

GLI EFFETTI DEI FENOMENI METEOROLOGICI

Esaminiamo i tutt'altro che trascurabili effetti provocati sui collegamenti a microonde da pioggia, neve, grandine e in genere da tutti quei fenomeni tecnicamente noti come "idrometeore"

DI MARINO RICCARDI

L' esigenza di sistemi di radiocomunicazione sempre più efficaci e capacità di trasmissione sempre maggiori ha spinto verso la utilizzazione di frequenze sempre più elevate. Sono ormai operativi diversi sistemi su frequenze oltre 10 GHz e vengono sperimentati sistemi anche a 20 e 30 GHz ed oltre.

Nei servizi di radiodiffusione è ben nota la necessità di trasferire con ponti radio l'informazione Radio/TV dal punto in cui questa viene generata ad altri punti, in cui la stessa può essere ulteriormente elaborata (collegamenti di contributo) oppure diffusa con trasmettitori circolari verso gli utenti (collegamenti di distribuzione). L'occupazione delle gamme inferiori, ormai sature, impone di utilizzare frequenze oltre 10 GHz. Inoltre queste frequenze sono utilizzate nei collegamenti di telecomunica-

zione con satelliti.

La propagazione di queste frequenze elevate, oltre a tutte le considerazioni generali sulla propagazione, già fatte su altri articoli apparsi su precedenti numeri di questa stessa rivista, richiede altre osservazioni particolari, come l'assorbimento di energia elettromagnetica dovuto alla risonanza dell'ossigeno e del vapore acqueo e soprattutto i fenomeni fisici che intervengono nella propagazione di un'onda elettromagnetica nella pioggia, che sono brevemente oggetto del presente articolo.

La propagazione delle radioonde oltre 10 GHz infatti può venire grandemente influenzata dalla presenza di idrometeore (pioggia, neve, grandine, nebbia, ecc.). In molte circostanze, come nei collegamenti Terra-Spazio, questa componente atmosferica può costituire il problema dominante.



In sintesi gli effetti più noti e rilevanti delle idrometeore, sulla propagazione delle onde centimetriche, sono:

- la attenuazione;
- la depolarizzazione;
- la interferenza da diffusione;
- il rumore.

Ognuno di questi effetti può essere studiato sotto due aspetti: quello fisico e quello statistico.

Lo studio fisico dei meccanismi di propagazione è relativamente agevole dal punto di vista teorico, ma presenta parecchie difficoltà per la applicazione pratica. L'aspetto statistico di questi problemi invece, an-

che se più aderente alla realtà per le sue applicazioni pratiche, è poco agevole, a causa della insufficiente conoscenza della struttura spaziale e temporale delle perturbazioni atmosferiche e soprattutto a causa delle grandissime difficoltà di descrivere eventi relativamente rari, sporadici e strutturalmente differenti, come i temporali.

Caratteristiche della pioggia

Senza entrare nei dettagli di tipo meteorologico, le precipitazioni si possono suddividere in:

- Piogge stratiformi, comuni nei climi temperati, caratterizzate da intensità massime di circa 20 mm/h, con altezza fino a 4-6 km ed estensione di alcune centinaia di chilometri. La loro durata può essere di parecchie ore.

- Piogge convettive. Sono quelle più interessanti dal punto di vista della propagazione. Sono le precipitazioni comunemente dette "temporali" e sono anch'esse caratteristiche dei climi temperati. Le piogge convettive si possono estendere in altezza fino a 10 km. Si presentano sotto forma di celle di pioggia locali di dimensioni ridotte e di forte intensità. Si possono raggiungere intensità di pioggia fino a 200 mm/h e anche oltre, ma per brevissime durate dell'ordine del minuto. Le dimensioni delle celle di pioggia intensa sono comprese tra 2 e 6 chilometri, di solito immerse in regioni di intensità di pioggia meno elevata di dimensioni fino a decine di chilometri.

Trascuriamo qui le piogge di tipo monsonico e di tipo tropicale, in genere di elevata intensità ed estensione, perché non interessano i climi temperati come il nostro.

Attenuazione da idrometeorore

Quando un'onda incide su una particella, questa diviene sede di un duplice fenomeno:

- diffusione di energia per reirradiazione;
- dissipazione in calore.

Viene quindi tolta all'on-

da incidente una certa quantità di energia, che normalmente viene considerata perduta agli effetti della trasmissione.

