

# UN METODO RIGOROSO DI PREDIZIONE DELLE PERDITE DA DIFFRAZIONE IN BANDA VHF-UHF

Fabio Mariani, Roberto Nebuloni  
Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano  
Piazza Leonardo da Vinci, 32 - 20133 Milano  
Via Giuseppe Ponzio, 34/5 - 20133 Milano  
E-mail: nebuloni@elet.polimi.it  
Telefono: 02.2399.3572  
Fax: 02.2399.3413

## Abstract

*This paper describes a rigorous technique for computing propagation path-losses over irregular terrain due to diffraction. In LOS (Line Of Sight) paths also the loss due to ground-reflection is taken into account. The path profile is classically modeled by multiple knife-edges, whatever their number, synthesized by a novel automatic decimation procedure able to select the natural obstacles that really affect the received field. The accuracy of our technique has been verified against the Savov-Andersen technique and the exact formula for grazing incidence on a series of equally spaced knife-edges of equal height. An example of path loss calculation on each obstacle of a real path profile is presented.*

## 1 INTRODUZIONE

Nello studio della propagazione lungo collegamenti terrestri in banda VHF, UHF e superiori, la presenza del terreno e di ostacoli naturali viene solitamente modellizzata tramite una serie d'ostacoli, di forma semplice, come le lame di coltello perfettamente assorbenti, che generano fenomeni di diffrazione. Esistono in letteratura diversi metodi rigorosi per calcolare il campo diffratto, sia in ambiente extraurbano sia urbano, basati sul Principio di Huygens e sulla soluzione di integrali di Fresnel, quali quello di Whittaker [1], Russell [2] e Savov-Andersen [3] (quest'ultimo valido per due soli ostacoli), ecc. Purtroppo le prime due tecniche sopra elencate pagano la loro accuratezza in termini di tempo di calcolo, crescente col numero di ostacoli presenti sul percorso. Oltre a queste tecniche rigorose ne esistono diverse approssimate che permettono un consistente risparmio in termini di calcolo, pagando per contro una minore accuratezza nei risultati forniti (tecniche di Bullington, Epstein-Peterson e Deygout).

In quest'articolo presentiamo un algoritmo numerico per stimare l'attenuazione subita dal campo a causa di diffrazioni multiple e di riflessioni da terreno, applicabile a percorsi urbani ed extraurbani, basato sulla tecnica di Whittaker [1] [4]. Viene in particolare evidenziata la scelta attenta di alcuni parametri fondamentali quali intervallo di integrazione e passo di campionamento spaziale del campo, da cui dipende l'efficacia della tecnica. Descriviamo inoltre una nuova procedura di decimazione del profilo altimetrico, dato che non tutti gli ostacoli perturbano significativamente il campo a ricevitore. Dopo opportune prove di verifica dell'algoritmo, ne mostriamo un'applicazione su di un collegamento reale, tra le località Besano (Va) e Varese: il risultato ottenuto è stato confrontato con la predizione fornita dalle tecniche approssimate sopra richiamate.

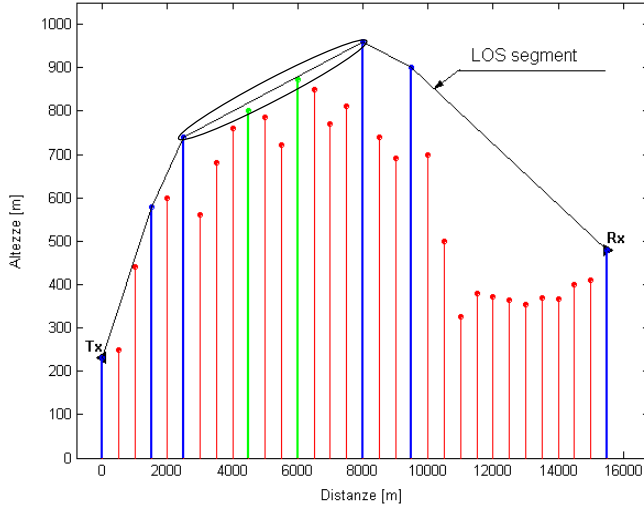
## 2 MODELLIZZAZIONE DEL PROFILO TERRITORIALE: IL PROFILO ELETTROMAGNETICO.

