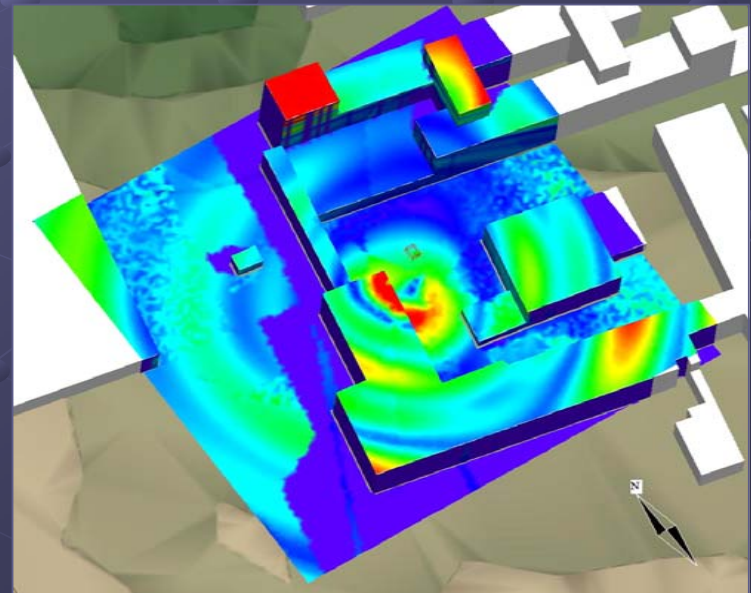


# *GUARDIAN*

**Graphical User Application for the RaDiation Intensity in  
Antenna Neighbourhoods**

# GUARDIAN

- Calcolo del campo EM in prossimità di tutte le superfici accessibili (facciate di edifici e strade) e all'interno degli edifici attraverso tecniche di *ray-tracing* e di GTD (Geometrical Theory of Diffraction).
- Nel nostro caso le simulazioni sono state eseguite secondo la modalità del "Building Surface Computation".
- Sono stati considerati i valori di campo elettrico presenti ad un'altezza di 1,5 metri dal terreno





# Modalità “Building Surface Computation”

**Analysis Area**

X min [m] Y min [m]  Show Area

X max [m] Y max [m] Step

**Raytracer Option**

Geometrical Contributes Contributes

Terrain  Line Of Sight

Transmission  Reflection

Diffraction

Reflection Diffraction

Diffraction Reflection

**Run Controls**

Far Field Method  Near Field Method  Near Field Method (ECD)

Background Field [V/m]

0.00

Run

➤ Analysis Area

➤ Raytracer Option

- Contributi Geometrici
- Contributi Elettrici

➤ Run Controls

- Metodi di calcolo
- Background Field



# RASPUTIN

**RA**dio **S**trength **P**rediction **U**sing **T**erritorial **I**Nputs

- Strumento software per la valutazione di coperture elettromagnetiche macrocellulari.
- Il modello Rasputin completo tiene conto dei tre seguenti contributi:

1. Propagazione in ambiente aperto e in assenza di ostacoli (ambiente di riferimento)
2. Effetto della diffrazione dovuta ad ostacoli orografici presenti lungo il cammino di propagazione
3. Fattore ambientale legato alle caratteristiche dell'ambiente nei pressi del quale si trova il terminale mobile

ma.....

RASPUTIN

È possibile applicare un modello Rasputin semplificato per le valutazioni di link budget che formalmente si esplicita nella seguente relazione:

$$L_b = k_1 + 26.16 \text{ Log } f - 13.82 \text{ Log } h_{\text{BTS}} - a(h_{\text{MS}}) + (k_2 - k_3 \text{ Log } h_{\text{BTS}}) \text{ Log } R - 25.66 + 17.25 \text{ Log } \alpha + A(\alpha)$$

Dove:

