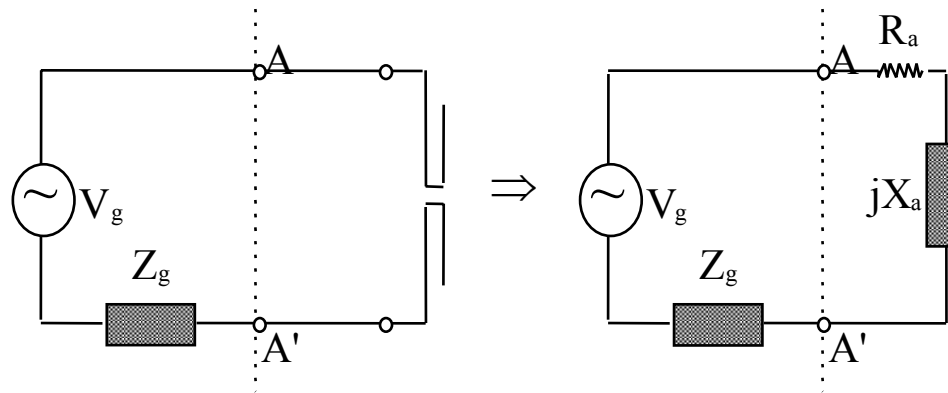


Antenne: generalità

- ❑ Dispositivo utilizzato per *irradiare* o *ricevere* in maniera **efficace** le onde e.m.
- ❑ Antenne trasmettenti e riceventi sono formalmente simili (reciprocità).
- ❑ Esistono antenne adatte ed ottimizzate per certi campi di applicazione e frequenze d'uso.
- ❑ Per lo studio delle antenne è conveniente utilizzare un sistema di riferimento in coordinate sferiche (r, ϑ, φ) .
- ❑ **Nel caso di condizioni di campo lontano si possono individuare grandezze caratteristiche della radiazione.**
- ❑ Nel caso di condizioni di campo vicino si deve ricorrere a modelli opportuni per poter effettuare il calcolo del campo.

L'antenna ed il suo circuito equivalente

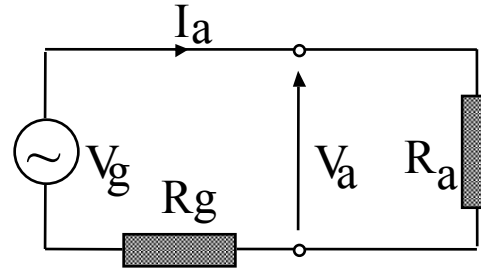


Generatore ad alta frequenza connesso con una antenna tramite una linea di trasmissione. Ai fini del bilancio energetico, tutto ciò che è a destra dei morsetti A-A' del generatore è schematizzabile attraverso una impedenza equivalente, l'impedenza d'antenna.

resistenza di radiazione di valore tale da giustificare la potenza che effettivamente viene ceduta dal generatore all'antenna

$$I_a = \frac{V_g}{R_g + R_a}$$

$$V_a = \frac{R_a}{R_g + R_a} V_g$$



$$P_a = \frac{R_a}{2} \frac{|V_g|^2}{(R_a + R_g)^2} = \frac{|V_g|^2}{2R_g} \frac{R_a}{\left(1 + \frac{R_a}{R_g}\right)^2}$$

Si ha il massimo di potenza irradiata in condizioni di eguaglianza della resistenza d'antenna e di generatore

rendimento di antenna η

$$\eta = \frac{P_a}{(P_a + P_j)} = \frac{P_a}{P_g}$$

P_a la potenza irradiata

P_j quella dissipata

P_g quella erogata dal generatore

Antenne ben progettate hanno il rendimento prossimo ad uno
cioè hanno resistenze di dissipazione piccole rispetto a quelle di radiazione

Le grandezze della radiazione

ipotesi: campo a grande distanza

<u>Densità di potenza irradiata:</u> È inversamente proporzionale a r^2	$p(r, \vartheta, \varphi) = \frac{1}{2} \overline{\mathbf{E}} \times \overline{\mathbf{H}}^* = \frac{1}{2} \frac{ \mathbf{E} ^2}{\eta_0} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$
<u>Intensità di radiazione:</u> È una funzione solo della direzione (ϑ, φ) e non di r	$I_r(\vartheta, \varphi) = p(r, \vartheta, \varphi) r^2$
<u>Potenza irradiata:</u> È la potenza trasmessa attraverso una superficie sferica centrata nel centro di fase dell'antenna	$P_s = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} p r^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = \int_{4\pi} I_r(\vartheta, \varphi) d\Omega \quad [\text{W}]$
<u>Funzione di radiazione:</u> la radice quadrata della intensità di radiazione normalizzata ad una direzione di riferimento (ϑ_1, φ_1) <i>(di solito la direzione di massimo)</i>	$f(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{I_r(\vartheta, \varphi)}{I_{r1}}} \quad I_{r1} = I_r(\vartheta_1, \varphi_1)$

Caratteristiche di radiazione delle antenne (I): Direttività

- Direttività (Guadagno in direttività)

$$D(\vartheta_1, \varphi_1) = \frac{4\pi}{\int_{4\pi} f^2(\vartheta, \varphi) d\Omega}$$

- Il Guadagno in direttività è funzione della particolare direzione di riferimento (ϑ_1, φ_1) scelta nella normalizzazione della funzione di irradiazione:

$$D(\vartheta_1, \varphi_1) = \frac{4\pi}{\int_{4\pi} f^2(\vartheta, \varphi) d\Omega} = \frac{4\pi I_r(\vartheta_1, \varphi_1)}{\int_{4\pi} I_r(\vartheta, \varphi) d\Omega} = \frac{P_o(\vartheta_1, \varphi_1)}{P_s}$$

⇒ $P_o(\vartheta_1, \varphi_1) = 4\pi I_{r1}$ rappresenta la potenza totale irradiata da una antenna isotropa capace di produrre in ogni direzione una intensità di radiazione pari a quella dell'antenna in esame nella direzione di riferimento, (ϑ_1, φ_1)

- Il guadagno in direttività rappresenta il risparmio di potenza irradiata in trasmissione, a parità di densità di potenza prodotta a distanza r in direzione (ϑ_1, φ_1) , quando si utilizzi una antenna “direttiva”, anzichè un'antenna isotropa

Caratteristiche di radiazione delle antenne (II): Guadagno in potenza

- Guadagno in potenza (Guadagno) di un'antenna reale

$$G(\vartheta_1, \varphi_1) = \frac{P_o(\vartheta_1, \varphi_1)}{P_T}$$

- Come la direttività, il guadagno è una funzione della direzione di riferimento (ϑ_1, φ_1) scelta.
- $P_T = P_s + P_j$,
 - ⇒ P_T = potenza fornita all'antenna
 - ⇒ P_s = potenza irradiata
 - ⇒ P_j = potenza dissipata per effetto joule

Guadagno in potenza

- È definito come:

$$G(\vartheta_1, \varphi_1) = \frac{P_o(\vartheta_1, \varphi_1)}{P_T}$$

- Per una antenna reale vale $P_T = P_S + P_J$, dove:

- ⇒ P_T =potenza fornita all'antenna
- ⇒ P_S =potenza irradiata
- ⇒ P_J =potenza dissipata per effetto joule

- Il guadagno in potenza, come la direttività, è funzione della particolare direzione di riferimento (ϑ_1, φ_1)
- Rappresenta l'effetto, in termini di densità di potenza in una data direzione (ϑ_1, φ_1) , causato dall'uso di un'antenna direttiva al posto di una antenna isotropa alimentata con la stessa potenza
- In una generica direzione (ϑ, φ) , il guadagno dipende dalla funzione di radiazione e dalla direzione di normalizzazione (ϑ_1, φ_1) :

$$G(\vartheta, \varphi) = f^2(\vartheta, \varphi) G(\vartheta_1, \varphi_1)$$

Caratteristiche di radiazione delle antenne (III):

Guadagno d'antenna

- Quando le perdite per effetto joule sono trascurabili
 $P_j \ll 1 \Rightarrow P_T = P_s = 1 \Rightarrow G = D$
Guadagno in potenza e guadagno in direttività coincidono

$$G(\vartheta_1, \varphi_1) = D(\vartheta_1, \varphi_1) = \frac{P_o(\vartheta_1, \varphi_1)}{P_T}$$

- Nel seguito si farà sempre l'ipotesi di $P_T = P_s$ (antenne ad alto rendimento) e si indicheranno il guadagno in direttività e il guadagno in potenza con il termine unico Guadagno d'antenna

Caratteristiche di radiazione delle antenne (IV):

Guadagno d'antenna

- Il guadagno di antenna è il rapporto, a parità di potenza di alimentazione, fra la densità di potenza dell'antenna in esame nella direzione di riferimento (ϑ_1, φ_1) e la densità di potenza

$$p_0 = \frac{P_T}{4\pi r^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

di un'antenna isotropa alimentata con la stessa potenza P_T .

$$G(\vartheta_1, \varphi_1) = \frac{p(\vartheta_1, \varphi_1)}{p_0}$$

$$\begin{aligned} G(\vartheta_1, \varphi_1) &= \frac{P_0(\vartheta_1, \varphi_1)}{P_T} = \frac{4\pi I_r(\vartheta_1, \varphi_1)}{P_T} = \\ &= \frac{4\pi r^2 p(\vartheta_1, \varphi_1)}{P_T} = \frac{p(\vartheta_1, \varphi_1)}{p_0} \end{aligned}$$

Il guadagno di antenna rappresenta l'effetto, in termini di densità di potenza in una data direzione (ϑ_1, φ_1), causato dall'uso di un'antenna direttiva invece di una antenna isotropa alimentata con la stessa potenza.

