

Onda di Terra nei centri abitati e presso gli Ostacoli

ing. Giovanni Gentile

1. Premessa

L'Onda di Terra o di Superficie, responsabile del servizio diurna nelle gamme delle Onde Medie e Lunghe, trae origine dai raggi diffratti nel suolo ed è data da:

$$1) \quad \text{Onda di terra} = (1-R_v) \cdot F(\omega) \cdot e^{-jkR}/R$$

dove R è la distanza, $k = 6.28 / \lambda$, $F(\omega)$ è la Funzione di Attenuazione e R_v è il coefficiente di riflessione [1].

Questa Onda durante la sua propagazione, quando non è schermata da ostacoli locali, continua ad essere incrementata tramite il raggio incidente con un "Contributo Ottico" proporzionale a $(1-R_v)$:

$$2) \quad (1-R_v) e^{jkR} / R$$

dove la 2) ne indica il modulo e la fase "al momento in cui detto raggio tocca il suolo".

Premesso che questo contributo tende a rafforzare l'Onda di Terra, l'onda risultante interessa il sottosuolo, dove mette in moto verticale, con la propria fase, gli elettroni del terreno, fino a profondità non piccole (per basse conduttività anche ad oltre 100 m):

- nel sottosuolo l'Onda non può però propagarsi orizzontalmente con le caratteristiche proprie del terreno (perché nei due mezzi le velocità sono molto diverse): si propaga invece con la fase dell'onda incidente.

Con questa ammissione l'onda in arrivo dall'alto può continuare ad essere sempre in fase con gli effetti del campo preesistente, dovuto al movimento degli elettroni a monte del punto di incidenza.

Quindi, anche se nel suolo l'Intensità dell'Onda di terra si attenua esponenzialmente con la profondità (avviso 368-4, ITU-R Vol. V pag. 69), l'Onda di Terra sopra il suolo avanza comportandosi:

- non come se fosse dovuta a una corrente sotterranea orizzontale, ma
- per induzione delle "correnti verticali a monte", rafforzate dall'Onda incidente sempre in fase, se sono assenti gli ostacoli.

2. Contributo Ottico e Perdite nel Suolo

Per meglio capire gli effetti del contributo ottico e il comportamento della propagazione

Sommario

Si esamina il meccanismo di propagazione dell'Onda di Terra in polarizzazione verticale su terreni a conduttività finita, da cui risulta che il campo di questa Onda:

- è dovuto agli elettroni oscillanti verticalmente nel suolo e la corrente di questi elettroni è alimentata esattamente come un sistema di "antenne cosiddette end-fire"
- nei centri abitati subisce una "attenuazione aggiuntiva", dovuta alla non corretta alimentazione, in fase e in ampiezza, di ipotetiche antenne end-fire, equivalenti alle correnti nel suolo
- si propaga indisturbata ai lati degli ostacoli e può, poiché l'end-fire irradia anche sui fianchi, aggirare lentamente l'ostacolo stesso e limitarne gli effetti negativi.

Sono inoltre elaborati i risultati di misure di campo dell'Onda di Terra effettuate sui campi dei trasmettitori OM di Milano (900 kHz e 1035 kHz) ed è ricavata, a conferma delle ammissioni precedenti, l'entità delle attenuazioni aggiuntive che questi campi subiscono per effetto della metropoli.

Le conclusioni valide per Milano sono infine generalizzate per estenderne la validità a città e paesi di varie dimensioni, anche su terreni di diversa conduttività e a trasmettitori OM a diverse distanze e frequenze.

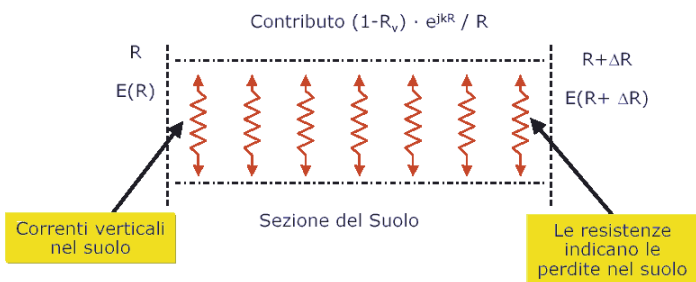


Fig. 1 - campi elettromagnetici in una sezione verticale del suolo, fino alla profondità interessata dalla surface wave

del raggio di superficie è anche opportuno esaminare il problema da un altro punto di vista, alla luce della figura 1.

