

Propagazione delle onde radio per frequenze con lunghezza d'onda metrica

di M. Michelini

E' questo un argomento di grande interesse, specialmente oggi che il numero di radio e TV private si moltiplica di giorno in giorno.

Esamineremo, in questo articolo, alcuni aspetti tipici della propagazione delle onde elettromagnetiche a frequenze superiori ai 50 MHz, quelle cioè che risentono in modo particolare della presenza della troposfera, ossia di quegli strati inferiori della atmosfera che si estendono per alcuni chilometri in altezza al di sopra della superficie terrestre.

Questa parte dell'atmosfera, a differenza degli strati superiori, non contiene ioni liberi, cioè i raggi solari vi giungono già così filtrati della componente ultravioletta ad opera degli strati superiori, che ne risultano infatti ionizzati, da non produrre effetti rilevanti riconducibili a ioni liberi.

Tuttavia, la propagazione delle frequenze oltre 50 MHz risente in special modo degli agenti atmosferici e particolarmente della variazione nel tempo e nello spazio dell'indice di rifrazione dell'atmosfera. Esamineremo poi come sfruttare questi fenomeni, nonché il problema della portata, cioè della zona «copribile» con una determinata installazione delle antenne trasmettenti.

Indice di rifrazione

Ricordiamo brevemente che cos'è l'indice di rifrazione. Esso viene indicato in genere con «n» ed è legato alla costante dielettrica relativa ϵ_r del mezzo cui si riferisce da una semplice relazione, $n = \sqrt{\epsilon_r}$. Conoscendo quindi ϵ_r , è immediato ricavare n (ricordarsi che $\epsilon_{\text{assoluta}} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ ove ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto).

Poiché l'atmosfera è composta d'aria, a noi interessa l'«n» dell'aria. Si trova che esso vale circa 1 ed è variabile intorno a questo valore in funzione della temperatura, della pressione e dell'umidità. Questi ultimi fattori, infatti,

modificano la costante ϵ_r e di conseguenza anche n.

Con rilievi sperimentali si è trovato che la temperatura dell'atmosfera varia, in condizioni di calma, cioè assenza di venti o fenomeni meteorologici particolari, diminuendo con l'altezza e con essa varia quindi anche n, che segue un andamento di tipo esponenziale, come riportato in figura 1 ove le scale sono state opportunamente esagerate. Per gli amanti delle formule diremo che tale andamento si può scrivere come:

$$a) \quad n(h) = 1 + \Delta n$$

ove « Δn » è la variazione di n rispetto all'unità e «h» è l'altezza dal suolo; Δn si può scrivere quindi:

$$b) \quad \Delta n = (n - 1) = (n_0 - 1) e^{-h/h_1}$$

ove « n_0 » è l'indice di rifrazione a livello del mare (va da

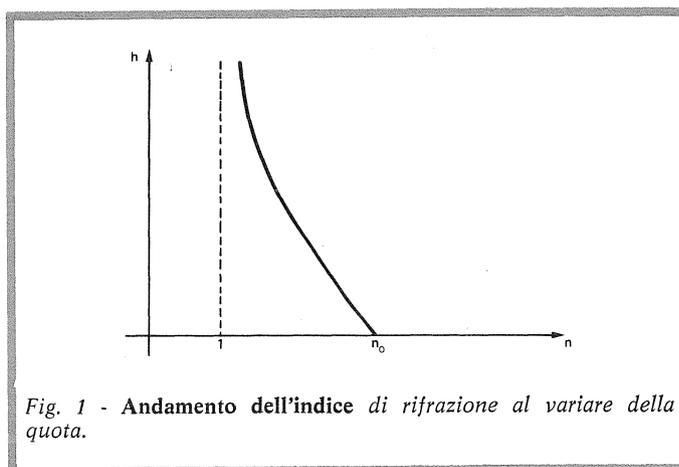


Fig. 1 - Andamento dell'indice di rifrazione al variare della quota.



Fig. 2 - Meccanismo dell'inversione termica per incuneamento di uno strato freddo sotto uno strato caldo in quiete.



Fig. 3 - Inversione termica per scorrimento di uno strato caldo sopra uno strato freddo.

1,0002 a 1,00045 circa), h è, come prima, l'altitudine in Km e h_1 è una costante che vale in media 7,3 Km.

