

**Ipotesi di Trasmissione con
la Parabola VLBI di
Medicina:
Esposizione al Campo Elettrico
nelle vicinanze**

Claudio Bortolotti, Sergio Mariotti, Mauro Roma

Rapporto Interno IRA 323 / 2002

Revisori: prof. G. Grueff, dott. G. Tomassetti

IPOTESI DI TRASMISSIONE CON LA PARABOLA VLBI DI MEDICINA: ESPOSIZIONE AL CAMPO ELETTRICO NELLE VICINANZE	1
1. GENERALITÀ	3
1.1. PREMESSA	3
1.2. OBIETTIVO	3
1.3. LISTA SIMBOLI, ACRONIMI E DEFINIZIONI.....	3
2. MISURE SPERIMENTALI.....	4
2.1. DESCRIZIONE DEL METODO.....	4
2.1.1. Link TX - RX.....	4
2.1.2. Trasmissione	4
2.1.3. Ricezione	5
2.1.4. Raccolta e trattamento dati.....	6
2.1.5. Unità di misura.....	7
2.2. MISURE A 1.3 GHZ.....	8
2.3. MISURE A 5 GHZ.....	11
3. MODELLO DI DISTRIBUZIONE DEL CAMPO EM	15
3.1. DESCRIZIONE	15
3.2. RICHIAMI DELLE RELAZIONI PRINCIPALI DELLE ANTENNE	15
3.3. CALCOLO DELLA POTENZA RICEVUTA	16
3.4. DISTRIBUZIONE DI POTENZA SULLO SPECCHIO PRIMARIO	17
3.5. ALTRE FONTI DI SEGNALE (SPILL-OVER)	19
3.6. PREVISIONI DI CAMPO ELETTRICO, TX DA CASSGRAIN.....	21
3.7. PREVISIONI DI CAMPO ELETTRICO, TX DA FUOCO PRIMARIO	23
4. CONCLUSIONI.....	24
4.1. CONVERGENZA.....	24
4.2. POTENZA TRASMISSIBILE	24
5. BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI	26

1. Generalità

1.1. Premessa

Alcuni progetti scientifici potrebbero richiedere l'utilizzo delle antenne Radioastronomiche per trasmettere segnali. Generalmente le applicazioni radar astronomiche, o di tracking richiedono l'impiego di potenze elevate.

In questa ottica si rende necessario determinare l'Intensità del Campo Elettrico nelle zone prossime all'antenna trasmittente e che possono essere frequentate da persone, per verificare che tali livelli siano inferiori ai limiti consentiti dalla legge.

1.2. Obiettivo

Lo scopo del presente lavoro sarà quello di determinare quali zone, vicine all'antenna, sono più esposte al campo elettromagnetico e quindi al campo elettrico. Di seguito si determinerà il livello del Campo Elettrico in base alla potenza trasmessa. Gli strumenti e le metodologie utilizzate saranno sia le misure sperimentale sia il calcolo; è bene notare che uno degli strumenti utilizzati, in particolare l'antenna-sensore sarà direttiva quindi sensibile alla direzione e verso del Campo, mentre gli Organi preposti utilizzano solitamente sensori isotropici.

Si mostrerà la convergenza fra i livelli di potenza rilevati sperimentalmente e quelli calcolati. Si potrà pertanto estrapolare il livello di Campo Elettrico in funzione della frequenza, della distanza e dell'orientamento del paraboloide 32 m.

Le misure condotte ed i calcoli effettuati si riferiranno alla presenza di un solo segnale CW trasmesso e ricevuto in luogo aperto.

1.3. Lista Simboli, Acronimi e Definizioni.

A_{eq}	Area equivalente dell'antenna
A_{geom}	Area geometrica dell'antenna
G	Guadagno
G_{da}	Guadagno in dB dell'antenna
G_{TX}	Guadagno in numeri dell'antenna trasmittente
$P_{d\ conn}$	potenza in dBm al connettore d'antenna
$P_{W\ conn}$	Potenza in Watt al connettore d'antenna
P_{TX}	Potenza in Watt trasmessa dall'antenna
D_F	Densità di potenza in <i>Far Field</i>
D_N	Densità di potenza in <i>Near Field</i>
D_{VN}	Densità di potenza in <i>Very Near Field</i>
η	Efficienza d'antenna
AZ	Azimuth (movimento angolare orrizzontale)
EL	Elevazione (movimento angolare verticale)
CW	Continuos wave , segnale monocromatico
TX	Trasmissione
RX	Ricezione

2. Misure sperimentali

2.1. Descrizione del metodo

2.1.1. Link TX - RX

Al fine di determinare l'intensità del campo elettromagnetico, quindi del campo elettrico nelle vicinanze del paraboloide 32m. è stato trasmesso un segnale dal fuoco Cassegrain e ricevuto alla distanza di alcune decine di metri dove ragionevolmente si può trovare una persona.

La trasmissione è stata effettuata utilizzando il Paraboloide 32m. , illuminando da fuoco Cassegrain con un classico horn corrugato.

La ricezione è stata effettuata con l'ausilio del Furgone per la Ricerca delle Interferenze e delle attrezzature in esso contenute.

La campagna di misura è stata organizzata in maniera tale da contemplare i diversi parametri di seguito elencati in modo da poterne poi studiare gli effetti al loro variare.

PARAMETRO	VALORI	
Frequenza	1.3 GHz	5 GHz
Distanza	15 metri	30 metri
Altezza del Sensore	2 metri (altezza uomo)	11 metri (in pieno beam)
Scansione in Elevazione	1 ... 90	
Scansione in Azimuth	-180 ... +180	

In particolare, variare il parametro "frequenza" ha richiesto il maggior tempo-uomo , in pratica il lavoro è stato svolto in due sessioni, la prima alla frequenza 1.3 GHz, la seconda alla frequenza 5 GHz, sessioni svolte in due giornate diverse.

2.1.2. Trasmissione

Alla frequenza 1.3 GHz è stato utilizzato l'illuminatore corrugato per banda L con profilo "coseno quadro" (in gergo "trombone"), tale horn è stato modificato per poter operare alla frequenza 1.296 GHz; il Return Loss e l'Isolamento fra le porte si è mostrato maggiore di 22 ÷ 25 dB. L'horn è stato alimentato da un trasmettitore CW, erogante una potenza pari a 15 W misurati con wattmetro di precisione, utilizzato in concomitanza della giornata "Marconiana". Tale trasmettitore è stato gentilmente prestato da IW4BLG Pierluigi Poggi.

Alla frequenza 5 GHz, è stato utilizzato il "Rack Ricevitore 5 GHz", nel quale, commutando gli switch in guida d'onda, si rendono disponibili 2 porte in WR187 per poter trasmettere segnali.

Un generatore di segnali hp83711B ha provveduto a generare 4.995 GHz con potenza +16 dBm.

2.1.3. Ricezione

Le attrezzature in dotazione al Furgone per La Ricerca Delle Interferenze utilizzate nel presente lavoro sono state:

- Antenna a Tromba, $G = 7-8 \text{ dB}_i$
- Cavo coassiale a bassa perdita
- Analizzatore di spettro hp 8564E e hp 8562B
- Amplificatore di segnale (solo nelle misure condotte a 5 GHz)
- Palo telescopico estensibile

L'antenna a tromba è stata montata sulla sommità del palo telescopico.

La quota dal suolo della tromba ricevente era variabile con continuità da circa 2 m (vedi Figura 2.2) a circa 11 m. (vedi Figura 2.3) in funzione dell'estensione del palo telescopico.

L'angolo di puntamento orizzontale è sempre stato indirizzato verso il paraboloide ed in asse con lo stesso (direzione boresight). L'angolo di puntamento verticale è stato regolato a 0° (posizione orizzontale) con palo telescopico totalmente estratto, mentre è stato inclinato verso l'alto di circa 45° con palo telescopico abbassato (vedi Figura 2.1). Le ragioni di tale scelta risiedono nel fatto che si è voluto raccogliere la massima intensità di segnale, pertanto con il palo totalmente estratto, quindi in pieno beam, era necessario puntare l'horn orizzontalmente, per contro con il palo basso (horn ad altezza uomo) è ragionevole pensare che il massimo del segnale si raccoglie puntando il centro del paraboloide.