Questa figura si presta a fare un grossolano bilancio delle energie prima e dopo la sezione (su terreno uniforme) del blocco evidenziato (ved. [2], da cui sono qui riprese alcune conclusioni).

Si ottiene che le Perdite nel suolo ogni 1000 m sono proporzionali al quadrato di:

$$3) \quad E(R) - E(R + 1000) - (1 - R_v)/R$$

Dai diagrammi, in potenza e in % ogni km, delle Perdite e del Contributo del raggio diffratto, per le varie conduttività e frequenze, risulta facilmente che il contributo ottico [2]:

- praticamente non dipende da σ (perché $1-R_v$ vale circa 2)
- è più intenso alle brevi distanze dalla antenna, dove gli effetti di eventuali ostacoli sono maggiormente deleteri
- per alte conduttività e a brevi distanze, può essere superiore alle Perdite nel suolo
- in genere dopo qualche km, è circa 6-10 dB inferiore alle perdite nel suolo.

3. Onda di Terra nei centri abitati che schermano la Vista dell'Antenna

Quando il Contributo Ottico viene a mancare, come si verifica nei centri abitati o a ridosso di ostacoli, l'Onda di superficie, oltre alle perdite nel suolo, subisce una ulteriore attenuazione che è il principale oggetto di questo contributo.

L'attuale discorso sul modello di generazione e di propagazione dell'Onda di superficie ha lo scopo di capire cosa succede quando questa Onda incontra paesi, città od ostacoli isolati e quale è l'entità delle conseguenti "Attenuazioni aggiuntive".

In quel che segue, per meglio capire come l'Onda di terra si comporta all'interno e subito dopo gli ostacoli è bene inoltre tenere presente che:

- mentre all'interno di una abitazione, o tra vari fabbricati, l'entità dell'attenuazione del campo misurabile dipende in modo imprevedibile dall'attitudine delle strutture circostanti ad assorbire e a reirradiare l'onda di terra da cui sono investite
- "nel suolo uniforme in assenza di ostacoli, i moti verticali degli elettroni, sempre in fase col raggio incidente, si possono anche pensare come tante antennine (sopra il terreno), alimentate con fasi del tipo cosiddetto end-fire."

Come è noto, un sistema direttivo di antenne end-fire consta di antenne equidistanti nella direzione di massima irradiazione, alimentate con intensità costante e ritardi di fase progressivi per ottenere segnali tutti in fase solo in direzione del massimo.

Con la precedente ammissione, quando ci si trova in un centro abitato, dove in genere non è presente il contributo ottico, succede che:

- i fabbricati (specie le strutture in cemento armato) e gli ostacoli locali vengono a far parte del suolo e sono perciò anch'essi percorsi dalle correnti verticali indotte dal raggio di terra;
- nei centri abitati le singole antenne e relative correnti dell'ipotetico sistema end-fire non possono però sempre avere la fase e la intensità teorica che avrebbero su un terreno regolare, perchè influenzate dalle correnti negli ostacoli.

Per questo motivo le correnti indotte a valle (nel senso della propagazione) ne risentono in modo negativo, tanto più che fino a quando non si esce dal centro abitato questo effetto va sempre più accentuandosi.

- E' quindi probabile che la Attenuazione Aggiuntiva che l'onda di terra subisce nei centri abitati sia "totalmente dovuta" al sistema di ipotetiche antenne end-fire non correttamente alimentate in fase e in ampiezza. Inoltre la deviazione dall'end-fire ideale, quando aumenta la conduttività o la frequenza, cresce leggermente, perché in tal caso le correnti nel suolo sono meno profonde e quindi contano maggiormente le perturbazioni dei fabbricati sovrastanti.