Caratteristiche di radiazione delle antenne (V):

Calcolo del campo a grande distanza

- ❑ Il guadagno d'antenna consente il calcolo del campo a grande distanza nel punto $R(r, \vartheta_1, \varphi_1)$.
- ❑ Infatti noto il guadagno $G(\vartheta_1, \varphi_1)$ e nota la potenza P_T fornita all'antenna si calcola la

densità di potenza effettivamente
generata in $R(r, \vartheta_1, \varphi_1)$.

$$p(r, \vartheta_1, \varphi_1) = \frac{P_T}{4\pi r^2} G(\vartheta_1, \varphi_1)$$

Caratteristiche di radiazione delle antenne (VI):

Guadagno in direzione generica

- Il guadagno in una generica direzione (ϑ, φ) dipende dalla funzione di irradiazione e dalla direzione di normalizzazione (ϑ_1, φ_1) :

$$G(\vartheta, \varphi) = f^2(\vartheta, \varphi) G(\vartheta_1, \varphi_1)$$

infatti

$$\begin{aligned} G(\vartheta, \varphi) &= \frac{p(\vartheta, \varphi)}{p_0} = \frac{p(\vartheta, \varphi) r^2}{p_0 r^2} = \\ &= \frac{I_r(\vartheta, \varphi)}{p_0 r^2} = \frac{f^2(\vartheta, \varphi) I_r(\vartheta_1, \varphi_1)}{p_0 r^2} = \\ &= \frac{f^2(\vartheta, \varphi) p(\vartheta_1, \varphi_1)}{p_0} = f^2(\vartheta, \varphi) G(\vartheta_1, \varphi_1) \end{aligned}$$

$$I_r(\vartheta, \varphi) = p(r, \vartheta, \varphi) r^2$$

$$f(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{I_r(\vartheta, \varphi)}{I_r(\vartheta_1, \varphi_1)}}$$

- La conoscenza della funzione di irradiazione $f(\vartheta, \varphi)$ consente il calcolo del guadagno in una qualsiasi direzione e, dunque, il calcolo della densità di potenza irradiata.

Caratteristiche di radiazione delle antenne (VII):

Diagrammi di Radiazione

- ❑ Per caratterizzare le proprietà direttive delle antenne si utilizzano i **diagrammi di irradiazione**.
- ❑ Si ottengono intersecando la superficie di radiazione normalizzata al massimo $f(\vartheta, \varphi)$ con piani passanti per l'origine (posizione dove è situata l'antenna trasmittente)
- ❑ Possono essere *diagrammi polari* o *cartesiani*
- ❑ Per praticità la funzione di radiazione è riportata in *decibel* (dB)

$$f(\vartheta, \varphi) [\text{dB}] = 10 \log_{10} f^2(\vartheta, \varphi) = 10 \log_{10} \frac{G(\vartheta, \varphi)}{G(\vartheta_M, \varphi_M)}$$

avendo indicato con (ϑ_M, φ_M) la direzione di massima irradiazione.

- ❑ La funzione di irradiazione così normalizzata è sempre positiva e minore di uno (in decibel sempre minore di 0 dB)

Parametri del diagramma di radiazione

Angolo di apertura del lobo principale

È l'angolo individuato dalle due direzioni più prossime al massimo di irradiazione per cui l'intensità di radiazione si riduce della metà (3dB)

Direzioni di zero

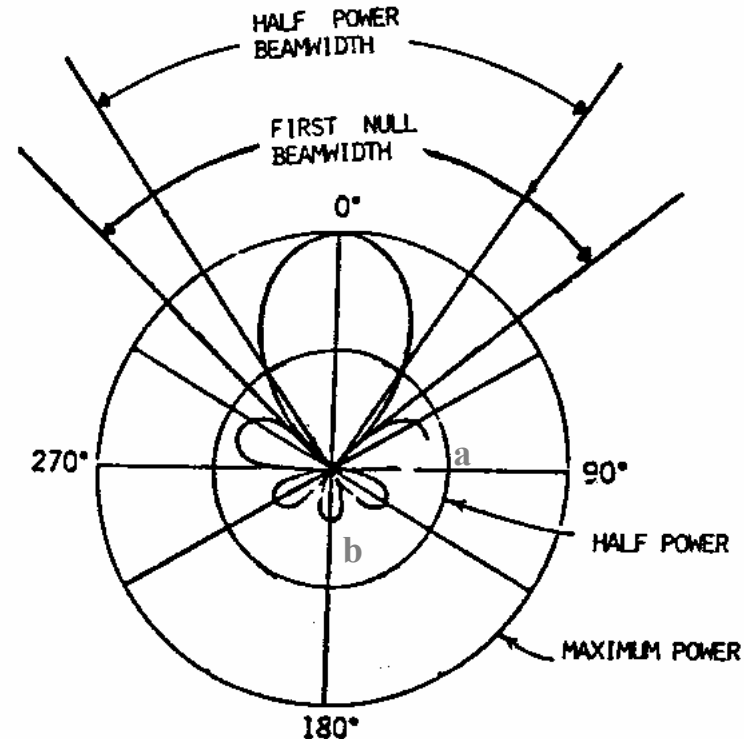
Sono le direzioni corrispondenti a irradiazione minima (teoricamente nulla)

Attenuazione dei lobi secondari

È il rapporto (in dB) fra l'intensità di radiazione nella direzione privilegiata e quella massima al di fuori del lobo principale

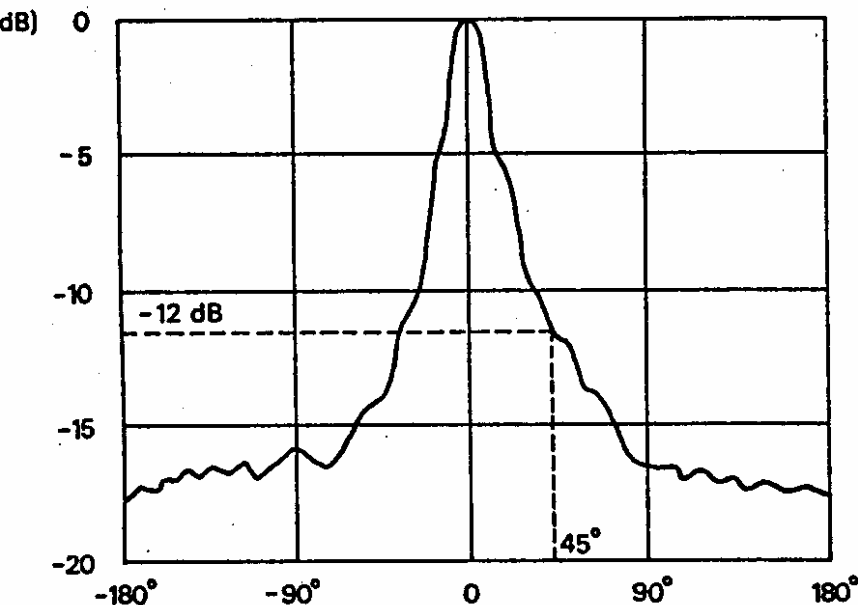
Attenuazione avanti-indietro

È il rapporto (in dB) fra l'intensità di radiazione nella direzione privilegiata e quella nella direzione opposta



Utilizzo dei diagrammi di radiazione (1/2)

- Poiché il guadagno è proporzionale al quadrato della funzione di radiazione, dai diagrammi di radiazione si può ricavare direttamente il rapporto fra il guadagno nella direzione di riferimento e quello nella direzione generica.



$$f(\vartheta, \varphi) [\text{dB}] = G(\vartheta, \varphi) [\text{dB}] - G(\vartheta_M, \varphi_M) [\text{dB}]$$
$$G(\vartheta, \varphi) [\text{dB}] = G(\vartheta_M, \varphi_M) [\text{dB}] + f(\vartheta, \varphi) [\text{dB}]$$

Esempio

$$G_M = G(\theta_M, \varphi_M) = 100 \quad [G_M = 20 \text{ dB}]$$
$$f(+45^\circ) = -12 \text{ dB}$$
$$\Rightarrow G(45^\circ) = G_M + f(45^\circ) = 8 \text{ dB}$$

Utilizzo dei diagrammi di radiazione (2/2)

- I diagrammi di irradiazione sul piano verticale e sul piano orizzontale possono essere utilizzati per ottenere con buona approssimazione il guadagno dell'antenna all'interno del lobo principale, secondo la relazione:

$$G(\theta, \varphi) \cong G_{MAX} D_V(\theta) D_H(\varphi)$$

$$G(\theta, \varphi)_{dBi} \cong G_{MAX_{dBi}} + D_{V_{dB}}(\theta) + D_{H_{dB}}(\varphi)$$

D_V, D_H : diagrammi di radiazione normalizzati a 1

G_{MAX} : valore del guadagno nella direzione di massima radiazione
Il guadagno massimo, riferito al radiatore isotropico, è spesso riportato in dBiso (dBi).

- La relazione vista presenta limiti al di fuori del lobo principale, tuttavia l'andamento e le ampiezze massime dei lobi secondari sono ancora riprodotti con una approssimazione accettabile.

Esempio diagramma di radiazione antenna per stazione base cellulare

Diagramma VERTICALE

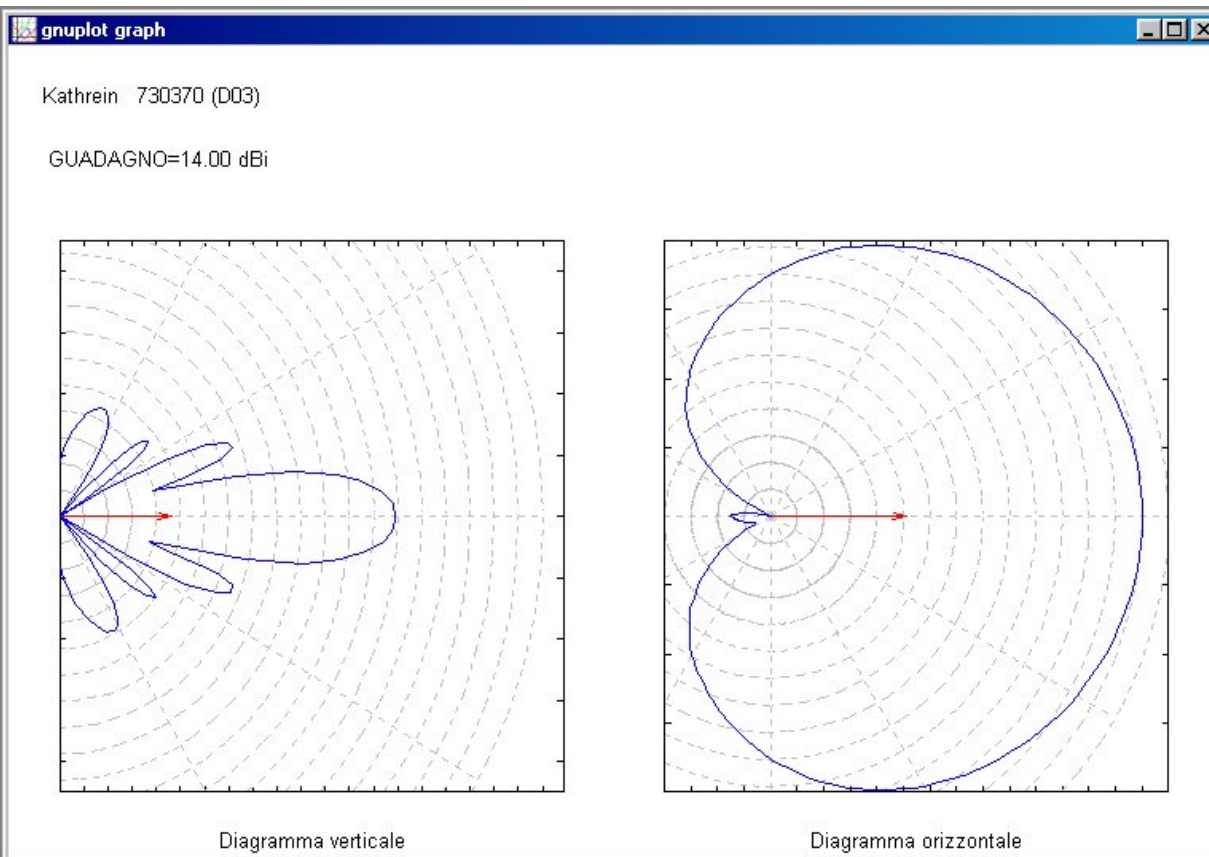
0.000000	0.024465
0.017444	0.022680
0.034889	0.022274
0.052333	0.019028
0.069778	0.016744
0.087222	0.015544
0.104667	0.013817
0.122111	0.010958
0.139556	0.008621

.....