L'angolo di polarizzazione è stato scelto arbitrariamente ad una posizione "media" fra H e V, ovvero la polarizzazione ricevuta era "Lineare 45° " per tutte le misure eseguite. Tale scelta che può apparire come un eccesso di zelo (in quanto trasmettendo in polarizzazione circolare e ricevendo in polarizzazione lineare, l'angolo di polarizzazione del ricevitore lineare è ininfluente) minimizza eventuali effetti di asimmetria nei lobi E e H dell'horn ricevente riducendo fortemente la probabilità di ricevere segnale proveniente da un lobo secondario di tale horn.



Figura 2.1 Particolare Horn montato 45°



Figura 2.2 Horn a 2 m. di quota montato sul Furgone



Figura 2.3 Horn a 11 m. di quota, nel pieno Beam dell'Antenna Parabolica

2.1.4. Raccolta e trattamento dati

È stata condotta una serie di misure di pattern d'antenna ruotando prima il Paraboloide in Azimuth, da 0° a 360° (con Elevazione = 1°), poi in Elevazione, da 1° a 90° (Azimuth = boresight).

In maniera sincrona con il movimento del Paraboloide, sono stati acquisiti i dati utilizzando un analizzatore di spettro hp 8564E in modalità "Zero Span" e con tempo di scansione orizzontale molto lento (paragonabile ai tempi di movimento del Paraboloide), pari a 50 sec. In tal modo si può immaginare di cambiare il significato della grandezza in l'ascissa del grafico su schermo dalla grandezza [Tempo] alla grandezza [Angoli] e quindi assumere lo scandire della traccia come sincrona con il movimento del Paraboloide.

I dati sono stati plottati on line su carta e per le sole misure svolte a 5 GHz sono stati anche memorizzate digitalmente.

Successivamente i dati in formato digitale sono stati inseriti in MS Excel tramite il programma "Agilent BenchLink" che permette di trasferire le tracce dall'Analizzatore di Spettro al PC.

Le misure sono state condotte a 2 frequenze, 1.3 GHz e 5 GHz ; alle distanze di 15 m. e 30 m. e con l'horn ricevente a 2 altezze, "a terra" ovvero dove una persona potrebbe trovarsi camminando, poi estendendo al massimo il palo telescopico dinanzi al paraboloide, nel pieno del beam.

La seguente tabella riassume i 12 casi presi in esame dalle misure.

1.3 GHz (15 W)		5 GHz (25 mW)	
<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 15 metri • Quota: 2 metri (a terra) • Horn inclinato, punta fuoco Cassegrain • Scansione EL e AZ 	<ul style="list-style-type: none"> • Distanza 30 metri • Non effettuate misure per mancanza di tempo 	<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 15 metri • Quota: 2 metri (a terra) • Horn inclinato, punta fuoco Cassegrain • Scansione EL e AZ 	<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 30 metri • Quota: 2 metri (a terra) • Horn inclinato punta fuoco Cassegrain • Scansione EL e AZ
<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 15 metri • Quota: 11 metri (dentro al beam) • Horn orizzontale, punta specchio parabolico • Scansione solo EL 	<ul style="list-style-type: none"> • Distanza 30 metri • Non effettuate misure per mancanza di tempo 	<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 15 metri • Quota: 11 metri (dentro al beam) • Horn orizzontale, punta specchio parabolico • Scansione solo EL 	<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 30 metri • Quota: 11 metri (dentro al beam) • Horn orizzontale punta specchio parabolico • Scansione solo EL

Tabella 2.1 Prospetto delle misure eseguite

2.1.5. Unità di misura

Generalmente il linguaggio e l'unità di misura che utilizzano gli esperti di radiofrequenza quando si riferiscono ad intensità di segnali è la Potenza, solitamente espressa in dB_m , per contro il mondo del diritto solitamente esprime le grandezze elettromagnetiche in termini di Campo Elettrico.

Benché tali unità di misura di grandezze siano diverse fra loro, la densità di potenza ed il Campo Elettrico sono legate fra loro dalla resistenza di radiazione del mezzo, che per l'aria vale circa 377Ω .

L'equazione dimensionale diventa:

$$\left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right] = \sqrt{\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \cdot 377} \quad \text{Equazione 2.1}$$

Pertanto il valore del modulo del campo elettrico nel quale una antenna di Area efficace A_{eff} è immersa vale:

$$|E| = \sqrt{377 \cdot \frac{P_{\text{W conn}}}{A_{\text{eff}}}} \quad \text{Equazione 2.2}$$

Sostituendo con grandezze espresse nelle unità di misura più utilizzate otteniamo:

$$|E| = \sqrt{10^{\frac{P_{\text{d conn}} - G_{\text{da}}}{10}} \cdot 52.64 \cdot \eta \cdot F_{\text{GHz}}^2} \quad \text{Equazione 2.3}$$

2.2. Misure a 1.3 GHz

Il link alla frequenza 1.3 GHz era costituito da:

TX: Antenna Paraboloida 32 m alimentata da horn corrugato in fuoco Cassegrain.

Il Trasmettitore alimentava l'antenna con un tono "quartzato" alla frequenza 1.296000 MHz, con Potenza Disponibile al connettore del trasmettitore di 15 W (+41.8 dBm).

L'horn utilizzato è stato il grande horn corrugato a profilo "cosine squared" utilizzato in passato per VLBI (in gergo "il trombone") alle frequenze 1.4 e 1.7 GHz ed ora dismesso. I lanciatori ed il corto-circuito mobile dell'horn sono stati modificati per ottenere un buon adattamento d'impedenza ed isolamento in un banda sufficientemente larga centrata alla frequenza 1.296 GHz.

Per ottenere con ragionevole purezza due polarizzazioni circolari, dalla configurazione originale di tale horn, è stato smontato il poco efficiente sfasatore a lamina in PTFE che è stato sostituito con un anello ibrido 90° a bassissima attenuazione, montato esterno ma a ridosso dell'horn stesso.

Le prestazioni complessive di adattamento d'impedenza (Return Loss) ed isolamento fra le polarizzazioni si sono dimostrate molto buone (entrambi fra i 22 e 25 dB).

La cascata di elementi è riassunta nella seguente tabella:

Elementi in cascata TX	Gain	Incertezza rms	Note:
	[dB] [dB _m]	+/- [dB]	
Trasmettitore	+41.8	0.3	
Cavo coassiale 1 m.+ accessori	-0.25	0.1	
Perdite horn	-1.0	0.5	Perdita "occulta" di natura non nota, storicamente presente
Totali	+40.55	0.6 rss^[2]	

Tabella 2.2 TX 1.3 GHz

Per la ricezione si è utilizzato il Furgone per la Ricerca delle Interferenze e la strumentazione in esso contenuta, la cascata di elementi è elencata nella seguente tabella:

Elementi in cascata RX	Gain	Incertezza rms	Note:
	[dB] [dB _i]	+/- [dB]	
Horn Double Ridged 1-18 GHz Azzurro "Spectrum Materials"	+6.9	0.2	R.L. < -15 dB, polarizzazione di montaggio: Lin.45°
Perdita dovuta alla polarizzazione	-3.0	0	Tx= circolare, RX= lineare
Cavo coassiale "Suhner" 10.8 m. (lungo il palo)	-3.8	0.1	
Cavo coassiale "Suchoflex" 1 m. (interno al Furgone)	-0.33	0.1	
Power Splitter Mini Circuit	-3.5	0.2	
Box di preamplificatori del Furgone	0.0	0	Non inserito
Analizzatore di Spettro hp 8562B		1.0	
Totale	-3.73	1.0 rss^[2]	

Tabella 2.3 RX 1.3 GHz

I dati misurati sono stati stampati on-line su plotter. Di seguito sono riportati i valori campionati e riportati in formato elettronico:

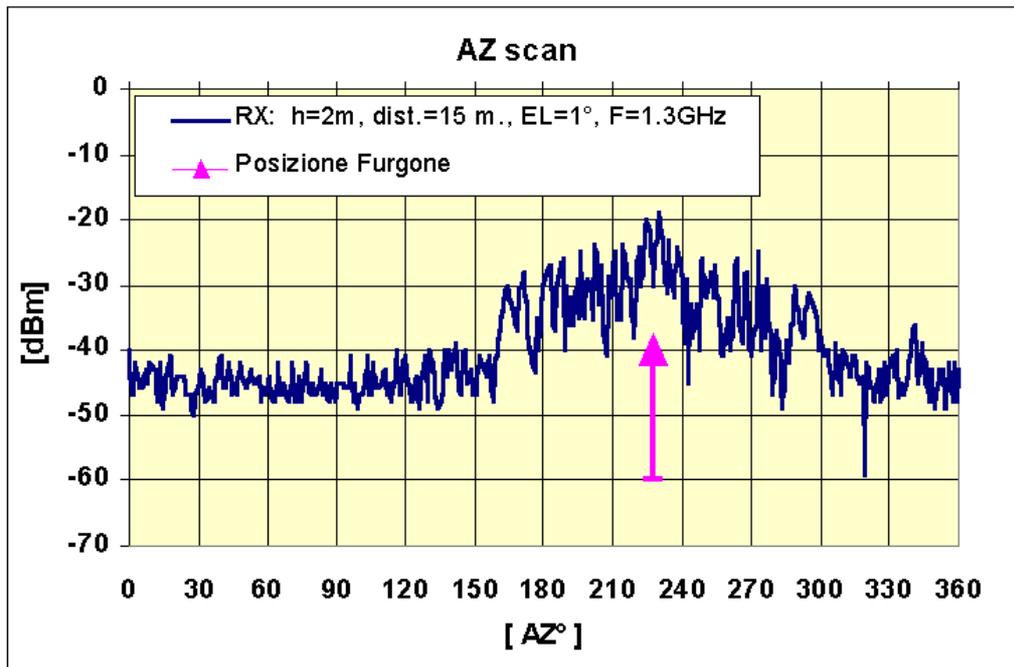


Figura 2.4 1.3 GHz; Potenza ricevuta con scan in Azimuth

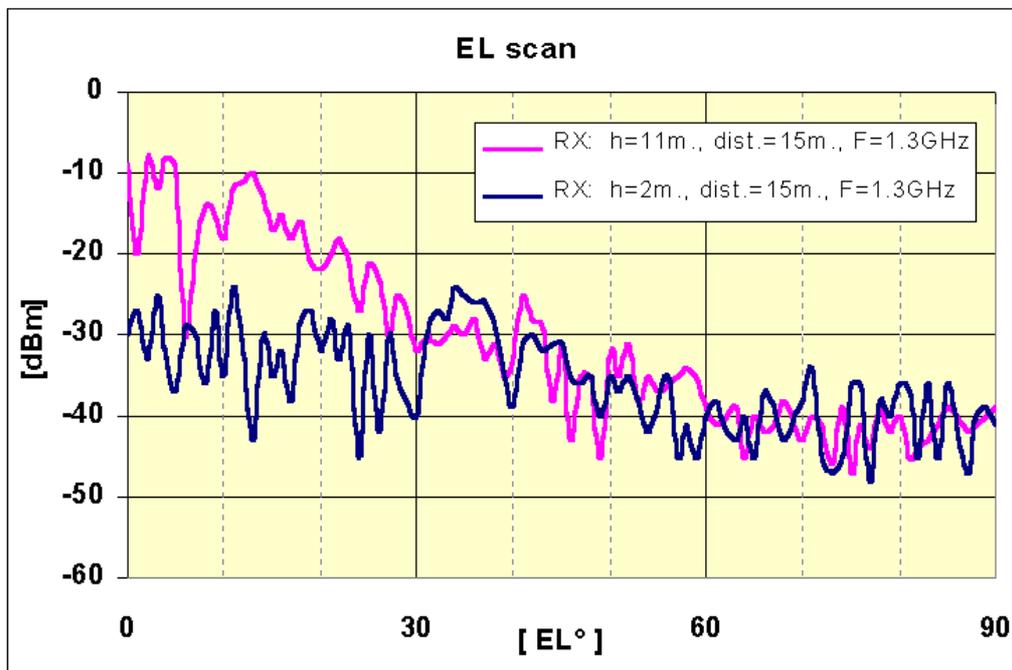


Figura 2.5 1.3 GHz; Potenza ricevuta con scan in Elevazione.

Una veloce analisi a colpo d'occhio mostra che:

- La potenza massima ricevuta con antenna ricevente “bassa” (2m.), letta nel grafico di Figura 2.4 è circa -20 dBm .
- La potenza massima ricevuta con antenna ricevente “bassa” (2m.) letta nel grafico di Figura 2.5 è circa -30 dBm . È evidente che la direzione boresight presenta un “buco” e che la potenza massima ricevuta con horn alla quota di 2 metri è da considerarsi -20 dBm.
- con antenna ricevente “bassa” alla quota di 2 metri, al variare dell’elevazione e/o dell’azimuth, il livello decresce violentemente di circa 10 dB per differenze di angolo maggiore di circa $50^\circ - 60^\circ$. La ragione di ciò risiede probabilmente nel fatto che a tali valori di puntamento lo specchio principale del Paraboloide 32m. “entra in zona d’ombra”, ovvero non è più visibile dall’antenna ricevente (si “vedono” i pannelli dello specchio da dietro).
-
- La potenza massima ricevuta con antenna ricevente “alta” (11m.), letta nel grafico di Figura 2.5 vale circa $- 8.5$ dBm. Essendo il ricevitore in pieno beam, il valore risulta chiaramente più elevato del caso precedente.

In base ai valori di potenza massima ricevuta, conoscendo il guadagno d’antenna e le perdite e/o guadagni della catena, si può risalire al valore del modulo del Campo Elettrico $|E|$ nel quale è immersa l’antenna ricevente.

Per prima cosa è necessario risalire alla potenza disponibile al connettore d’antenna ricevente. Per ottenere tale valore si “percorre a ritroso” la linea del segnale ricevuto; dal misuratore (Analizzatore di spettro) al connettore dell’antenna a tromba. In base alla Tabella 2.3 otteniamo che il guadagno della linea di discesa vale: -10.6 dB

Il segnale presente al connettore d’antenna ricevente sarà pertanto il valore letto sui grafici di Figura 2.4 e Figura 2.5 aumentati di 10.6 dB . Applicando poi la Equazione 2.3 otteniamo i valori di Campo Elettrico generato trasmettendo un segnale monocromatico di potenza anodica pari a 15 W con frequenza 1.3 GHz, puntando il Paraboloide all’orizzonte, alla distanza di circa 15 metri.

I valori misurati sono riportati nella seguente tabella.

Campo Elettrico E	
Freq. 1.3GHz, Potenza trasmessa: +40.5 dBm	
Quota 2m. (ad altezza uomo)	1.63 [V/m]
Quota 11m. (in pieno beam)	5.77 [V/m]
Incertezza di misura	+/-1.2 dB, cioè +/- 14 %

Tabella 2.4 Campo Elettrico massimo (cioè di picco) misurato alla frequenza 1.3 GHz

Il calcolo delle incertezze è stato effettuato con il programma `Uncertainty calculator.exe` ^[5]

2.3. Misure a 5 GHz

Il link era costituito da una sezione trasmittente situata nella Vertex Room e composta dagli elementi elencati nella seguente tabella.

Elementi in cascata TX	Gain	Incertezza rms	Note:
	[dB] [dB _m]	+/- [dB]	
Generatore hp 83711B	+16.0	0.2	
Cavo coassiale 1 m.+ accessori	-1.8	0.1	
Perdite horn	-0.3	0.2	Perdita di spill-over,
Totali	+13.9	0.3 rss^[2]	

Tabella 2.5 Trasmissione alla frequenza 5 GHz

L'horn utilizzato era lo stesso del ricevitore per radioastronomia. Le porte in guida d'onda sono state rese disponibili commutando gli appositi switch in guida d'onda.