- R : distanza dalla BTS [Km]
- f : frequenza [MHz]
- $h_{\text{BTS}}$ : altezza efficace della Stazione Radio Base [m]
- $h_{\text{MS}}$ : altezza dell'antenna del terminale mobile [m]
- $\alpha$  : percentuale di edificato del pixel su cui si trova il terminale mobile

$$a(h_{\text{MS}}) = (1.1 \text{ Log } f - 0.7) h_{\text{MS}} - (1.56 \text{ Log } f - 0.8)$$

$$A(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{per } f \text{ contenuto nella banda dei } 900 \text{ MHz} \\ 0.85 + 0.073\alpha & \text{per } 1600 \text{ (MHz)} \leq f < 2200 \text{ (MHz)} \end{cases}$$

RASPUTIN

	$k_1$	$k_2$	$k_3$
<b>R ≤ 8 Km</b>	65.94(dB)	46.86(dB)	6.66(dB)
<b>R &gt; 8 Km</b>	55.76(dB)	58.35(dB)	6.8 (dB)

<b>Ambiente</b>	<b>Percentuale di edificato <math>\alpha</math></b>
Urbano denso	60%
Urbano	30%
Suburbano	15%
Incar	2%
Area vegetata aperta	2%

**RASPUTIN**

# Termini di applicabilità

$$h_{\text{BTS}} = 10 - 200 \text{ m}$$

$$h_{\text{MS}} = 1 - 10 \text{ m}$$

$$R = 0.3 - 100 \text{ Km}$$

$$f = \begin{cases} \text{banda 900 MHz (800 - 1000 MHz)} \\ \text{banda 2GHz (1770 - 2200 MHz)} \end{cases}$$



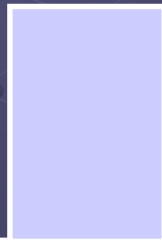
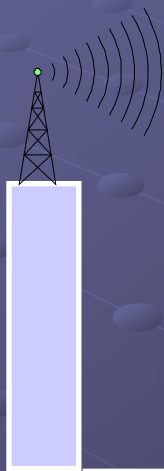
# SCAMPER

Small Cell Advanced Mobile Propagation Evaluation Resource

- Campo di applicazione: Coperture Small Cells
- Nuovo approccio al fenomeno propagativo rispetto ai modelli macrocellulari (tipo Rasputin) che fanno uso di impostazioni statistiche.
- Utilizzo dati ad alta risoluzione (1m) in formato raster che tengono conto della reale topologia dell'edificato (i pixel di  $1\text{m}\times 1\text{m}$  costituiscono un limite di applicabilità, essendo queste informazioni cartografiche non sempre disponibili).
- Il tool raggiunge un buon livello di affidabilità, data la dimensione del pixel, a partire da una distanza dalla BTS di 20m.



- Effetti da diffrazione: approccio Huyghens-Fresnel multischermo con modello basato sulle raccomandazioni ITU-R e Corda tesa.
- Ogni edificio e' approssimato mediante uno schermo di pari altezza e posizionato a meta' dell'edificio ("lama di coltello"). Ulteriori schermi possono essere aggiunti per tenere conto di eventuali ostacoli naturali.



SCAMPER

Area: to500.bomnil

UTM: 395545 4991477

X axis [m]: 500

Y axis [m]: 500

Colour map:

UTM Tx: 395795 4991727

h\_Tx [m]: 45.0

freq [MHz]: 900.0

P\_Tx [W]: 20.0

EL. FIELD [dBuV/m]:

E>=115

E>=110

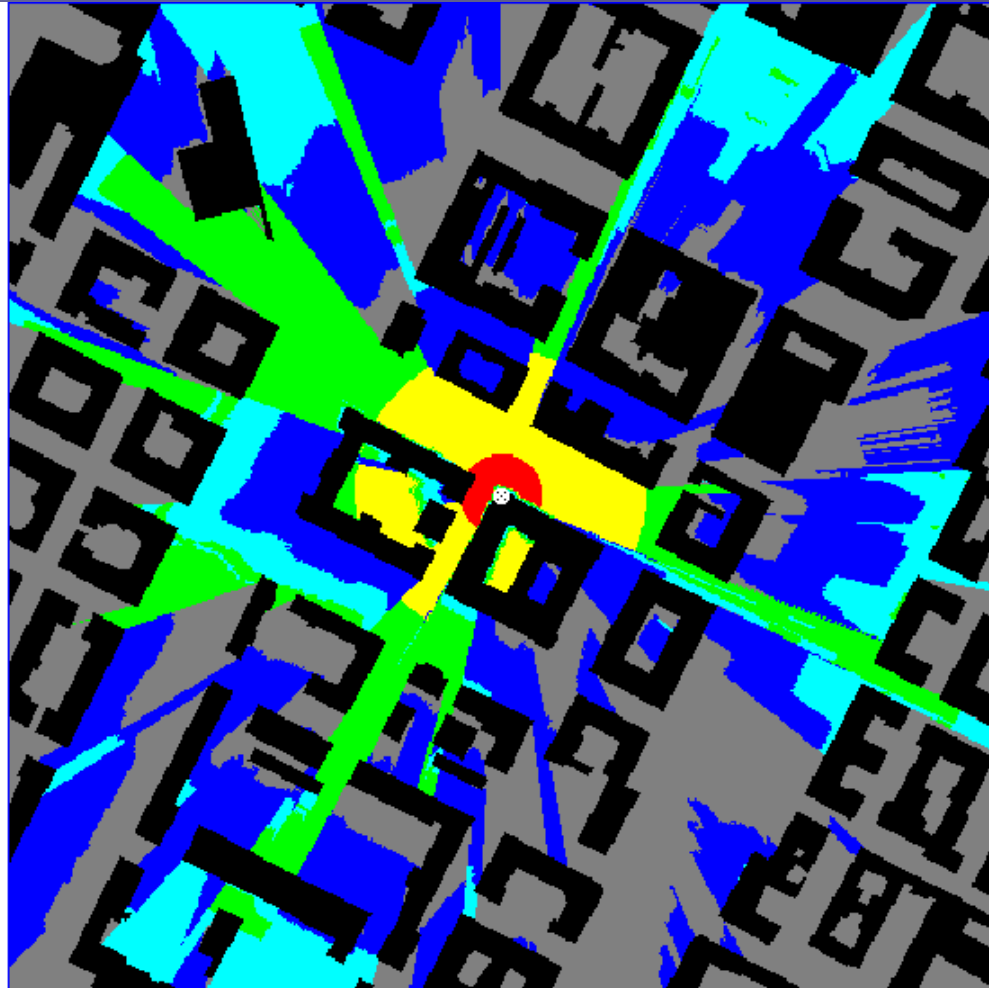
E>=100

E>= 90

E>= 80

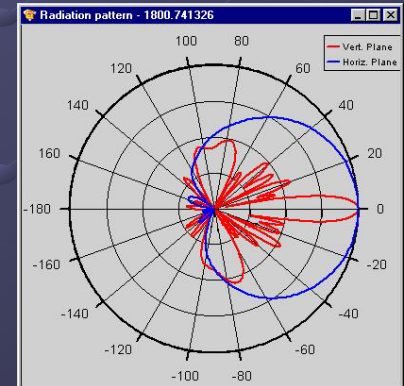