;Diagramma ORIZZONTALE

-3.140000	0.011860
-3.122556	0.013306
-3.105111	0.013306
-3.087667	0.015451
-3.070222	0.015451
-3.052778	0.017114
-3.035333	0.017114
-3.017889	0.019306

.....



Caratteristiche di radiazione delle antenne (X)

Potenza Irradiata Efficace (EIRP)

- Si definisce EIRP (Effective Irradiated Power) il prodotto

$$EIRP = P_T G(\vartheta_M, \varphi_M)$$

che è la potenza effettivamente irradiata nella direzione di massimo (ϑ_M, φ_M) dall'antenna quando è alimentata con potenza P_T

- In questo modo è possibile esprimere la densità di potenza generata in $R(r, \vartheta_M, \varphi_M)$ da un'antenna direttiva con guadagno $G_M = G(\vartheta_M, \varphi_M)$ come

$$p(r, \vartheta_M, \varphi_M) = \frac{EIRP}{4\pi r^2}$$

mentre in qualsiasi altra direzione come

$$p(r, \vartheta, \varphi) = \frac{EIRP}{4\pi r^2} f(\vartheta, \varphi)$$

Caratteristiche di radiazione delle antenne (XI): Area Efficace

- ❑ L'area efficace rappresenta l'attitudine dell'antenna a captare energia dallo spazio
- ❑ Viene definita in condizioni di polarizzazione favorevole del campo e.m. incidente e di massimo trasferimento di potenza fra antenna e carico (adattamento)

$$A_e(\vartheta, \varphi) = \frac{P_r(\vartheta, \varphi)}{p(r, \vartheta, \varphi)} \quad [\text{m}^2]$$

- P_r = potenza ricevuta disponibile al carico.
- p = densità di potenza in (r, ϑ, φ) in assenza della antenna.

Caratteristiche di radiazione delle antenne (XII): Legame tra Area Efficace Guadagno

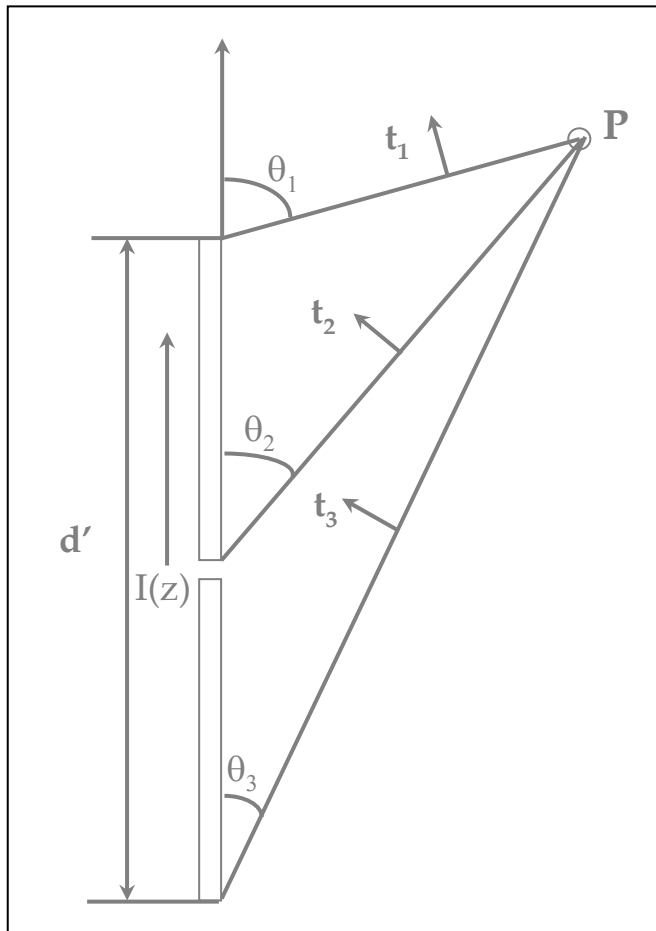
- Si dimostra che per una antenna il rapporto tra area efficace e guadagno è una costante

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

dove λ è la lunghezza d'onda.

Modelli per il campo vicino (1/2)

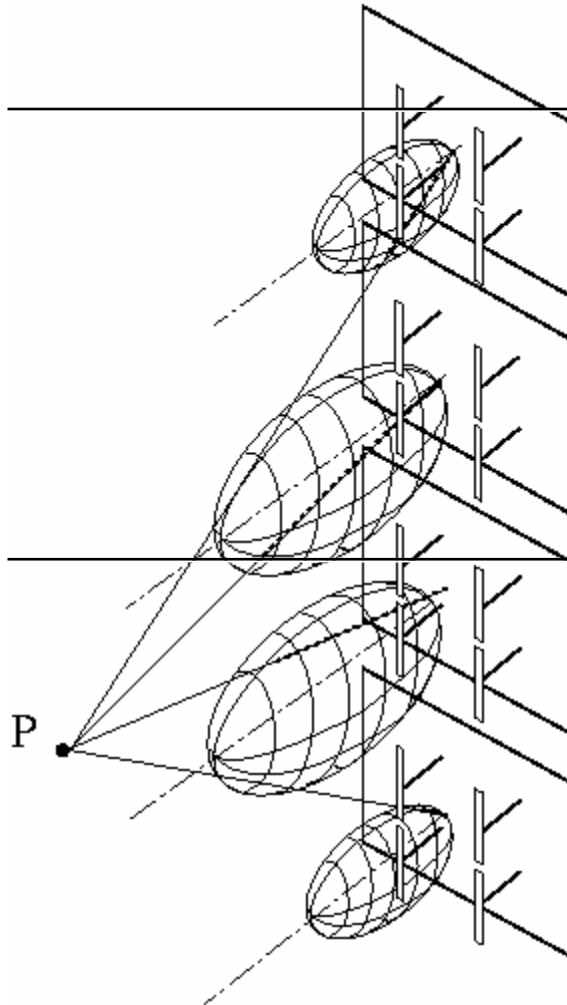
Modello a terne di onde sferiche (Modello di Schelkunoff):



- ❑ Consente il calcolo del campo anche quando non sono soddisfatte le condizioni di campo lontano.
- ❑ Il campo irradiato da un dipolo di lunghezza d' è dato dalla somma dei campi irradiati da tre sorgenti sferiche non uniformi
- ❑ In un caso reale si devono tenere in conto i contributi dovuti a riflessione e a diffrazione sullo schermo posteriore riflettente

Modelli per il campo vicino (2/2)

Modello a diagrammi di radiazione parziali:



- ❑ Suddivisione dell'antenna in sottoelementi (es. coppie di dipoli) a diagramma di radiazione noto
- ❑ Regione di campo lontano per il singolo elemento, per distanze superiori a $3 \div 5 \lambda$
- ❑ Sovrapposizione degli effetti e calcolo del campo in P (ad esempio con algoritmi di ray-tracing)

Modello a diagrammi di radiazione parziali

```
[Descrizione]
File_diagr=v55_h90_g80.sng
No_dipoli=8

[Dip1]
X=0.0
Z=2.24
Pwr_rel=0.6
Phs_rel=0.0

[Dip2]
X=0.0
Z=1.92
Pwr_rel=1.0
Phs_rel=0.0

[Dip3]
X=0.0
Z=1.6
Pwr_rel=1.0
Phs_rel=0.0

[Dip4]
X=0.0
Z=1.28
Pwr_rel=1.0
Phs_rel=0.0

.....
```

```
; Diagramma singolo elemento
6.30957
180 361 "v"
;Diagramma VERTICALE
0.000000 0.059979
0.017444 0.062015
0.034889 0.063973
0.052333 0.065993
0.069778 0.067999
0.087222 0.069984
0.104667 0.072028
0.122111 0.073961
0.139556 0.076033
0.157000 0.077983
0.174444 0.079983
0.191889 0.082035
0.209333 0.084043
.....
;Diagramma ORIZZONTALE
-3.140000 0.062661
-3.122556 0.062878
-3.105111 0.064047
-3.087667 0.065464
-3.070222 0.063314
-3.052778 0.061589
-3.035333 0.061518
-3.017889 0.062087
-3.000444 0.060884
-2.983000 0.061235
-2.965556 0.063753
```

Esempio dei file del diagramma di radiazione
per antenne scomposte in sottoelementi

Esempio del database delle antenne

File Modifica Visualizza Inserisci Strumenti Finestra ?