Per la ricezione si è utilizzato il Furgone per la Ricerca delle Interferenze e la strumentazione in esso contenuta, la cascata di elementi è elencata nella seguente tabella:

Elementi in cascata RX	Gain	Incertezza rms	Note:
	[dB] [dB _i]	+/- [dB]	
Horn Double Ridged 1-18 GHz Azzurro "Spectrum Materials"	8.0	0.2	R.L. < -15 dB, polarizzazione di montaggio: Lin.45°
Perdita dovuta alla polarizzazione	-3.0	0	Tx= circolare, RX= lineare
Cavo coassiale a "Suhner" 10.8 m. (lungo il palo)	-8.3	0.1	
Cavo coassiale "Suchoflex" 1 m. (interno al Furgone)	-0.67	0.1	
Power Splitter Mini Circuit	0.0	0.0	Non inserito
Box di preamplificatori del Furgone+cavo proprio	+33.8	0.2	
Analizzatore di Spettro hp 8564E		0.5	
Totale	+29.8	0.6 rss^[2]	

Tabella 2.6 Ricezione alla frequenza 5 GHz

I dati misurati sono stati sia stampati on-line su plotter sia salvati in files in formato numerico. Di seguito sono riportati i grafici grezzi dei files.

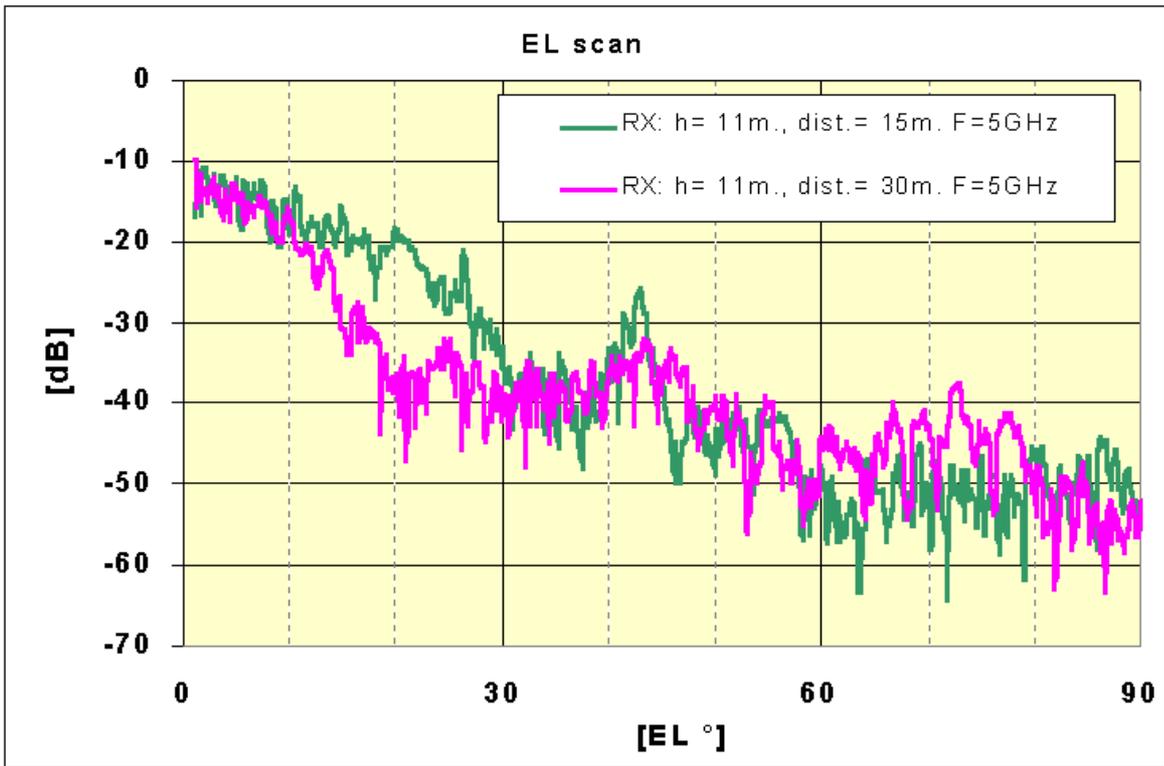


Figura 2.6 5GHz: Potenza ricevuta con scan in EL, h=11m, dist=15 e 30 m.

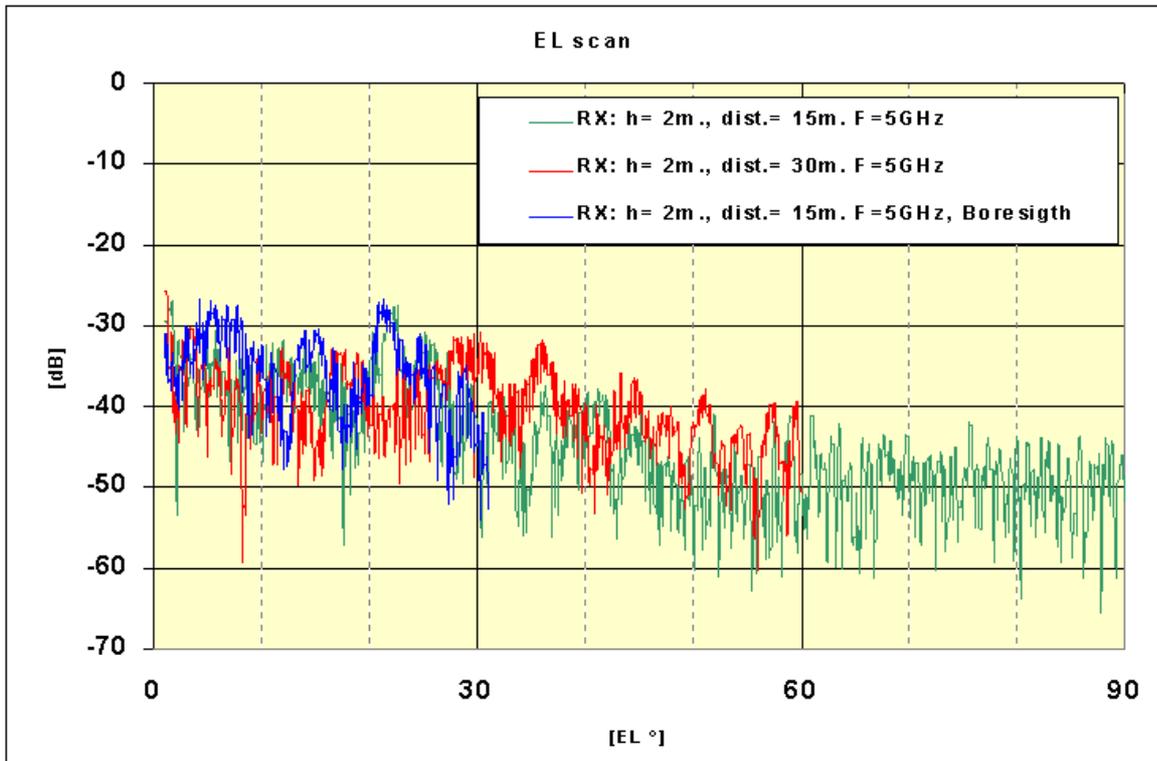


Figura 2.7 5GHz: Potenza ricevuta con scan in EL, h=2m, dist=15 e 30 m.