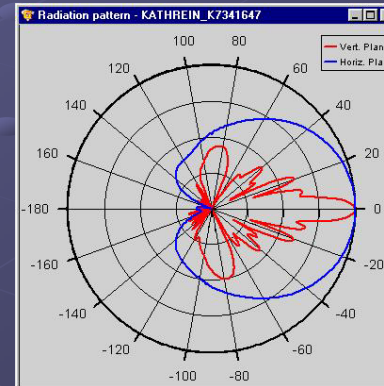
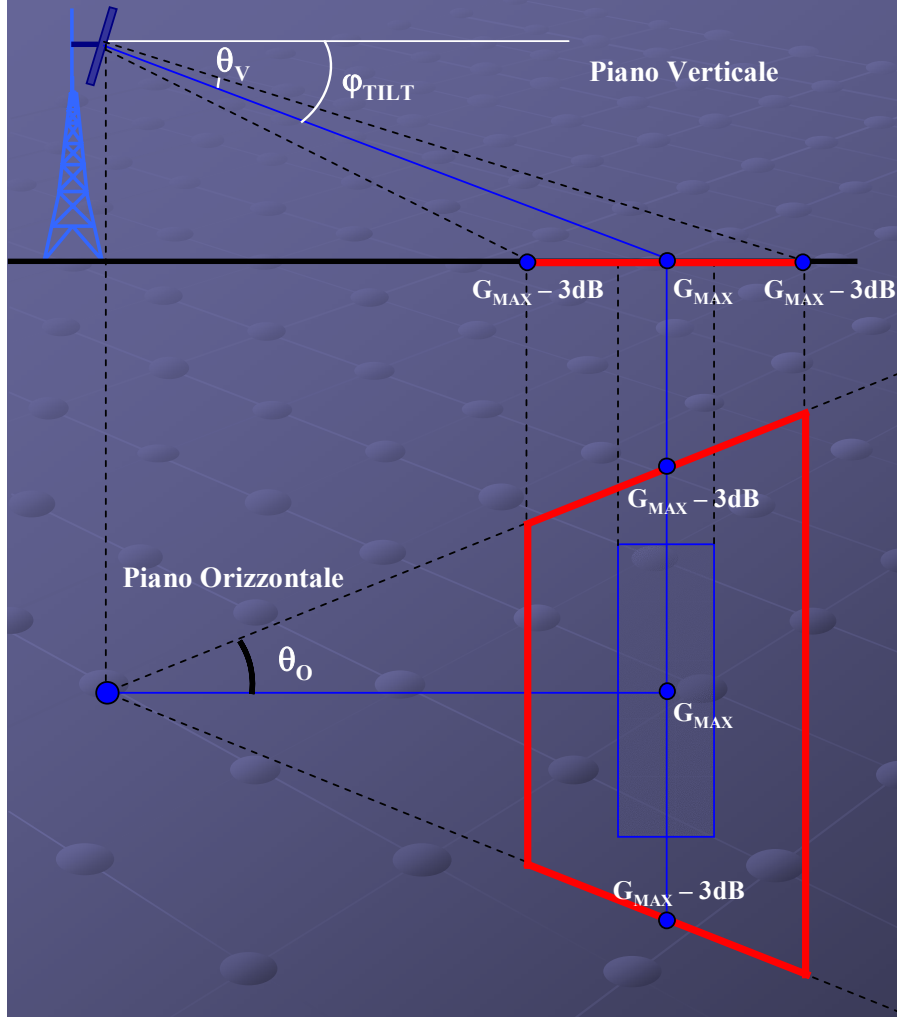
E< 80