Compobj : Database

Tabelle Query Maschere Report Macro Moduli

ANTENNE
 COSTRUTTORI
 FREQUENZE
 GESTORI
 MATERIALI
 RADIATION
 RADIATION_VALUE
 SISTEMI
 TIPO

Apri
 Struttura
 Nuovo

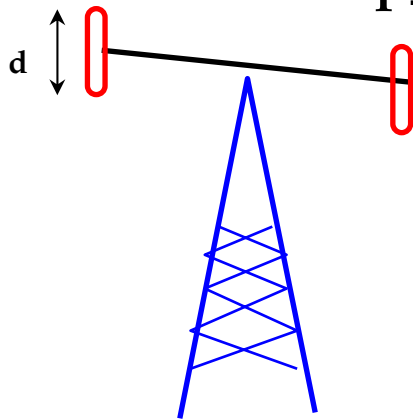
ANTENNE : Tabella

ANT_CODE	ANT_NAME	ANT_DESC	RAD_CODE	ANT_FILENAME	FREQ_CODE	COST_CODE	SIS_CODE	TIP_CODE
0					0	0	0	0
1	Kathrein 730362			k730362.tot	1	1	1	2
2	Kathrein 730368			k730368.tot	1	1	1	2
3	Kathrein 730370			k730370.tot	1	1	1	2
4	Kathrein 730374			k730374.tot	1	1	1	2
5	Kathrein 731841			k731841.tot	1	1	1	2
6	Kathrein 732507			k732507.tot	1	1	1	2
7	Kathrein 732508			k732508.tot	1	1	1	2
8	Kathrein 732690			k732690.tot	1	1	1	2
9	Kathrein 732691			k732691.tot	1	1	1	2
10	Kathrein 7345647			k7345647.tot	1	1	1	2
11	Kathrein 736349			k736349.tot	1	1	1	2
13	Kathrein 737656			k737656.tot	1	1	1	2

Record: 1 di 322

Pronto

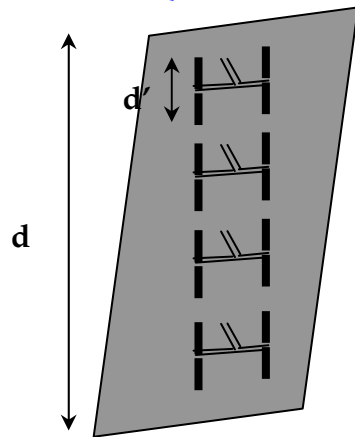
$$f = 900 \text{ MHz} \quad \uparrow \quad \lambda = 0.333 \text{ m}$$



Antenna complessiva

$$d = 1.30 \div 1.60 \text{ m}$$

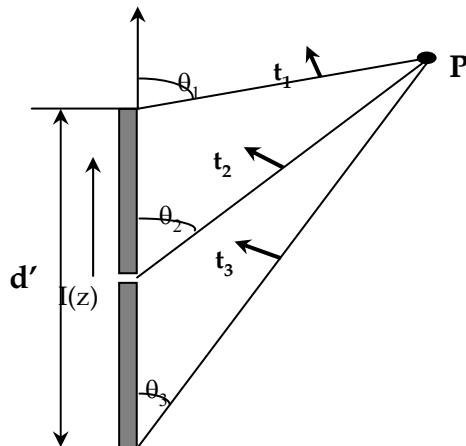
↑ regione di campo lontano per distanze superiori a $2 \cdot d^2 / \lambda$



Schematizzazione dell'antenna in singoli elementi

$$d' \cong \lambda$$

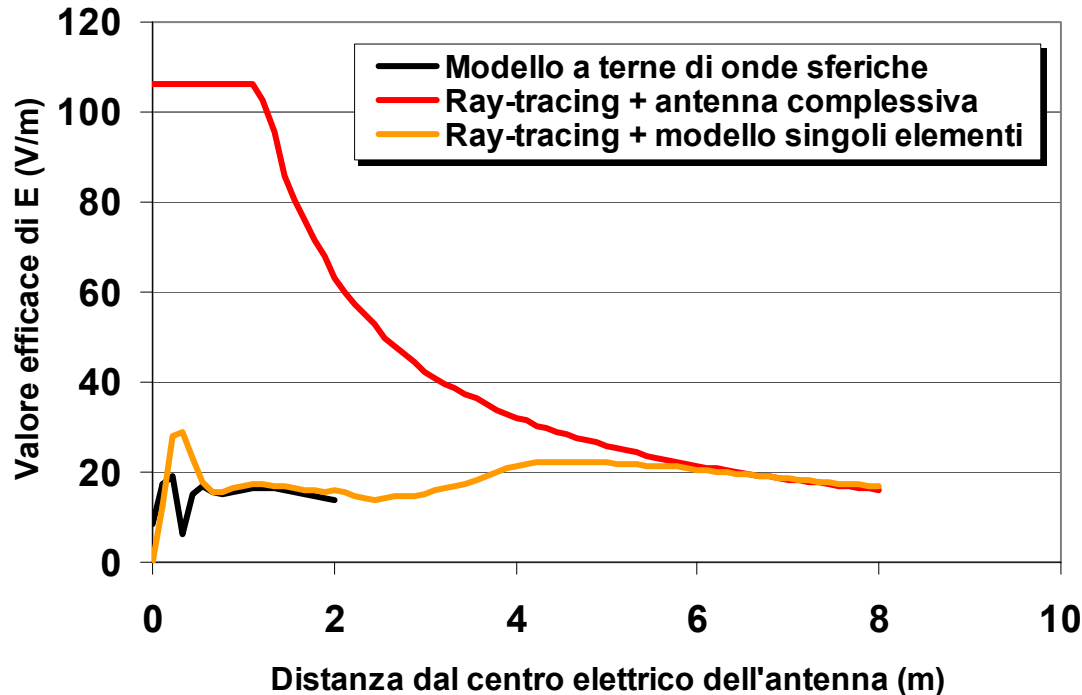
↑ regione di campo lontano per distanze superiori a $3 \div 5 \lambda$



Modello a terne di onde sferiche (Schelkunoff) per il singolo elemento

↑ calcolo del campo in regione di campo vicino

Confronto tra i tre modelli d'antenna



- I primi due modelli sono confrontabili dopo circa 0.5 m
- Il secondo e il terzo modello sono confrontabili dopo circa 6 m
- Il modello di previsione completo è valido anche per distanze inferiori a 1 m, mentre il modello con l'antenna complessiva è valido per distanze superiori ai 6 m

Classificazione Antenne

- ❑ **Antenne filiformi:** sono costituite da un insieme di conduttori filiformi più o meno sottili sedi di correnti impresse lineari.
- ❑ **Antenne a superficie (ad apertura):** in questo caso si hanno superfici che sono sedi di correnti impresse superficiali
- ❑ **Antenne composite:** In queste antenne si sfruttano le caratteristiche di radiazione di più antenne identiche e vicine tra loro alimentate in modalità opportuna
 - ⇒ Schiere di antenne (antenne allineate lungo una data direzione)
 - ⇒ Schiere di antenne o cortine di antenne (antenne distribuite su una superficie).

Antenne a schiera

- ❑ Sono antenne composte da un insieme di elementi radianti identici disposti a distanze regolari ed alimentati in modo da ottenere un prefinito diagramma di radiazione.
- ❑ **Antenna a schiera lineare**: È un'antenna a schiera monodimensionale in cui gli elementi radianti sono disposti equispaziati lungo una linea retta.
- ❑ **Fattore di schiera** : È il diagramma di radiazione di un'antenna a schiera in cui tutti gli elementi sono radiatori isotropici. Non dipende quindi dal tipo di antenne di cui è costituita la schiera.
 - ⇒ Agendo sul fattore di schiera si ottiene la direttività sul piano verticale, mentre la forma dei radiatori elementari determina la direttività sul piano orizzontale
- ❑ **Angolo di down tilt elettrico**: Per antenne a schiera lineari è la differenza angolare tra la direzione di massima irradiazione e l'asse ortogonale al piano sul quale giace la schiera.

Impianti fissi di radiocomunicazione (I)



- ❑ Impianti televisivi e radio diffusivi
- ❑ Collegamenti radio punto-punto



Impianti fissi di radiocomunicazione (II)

- ❑ Stazioni radiobase cellulari
- ❑ Stazioni radiobase sistemi cordless



Classificazione in base alla potenza trasmessa e al tipo di antenna installata (I)

❑ Installazioni outdoor

- ⇒ impianti diffusivi audio e video
potenze elevate (ordine dei Kwatt e MegaWatt)
posizionati al di fuori dei centri abitati e su alture
- ⇒ collegamenti radio punto-punto
antenne molto direttive con guadagni molto elevati
potenza in trasmissione bassa (alcuni Watt)
posizionati sui tetti delle abitazioni o su tralicci, in visibilità
- ⇒ SRB per sistemi cellulari
potenze non elevate per rendere massima la strategia cellulare (da qualche centinaio di mWatt a qualche decina di Watt)
coperture macrocellulari
coperture “small cells”
coperture microcellulari

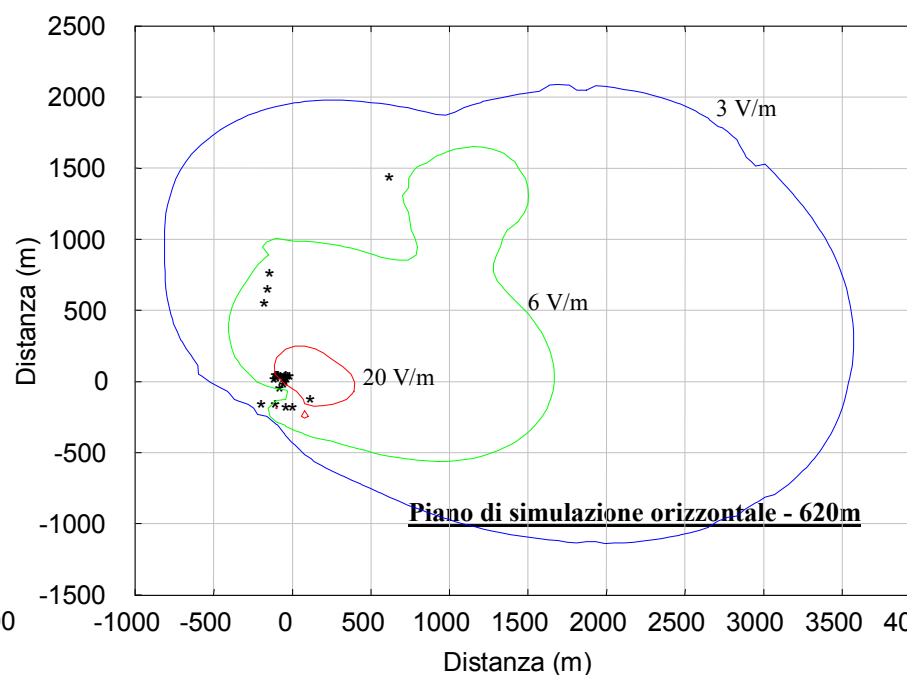
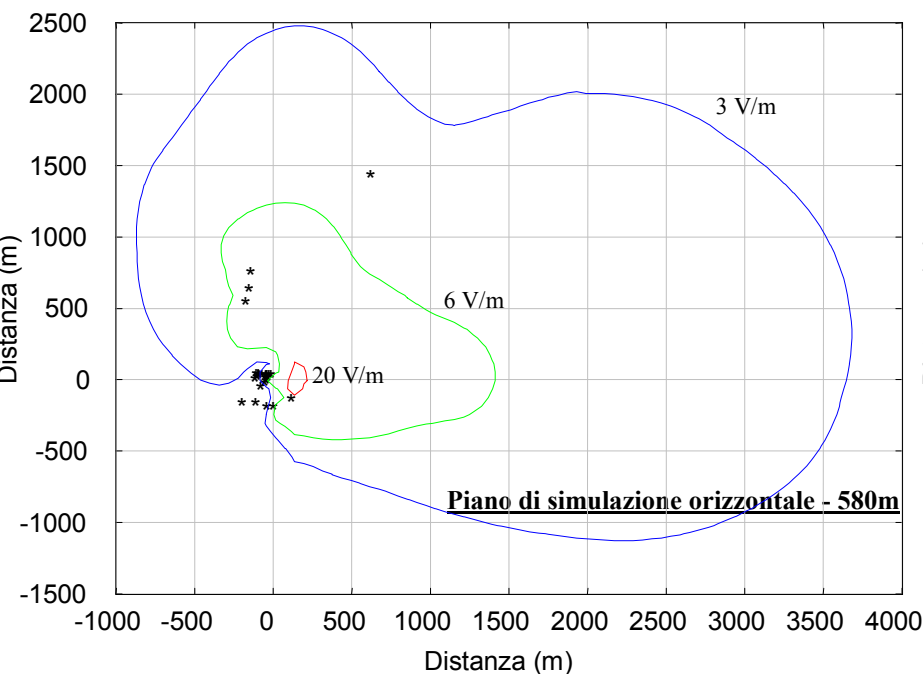
Classificazione in base alla potenza trasmessa e al tipo di antenna installata (II)