Dopo tutto questo discorso ci interessa fare le seguenti osservazioni: l'indice di rifrazione dell'atmosfera è variabile con l'altezza e con la situazione meteorologica locale, cioè l'andamento reale di n non è sempre quello riportato in figura 1, o meglio, lo è in particolari situazioni: aria calma, alta pressione così via, cioè figura 1 è più un riferimento, un punto d'appoggio, che una legge valevole sempre. Infatti, l'accennata dipendenza di n da altri fattori atmosferici, in particolare la temperatura, fa sì che spesso il suo andamento reale al variare dell'altezza, si discosti anche notevolmente da quello «standard» di figura 1. Sono questi ad esempio i casi di inversioni termiche che si verificano quando, salendo di quota, ad una certa altezza la temperatura, invece di continuare a scendere, comincia a crescere, per poi riprendere un pò più in alto a scendere come faceva prima. Ciò si verifica quando uno strato di aria fredda si infila come un cuneo sotto uno strato più caldo, figura 2 o viceversa se uno strato più caldo viene a scivolare, in alta quota, su uno strato calmo di aria fredda, figura 3.

Questi fenomeni, purtroppo, non sono prevedibili con certezza e sono variabili da zona a zona. Ciò che è peggio poi, sono variabili di ora in ora. Questo fatto ci conduce ad immaginare una situazione standard, di riferimento, per gli studi che seguono. Ecco quindi spiegata l'utilità della figura 1 che si riferisce ad una situazione vicina, nella maggioranza dei casi, a quella reale.

Vediamo ora di capire che cosa succede ad una onda radio che viaggia nell'atmosfera.

Ricordiamo prima di tutto un fenomeno dell'ottica, la rifrazione. Come è noto, quando un raggio di luce passa da un mezzo ad un altro, avente indice di rifrazione diverso, esso non prosegue in linea retta ma viene deviato, rifratto appunto, di un certo angolo, figura 4 e figura 5. L'esperienza stessa ci suggerisce quando si verifica figura 4 o figura 5. Pensiamo ad esempio ad un cucchiaio immerso per metà in una tazza piena d'acqua; guardiamo ora il cucchiaio: sembra si sia piegato; in realtà, pensandoci bene, poiché il cucchiaio è sempre sicuramente dritto, questo effetto è spiegabile solo se ipotizziamo che i raggi luminosi che giungono a noi d'ogni punto del cucchiaio immerso si comportino come in figura 4. Cioè in definitiva, poiché l'acqua è più densa dell'aria, diremo che i raggi si comportano come in figura 4 se il mezzo due è più denso del mezzo uno e viceversa per la figura 5.

Poiché l'indice di rifrazione è legato alla densità del mezzo, avendo un mezzo più denso indice di rifrazione più alto, diremo che un raggio «stringe la normale» (cioè l'angolo di φ_1) se n_2 è maggiore di n_1 e viceversa «allarga la normale» se n_2 è minore n_1 . La «normale» è una retta perpendicolare alla superficie che separa i due mezzi nel punto attraversato dal raggio. Questo fenomeno si verifica anche per le nostre onde elettromagnetiche.

Rifrazione delle onde elettromagnetiche

Infatti, supponendo che l'aria sia stratificata in altezza,

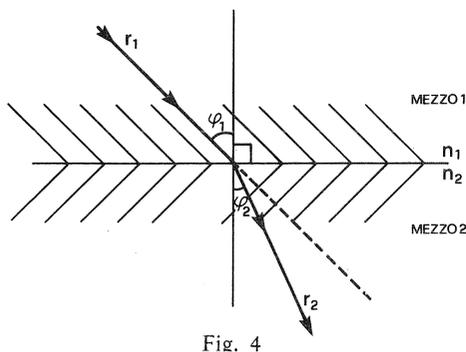


Fig. 4

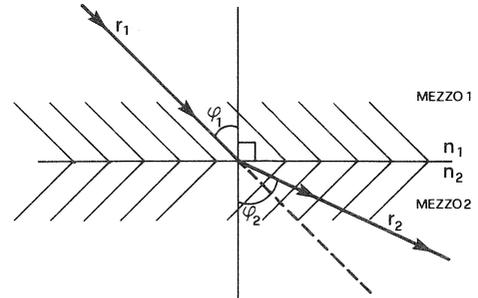


Fig. 5

Fig. 4-5 - Rifrazione di un raggio che attraversa due strati con diverso indice di rifrazione.

in realtà ciò non è vero ma è comodo per capire il concetto, osserviamo che, nella situazione standard cui ora ci riferiamo, cioè in cui l'indice di rifrazione n diminuisce con l'aumentare della quota, si deve avere un comportamento come in *figura 6*, ove $n_1 > n_2 > n_3 > n_4 > n_5 \dots$, cioè l'onda deve piegarsi man mano che sale, «allargando la normale».