E' possibile considerare ogni particella come una minuscola antenna ricevente, con un'area equivalente C_e , di valore tale da tenere conto della potenza complessivamente tolta all'onda incidente. Quest'area equivalente può a sua volta venire scissa in due parti, C_s e C_a , quando si voglia tener separato il valore della potenza reirradiata e della potenza assorbita. Risulta così:

$$C_e = C_s + C_a$$

e complessivamente:

$$P_p \text{ (Potenza assorbita)} = (C_s + C_a) P_i \text{ (Potenza incidente)}$$

C_e viene detta sezione di estinzione;

C_s viene detta sezione di reirradiazione o "scattering";

C_a viene detta sezione di assorbimento.

Se si considera un'onda che incide su uno straterello di pioggia di spessore dz e di area unitaria, la potenza dP tolta all'onda, per ogni metro quadrato di superficie trasversa, sarà:

$$dP = P_i (\text{SOM } C_{ei}) dz;$$

ove la somma (SOM C_{ei}) va estesa a tutte le particelle i , di sezione di estinzione C_{ei} , contenute in un metro cubo e P_i è la densità di potenza incidente. La quantità (SOM C_{ei}) è la somma di tutte le sezioni di estinzione ed è una caratteristica della pioggia.

Essa rappresenta le proprietà statistiche della popolazione delle gocce, che non sono affatto tutte ugua-

li tra loro.

L'equazione differenziale prima scritta esprime una perdita di potenza percentuale costante per avanzamenti costanti lungo la direzione di propagazione. Essa è simile alla equazione che si trova per la propagazione nei cavi. Il suo integrale esprime il decadimento della potenza con legge esponenziale con esponente negativo.

Ossia l'attenuazione non è lineare con la distanza come nello spazio libero, nel senso che il segnale non si dimezza per ogni raddoppio della distanza, ma subisce invece un decremento esponenziale con la distanza stessa, esattamente come nei cavi coassiali.

L'attenuazione dunque viene espressa in dB al Km, e sulle grandi distanze con piogge intense può produrre attenuazioni intollerabili.

Noi non entreremo nel dettaglio della analisi statistica della struttura della pioggia, studiata da diversi autori. Sono state misurate in pratica le distribuzioni statistiche del diametro delle gocce.

Si è trovato che, usando campioni abbastanza vasti, una legge di tipo esponenziale è abbastanza bene adeguata per rappresentare i risultati ottenuti sperimentalmente.

Ci limiteremo solo a considerare che in estrema sintesi l'attenuazione specifica dovuta alla pioggia dipende dalla intensità di pioggia, alla quale sono legate le dimensioni delle gocce e le relative sezioni di estinzione. L'attenuazione dipende inoltre dalla frequenza e dalla polarizzazione dell'onda elettromagnetica.

Dal punto di vista pratico vengono rilevate sperimentalmente le statistiche di

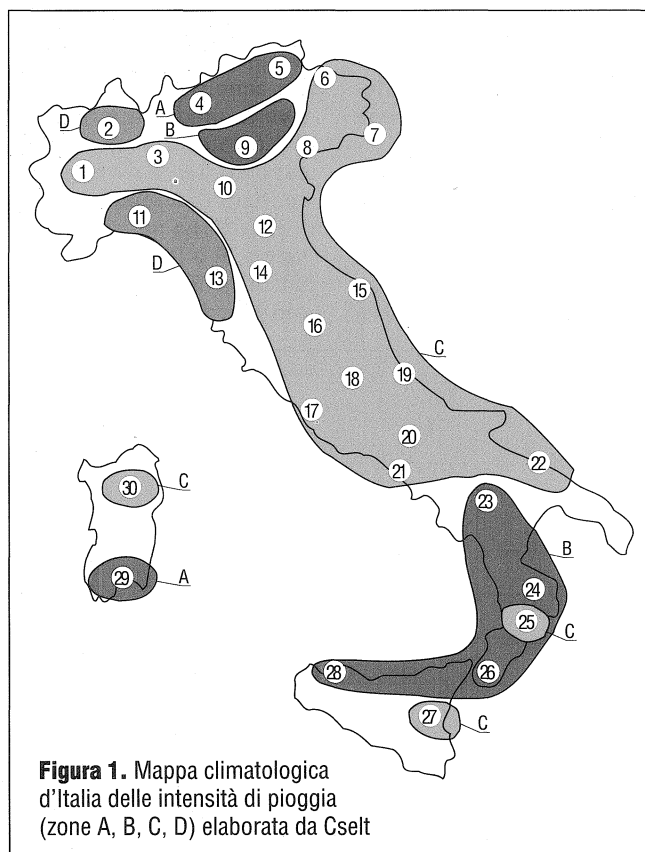


Figura 1. Mappa climatologica d'Italia delle intensità di pioggia (zone A, B, C, D) elaborata da Cselit

precipitazione mediante pluviometri, in modo da rappresentare l'effetto globale della pioggia, che a noi interessa in questa sede. Esse sono curve di distribuzione di probabilità della intensità di pioggia, come quelle indicate nella **figura n.2**. Ossia rappresentano la probabilità che una certa intensità di pioggia venga superata nel periodo di osservazione considerato, o per meglio dire rappresentano la percentuale del tempo totale di osservazione durante la quale ogni livello di intensità è stato superato.