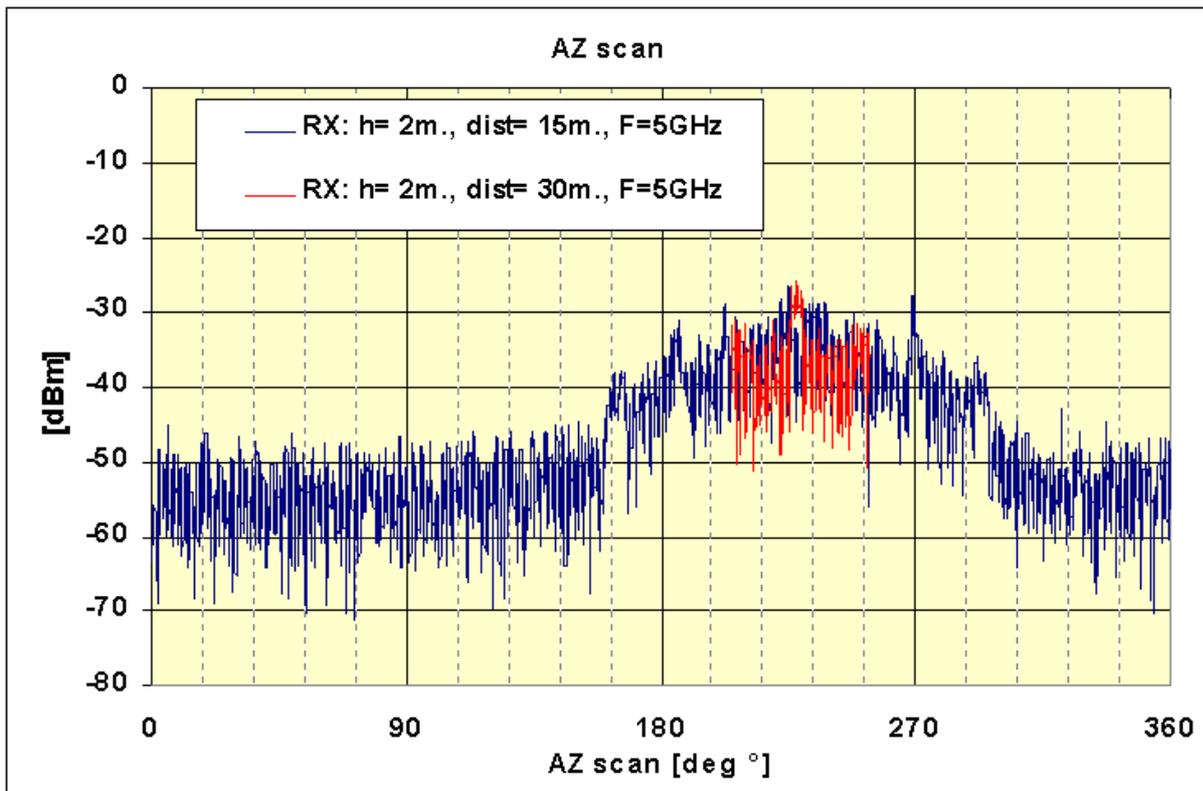


Figura 2.8 5GHz: Potenza ricevuta con scan in AZ, h=2m, dist=15 e 30 m.

Una veloce analisi a colpo d’occhio mostra che:

- Non si nota una sensibile differenza nei valori di potenza ricevuta al variare della distanza (15m. o 30m.)
- La massima potenza ricevuta alla quota h=11m., letta nel grafico di Figura 2.6 vale circa -10 dBm .
- La massima potenza ricevuta alla quota h=2m., letta nel grafico di Figura 2.7 e Figura 2.8 vale circa -27 dBm .
- Così come per il caso 1.3GHz, si nota che le curve di potenza di AZ e di EL decrescono rapidamente in corrispondenza dell’inizio della “zona d’ombra”, tale effetto è chiaramente visibile nei grafici di Figura 2.6 e Figura 2.8 .

In base ai valori di potenza massima ricevuta, conoscendo il guadagno d’antenna e le perdite e/o guadagni della catena, si può risalire al valore del modulo del Campo Elettrico |E| nel quale è immersa l’antenna ricevente.

Per prima cosa è necessario risalire alla potenza disponibile al connettore d’antenna ricevente. Per ottenere tale valore si “percorre a ritroso” la linea del segnale ricevuto; dal misuratore (Analizzatore di spettro) al connettore dell’antenna a tromba. In base alla Tabella 2.6 otteniamo che il guadagno della linea di discesa vale: +21.8 dB

Il segnale presente al connettore d’antenna ricevente sarà pertanto il valore letto sui grafici di Figura 2.6, Figura 2.7, e Figura 2.8 diminuiti di 21.8 dB . Applicando poi la Equazione 2.3 otteniamo i valori di Campo Elettrico generato trasmettendo un segnale monocromatico di potenza pari a +13.9 dBm con frequenza 4.995 GHz, puntando il Paraboloide all’orizzonte, alla distanza di circa 15 metri.

I valori misurati sono riportati nella seguente tabella.

Campo Elettrico E 		
Freq. 4.995GHz, Potenza trasmessa: +13.9 dBm		
	Distanza 15 m.	Distanza 30 m.
Quota 2m. (ad altezza uomo)	0.054 [V/m]	0.061 [V/m]
Quota 11m. (in pieno beam)	0.34 [V/m]	0.38 [V/m]
Incertezza di misura	+/-0.63 dB cioè +/- 8 %	

Tabella 2.7 Campo Elettrico massimo (cioè di picco) misurato alla frequenza 5 GHz

Il calcolo delle incertezze è stato effettuato con il programma `Uncertainty calculator.exe` ^[5]

3. Modello di distribuzione del Campo EM

3.1. Descrizione

Per poter prevedere il livello di Campo Elettrico presente ad una distanza “R” prossima al Paraboloide 32m. trasmittente, è necessario creare un modello ad hoc che tenga in conto ed integri fra loro varie leggi elettromagnetiche, in particolare la distribuzione di Densità di Potenza: in *Far Field* (legge di Friis) ed in *Near Field*,

3.2. Richiami delle relazioni principali delle Antenne

La relazione che lega la Densità di Potenza al Campo Elettrico è la legge di Ohm. Riportiamo di seguito la Equazione 3.1 che lega dimensionalmente il Campo Elettrico e la Densità di Potenza.

$$\left[\frac{V}{m} \right] = \sqrt{\left[\frac{W}{m^2} \right] \cdot 377} \quad \text{Equazione 3.1}$$

La densità di Potenza è legata alla Potenza disponibile ricevuta da:

$$\left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{P_{\text{ric}}}{A_{\text{eq}}} \quad \text{Equazione 3.2}$$

L'Area equivalente vale:

$$A_{\text{eq}} = \frac{G \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi \cdot \eta} \quad \text{Equazione 3.3}$$

Una stima, sufficientemente precisa, della larghezza del Beam è:

$$\text{HPBW} = \frac{55.95 + 1.0524 \cdot |\text{Taper}_{\text{dB}}| \cdot \lambda}{\Phi_{\text{eq.}}} \quad \text{Equazione 3.4}$$

Il Diametro equivalente $\Phi_{\text{eq.}}$ è riferito ad un cerchio di area pari a $A_{\text{eq.}}$, pertanto si può scrivere:

$$\Phi_{\text{eq.}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\text{eq.}}}{\pi}} \quad \text{Equazione 3.5}$$

3.3. Calcolo della potenza ricevuta

- La ben nota legge di Friis ^[1] è applicabile solo nella regione di *Far Field*. A distanze molto inferiori al limite *Far Field*, tale relazione fornisce addirittura valori di Potenza ricevuta superiori a quella trasmessa.
- Per distanze comprese nella regione *Near Field*, è necessario ricordare che la radiazione si propaga confinata in una sorta di “cilindro” nel cui diametro, pari al Diametro dell’Antenna stessa, rimane contenuta la quasi totalità della radiazione. Tale diametro rimane pressoché costante dall’Antenna fino al limite del *Near Field*.
- C’è poi una zona, estremamente vicina all’antenna, che comprende tutte le direzioni, nella quale si è continuamente immersi in una ulteriore quantità di Campo Elettrico. Tale zona che modelliamo sferica, viene comunemente chiamata in gergo “lobi secondari didietro”.