La relazione che lega gli angoli di incidenza e rifrazione di *figura 4* e di *figura 5* ai valori di n_1 e n_2 è la stessa dell'ottica geometrica:

$$c) \quad \frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

Nota quindi φ_1 , cioè l'angolo di incidenza con il quale l'onda di *figura 6* arriva alla separazione tra gli strati con n_1 e n_2 , è possibile ricavare $\sin \varphi_2$:

$$d) \quad \sin \varphi_2 = \frac{n_1 \cdot \sin \varphi_1}{n_2}$$

e da questa

$$e) \quad \varphi_2 = \arcsin \left(\frac{n_1 \cdot \sin \varphi_1}{n_2} \right)$$

Applicando la relazione c) successivamente, per ogni rifrazione si trova che, in pratica, per conoscere un qualunque angolo di uscita, è sufficiente conoscere l'angolo di partenza φ_1 , l'indice di rifrazione n_1 del mezzo di partenza e l'indice n_u del mezzo di uscita, cioè non importa nulla ciò che avviene in mezzo, tra i vari strati.

Come casi limite occorre accennare: 1) quando l'onda incide perpendicolarmente alla superficie di separazione tra gli strati: in tal caso l'angolo di uscita è sempre zero gradi, per qualsiasi n_1 e n_2 , cioè non si ha rifrazione; 2) quando incide perfettamente orizzontale, cioè parallelamente allo strato, e allora il nostro discorso perde significato perché un'onda di tale tipo non riesce mai ad attraversare lo strato e si mantiene quindi sempre orizzontale.

Facciamo ora un esempio pratico per fissare le idee: consideriamo per ora la terra piatta, in seguito rimuoveremo tale restrizione. Questa approssimazione è abbastanza buona per distanze sulla terra piuttosto piccole. Con quanto abbiamo detto fino ad ora possiamo calcolarci a che altezza può avvenire la «riflessione» di un'onda radio, supposta trasmessa con una antenna molto direttiva, per poter considerare tale onda come il solo raggio di interesse.

Per altezza di riflessione possiamo intendere per esempio, quella alla quale il raggio precede orizzontalmente, cioè $\varphi_u = 90^\circ$. Allora dalla c) essendo $\sin \varphi_u = 1$

$$\frac{1}{\sin \varphi_1} = \frac{n_1}{n_u}$$

da cui

$$f) \quad n_u = n_1 \cdot \sin \varphi_1$$

Noti quindi φ_1 e n_1 , ricaviamo n_u .

Se con le formule a) e b) costruiamo una tabella come in *figura 7*, possiamo sapere a che altezza avviene la riflessione.

Abbiamo visto, quindi, che il raggio compie una certa curva, fino a diventare orizzontale. Ci si può domandare ora come possa esso tornare a terra e non rimanere orizzontale sempre, cioè parallelo alla superficie terrestre. In questo caso è proprio ancora la variabilità di n che ci viene in aiuto, infatti, come abbiamo accennato all'inizio, la stratificazione dell'atmosfera è una semplificazione inesatta, ricordiamolo, n in generale varia anche in direzione orizzontale, e non appena il nostro raggio incontra una zona con n maggiore, a causa di movimenti dell'atmosfera, rimescolii ecc., esso dirige nuovamente verso terra, raggiungendo così la stazione ricevente.

Poiché l'antenna trasmittente non è mai così direttiva come l'abbiamo immaginata noi, vi sarà una moltitudine di raggi che giungono nuovamente a terra, dando così una copertura maggiore. Tutto quanto detto, spiega il fenomeno della portata oltre l'orizzonte ottico delle onde elettromagnetiche. Come si vede in *figura 8*, mentre l'orizzonte ottico è P, quello elettromagnetico è più ampio, giungendo ad esempio in R. Dalla stessa figura si vede anche l'utilità di un lobo di radiazione dell'antenna stretto e basso in senso verticale al fine di avere maggiore portata.