Lo CSELT di Torino (Centro Studi e Laboratori di Telecomunicazioni del gruppo STET) ha raccolto i dati pluviometrici, disponibili in 30 località italiane presso i Centri Idrografici del Genio Civile (10 anni di dati per ciascuna località). Dall'analisi effettuata (relativa complessivamente a circa 6500 precipitazioni temporalesche) è emersa la possibilità di suddividere l'Italia in quattro zone pluviometriche, come mostrato in **figura n.1**.

Esse indicano le zone del nostro Paese che hanno le stesse caratteristiche dal punto di vista della pioggia, ossia quelle zone che sono rappresentate da una curva

media tipica di distribuzione della intensità di precipitazione. In particolare sui grafici della **figura n.2** sono state riportate queste curve medie di distribuzione statistica per le quattro diverse zone pluviometriche (A, B, C e D).

Da questo studio climatologico risulta che, come ben si può vedere sulla **figura n.1**, gran parte del territorio nazionale è caratterizzato da una ben determinata curva di distribuzione della intensità di precipitazione (curva C). Le intensità più elevate si verificano sul litorale tirrenico, da Genova a Pisa (curva D). Le intensità più basse invece sono caratteristiche di alcune zone alpine e della Sardegna (curva A).

A livello mondiale anche il CCIR (Comitato Consultivo Internazionale per le Radiocomunicazioni) riporta le diverse zone pluviometriche, sulla base dei dati sperimentali raccolti dai vari Paesi in parecchi anni di misure. Per ciascuna di queste zone il CCIR fornisce i livelli medi caratteristici delle intensità di pioggia, superati per le diverse percentuali di tempo.

Il CCIR ha poi calcolato i valori di attenuazione specifica, in dB/Km, dovuti alla pioggia, in funzione della

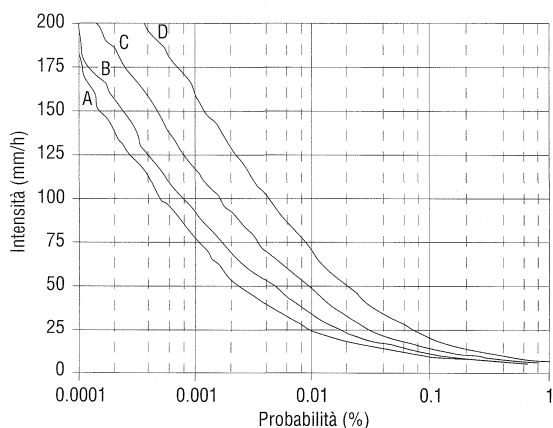


Figura 2. Curve medie delle intensità di pioggia nelle quattro zone pluviometriche d'Italia