Inoltre, se l'analogia che fa riferimento a queste antenne è vera, diventa ovvio che tutto il sistema end-fire, che di preferenza irradia nella direzione radiale che si allontana dall'antenna reale, irradia anche in altre direzioni, in particolare in un settore di circa più o meno 10-15 gradi.

E' quindi ragionevole ritenere che il campo di terra che si propaga indisturbato ai lati degli ostacoli possa, irradiando in parte anche sui fianchi, aggirare lentamente l'ostacolo stesso e limitarne gli effetti negativi.

Si spiegherebbe così come il campo di terra "dimentica" quasi del tutto, dopo una certa distanza, l'azione schermante dei centri abitati.

Tutto il suddetto modo di ragionare vale statisticamente per interi paesi o città e per ostacoli o fabbricati isolati. Anche negli avvallamenti del suolo, dove avvengono come è noto attenuazioni aggiuntive, i fatti si spiegano con la non corretta alimentazione del sistema end-fire.

Dopo queste considerazioni iniziali restano da giustificare:

- le "entità delle attenuazioni" che il campo di terra subisce nelle vie e nelle piazze all'interno dei centri abitati, per effetto della suddetta oscillazione verticale degli elettroni e delle perturbazioni di fase e di intensità sulle antenne end-fire;
- a quale distanza dopo la città e con quale attenuazione residua il campo di superficie "dimentica" gli effetti negativi dei fabbricati.

4. Effetto schermante della città di Milano sui Campi di Terra di Mi 1 900 kHz e di Mi 2 1035 kHz

Un certo numero di misure molto utili al nostro scopo è fortunatamente stato fatto a cura della Rai presso i trasmettitori OM di Milano Siziano (900 kHz e 1035 kHz) all'inizio degli anni '90.

Queste misure a partire da Siziano sono state fatte in circa 130 punti prima della città di Milano, sui fianchi, all'interno e oltre la città stessa, fino a 20-25 km oltre Milano.

L'andamento delle linee di equal campo e.m. ottenuto dai risultati di queste misure è stato tracciato sui grafici delle figure 2 e 3, dove detti risultati sono stati leggermente modificati, come suggerirebbe una propagazione ideale e una distribuzione simmetrica e uniforme dei fabbricati, supponendo che il centro della città di Milano (ammessa di diametro 10 km) sia, come è grossolanamente in pratica, a 15 km da Siziano.

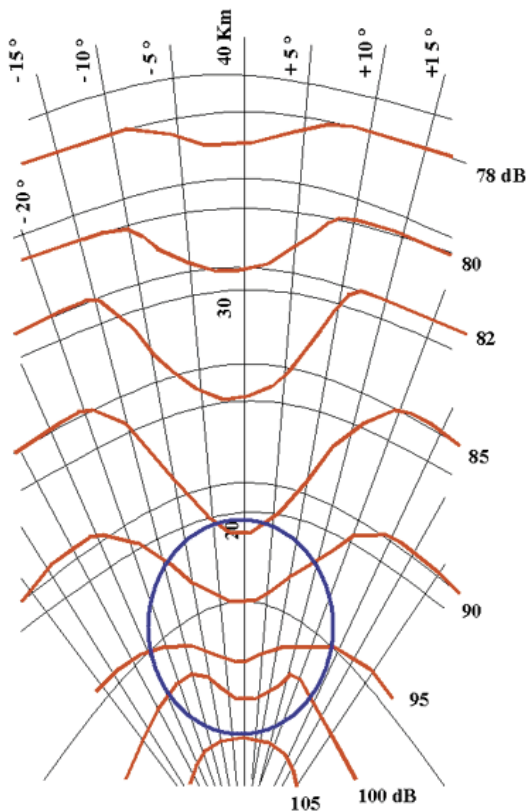
Da queste figure 2 e 3, oltre a intravedere grosso modo che l'Onda di Suolo lentamente raggiunge e dimentica gli effetti negativi dovuti alle strutture abitative di Milano, è stato possibile ricavare la figura 4.