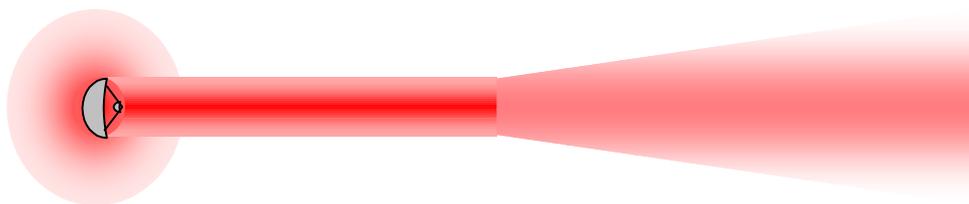


Figura 3.1 Distribuzione del $|E|$ intorno all’antenna trasmittente

Nella regione *Far Field* la densità di Potenza ricevuta vale:

$$D_F = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad \text{Equazione 3.6}$$

All’interno del cilindro, nel *Near Field*, la densità di potenza media vale^[6]:

$$D_N = \frac{P_{TX}}{A_{eq.}} \quad \text{Equazione 3.7}$$

Nella regione estremamente vicina alla bocca radiante (*Very Near Field*), la densità di potenza media vale^[6]:

$$D_{VN} = \frac{P_{TX}}{A_{geom.}} \quad \text{Equazione 3.8}$$

Nelle regioni *Near Field* e *Very Near Field*, la densità di potenza al variare della distanza radiale dal centro antenna, varia in modo ondulatorio, tale ondulazione è principalmente dovuta alla diffrazione di Fresnel^[3].

Il picco di densità di potenza vale^[6]:

$$D_{VN_{picco}} = \frac{4 \cdot P_{TX}}{A_{geom.}} \quad \text{Equazione 3.9}$$

Si può pensare di combinare le due precedenti equazioni, in modo empirico, in una unica equazione utilizzando il reciproco della somma dei reciproci:

$$D = \frac{1}{\frac{1}{D_F} + \frac{1}{D_{VN_{picco}}}} \quad \text{Equazione 3.10}$$

In tal modo per $R \gg$ **Limite Far Field**, vale la Equazione 3.6 (legge di Friis), mentre per $R \ll$ **Limite Near Field** vale la Equazione 3.8.

Si può quindi considerare che la Equazione 3.10 sia un metodo approssimato ma elegante per esprimere la Densità di Potenza di picco indipendentemente dal fatto che ci si trovi in regione di *Far Field* o in *Near Field*.

La Figura 3.1 mostra graficamente gli effetti descritti.

3.4. Distribuzione di Potenza sullo Specchio Primario

La funzione di illuminazione degli horns, generalmente, non è uniforme ma “a campana” .

E benché la distribuzione di potenza nel beam d’antenna in *Far Field* non sia la stessa della distribuzione di potenza dell’horn illuminante, è ragionevole pensare che a distanza prossime dall’antenna trasmittente, la distribuzione di potenza nel “cilindro” sia la stessa data dal pattern dell’horn illuminante.

Pertanto, con l’aiuto del programma di calcolo di riflettori d’antenna REF . EXE ^[7], di un apposito foglio di calcolo MS Excel è stata calcolata la distribuzione radiale della densità di potenza (D) e quindi di Campo Elettrico (|E|) in funzione del diametro del paraboloide e della potenza applicata. (tenendo conto della funzione di illuminazione dell’horn, della riflessione del subriflettore e dei diversi percorsi verso lo specchio primario).

Tale calcolo risulterà utile per essere confrontato con la D ricevuta dal Furgone Delle Interferenze con Antenna Ricevente piazzata ad 11 m. di quota (ovvero a 7 m. distante dal centro del paraboloide).

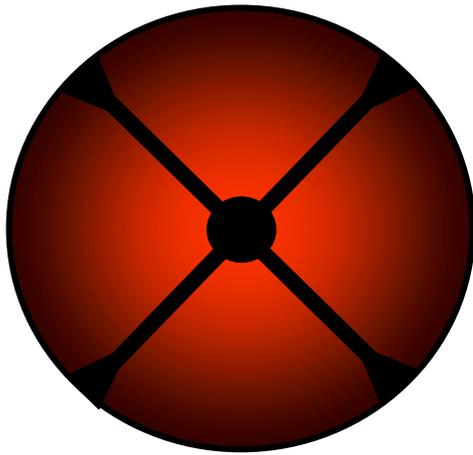


Figura 3.2 Distribuzione di Potenza dell'Antenna trasmittente

Mentre per il caso dell'antenna ricevente alla quota di 2 m. non abbiamo sufficiente conoscenza per creare un valido modello. Possiamo prevedere solamente la D prodotta dallo specchio principale, pertanto il valore di D e quindi di $|E|$ sarà maggiore di quanto previsto dal nostro semplice modello.

3.5. Altre fonti di segnale (spill-over)

L'intensità di D e quindi di $|E|$, oltre che dipendere dal segnale riflesso dallo specchio principale, dipende anche da altre fonti, quali diffrazione dalle strutture che causano bloccaggio (subriflettore e proprie gambe) e dallo spill-over degli illuminatori.

Non abbiamo elementi per calcolare la diffrazione.

Per quanto riguarda invece lo spill-over, con Antenna ricevente alla distanza di 30m. e piazzata a 11m. dal suolo, il fuoco Cassegrain è "in vista" con un angolo di circa 10° . Ciò significa che la radiazione che arriva all'antenna ricevente sarà la somma vettoriale della radiazione emessa dallo specchio principale sommata alla radiazione proveniente dall'horn corrugato in fuoco secondario con angolo $\theta = 10^\circ$.

Il guadagno di un classico horn corrugato adatto ad illuminare il Paraboloide 32m. a $\theta = 10^\circ$ vale circa +11 dBi.

Il livello del segnale proveniente direttamente dall'horn corrugato (per spill-over) non è trascurabile.

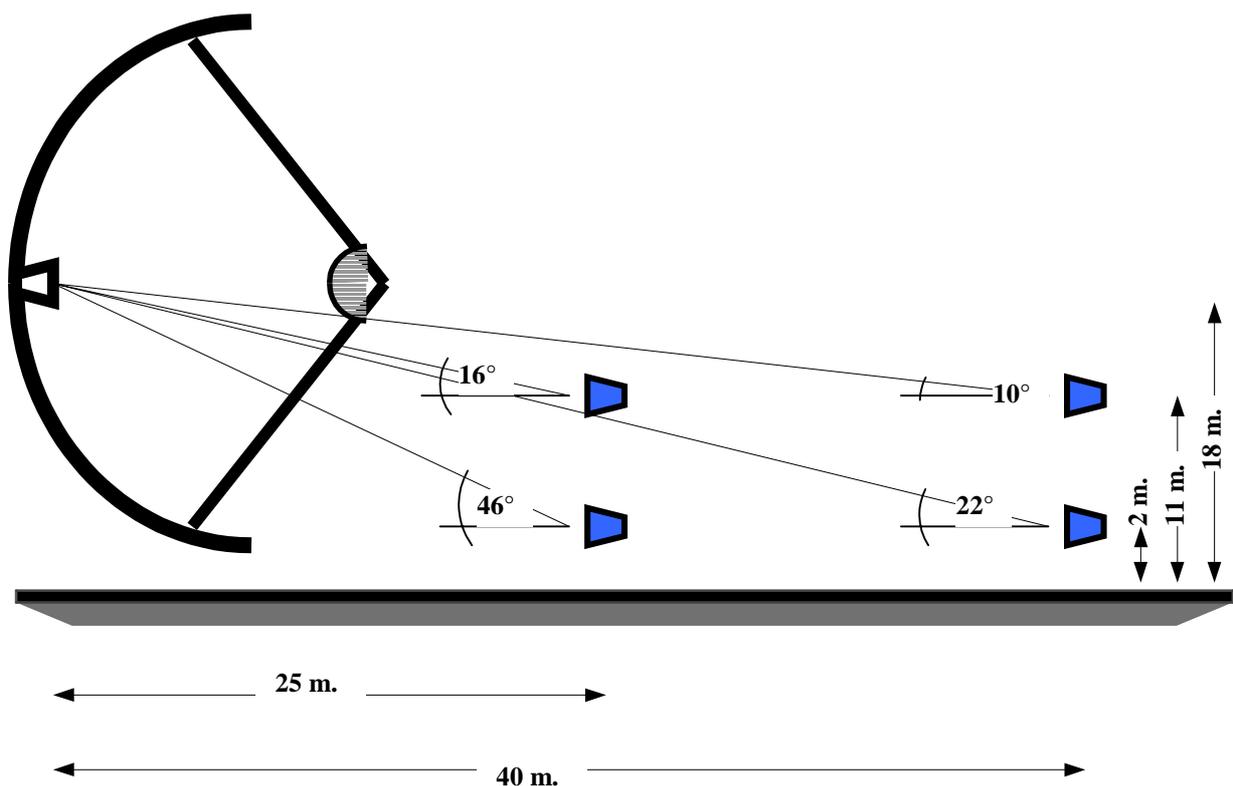


Figura 3.3 Angoli di vista del Fuoco Secondario

Il seguente grafico mostra l'ampiezza dei picchi e dei minimi quando si combinano fra loro 2 segnali monocromatici. Come si può notare, anche quando i livelli differiscono di parecchio non si può trascurare il più piccolo dei due.