□ Installazioni indoor

- ⇒ sistemi cordless e w-lan
- potenze estremamente basse per coprire aree piccole (decina di mWatt)
- antenne omnidirezionali
- posizionate in zone accessibili alla popolazione

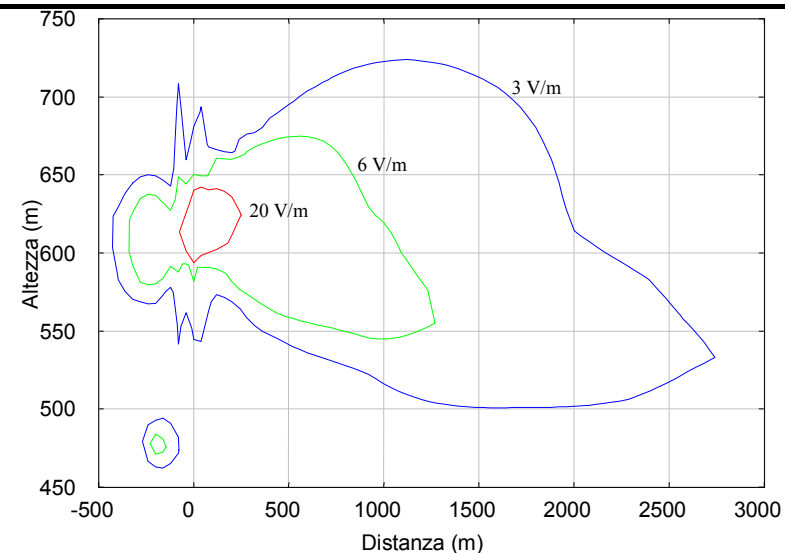
ANALISI DEL SITO COMPLESSO RADIO TV

- 26 installazioni (individuate da asterischi “*”)
- **70 antenne di cui 56 attive**
- Altezza media delle antenne dal livello del mare circa 620 metri
- Trasmettitori divisi in due gruppi:
 1. Direzione media di massima irradiazione circa 0° Nord
 2. Direzione media di massima irradiazione circa 90° Nord

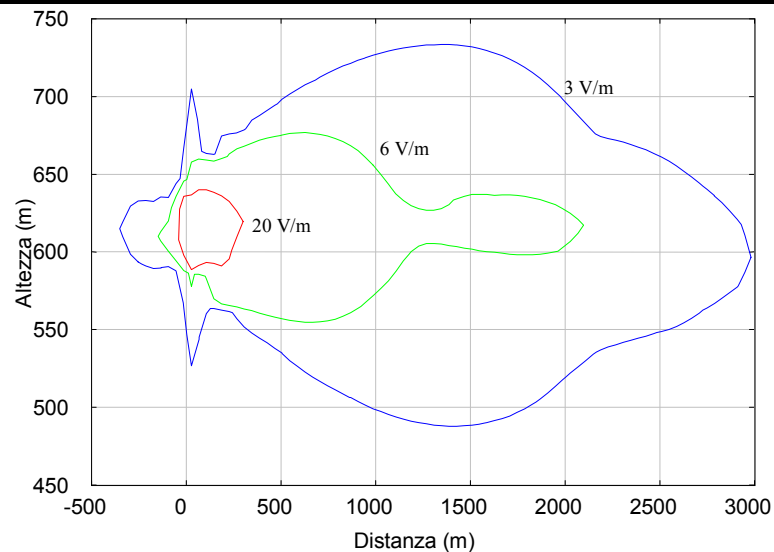


ANALISI DEL SITO COMPLESSO RADIO TV

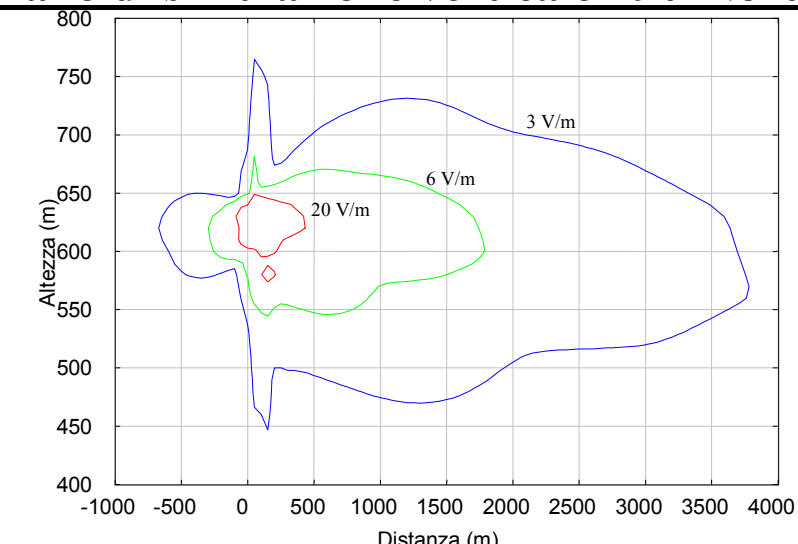
Piano di simulazione verticale - 0°Nord



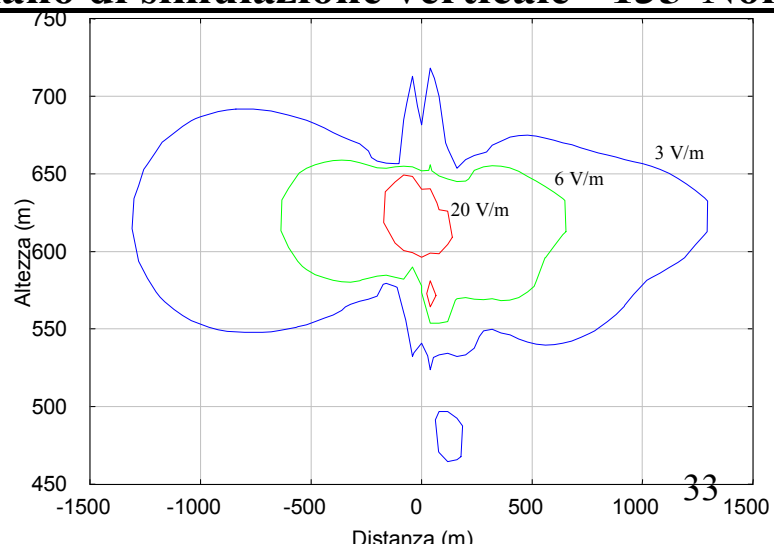
Piano di simulazione verticale - 45°Nord



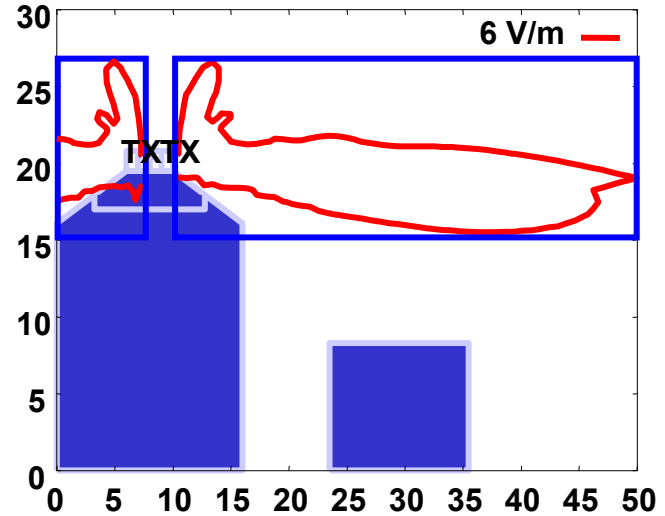
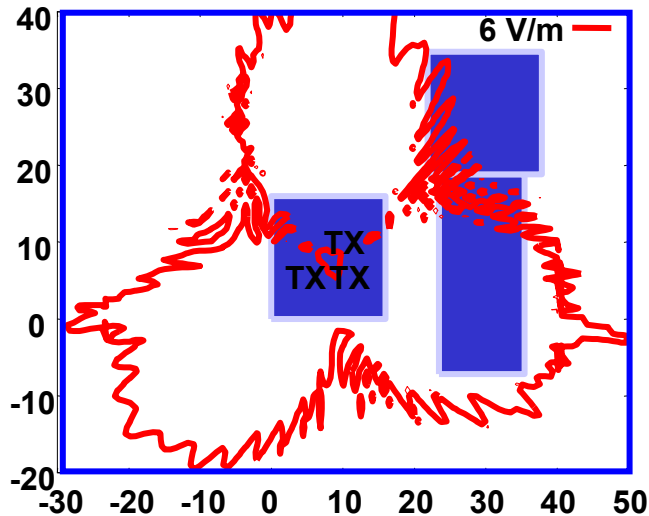
Piano di simulazione verticale - 90°Nord