Le curve di questa figura danno, per le frequenze, poco diverse, di Milano OM, le attenuazioni medie aggiuntive dovute alla città, alle varie distanze da Siziano, nelle direzioni passanti per il centro di Milano e per le altre direzioni laterali.

Dalle curve della figura 4, si può quindi concludere che:

- l'Onda di Terra subisce la attenuazione di circa 6 dB a partire da 2 fino a 6-7 km oltre il limite esterno della città
- all'interno di Milano città l'attenuazione varia da 3 a 5 dB circa
- da 8 a 15 km oltre la città, l'attenuazione a 0 gradi si riduce mediamente da circa 4 dB a 1 dB

Fig. 2 - andamento delle linee di equal cmap e.m. basati sulle misure (Milano Siziano, 900 MHz)



- al termine della città (tra 21 e 26 km da Siziano), entro un angolo di circa 7 gradi, si trova un'area chiusa in cui l'attenuazione raggiunge il valore massimo
- l'Onda di Terra "accercchia" mediamente, da ciascun fianco, la città di Milano di circa 1 grado ogni km.
- la città di Milano, ammessa del diametro di 10 km con centro a 15 km da Siziano, agli effetti della attenuazione aggiuntiva viene praticamente "dimenticata" dopo circa 25 km dal centro stesso (2.5 volte la dimensione trasversale dell'ostacolo).

5. Effetto schermante di una città o di un paese generico

Le suddette conclusioni, valide per i parametri che caratterizzano la città di Milano (conduttività σ , frequenza, dimensioni e distanza dal TX), possono essere generalizzate, con opportune e verosimili ammissioni, anche per:

- centri abitativi di diverse dimensioni, su terreni di varie conduttività e a differenti distanze dall'impianto trasmettente
- e per trasmettitori di diversa frequenza OM.

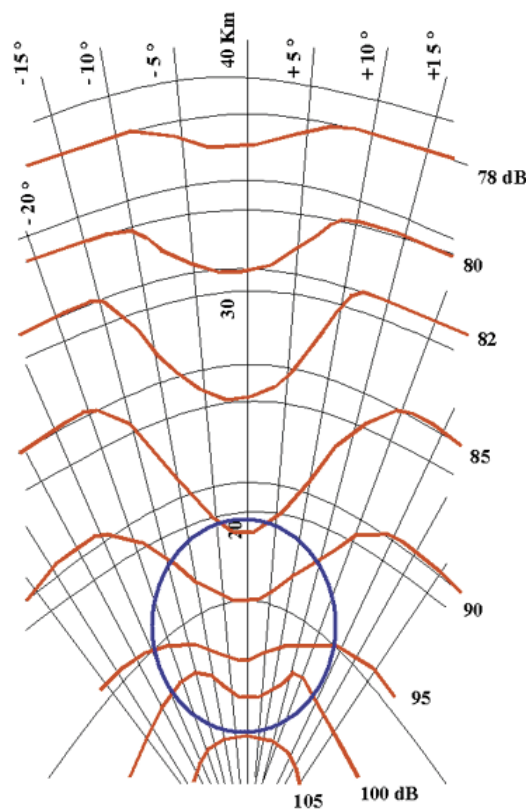
Premesso che nel caso generico:

- 1) sono noti σ del terreno, Frequenza TX, Diametro città, sua distanza dal TX e angolo da cui la città è vista dal TX e
- 2) deve essere calcolata la Attenuazione Aggiuntiva massima nella direzione del centro ostacolo e la distanza a cui questa si annulla, non le attenuazioni alle varie distanze e ai vari angoli dal centro città (o distanze trasversali dal centro ostacolo)

si tratta di ricavare l'analogo della figura 4, cioè una serie di valori delle attenuazioni aggiuntive, che applicati alle linee isocampo nell'area della città generica (ma in assenza della città stessa), diano i campi reali previsti per quella città.