TILAB MB/PP

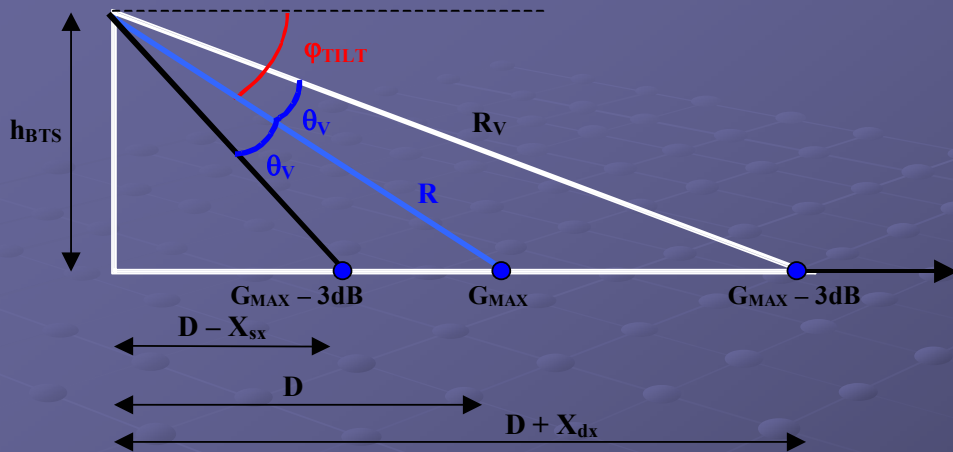


SCAMPER

# Protocollo di acquisizione dati (1)

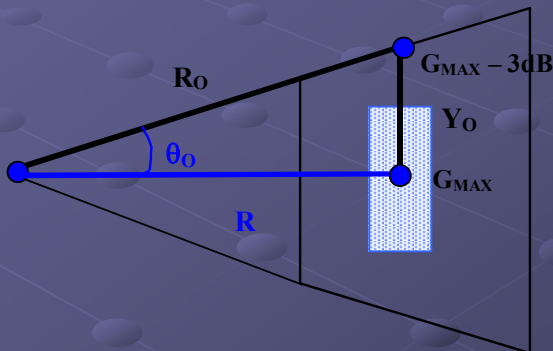


# Protocollo di acquisizione dati (2)



$$X_{sx} = D - \frac{h_{BTS}}{\operatorname{tg}(\varphi_{TILT} + \vartheta_V)}$$

$$X_{dx} = \frac{h_{BTS}}{\operatorname{tg}(\varphi_{TILT} - \vartheta_V)} - D$$



$$Y_o = R \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \vartheta_o} - 1}$$

	900 MHz	1800 MHz
$\theta_v$	9°	10°
$\theta_o$	59°	62°

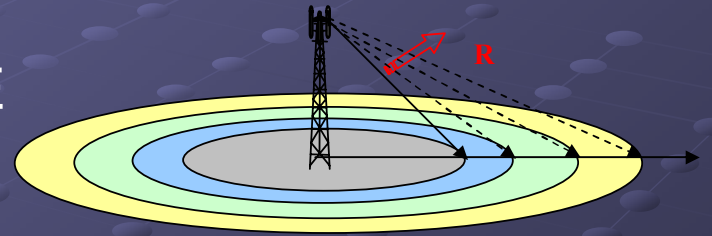
# Protocollo di acquisizione dati (3)

- Per ogni sito, in totale 10, sono state effettuate simulazioni per le antenne a 900 e a 1800 MHz.
- Per ogni antenna sono state ripetute le simulazioni per quattro differenti angolazioni, rispetto al nord geografico ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ).
- Per ogni angolazione sono state ripetute le verifiche per cinque altezze dell'antenna: 30, 40, 50, 55, 60 metri.
- Per ogni posizione sono state ripetute le simulazioni per cinque distanze diverse: 50, 100, 150, 250, 400 metri, "tiltando" opportunamente l'antenna, in modo che nella regione di calcolo il guadagno dell'antenna sia compreso tra  $G_{MAX}$  e  $G_{MAX}-3dB$ .

Totale simulazioni effettuate =  $10 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 5 = 2000$

# Procedura di elaborazione dei dati

- Dalla procedura di verifica con *Guardian* otteniamo il campo elettrico  $E$  in funzione di  $R$
- Medio i valori di campo elettrico  $E$



$$Y_G = 20 \log_{10} \left( \frac{E_0}{E} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{➤ } E_0 &= \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi R^2}} (EIRP_T)_{\text{watt}} \\ \text{➤ } Z_0 &= 377 \Omega \\ \text{➤ } (EIRP_T)_{\text{dBm}} &= 60 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$Y_G$	$R$	$f$	$\rho$	$h_{Ed}$	$\Delta h$
$Y_{G1}$	$(R)_1$	$(f)_1$	$(\rho)_1$	$(h_{Ed})_1$	$(\Delta h)_1$
$Y_{G2}$	$(R)_2$	$(f)_2$	$(\rho)_2$	$(h_{Ed})_2$	$(\Delta h)_2$
.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....
$Y_{GN}$	$(R)_N$	$(f)_N$	$(\rho)_N$	$(h_{Ed})_N$	$(\Delta h)_N$

# Calcolo coefficienti del funzionale Y

$$Y = k + k_R \log R + k_f \log f + k_{\bar{\rho}} \log \bar{\rho} + k_{\Delta h} \log(1 + \Delta h) + k_{\bar{h}_{Ed}} \log \bar{h}_{Ed}$$

LOG(R)	TG	LOG(Freq)	LOG(h_BTS)	LOG(h_msd)	LOG(h_Ed)	LOG(h)
1.785	39.873	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.792	41.157	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.806	40.813	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.813	14.389	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.820	32.964	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.824	37.744	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.833	32.103	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.839	34.385	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.845	34.022	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.851	32.782	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.857	24.428	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.863	24.148	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.869	24.107	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.875	24.277	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.881	22.620	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.886	18.620	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.892	17.975	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.898	17.014	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.903	14.745	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.908	15.425	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.914	15.998	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.919	15.953	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.924	15.126	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.929	14.593	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.934	11.919	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.940	12.437	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.944	10.179	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.949	11.474	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362
1.954	10.556	2.954	1.690	1.415	1.602	1.362