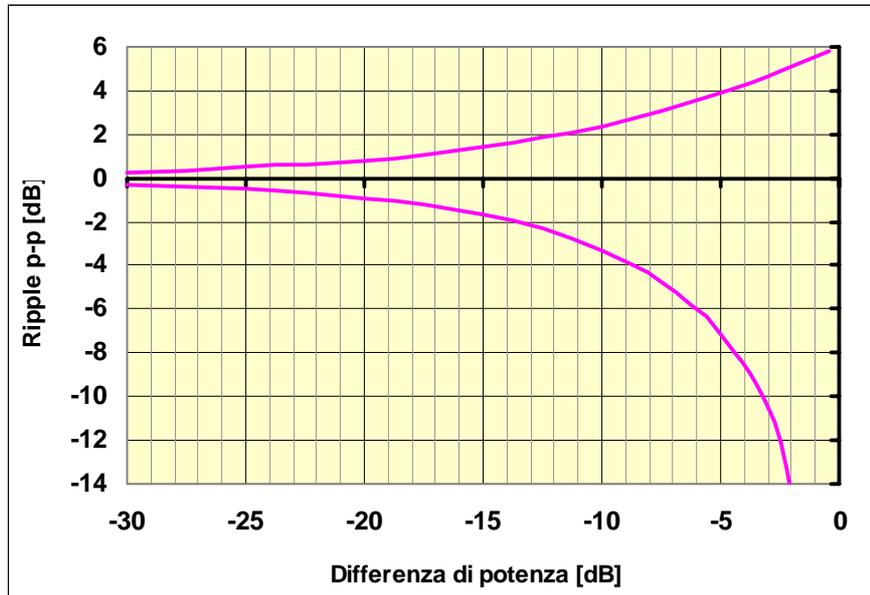


Figura 3.4 Somma di due segnali monocromatici: livello dei picchi e dei minimi.

Utilizzando il programma “HORN.EXE”^[7] (Sletten) ed il Foglio Elettronico MS Excel “campo elettrico antenne.xls” sostituendo valori in modo da simulare situazioni diverse, otteniamo i seguenti valori :

PICCO MASSIMO DEL RIPPLE				
Gradi [°]	Distanza fra gli horns	G [dBi]	Differenza di potenza [dB]	Picco max. Ripple [dB]
10	41 (d=30, h=11)	13	- 1.8	5.3
16	26 (d=15, h=11)	3.3	- 7.5	3.0
22	43 (d=30, h=2)	-6.8	> - 12	>1.8
46	30 (d=15, h=2)	trascurabile	trascurabile	trascurabile

Tabella 3.1 Picco massimo del ripple dovuto allo spill-over da Fuoco Secondario

Utilizzando il grafico di Figura 3.4 e la Tabella 3.1 deduciamo che al segnale ricevuto calcolato dovremo associare un ripple, quindi un picco di intensità variabile a seconda dei casi. Tale ripple decresce poi rapidamente con l'aumentare dell'elevazione.

3.6. Previsioni di Campo Elettrico, TX da Cassgrain

Per poter prevedere la Densità di Potenza ed il modulo del Campo Elettrico, è stato utilizzato il già citato Foglio Elettronico MS Excel “campo elettrico antenne.xls”. In particolare i sottofogli “Link (friis)” e “Campo Elettrico Paraboloidale” contengono le equazioni necessarie al calcolo e descritte nei paragrafi 3.2 3.3 e 3.4 .

La Figura 3.5 mostra un esempio di calcolo di $|E|$ trasmettendo con il Paraboloidale.

I risultati delle previsioni di $|E|$ sono riportati in Tabella 3.2.

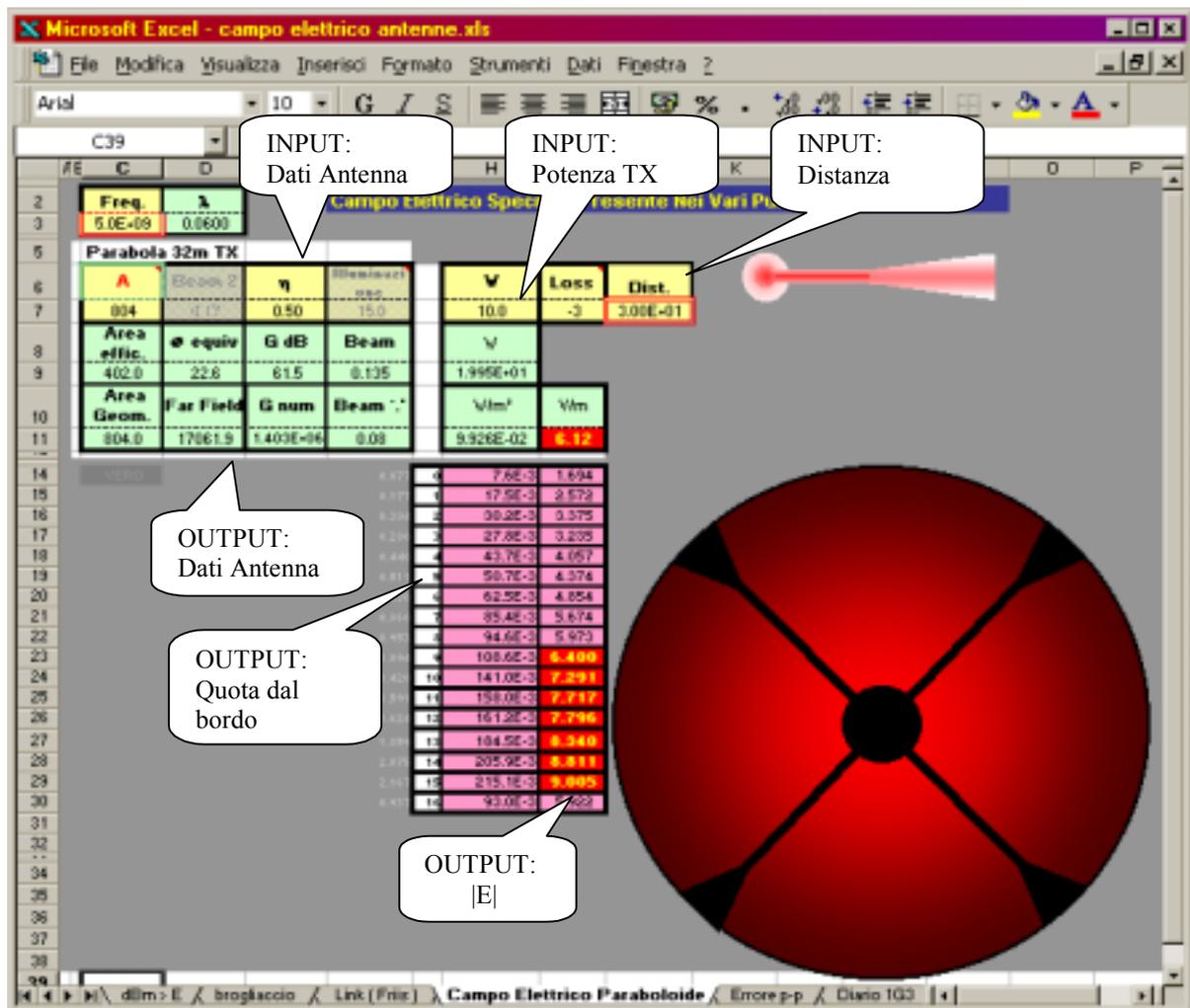


Figura 3.5

Esempio di calcolo di $|E|$ con MS Excel

La seguente tabella riporta i valori di $|E|$ calcolato tenendo in conto Potenza TX, Frequenza, distanza, distribuzione potenza sullo specchio, posizione RX, Guadagno antenna RX, perdite linee coassiali, inoltre è considerato il valore di picco della somma vettoriale con il segnale proveniente dal fuoco Cassegrain.