Per estendere a casi generali le conclusioni ottenute per Milano, conviene esaminare uno per uno i vari parametri che caratterizzano la città generica. Cioè:

Fig. 3 - andamento delle linee di equal cmap e.m. basati sulle misure (Milano Siziano, 1035 MHz)



a) Distanza del centro città dal TX .

Occorre cambiare sull'asse delle ascisse, le distanze dal TX, che saranno ora graduate, oltre che in km, a volte anche in unità pari alla dimensione trasversale della città (indicata con Diametro), cittadina od ostacolo.

b) Diametro della città e fine delle Attenuazioni aggiuntive.

Occorre ammettere che, per città di dimensioni generiche, la fine delle attenuazioni aggiuntive dovute alla città o all'ostacolo, espressa in Diametri dal centro, sia data da una curva del tipo di figura 5. Da questa curva risulta, come è ovvio, che se il TX è lontano l'accerchiamento è più rapido e, se più vicino alla città, più lento o solo parziale.

c) Frequenza OM del TX.

Per città servite da TX di frequenze diverse da quelle di Milano (circa 1 MHz), è necessario tenere presente che nelle formule di Norton, che danno il campo di terra (al suolo e in quota), la frequenza F in MHz e la conduttività in milliSiemens/m sono legati dalla relazione (1):

$$2) 1 / u^2 = Epsr + j * 16 * \sigma \text{ (mS/m)} / F \text{ (MHz)}$$

Quindi, visto che per Milano $\sigma \text{ (mS/m)} / F \text{ (MHz)} = 3.5$ circa, in generale la correzione di frequenza equivale a sostituire il vero valore del σ locale con un valore del σ corretto a Freq. = 1 MHz:

$$\sigma_{\text{corretto}} = \sigma \text{ (mS/m)}_{\text{locale}} * \text{Freq(MHz)}_{\text{locale}}$$

Cioè se il σ locale è, per es., 12 mS/m e la frequenza è 1.5 MHz per la correzione di frequenza occorre considerare tutto come se la conduttività fosse pari a $12 * 1.5 = 18$ mS/m (e la frequenza 1 MHz, come a Milano).

d) Attenuazione Aggiuntiva e σ corretto.

Per terreni di σ corretto diverso da quello di Milano, occorre ammettere che la attenuazione aggiuntiva massima a 0 gradi sia dipendente da σ come indicato in figura 6: cioè che questa attenuazione da ostacoli cresca leggermente

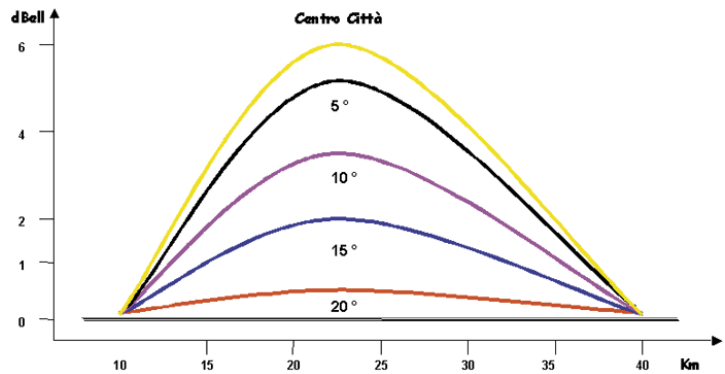


Fig. 4 - effetti della città di Milano sulla Propagazione dell'Onda di Terra, ricavati dalle misure sui campi di Mi 1 (900 MHz) e Mi 2 (1035 MHz)

con la conduttività del suolo cittadino (in tal caso infatti come già detto si riduce la profondità delle correnti verticali e quindi gli ostacoli sovrastanti sono più dannosi per le fasi e le ampiezze del sistema end-fire).