In conclusione, conviene nei calcoli, considerare i raggi uscenti in orizzontale, che come visto sono quelli che danno la maggior portata.

E' facile verificare infatti che, anche un raggio che parte orizzontalmente, arriva a colpire la stratificazione atmosferica sempre con un certo angolo φ_1 maggiore di zero, *figura 9* e risulta quindi rifratto. Ci interessa ora notare che tale curvatura ha un raggio, calcolabile con:

$$g) \quad r = \frac{1}{\frac{\delta n}{\delta h}}$$

ove con $\frac{\delta n}{\delta h}$ (detto gradiente dell'indice di rifrazione)

si è indicata la variazione di n rispetto alla variazione della quota. Se si assume per tale gradiente il valore che esso presenta per l'atmosfera standard, pari a $- 37 \cdot 10^{-6} \text{ Km}^{-1}$, si trova che r vale:

$$r = \frac{1}{\frac{1}{37 \cdot 10^{-6} \text{ Km}^{-1}}} = \frac{1}{37} \cdot 10^6 \cdot \text{Km} = 27000 \text{ Km},$$

cioè un raggio di curvatura poco più di quattro volte quello terrestre (che è pari a circa 6370 Km).

Cerchiamo di semplificare tutto il discorso: poiché sarebbe molto comodo poter rappresentare le onde elettromagnetiche come propagantesi sempre in linea retta, si può pensare di modificare fittiziamente la curva della terra, mantenendo, in modo opportuno, la stessa distanza tra il raggio e la crosta terrestre, nei due casi di raggio curvo e terra normale e raggio diritto e terra modificata. Il tutto è rappresentato più semplicemente in *figura 10*.

La formula che da il raggio equivalente della terra è:

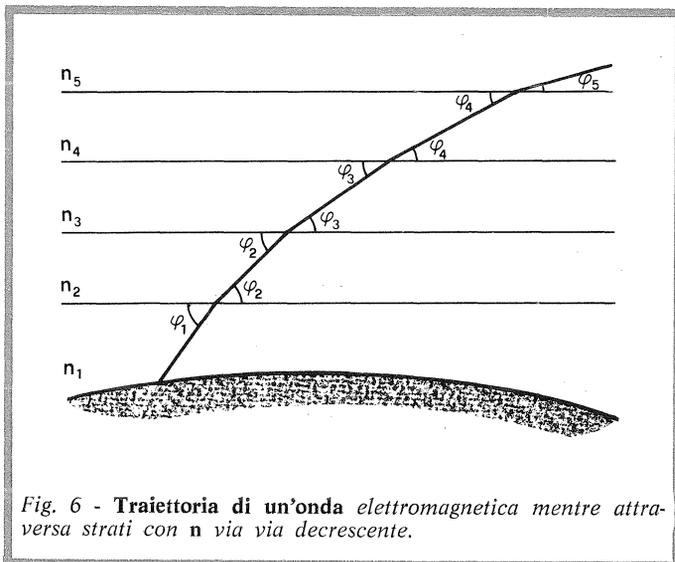


Fig. 6 - Traiettorie di un'onda elettromagnetica mentre attraversa strati con n via via decrescente.

Altezza	Valore in n
0 m	1,0003 (n ₀)
200 m	1,00029
	1,00028
800 m	1,00027
1 km	1,00026
1,5 km	1,00024

Fig. 7 - Tabella dei valori di n in funzione della quota (per n₀ si è assunto il valore 1,0003).

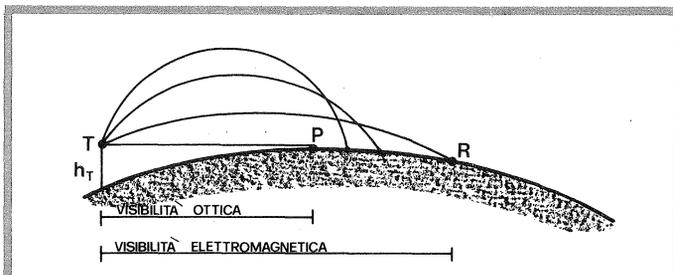


Fig. 8 - Differenza fra orizzonte ottico e orizzonte elettromagnetico.