Nella progettazione di sistemi di trasmissione radio terrestri sono solitamente necessarie informazioni altimetriche dettagliate [5], contenute in database territoriali digitali (DTEM), mediante le quali ricostruire, tramite interpolazione, i profili territoriali. Questi devono poi essere modellizzati con un numero limitato di "lame di coltello", dato che solo alcune di esse influenzano in maniera rilevante il campo ricevuto. Con questo obiettivo abbiamo identificato la seguente procedura di *decimazione* (Fig. 1):

- a) tracciamo delle "spezzate di visibilità" lungo l'intera tratta, a partire dal trasmettitore Tx fino alla cima dell'ostacolo più lontano, ancora in visibilità (LOS) (il procedimento prosegue fino a

raggiungere il ricevitore Rx). Così facendo evidenziamo un certo numero di sottopercorsi tra Tx e Rx;

- b) costruiamo su ogni sottopercorso il primo ellissoide di Fresnel: *solo* quegli ostacoli che non intercettano tali ellissoidi, vengono definitivamente eliminati dal profilo.



**Fig. 1** Esempio di applicazione della procedura di decimazione al collegamento Como-Canzo. Il profilo è ricostruito a passo di 500 m e la frequenza del collegamento è 450 MHz. In nero a tratto spesso sono identificati gli ostacoli individuati dalle spezzate di visibilità (LOS segment), in grigio gli ostacoli recuperati dal primo ellissoide di Fresnel. In nero a tratto sottile sono indicate quelle lame definitivamente scartate.

Abbiamo osservato che l'errore introdotto dalla decimazione, nelle diverse prove effettuate, non decresce sensibilmente anche aumentando l'ordine dell'ellissoide che si vuole garantire libero da ostruzioni e si mantiene limitato entro 1 dB.

### 3 L'ALGORITMO DI CALCOLO DELL'ATTENUAZIONE

Il punto di partenza del metodo proposto è l'integrale di Helmholtz-Kirchhoff [6]. Adottando le stesse ipotesi di [1], possiamo ricavare l'espressione del campo relativa a quello di spazio libero  $\hat{E}(x_{j+1}, z_{j+1})$  sulla cima  $j+1$ -esima, noto il campo relativo  $\hat{E}(x_j, z_j)$  sull'ostacolo precedente [1]:

$$\hat{E}(x_{j+1}, z_{j+1}) = \left( \frac{k x_{j+1}}{2\pi i x_j \Delta x_j} \right)^{\frac{1}{2}} \int_{h_j}^{\infty} \hat{E}(x_j, z_j) e^{jkR} dz_j \quad (1)$$

dove  $x$  è la direzione di propagazione e  $z$  l'asse delle quote rispetto al Tx, che è posto in  $x_0=0, z_0=h_{tx}$ ;  $k$  è il numero d'onda. La distanza  $R$  è così definita:

$$R = \frac{x_{j+1}}{2 x_j \Delta x_{j+1}} \left( z_j - \frac{x_j}{x_{j+1}} z_{j+1} \right)^2 \quad (2)$$

Il campo  $\hat{E}(x_j, z_j)$  viene calcolato in un numero finito di punti a partire dalla cima dell'ostacolo  $j$ -esimo finché, ad una data quota  $Q''$ , può essere approssimato a quello in spazio libero. L'integrale (1) viene risolto approssimando l'integranda con un polinomio del second'ordine e applicando tecniche di integrazione numerica di funzioni fortemente oscillanti [4]. È necessario fissare correttamente alcuni parametri fondamentali:

- L'intervallo di integrazione in quota sopra ogni ostacolo (da  $h_j$  a  $Q''$ );
- il passo di integrazione del campo (campionamento del campo);

Inoltre occorre individuare una tecnica efficiente per integrare le sorgenti di campo da  $Q''$  a infinito.

*Intervallo di integrazione.* Il calcolo del campo sopra la cima  $j$ -esima viene esteso fino al punto  $Q''$  nel quale il campo diffratto è aumentato, rispetto al valore sulla vetta, fino a raggiungere il valore di spazio libero. Ciò corrisponde a richiedere che l'ellissoide di ordine 1.3 sia sgombro.