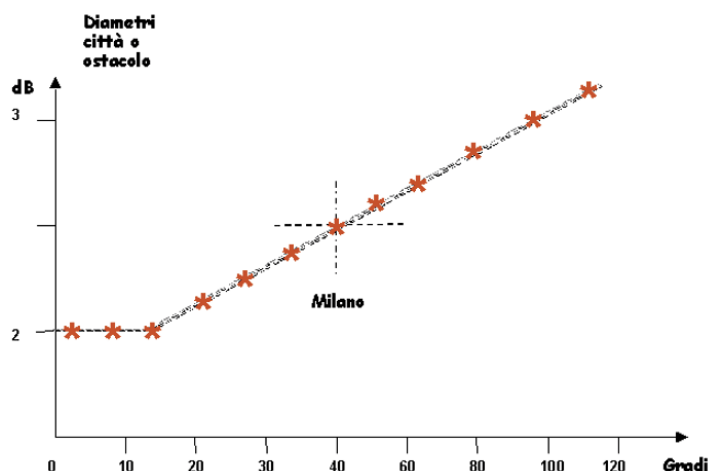
f) Attenuazione aggiuntiva ai lati del centro città

Dopo aver calcolato le suddette correzioni, attenuazione massima d) e distanza di fine dell'effetto città b), è necessario adattare opportunamente le varie curve in dB, valide per le direzioni ai fianchi del centro, della figura 4: il risultato finale sarà la figura 7.

Per ottenere questa figura occorre distinguere due casi:

- la città è vista sotto un angolo di almeno 10 gradi; in tal caso le curve di figura 4 (agli angoli 5, 10 gradi, ecc.) in figura 7 si adattano opportunamente (per es. agli angoli di 1, 2, 3 e 4 gradi, se l'angolo totale è 10 gradi).

Fig. 5 - andamento della Distanza dal centro città (od ostacolo) a cui cessa l'Attenuazione aggiuntiva, al variare dell'angolo da cui la città dal TX



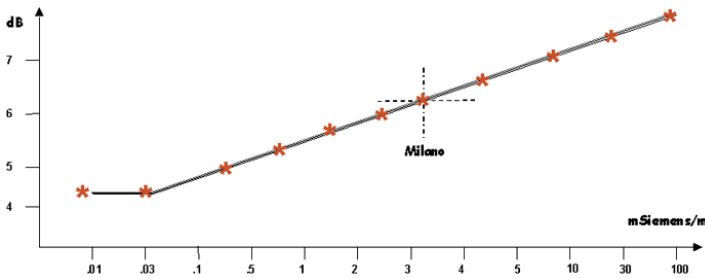


Fig. 6 - Andamento presunto in dB delle Massime Attenuazioni Aggiuntive al variare della conduttività del suolo

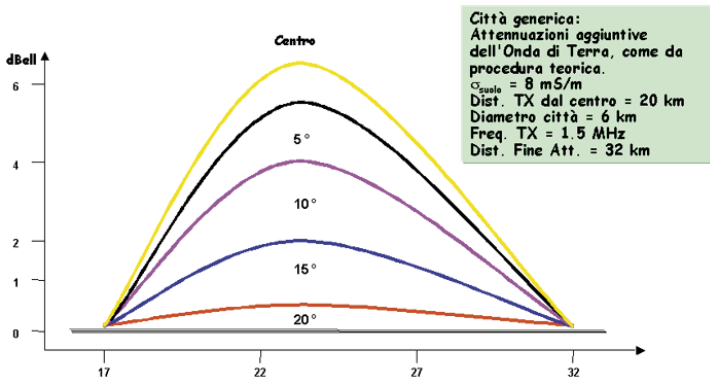


Fig. 7 - Città generica: Attenuazioni aggiuntive dell'Onda di Terra, come da procedura teorica.