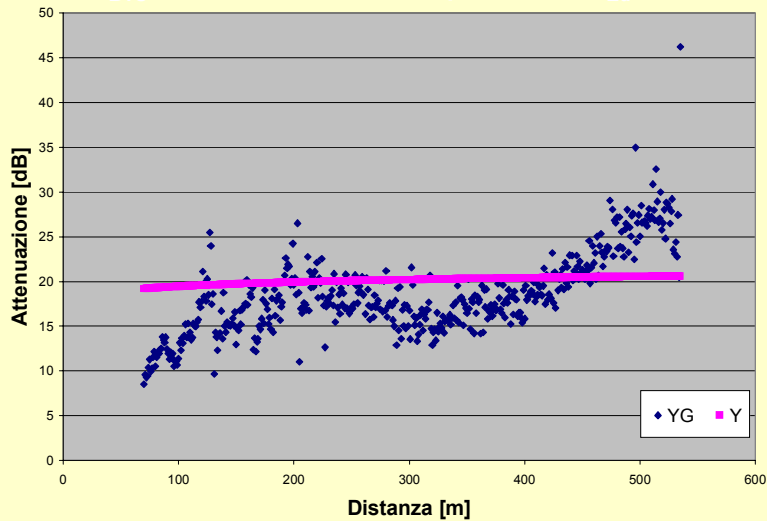
Regressione  
lineare multipla

k	k <sub>R</sub>	k <sub>f</sub>	k <sub><math>\bar{\rho}</math></sub>	k <sub><math>\Delta h</math></sub>	k <sub><math>\bar{h}_{Ed}</math></sub>
-9,3	1,6	2,32	16,93	-13,85	4,87

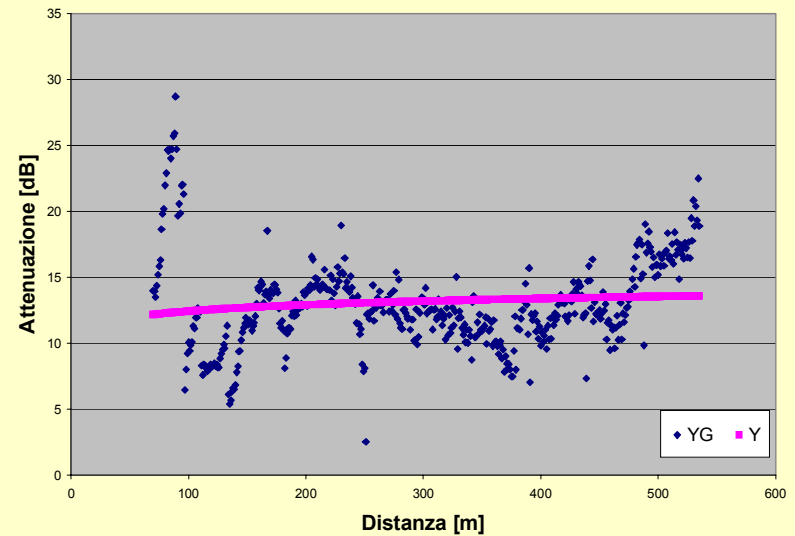
Errore quadratico medio = 3,7 dB

# Test su siti utilizzati per il calcolo dei coefficienti di Y

$h_{BTS} = 39m$   $f = 900\text{ MHz}$   $\bar{\rho} = 43\%$   $\bar{h}_{Ed} = 26\text{ m}$



$h_{BTS} = 49m$   $f = 1800\text{ MHz}$   $\bar{\rho} = 41\%$   $\bar{h}_{Ed} = 15\text{ m}$