*Intervallo di campionamento.* Si è verificato che qualora si volesse calcolare il campo sulla generica cima  $j+1$ , è necessario ridurre il passo di campionamento quanto più quest'ultima e la cima precedente  $j$  sono in ombra rispetto al trasmettitore Tx. Nella situazione più critica occorre adottare un passo di campionamento di  $0.1 \lambda$  per avere una precisione di 0.2 dB. Si è scelto di adottare un passo costante al fine di privilegiare la precisione rispetto alla velocità di calcolo: è possibile che una scelta del passo di campionamento dipendente del grado di ombra della cime in questione e crescente con la quota permetta velocità maggiori senza pagare in precisione.

*Integrazione da  $Q''$  a infinito.* Abbiamo detto che al di sopra della quota  $Q''$  il campo da integrare è assimilabile a quello di spazio libero. In questa situazione la (1) si semplifica in un integrale di Fresnel standard:

$$E_{\infty}^{\wedge}(x_{j+1}, z_{j+1}) = \left( \frac{k x_{j+1}}{2 \pi i x_j \Delta x_j} \right)^{\frac{1}{2}} \int_{h_j + Q''}^{\infty} e^{jkR} dz_j \quad (3)$$

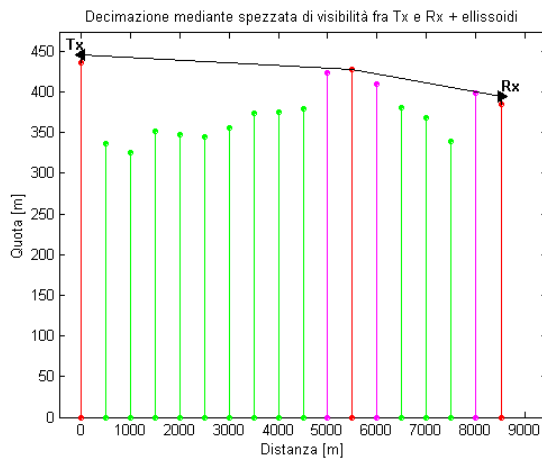
Per ottenere il campo su di una data cima, l'integrale di Fresnel viene calcolato numerose volte: si richiede quindi, per quest'ultimo, un'adeguata precisione di calcolo, ottenuta mediante una tecnica che garantisce un errore relativo di  $10^{-8}$ .

*Caso LOS: contributo di riflessione da terreno.* Per le situazioni di collegamento in visibilità è stato valutato anche il contributo delle riflessioni da terreno [7]. Lungo ogni tratta congiungente le cime  $j$  e  $j+1$  si verifica l'esistenza di eventuali punti di riflessione, che vengono identificati valutando l'angolo di incidenza dal trasmettitore  $\vartheta_{TX}$  e quello di riflessione dal ricevitore  $\vartheta_{RX}$ , considerando la superficie di riflessione *piana*, a patto che i raggi incidente e riflesso così tracciati non siano ostruiti da ostacoli.

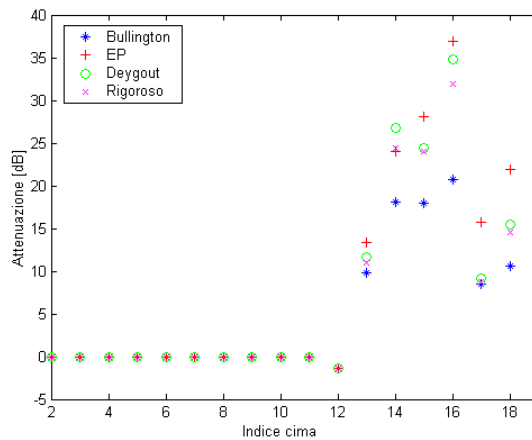
## 4 RISULTATI

La nostra tecnica è stata confrontata con quella rigorosa di Savov-Andersen mediante diverse prove su profili sintetici a due ostacoli, variabili in altezza e in posizione, e su di una schiera di  $N$  ostacoli di altezza uniforme ed equispaziati, per i quali è possibile esprimere il campo su ogni ostacolo in forma chiusa. In tutti i test abbiamo osservato scostamenti nei risultati inferiori a 0.5 dB.