$\sigma_{\text{suolo}} = 8 \text{ mS/m}$ Dist. TX dal centro = 20 km Diametro città = 6 km
Freq. TX = 1.5 MHz Dist. Fine Att. = 32 km

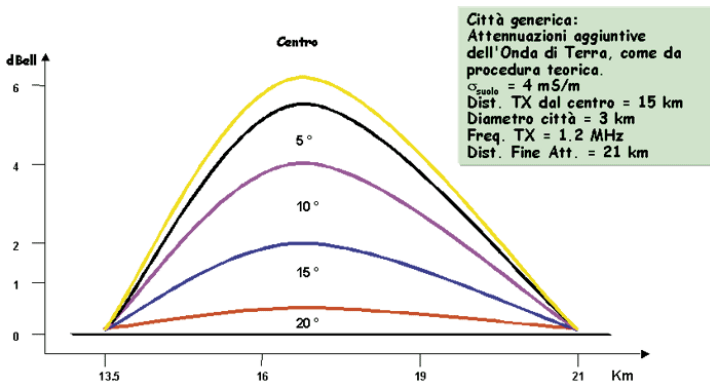


Fig. 8 - Città generica: Attenuazioni aggiuntive dell'Onda di Terra, come da procedura teorica.

$\sigma_{\text{suolo}} = 4 \text{ mS/m}$ Dist. TX dal centro = 15 km Diametro città = 3 km
Freq. TX = 1.2 MHz Dist. Fine Att. = 21 km

- la città o l'ostacolo sono visti sotto un angolo molto piccolo; in tal caso si divide la dimensione trasversale dell'ostacolo in 8 parti; al centro vengono assegnati i valori a 0 gradi e, agli spigoli esterni dei segmenti ottenuti,

le curve dedotte dai valori agli angoli di più e meno 5, 10, 15 e 20 gradi.

Riassumendo, nel caso generico, per ottenere il diagramma di figura 7 delle attenuazioni aggiuntive (analogo di figura 4 per Milano) occorre:

- tenere conto, sull'asse x, della distanza del centro città dal TX
- cambiare la conduttività reale σ (mS/m), per tener conto della diversa Frequenza, con il valore σ (mS/m) * Freq(MHz)
- ricavare dalla figura 6, con la conduttività corretta, la massima attenuazione aggiuntiva
- ricavare dalla figura 5, in base alle dimensioni della città e all'angolo sotto cui è vista dal TX, la distanza, espressa in Diametri dell'abitato, a cui cessa la attenuazione aggiuntiva e tenerne conto sull'asse x della figura 7.
- variare proporzionalmente le attenuazioni trovate per Milano, cioè le attenuazioni alle varie distanze dal TX e ai vari gradi dal centro (o alle varie distanze trasversali per il centro ostacolo).
- applicare le attenuazioni aggiuntive alle previsioni dei campi che si avrebbero in assenza della città, per ottenere le curve isocampo che tengono anche conto statisticamente delle attenuazioni cittadine.

In figura 7, come esempio, sono appunto riportate le attenuazioni, ottenute con la suddetta procedura, per una cittadina del diametro di 3 km, su terreno di conduttività circa 12 mS/m e con centro distante 20 km dal trasmettitore, di frequenza 1500 kHz.

La cittadina inizia quindi ad una distanza Start = 18.5 km dal trasmettitore ed ha sull'Onda di Terra una influenza negativa fino a circa 2 volte il suo diametro, cioè fino a circa 6-7 km oltre il centro della città.

In questo caso l'accerchiamento dell'ostacolo risulterebbe, da ciascun fianco, di circa 2 gradi ogni km.

Applicando le attenuazioni aggiuntive della figura 7, ai campi previsti per la città in considerazione, si otterrebbero le curve isocampo

attenuate, in città e fino a circa 7 km oltre.

Concludendo, la suddetta procedura facilmente computerizzabile, permette di ottenere, per centri abitati od ostacoli di dimensioni generiche, terreni di varia conduttività σ e TX di frequenza OM alle varie distanze, le attenuazioni dovute ad una città, ai vari angoli dalla direzione passante per il centro abitato (in figura 8 è riportato un altro esempio) e quindi le linee isocampo in città e oltre fino all'esaurimento delle attenuazioni aggiuntive.