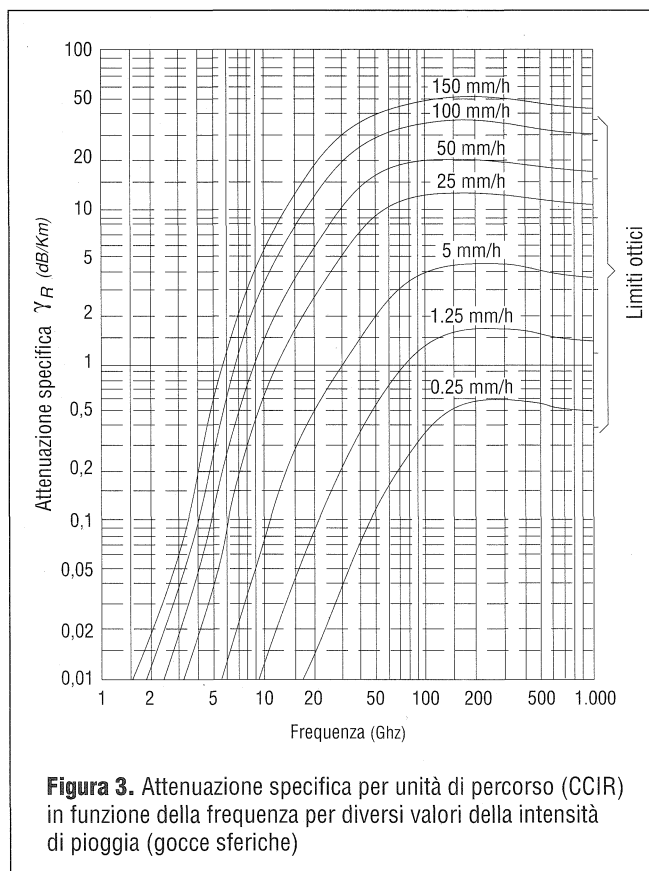


Figura 3. Attenuazione specifica per unità di percorso (CCIR) in funzione della frequenza per diversi valori della intensità di pioggia (gocce sferiche)

frequenza dell'onda elettromagnetica e per diversi valori della intensità di pioggia. Queste curve di attenuazione sono riportate nella **figura n.3**.

Su queste curve si può osservare che, per tutte le intensità di precipitazione, l'attenuazione aumenta rapidamente fino alla frequenza di circa 100 GHz. Oltre questo valore l'attenuazione non aumenta più sensibilmente.

Senza entrare nei particolari, possiamo cercare di spiegare qualitativamente il risultato prima ottenuto.

L'aumento di attenuazione con l'intensità di pioggia è dovuto all'aumento del numero di gocce per unità di volume ed all'aumento del diametro delle gocce stesse.

In una parola esso è dovuto all'aumento della quantità di acqua per unità di vo-

lume.

L'aumento della attenuazione con la frequenza deriva dall'aumento della sezione di estinzione delle gocce con la frequenza. Questa raggiunge un massimo tra i 100 e i 250 GHz, perchè a queste frequenze le dimensioni delle gocce sono paragonabili alla lunghezza d'onda (da 1 a 3 mm). Inoltre il massimo è più spostato verso le frequenze alte per le basse intensità di pioggia, perchè in tali condizioni il diametro delle gocce è generalmente più piccolo.

La validità delle ipotesi fatte dal CCIR per eseguire il calcolo della attenuazione per unità di lunghezza è stata accuratamente verificata da diversi autori su piogge reali e su piogge simulate.

Una importante limitazione dei risultati, esposti nelle curve sopra accennate, viene dal fatto che si suppo-

ne che le gocce di pioggia siano sferiche. Siccome le gocce di pioggia naturali non lo sono, ma sono invece schiacciate a forma di sferoide oblato con la dimensione maggiore in orizzontale, come mostrato nei diversi esempi della **figura n.4**, le onde a polarizzazione orizzontale subiscono una attenuazione maggiore delle onde in polarizzazione verticale.

Per i calcoli numerici, invece delle curve, con maggiore precisione si può utilizzare la formula seguente:

$$\gamma R = kR \alpha \text{ (dB/km)}$$

Sono stati calcolati i valori di k e di α in condizioni tipiche ed in particolare supponendo che le gocce di pioggia abbiano una forma elissoide appiattita in basso, con un asse di rotazione verticale e con lo stesso volume di gocce sferiche, di cui si conosce la distribu-

zione dei diametri. Questi valori sono riportati nella Tabella di **figura n.5**, per diverse frequenze e per polarizzazione orizzontale e verticale.

Nel caso di polarizzazione mista, oppure nel caso di polarizzazione circolare, si deve adottare una interpo-

lazione dei valori della tabella, relativi rispettivamente alla polarizzazione orizzontale e verticale.

Previsioni statistiche della attenuazione

Per calcolare l'attenuazione dovuta alla pioggia su un tragitto, si può integrare l'attenuazione specifica per unità di lunghezza, prima trovata, lungo tutto il tragitto. Bisogna però conoscere i valori puntuali di intensità di pioggia per ogni tratto elementare del percorso dell'onda elettromagnetica. Naturalmente questa conoscenza istante per istante e punto per punto non si ha. Si conoscono però in molti casi, come già visto, le statistiche della intensità di pioggia, misurate nel tempo, in diversi punti del territorio. E a partire da queste misure che si è cercato di prevedere le statistiche di attenuazione dovute alla pioggia su un determinato tragitto. Tutti i metodi di calcolo proposti determinano la attenuazione specifica per unità di lunghezza in funzione della intensità di pioggia, come

visto più sopra. Essi differiscono però nel modello utilizzato per descrivere la struttura spazio temporale della pioggia.