Poiché il modello di previsione di $|E|$ considera che l'antenna RX sia dentro il beam dell'antenna TX e che gli assi ottici siano paralleli (entrambi orizzontali), il caso dell'antenna RX a 2m. che punta "in alto" verso il fuoco Cassegrain non è realistico. Si può calcolare solo la componente proveniente dal bordo dello specchio principale, pertanto il calcolo di $|E|$ in tali situazioni è da considerarsi "di minima" quindi viene preceduto il valore dal segno $>$.

1.3 GHz 40.7 dBm (11.7 W)		5 GHz 13.9 dBm (25 mW)	
On Beam		On Beam	
<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 15 metri • Quota: 2 metri (a terra) • Horn inclinato, punta fuoco Cassegrain <p>• E all'horn RX</p> <p>• >1.28 V/m</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 15 metri • Quota: 2 metri (a terra) • Horn inclinato, punta fuoco Cassegrain <p>E all'horn RX</p> <p>• >59 mV/m</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 30 metri • Quota: 2 metri (a terra) • Horn inclinato punta fuoco Cassegrain <p>E all'horn RX</p> <p>• >73 mV/m</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 15 metri • Quota: 11 metri (dentro al beam) • Horn orizzontale, punta specchio parabolico <p>• E all'horn RX</p> <p>• 6.81 V/m</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 15 metri • Quota: 11 metri (dentro al beam) • Horn orizzontale, punta specchio parabolico <p>E all'horn RX</p> <p>• 317 mV/m</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Distanza: 30 metri • Quota: 11 metri (dentro al beam) • Horn orizzontale punta specchio parabolico <p>E all'horn RX</p> <p>• 413 mV/m</p>

Tabella 3.2 Previsione calcolata di $|E|$ nella direzione boresight

3.7. Previsioni di Campo Elettrico, TX da Fuoco Primario

Il metodo per prevedere il Campo Elettrico nell'ipotesi di trasmissione da fuoco primario rimane sostanzialmente invariato, e vale quanto descritto nel paragrafo precedente.

In particolare per quanto riguarda il livello $|E|$ on beam non conosciamo ragioni per cui debba essere differente dal caso di illuminazione Cassegrain.

Per quanto riguarda invece il livello $|E|$ al suolo, è necessario tenere in conto dello spill-over dell'illuminatore che tipicamente è maggiore che per gli horn da fuoco secondario.

Pertanto per valutare il $|E|$ che invade una persona a terra e vicina all'antenna, è necessario sommare il segnale proveniente dallo specchio principale con quello proveniente direttamente dall'horn per spill-over.

Per eseguire tale calcolo si utilizzano il già citato foglio elettronico MS Excel "campo elettrico antenne.xls" ed il programma "HORN.EXE"^[7]

Tipicamente gli illuminatori da fuoco primario hanno $G = 7$ dBi ed illuminano il bordo a -14 dB.

In pratica il bordo viene illuminato da un antenna con $G = 7 - 14 = -7$ dBi.

Utilizzando in maniera interattiva il già citato sottofoglio "Campo Elettrico Paraboloidale" calcoliamo i $|E|$ generati a terra sia dallo specchio primario sia dall'horn in fuoco primario.

Utilizzando poi il grafico di Figura 3.4 determiniamo un "margine" (in dB) che dovrà essere sottratto al $|E|$ massimo consentito per il caso di illuminazione Cassegrain.

Per l'antenna Paraboloidale 32m. tale "margine di potenza" vale circa 4 dB.

4. Conclusioni

4.1. Convergenza

Riteniamo confrontabili fra loro i livelli massimi ottenuti dalle misure sperimentali con i livelli calcolati.

Confrontando fra loro i livelli massimi di Campo Elettrico misurati ed i livelli di Campo Elettrico calcolati otteniamo un buon accordo in tutti i casi presi in esame.

Le seguente tabella riassume le differenze (in dB) fra il misurato ed il calcolato.

Rapporto fra Valori Misurati e Valori Calcolati	<i>Frequenza</i>			
	1.3 GHz		5 GHz	
	<i>Distanze</i>			
	15 m.	30 m.	15 m.	30 m.
<i>A Terra</i>	<i>Non applicabile</i>			
<i>On Beam</i>	- 1.4 dB	<i>Non applicabile</i>	0.6 dB	- 0.7 dB

Tabella 4.1 Convergenza dei risultati

Si può affermare anche che il Livello di Campo Elettrico dovuto ad irradiazione dall'antenna Parabolica 32m. non dipende dalla frequenza, ed in pratica nemmeno dalla distanza (almeno entro parecchie decine di metri di distanza dallo specchio).

4.2. Potenza trasmissibile

In base alle misure effettuate e descritte nel presente rapporto, unitamente alla formulazione analitica presentata, possiamo ricavare l'ordine di grandezza delle potenze applicabili all'antenna che limitino il campo elettrico alla base e nelle vicinanze dell'impianto, per esempio ai 6V/m fissati dal D.M. 10 settembre 1998, N° 381^[4].

6 V / m			si raggiungono con	
TX in Fuoco Cassegrain	Quando una persona si trova nel piazzale	e si trasmette	240 W	
TX in Fuoco Primario		e si trasmette	100 W	
TX Cassegrain o Primario	Quando una persona è in pieno Beam	e si trasmette circa 10 W		

Tabella 4.2 Esempio. Potenze trasmesse dal Paraboloide di Medicina che producono un |E| pari a 6 V/m

In un caso pratico di tracking, in cui si usino potenze probabilmente superiori a quelle da noi calcolate ed indicate nella tabella sovrastante, crediamo sia opportuno prevedere e mettere in atto gli accorgimenti necessari per minimizzare il Campo Elettrico e ridurre comunque l'esposizione degli individui al di sotto dei limiti di cautela e precauzione.

Una stima del valore del $|E|$ in funzione della potenza trasmessa per il paraboloide 32m. vale:

Paraboloide 32 m. Espressione empirica E $ E $ [V/m], P [Watt]	
TX in Fuoco Cassegrain, rivelatore sul piazzale ad alcune decine di metri dallo specchio	$ E \approx 0.39 \cdot \sqrt{P}$
TX in Fuoco Primario, rivelatore sul piazzale ad alcune decine di metri dallo specchio	$ E \approx 0.60 \cdot \sqrt{P}$
TX Cassegrain o Primario, rivelatore nel Beam	$ E \approx 1.90 \cdot \sqrt{P}$

Tabella 4.3 **Espressione empirica del livello $|E|$ in base alla potenza trasmessa. Vale per il Paraboloide 32 m.di Medicina**

In ogni caso ci sembra di poter affermare che si dovrà sempre e comunque evitare di operare il sistema a basse elevazioni per limitare il Campo prodotto dal beam primario.

5. Bibliografia e Riferimenti

- [1] *R. Johnson, H. Jasik*, - **Handbook of Antenna Design**, pagg. 1-6 ÷ 1-16 - Mc Grow Hill
- [2] *D. Boyd*, - **Calculate The Uncertain of NF Measurements**, - *Microwaves & RF*, Oct. '99.
- [3] *Bronzi*, “**Linee di trasmissione ed Antenne**”, Ed. Colombo Cursi
- [4] **D.M. 10 settembre 1998, No 381** – <http://www.arpa.erm.it/elettrosmog/legge1.html>
- [5] *Christopher L. Grachanen*, “**Uncertainty calculator.exe**”
<http://metrologyforum.tm.agilent.com/download.shtml>
- [6] <http://www.andrew.com/products/antennas/esa/RADIATIONHAZARDANALYSIS/default.aspx>
- [7] *Carlyle J. Sletten* – **Reflector and Lens Antennas: Analysis and Design Using PC's** – Artech House