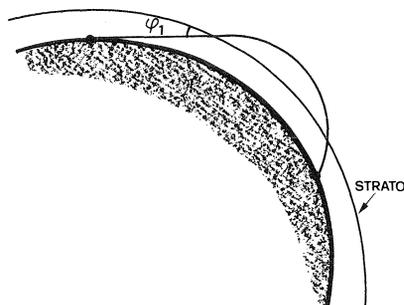


Fig. 9 - Traiettorie seguita da un raggio partito orizzontalmente

$$h) \quad R_{eq} = R_{terra} \left[\frac{1}{1 + R_{terra} \cdot \frac{\delta n}{\delta h}} \right] = R_{terra} \cdot k$$

ove k è detto coefficiente di correzione del raggio terrestre. Usando per $R_{terra} = 6370 \text{ Km}$ e per $\frac{\delta n}{\delta h}$ il valore

standard, si trova $k = 4/3$ e quindi

$$R_{eq} = (4/3) \cdot R_{terra} = 8500 \text{ Km}$$

Valori diversi si ottengono naturalmente con diversi valori del gradiente dell'indice di rifrazione ma noi, d'ora in poi, ci riferiremo sempre alla situazione standard.

Calcolo della portata e dell'altezza delle antenne

Ora possiamo studiare la portata di una emittente in modo semplice usando la figura 11, dove con T si è indicata l'antenna trasmittente e h_T la sua altezza sulla superficie terrestre. Si trova che:

$$i) \quad h_T = \frac{d^2}{2 R_{eq}}$$

da cui

$$l) \quad d = \sqrt{2 h_T R_{eq}}$$

Queste due espressioni permettono di valutare a che altezza mettere una antenna o che distanza è possibile coprire con una determinata installazione.

Nel caso che anche il punto di ricezione sia elevato, la situazione è come in figura 12 e la distanza totale raggiungibile è la somma delle due parziali:

$$d_{tot} = d_1 + d_2 = \sqrt{2 h_T R_{eq}} + \sqrt{2 h_R R_{eq}}$$

Facciamo qualche esempio pratico.

Supponiamo di essere i tecnici di una emittente privata FM e di dovere installare un traliccio per l'antenna in modo che, in media, la zona coperta si estende per un raggio di 50 Km intorno alla emittente. Usando la formula i), ricaviamo immediatamente:

$$h_T = \frac{d^2}{2 R_{eq}} = \frac{(50 \text{ Km})^2}{(8500 \text{ Km})} = 147 \text{ m}$$

Da ciò si vede quanto sia arduo il problema, un traliccio da 147 m non è uno scherzo, tanto più che questi 147 m vanno intesi al di sopra del livello medio dei tetti circostanti, se ce ne sono.

Viceversa, supponiamo di possedere un traliccio che è alto 20 m. Che portata ci aspetteremo? La formula l) ci dà la soluzione:

$$d = \sqrt{2 h_T \cdot R_{eq}} = \sqrt{2 \cdot 20 \text{ m} \cdot 8500 \text{ Km}} = 18,5 \text{ Km}$$

Questo risultato può sembrare a prima vista strano: ma come, con 20 m copro 18,5 Km e me ne occorrono ben 147 per coprire una distanza circa 2,5 volte più grande. Il fatto è che il legame tra h_T e d non è lineare ma di tipo quadratico, come riportato in tabella 13.

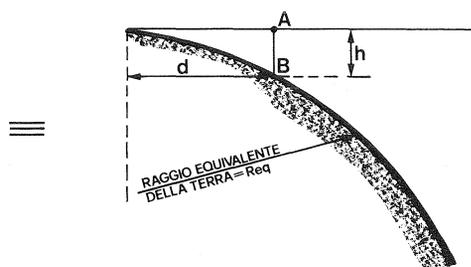
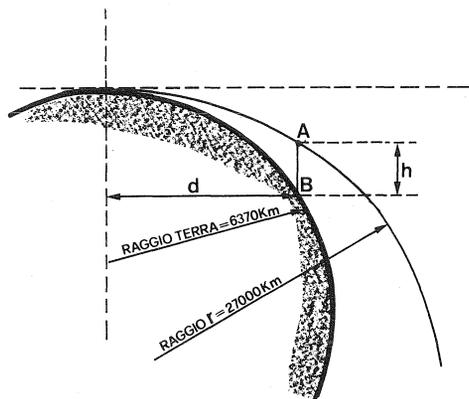


Fig. 10 - Confronto fra situazione reale e situazione modificata (quest'ultima permette la semplificazione dei calcoli).