Piano di simulazione verticale - 135°Nord



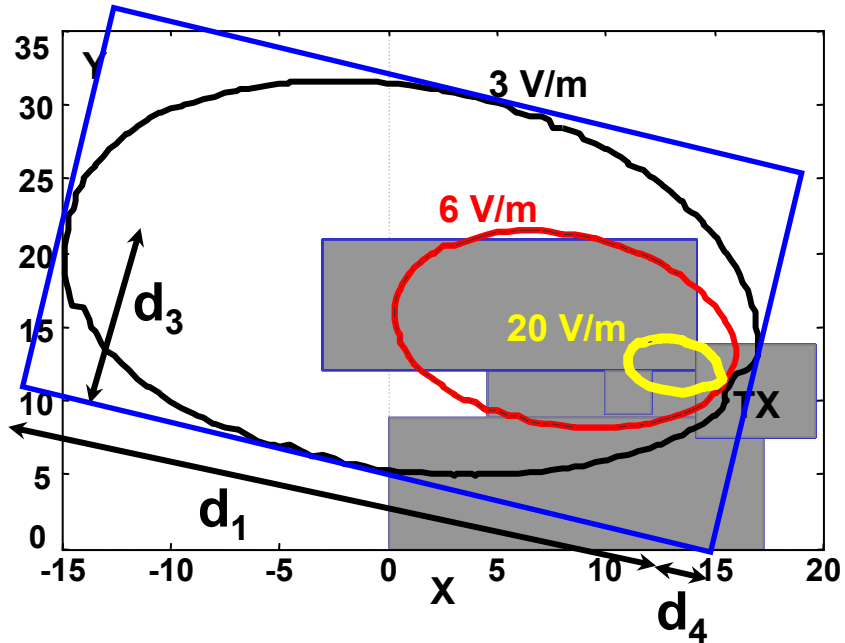
Installazione in area urbana macrocellulare, multiantenna: livelli di campo e volume di rispetto



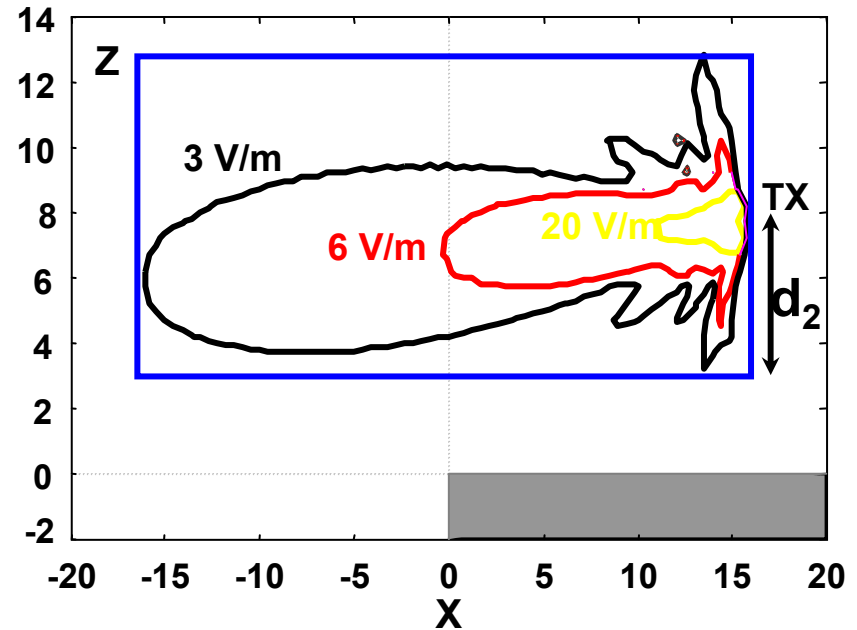
Quando l'installazione è complessa (più trasmettitori) il volume di rispetto, come precedentemente definito, perde di validità: necessità di definire un nuovo volume di rispetto.

Analisi dei livelli di campo

Piano orizzontale



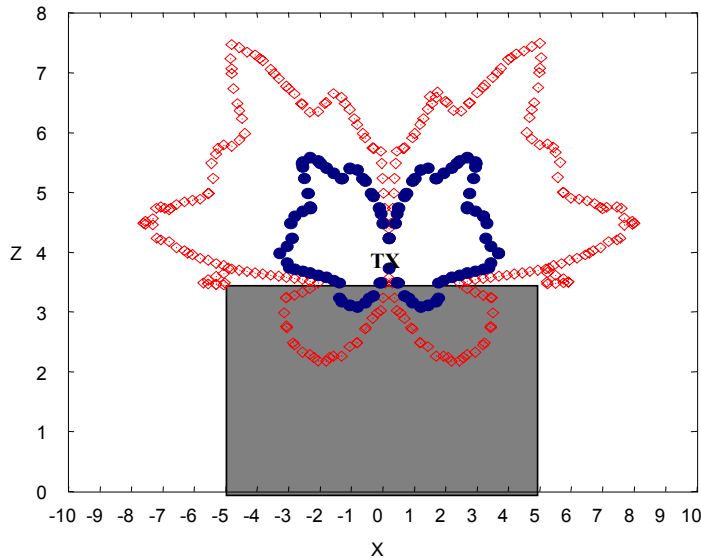
Piano vericale



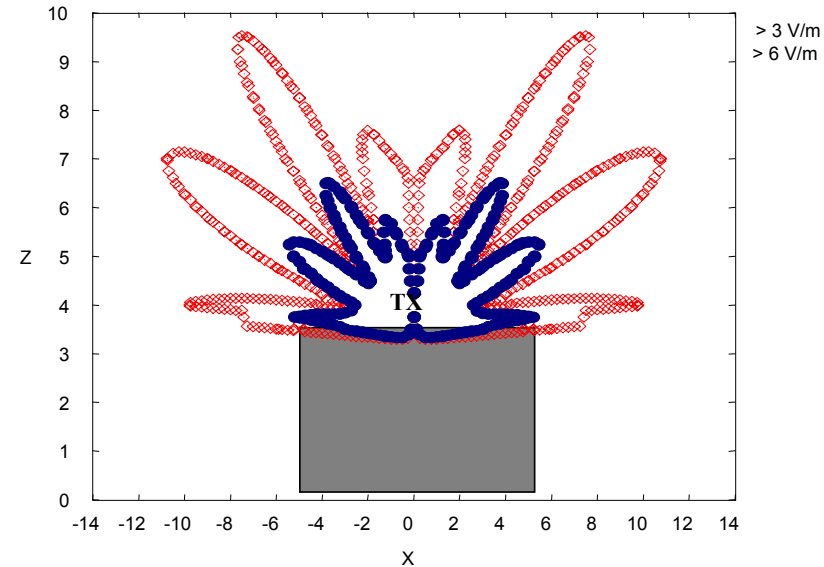
Il volume di rispetto, come definito, sovrastima l'area effettiva in cui i limiti vengono superati

Esempio

Antenna installata su edicola: i materiali



Edicola in cemento

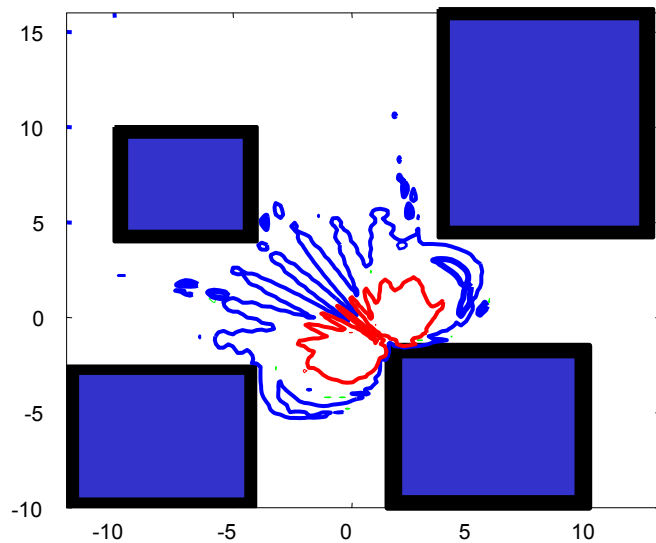


Edicola in metallo

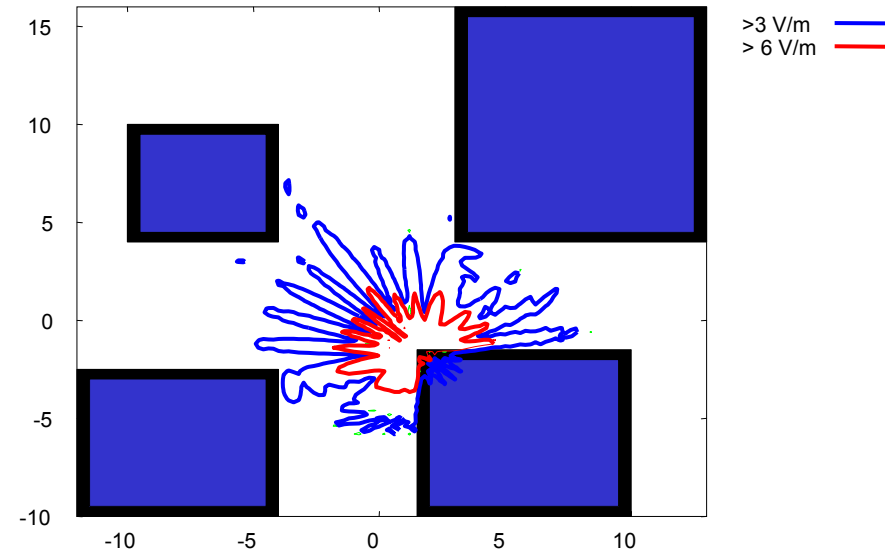
- ✦ L'antenna è posta sopra il tetto dell'edicola
- ✦ L'altezza dell'installazione varia tra 3.7 e 4.5 metri dal suolo
- ✦ La potenza massima attribuibile al trasmettitore, in corrispondenza di 3.7 metri, è 4.4 Watt

Esempio

Antenna installata a parete: il tipo di antenna



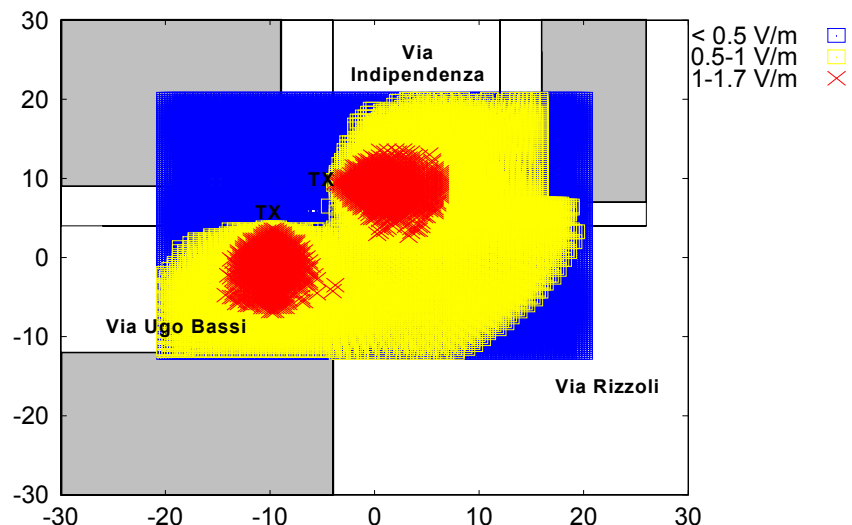
Antenna Etel



Antenna omnidirezionale

- Scopo dell'impianto è coprire tutte le strade che formano l'incrocio
- Altezza dei trasmettitori compresa tra 4 e 4.5 metri
- Potenza compresa tra 0.8 e 2 Watt