In particolare risulta che:

- applicando le considerazioni precedenti, un paese del diametro di 1 km viene quasi dimenticato dopo circa 2 km.
- per un ostacolo isolato, l'effetto attenuativo dell'ordine di 6 dB, cessa dopo una distanza di circa 2 volte le sue dimensioni trasversali (figura 9).

Queste attenuazioni, per ostacoli isolati o piccoli paesini, di solito si inseriscono tra due linee isocampo con linee chiuse di valore inferiore.

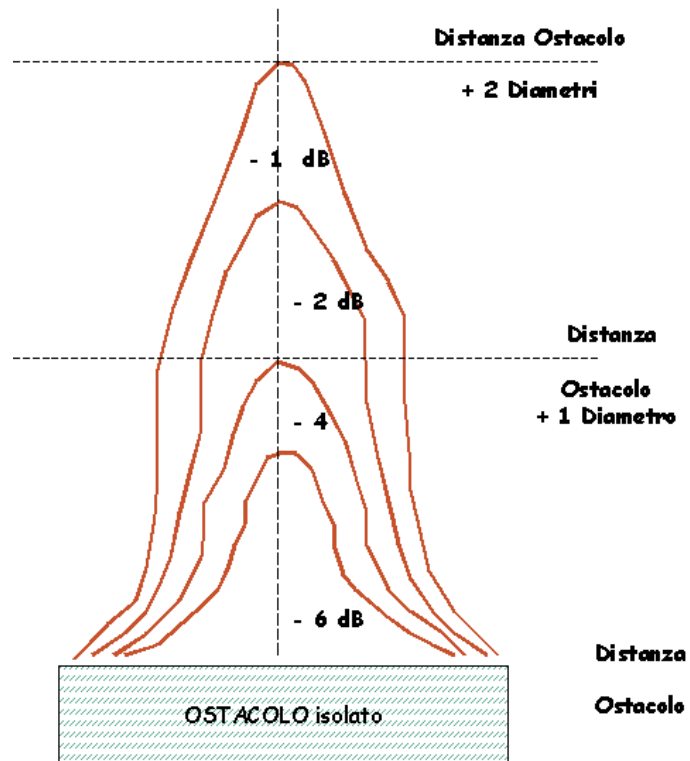
- se la città è vista dal trasmettitore sotto un angolo maggiore di 110-120 gradi, l'accerchiamento dell'ostacolo non può avvenire secondo le regole precedenti

Infatti, da altre misure effettuate sui campi di Milano 3 (130 misure sul TX di Vigentino 1538 kHz alla periferia Sud, da dove Milano è visto sotto un angolo di quasi 180 gradi), le attenuazioni aggiuntive massime in direzione centro di Milano sono risultate circa 13 dB.

Queste attenuazioni si riducono a 7 dB dopo 20 km dal TX e si stabilizzano a 2-3 dB a circa 40 km.

- infine per la validità della suddetta procedura è necessario che, sia la città di riferimento (nel nostro caso Milano) sia la città generica, siano su terreno praticamente pianeggiante e interamente su un suolo senza grandi sbalzi di conduttività.

Come ultima osservazione è bene ricordare che tutta la suddetta procedura trae la sua origine dai risultati delle misure presso Milano città. E' quindi ovvio che se si disponesse dei



risultati di analoghe misure in altri centri, le stesse precedenti considerazioni permetterebbero per altra via di prevedere le attenuazioni aggiuntive in oggetto.

Si potrebbero trovare, come è auspicabile, utili conferme circa la validità della procedura su esposta e verificare sperimentalmente la bontà delle ammissioni iniziali, espresse dagli andamenti delle curve di figure 2 e 3.

Fig. 9 - Tipiche attenuazioni dovute ad uno ostacolo isolato tra due linee isocampo

Bibliografia

- 1 K. A. Norton : Proc. I. R. E. Sept. 1937 The Propagation of Radio Waves over the Surface of the Earth and in the upper Atmosphere. Part II.
- 2 G. Gentile : Febbraio 2001 Propagazione dell'Onda di Superficie nelle Gamme OM e OL