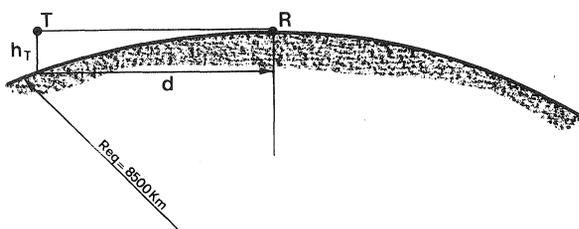


Fig. 11 - Schema pratico utilizzato per il calcolo della portata di una installazione di antenne.

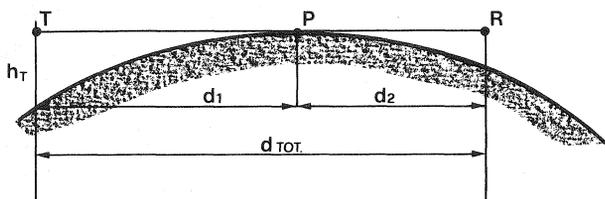


Fig. 12 - Schema per il calcolo della portata per trasmettitore e ricevitore in quota.

Tabella 13 - Legame tra h_T e a .

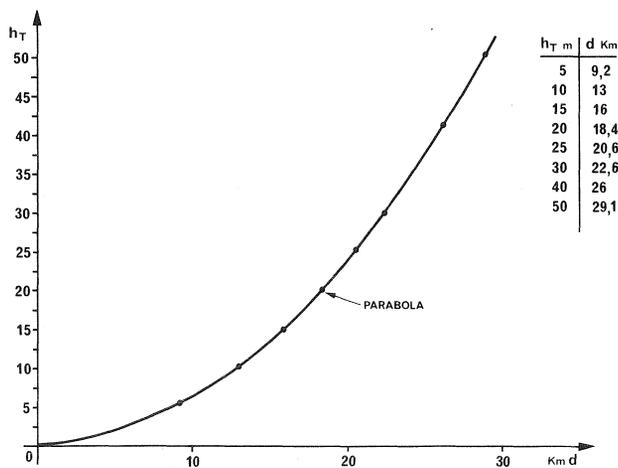


Fig. 14

Conclusioni

Occorre fare ora due osservazioni importanti. La prima è che questi sono dati orientativi. Infatti, come noto, le onde radio a queste frequenze non attraversano gli oggetti ma vengono da essi riflesse e difratte; questo fenomeno rende ragione della ricevibilità, a volte verificatasi, di un segnale anche oltre l'orizzonte elettromagnetico. La differenza principale tra un fenomeno dovuto a riflessione o diffrazione e il più ampio orizzonte elettromagnetico che si ha quando il gradiente dell'indice di rifrazione è minore (più negativo) del valore standard, è che nel secondo caso la ricezione non è costante nel tempo ma varia, seguendo le variazioni di $\delta n/\delta h$. Può avvenire quindi che si riceva il segnale in certe ore, mentre per altre esso sia assente.

La seconda osservazione è che risulta evidente l'utilità di disporre le antenne trasmettenti, nel caso di radiodiffusione circolare, il più in alto possibile, sfruttando magari le montagne, di cui l'Italia è ricca, creando così un «ponte ripetitore» in quota che potrebbe essere collegato agli studi centrali tramite un altro «ponte», magari a microonde.

Appare così evidente quanto sia erronea e incompetente la richiesta di amplificatori a radio-frequenza di alta potenza, quando con le antenne installate si raggiunga già una distanza circa pari a quella orientativa data dalla 1). La soluzione corretta quindi è elevare maggiormente le antenne, curare che il loro angolo di radiazione sia il più basso possibile o addirittura spostarle in quota, se possibile. Questa soluzione è, nel 90% dei casi, certamente più economia dell'acquisto di un amplificatore di potenza, senza contare i risultati reali che dà.

Infatti, una maggior potenza irradiata, serve solo ad aumentare quella dei raggi diffratti o riflessi, dando l'illusione di una maggior copertura e creando maggiori problemi di interferenza con altre emittenti e con gli utenti delle Televisioni che vedono aumentare, nella maggior parte dei casi i disturbi sul video (TV1).

Potremo parlare a questo punto della necessità e importanza di usare trasmettitori che abbiano un'uscita «pulita», strumentalmente verificata e verificabile. Questo problema ci porterebbe lontano e... forse è meglio rimandare la scottante questione ad un prossimo articolo.