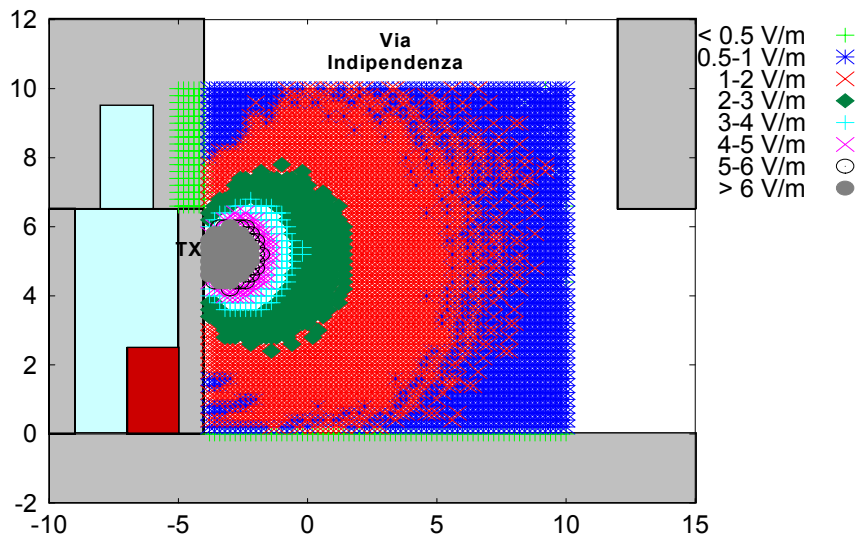
Installazione in area urbana multicellulare, due antenne: simulazioni dei livelli di campo



Piano orizzontale a 1.70 d'altezza

Il valore massimo del campo è inferiore a 1.7 V/m

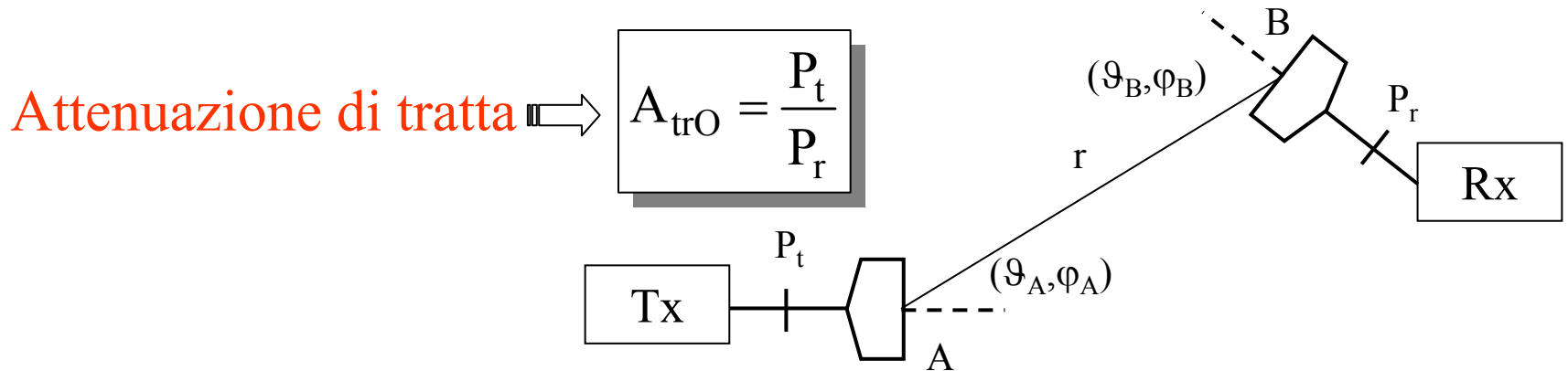
Piano verticale passante per il centro elettrico dell'antenna



I valori di campo più elevati (> 6 V/m) si trovano ad un'altezza dal suolo superiore a 4 metri

Le zone accessibili alla popolazione presentano valori di campo inferiori ai limiti

Formula di trasmissione in Spazio Libero (I)



- ❑ Antenne in spazio libero e a grande distanza
 - $\Rightarrow$ sorgente puntiforme
 - $\Rightarrow$ onda piana incidente
- ❑ Massimo trasferimento di potenza
 - $\Rightarrow$ Adattamento di polarizzazione
 - $\Rightarrow$ Adattamento di impedenza fra antenna ricevente e carico (RX)
 - $\Rightarrow$ Effetti atmosferici trascurati
 - $\Rightarrow$ etc.

Formula di trasmissione in Spazio Libero (II): Equazione di Frijs

□ Chiamando

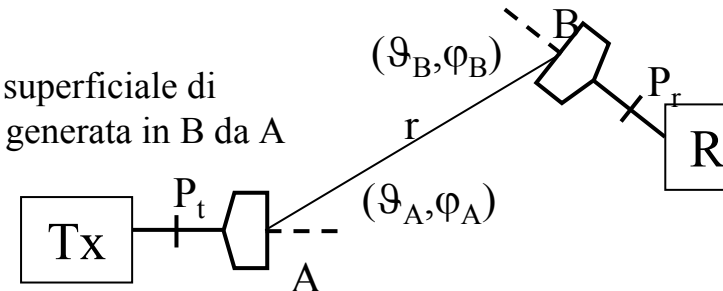
- ⇒ P_{TA} , $G_A(\vartheta, \varphi)$ la potenza trasmessa e il guadagno dell'antenna trasmittente,
- ⇒ P_{RB} , $A_{EB}(\vartheta, \varphi)$ la potenza ricevuta e l'area efficace dell'antenna ricevente,

ed osservando che

$$p_B = \frac{P_{tA}}{4\pi r^2} G_A(\vartheta_A, \varphi_A)$$

$$P_{rB} = p_B A_{eB}(\vartheta_B, \varphi_B)$$

Densità superficiale di
potenza generata in B da A



si ottiene l'equazione di **propagazione in spazio libero**, nota anche con il nome di equazione di Frijs:

$$P_{rB} = \frac{P_{tA}}{4\pi r^2} G_A(\vartheta_A, \varphi_A) A_{eB}(\vartheta_B, \varphi_B)$$

Formula di trasmissione in Spazio Libero (III): Attenuazione di tratta

- Ricordando il legame tra guadagno e area efficace si ottengono le tre equivalenti espressioni

$$\begin{aligned} A_{\text{trO}} &= \frac{P_{\text{TA}}}{P_{\text{RB}}} = \frac{4\pi r^2}{G_A(\vartheta_A, \varphi_A) A_{\text{eB}}(\vartheta_B, \varphi_B)} \\ A_{\text{trO}} &= \frac{P_{\text{TA}}}{P_{\text{RB}}} = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2 \frac{1}{G_A(\vartheta_A, \varphi_A) G_B(\vartheta_B, \varphi_B)} \\ A_{\text{trO}} &= \frac{P_{\text{TA}}}{P_{\text{RB}}} = \left(\frac{rc}{f} \right)^2 \frac{1}{A_{\text{eA}}(\vartheta_A, \varphi_A) A_{\text{eB}}(\vartheta_B, \varphi_B)} \end{aligned}$$

che esprimono l'**attenuazione di tratta** in funzione della distanza, della frequenza utilizzata per la trasmissione, dei guadagni e/o delle aree efficaci delle antenne riceventi e trasmettenti.

Formula di trasmissione in Spazio Libero (IV): Attenuazione isotropica

- Nel caso di antenne isotrope $G_A = G_B = 1$, per qualsiasi direzione e dunque l'attenuazione di tratta diviene (dalla seconda delle precedenti)

$$A_{trO} = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2 \frac{1}{G_A(\vartheta_A, \varphi_A) G_B(\vartheta_B, \varphi_B)} = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2$$

=1

che prende il nome di **Attenuazione Isotropica** di tratta (A_{IO}):

$$A_{IO} = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2$$

Formula di trasmissione in Spazio Libero (V): Attenuazione di tratta in decibel

- Una utile formulazione dell'attenuazione di tratta è quella in decibel

$$A_{\text{trO}}(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2 + 10 \log_{10} f^2 + 10 \log_{10} r^2 - G_A(\vartheta_A, \varphi_A)(dB) - G_B(\vartheta_B, \varphi_B)(dB)$$

spesso si trova riportata la seguente espressione (derivabile direttamente dalla precedente)

$$A_{\text{trO}}(dB) = 32.4(db) + 20 \log_{10} \underbrace{f[MHz]}_{\text{in MHz}} + 20 \log_{10} \underbrace{r[km]}_{\text{in km}} - G_A(\vartheta_A, \varphi_A)(dB) - G_B(\vartheta_B, \varphi_B)(dB)$$

chiaramente anche per le rimanenti due formulazioni dell'attenuazione di tratta è possibile ricavare analoghe espressioni in decibel.

Formula di trasmissione in Spazio Libero (VI): Reciprocità

- Il teorema di reciprocità permette di affermare che l'attenuazione di tratta che si ha alimentando l'antenna A e considerando l'antenna B come ricevente è la stessa che si avrebbe alimentando l'antenna B e considerando l'antenna A come ricevente

cioè

$$\begin{aligned} A_{\text{trO}} &= \frac{P_{\text{tA}}}{P_{\text{rB}}} = \frac{4\pi r^2}{G_A(\vartheta_A, \varphi_A) A_{\text{eB}}(\vartheta_B, \varphi_B)} \\ &= \frac{P_{\text{tB}}}{P_{\text{rA}}} = \frac{4\pi r^2}{G_B(\vartheta_B, \varphi_B) A_{\text{eA}}(\vartheta_A, \varphi_A)} \end{aligned}$$

- da cui segue che per una data antenna il rapporto fra i valori del Guadagno e dell'Area Efficace, valutati per lo stesso orientamento, è costante

$$\frac{G_A(\vartheta_A, \varphi_A)}{A_{\text{eA}}(\vartheta_A, \varphi_A)} = \frac{G_B(\vartheta_B, \varphi_B)}{A_{\text{eB}}(\vartheta_B, \varphi_B)} = \frac{4\pi}{\lambda^2}$$

Formula di trasmissione in Spazio Libero (VII): alcune utili riformulazioni dell'equazione di Frijs

$$P_r = \frac{P_T}{4\pi r^2} G_T(\vartheta_A, \varphi_A) A_{eR}(\vartheta_B, \varphi_B)$$