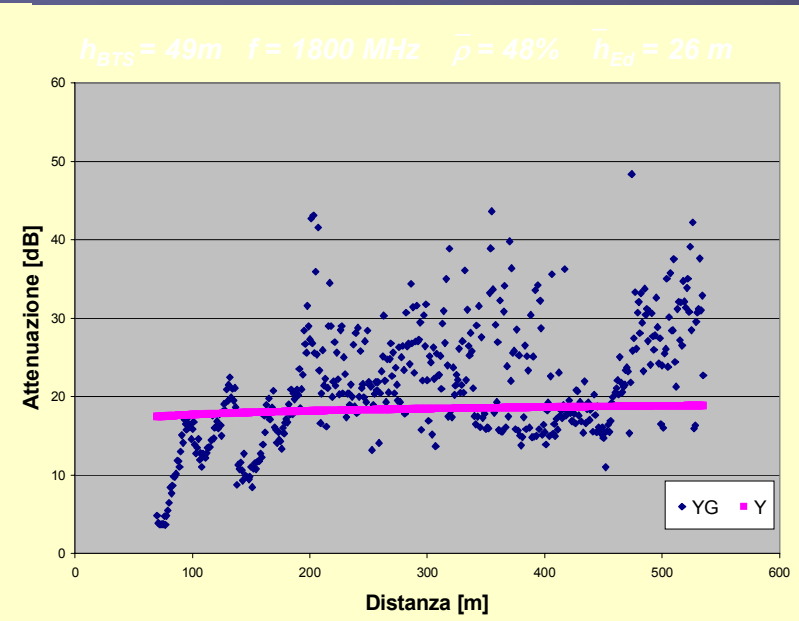
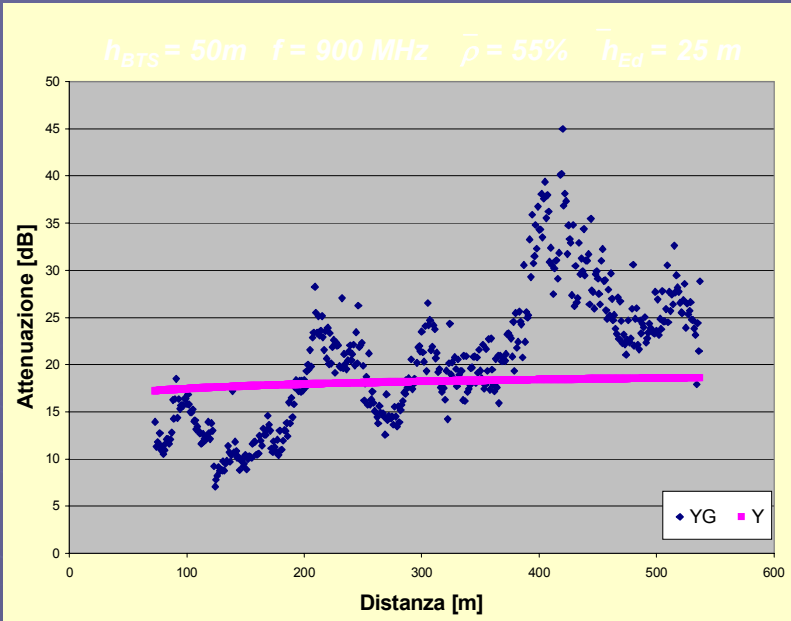


frequenza	Y			Y <sub>G</sub>	
	Val.medio	N <sub>Δ</sub>	N <sub>Δ%</sub>	Val.medio	DEV.ST
900 MHz	20,1 dB	11	2,4 %	18,6 dB	4,5 dB
1800 MHz	13,8 dB	22	4,7 %	14,1 dB	3,1 dB

- N = Numero di campioni 500
- $\Delta = |Y - Y_G|$
- N<sub>Δ</sub> = numero di campioni tali che  $\Delta > 2\text{DEV.ST}$



# Test su siti *non* utilizzati per il calcolo dei coefficienti di Y



frequenza	Y			Y <sub>G</sub>	
	Val.medio	N <sub>Δ</sub>	N <sub>Δ%</sub>	Val.medio	DEV.ST
900 MHz	18,1 dB	26	6 %	20,5 dB	7 dB
1800 MHz	18,4 dB	27	5,8 %	21,2 dB	7,5 dB

- N = Numero di campioni 500
- $\Delta = |Y - Y_G|$
- N<sub>Δ</sub> = numero di campioni tali che  $\Delta > 2\text{DEV.ST}$