Presentiamo di seguito i risultati ottenuti sul profilo reale Besano (Va) – Varese, ricostruito a passo 500 m e sottoposto a fase di decimazione (Fig. 2). Le altezze delle antenne Tx e Rx sono pari a 10 m. La frequenza è 450 MHz.



**Fig. 2** Procedura di decimazione applicata al profilo reale Besano (Tx) - Varese (Rx), ricostruito a passo 500 m. Le altezze dei tralicci trasmettitore (Tx) e ricevitore (Rx) è pari a 10 m. La frequenza è 450 MHz.



**Fig. 3** Confronto tra i risultati forniti dalla tecnica rigorosa e da quelle di Bullington, Epstein-Peterson e Deygout sulla vetta di ogni cima del profilo reale di Fig. 2, nel caso di sola propagazione per diffrazione.

Come si può osservare dalla Fig. 3, l'attenuazione è stata calcolata sulla vetta di ogni cima del profilo, il cui numero d'ordine è indicato in ascissa. Abbiamo considerato la sola propagazione per diffrazione, confrontando i risultati forniti dal nostro algoritmo e le tecniche approssimate di Bullington, Epstein-Peterson e Deygout. Si osserva come quest'ultima tecnica si discosti sempre meno di 3 dB dai risultati forniti dalla tecnica rigorosa, mentre gli altri metodi approssimate mostrano errori maggiori. Anche da confronti effettuati su altri profili reali, tra la tecnica rigorosa e quelle approssimate, si è evidenziato come il metodo approssimato più prossimo a quello rigoroso sia quello di Deygout. I tempi di calcolo del campo su ogni cima sono variabili in dipendenza dalla situazione d'ombra dell'ostacolo rispetto al trasmettitore, ma sempre nell'ordine dei secondi. Il tempo complessivo di calcolo necessario per la valutazione del campo a ricevitore è, per il profilo in analisi, di circa 15 s. Il calcolo dei contributi di riflessione è invece istantaneo. Le simulazioni sono state eseguite su un PC AMD 1100 MHz, in ambiente MATLAB.

## CONCLUSIONI

In questo articolo abbiamo presentato una tecnica numerica di calcolo delle perdite da diffrazione multipla attraverso un numero arbitrario di ostacoli modellizzati come lame di coltello. Dopo un'opportuna fase di decimazione del profilo, atta a mantenere i soli ostacoli che realmente perturbano il segnale ricevuto, la formulazione integrale (1) è stata risolta approssimando ampiezza e fase dell'integranda mediante polinomi quadratici. Adottando un passo di campionamento di  $0.1 \lambda$  in quota, si è verificato, tramite diverse prove su profili sintetici, come i risultati ottenuti differiscano al più di 0.5 dB da altre tecniche rigorose. Il confronto con tecniche approssimate su profili reali ha evidenziato che il metodo di Deygout è quello che fornisce i risultati più vicini alla tecnica rigorosa.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Whittaker, J. H.: "Fresnel-Kirchhoff theory applied to terrain diffraction problems", *Radio Sci.*, vol. 25, no 5, pp. 837-851, 1990.
- [2] Savov, S. V. and Andersen, J. B.: "Efficient method for calculation of Fresnel double integral", *Electron. Lett.*, vol 31, no. 6, pp. 435-437, 1995.
- [3] Russell, T. A., Bostian C. W., and Rappaport T. S.: "A deterministic approach to predicting microwave diffraction by buildings for microcellular systems", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 41, no.12, 1993.
- [4] Whittaker, J. H.: "Numerical evaluation of one-dimensional diffraction integrals", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 45, no. 6, 1997.
- [5] Anderson, H. R.: "Digital terrain database structures and accuracy requirements for propagation modeling" *EDX Engineering, Inc.*
- [6] Born, N. and Wolf, E.: "Principles of Optics". New York, Pergamon Press, ed. no. 7, 1964.
- [7] Anderson H. R.: "New 2D Physical EM Propagation Model Selected" *IEEE Vehicular Technology Society News*, August 1997.