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

$$P_r = \left(\frac{c}{4\pi rf} \right)^2 P_T G_T(\vartheta_A, \varphi_A) G_R(\vartheta_B, \varphi_B)$$

$$G(\vartheta, \varphi) = f^2(\vartheta, \varphi) G(\vartheta_M, \varphi_M)$$

$$P_r = \left(\frac{c}{4\pi rf} \right)^2 P_T G_T G_R f_T(\vartheta_A, \varphi_A) f_R(\vartheta_B, \varphi_B)$$

$$\text{EIRP} = P_T G_T$$

$$P_r = \left(\frac{c}{4\pi rf} \right)^2 \text{EIRP} G_R f_T(\vartheta_A, \varphi_A) f_R(\vartheta_B, \varphi_B)$$

Antenne orientate
nelle rispettive
direzioni di massimo

$$P_r = \frac{P_T G_T}{4\pi r^2} A_{eR}$$

$$P_r = \left(\frac{c}{4\pi rf} \right)^2 P_T G_T G_R$$

$$\begin{aligned} (\vartheta_A, \varphi_A) &= (\vartheta_{MT}, \varphi_{MT}) \\ (\vartheta_B, \varphi_B) &= (\vartheta_{MR}, \varphi_{MR}) \end{aligned}$$

$$P_r = \frac{\text{EIRP}}{4\pi r^2} A_{eR}$$

$$P_r = \left(\frac{c}{4\pi rf} \right)^2 \text{EIRP} G_R$$

Esercizio

- ❑ In un collegamento radio alla frequenza di 900 MHz, la potenza del trasmettitore è di 10 Watt, il guadagno dell'antenna trasmittente è di 5 dB e quello dell'antenna ricevente di 3 dB. Si calcoli:
 - ⇒ EIRP dell'antenna trasmittente sia in Watt che in dBWatt
 - ⇒ L'attenuazione a 1 Km e a 3 Km di distanza
 - ⇒ La potenza ricevuta alle distanze di 1 Km e 3 Km

Il rumore nei sistemi di TLC (1):

- ❑ In ricezione, oltre al segnale desiderato (**segnale utile**) proveniente dal trasmettitore ($\Rightarrow$ attenuato), sono presenti segnali di varia natura, indipendenti dal segnale utile, ed indesiderati (**disturbi**) :
 - $\Rightarrow$ di provenienza legata al sistema:
 - Rumore Termico
 - Rumore di fluttuazione
 - Rumore di scintillazione
 - Rumore di ripartizione
 - ...
 - $\Rightarrow$ di provenienza indipendente dal sistema
 - Interferenze
 - Disturbi Atmosferici
 - Disturbi Artificiali
 - ...

Il rumore nei sistemi di TLC (2): il rumore termico

- ❑ Il rumore termico è il principale disturbo nei sistemi di TLC. Il rumore termico è dovuto al movimento, per eccitazione termica, dei portatori di carica all'interno di un conduttore.
- ❑ Ai capi di un resistore di resistenza R posto alla temperatura T [K] si osserva una F.E.M. la cui densità spettrale di potenza disponibile al carico è, per un ampio intervallo di frequenze,

$$N(f) = kT = N_0 \quad [\text{watt/Hz}]$$

Costante di Boltzman
 $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ [joule/K]

Essendo la densità spettrale di potenza indipendente da f , il rumore termico viene detto **rumore bianco**.

- ❑ La potenza disponibile al carico in una banda B [Hz] è

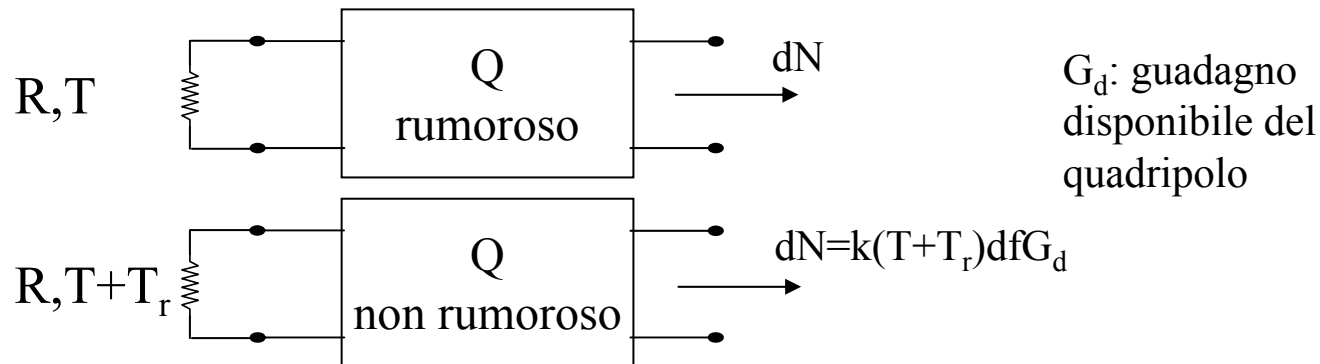
$$N = kTB = N_0 B \quad [\text{watt}]$$

Il rumore di un resistore è dunque caratterizzato dalla temperatura fisica del resistore stesso.

Il rumore nei sistemi di TLC (3): il rumore nei quadripoli

- Il rumore introdotto da un quadripolo può essere caratterizzato con riferimento a quello che verrebbe emesso da un resistore posto ad una certa temperatura fisica T_r [K].

Si considerino i due sistemi di figura



all'uscita di entrambi si misura una potenza pari a dN , ma nel secondo caso il quadripolo è non rumoroso. La sua rumorosità è stata infatti trasferita a monte ed associata al resistore R .

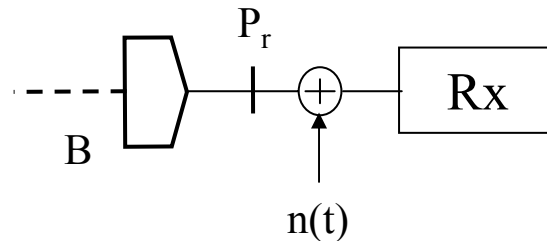
- La temperatura $T + T_r$ non l'effettiva temperatura di R , bensì è la temperatura a cui dovrebbe trovarsi affinché all'uscita del quadripolo non rumoroso si misurasse la potenza disponibile che si ha all'uscita del sistema reale.
- T_r prende il nome di **Temperatura Equivalente di rumore** del quadripolo

Il rumore nei sistemi di TLC (4): il rumore di antenna

- ❑ Una sorgente di segnale (come può essere considerata un'antenna) introduce rumore.
- ❑ La rumorosità dell'antenna viene caratterizzata dalla **temperatura di rumore equivalente di antenna** T_a . In altri termini si descrive il rumore introdotto dalla sorgente come un rumore termico generato da una resistenza esterna posta alla temperatura T_a e si considera la sorgente non rumorosa.

Il rumore nei sistemi di TLC (5): conclusioni

- Il rumore termico che si sovrappone al segnale è dovuto a due termini:
 - ⇒ rumore del ricevitore: riportato a monte del ricevitore e modellato come il rumore generato da un resistore posto alla temperatura equivalente di rumore T_r .
 - ⇒ Rumore dell'antenna: riportato a valle dell'antenna e modellato come il rumore generato da un resistore posto alla temperatura equivalente di antenna T_a .



$$N_0 = k(T_r + T_a) \quad [\text{watt/Hz}]$$

Bilancio di collegamento (1):

- ❑ Il bilancio di collegamento consiste nell'analizzare il collegamento e determinare i parametri del sistema (potenza trasmessa, antenne, lunghezza del collegamento, rumorosità massima degli apparati, etc) al fine di soddisfare le specifiche di qualità imposte, o di verificare che siano soddisfatte.
- ❑ La qualità di un collegamento di TLC è generalmente determinata dal rapporto tra la potenza del segnale ricevuto e la potenza del rumore termico che cade nella banda del segnale (**SNR**, Signal to Noise Ratio)

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{\text{Potenza del segnale utile}}{\text{Potenza del rumore}}$$

Bilancio di collegamento (2)

- Per il bilancio di collegamento è possibile considerare come potenza del segnale utile la potenza media della portante:

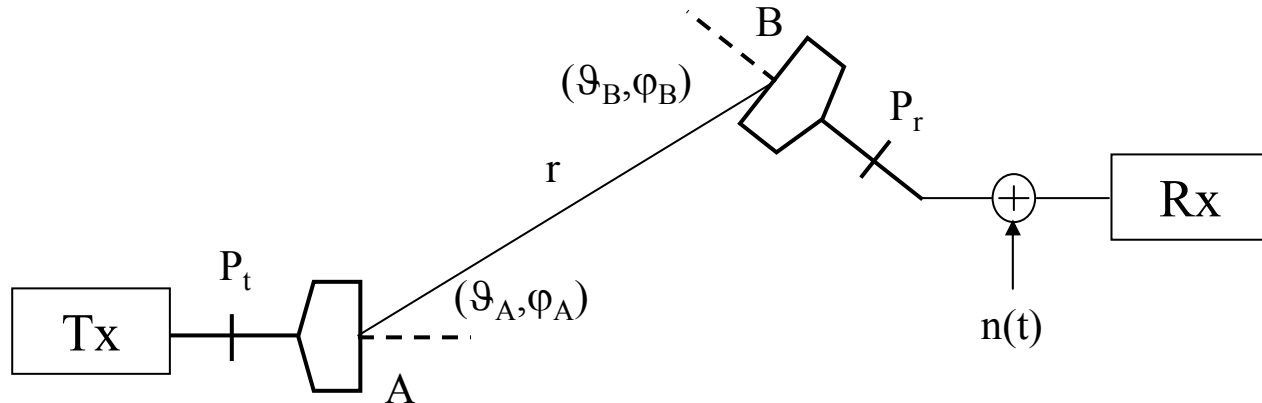
$$SNR = \frac{P_r}{N}$$

- nel caso di propagazione in spazio libero si ottiene quindi

$$SNR = \frac{P_r}{N} = \frac{P_t}{\underbrace{A_{tr}}_{P_r}} \frac{1}{\underbrace{K T_s B}_{1/N}}$$

Bilancio di collegamento (3)

- Ricordando che il collegamento può essere schematizzato come



dove $n(t)$ rappresenta il rumore termico, e sostituendo una delle formulazioni dell'equazione di propagazione in spazio libero, si ottiene

$$SNR = \frac{1}{k(T_r + T_a)B} \left(\frac{c}{4\pi r f} \right)^2 P_T G_T G_R f_T(\vartheta_A, \varphi_A) f_R(\vartheta_B, \varphi_B)$$

Naturalmente, quale formulazione utilizzare dipenderà dal problema in analisi. A seconda dell'obiettivo si dovrà utilizzare la relazione utilizzare la relazione tra i parametri più opportuna.