Il metodo del "temporale sintetico" ad esempio converte i profili intensità di pioggia/tempo, registrati in un punto, nei profili intensità di pioggia/distanza, come se la cella temporalesca traslasse per effetto del vento in quota al livello di 700 millibar di pressione atmosferica e le diverse intensità di pioggia, registrate nel tempo, corrispondessero alle diverse posizioni della cella temporalesca sopra il punto di misura. Naturalmente bisogna conoscere anche l'intensità e la direzione del vento, oltre a fare alcune ipotesi sulla forma della cella temporalesca. Questo metodo dunque, pur essendo molto vicino alla rappresentazione reale del fenomeno fisico, richiede una base di dati molto dettagliata.

Tutti gli altri metodi, compreso quello raccomandato dal CCIR, utilizzano la distribuzione cumulativa della pioggia misurata in un punto.

Il più semplice procedimento consiste nell'applicare

Frequenza (GHz)	K_H	K_V	α_H	α_V	Frequenza (GHz)	K_H	K_V	α_H	α_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880	40	0.350	0.310	0.939	0.929
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923	45	0.442	0.393	0.903	0.897
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075	50	0.536	0.479	0.873	0.868
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265	60	0.707	0.642	0.826	0.824
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312	70	0.851	0.784	0.793	0.793
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310	80	0.975	0.906	0.769	0.769
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264	90	1.06	0.999	0.753	0.754
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200	100	1.12	1.06	0.743	0.744
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128	120	1.18	1.13	0.731	0.732
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065	150	1.31	1.27	0.710	0.711
25	0.124	0.113	1.061	1.030	200	1.45	1.42	0.689	0.690
30	0.187	0.167	1.021	1.000	300	1.36	1.35	0.688	0.689
35	0.263	0.233	0.979	0.963	400	1.32	1.31	0.683	0.684

Figura 5. Tabella dei coefficienti k e α nella formula della attenuazione specifica dovuta alla pioggia

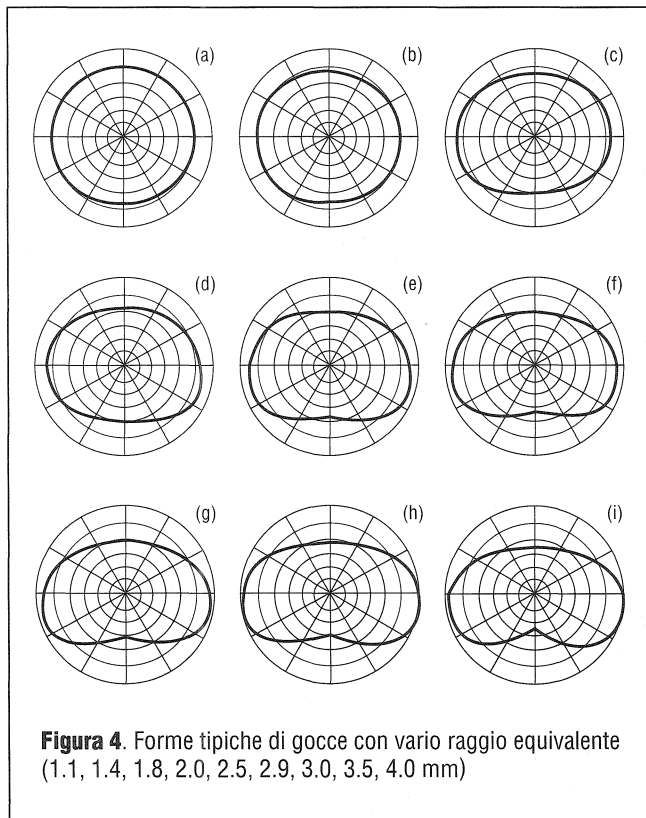


Figura 4. Forme tipiche di gocce con vario raggio equivalente (1.1, 1.4, 1.8, 2.0, 2.5, 2.9, 3.0, 3.5, 4.0 mm)

care il coefficiente di riduzione alla lunghezza reale del tragitto, in modo da ottenere una lunghezza equivalente per la quale l'intensità di pioggia rimane costante come nel punto di misura.

Questo coefficiente di riduzione, qualunque sia il modo in cui è applicato, è naturalmente funzione della intensità della pioggia, del tasso di probabilità considerato, della frequenza, del clima e della lunghezza del tragitto. Il modello considerato però fa alcune semplificazioni e suppone la dipendenza solo da uno o due di questi parametri (intensità di pioggia e lunghezza del tragitto).

Indicando con L la lunghezza geometrica del tragitto, la lunghezza equivalente L_e , sulla quale si immagina che sia costante la intensità di pioggia rilevata in un punto per lo 0.01 % del tempo, risulta:

$$L_e = \frac{L}{1 + 0.045 L}$$

Nel caso poi di previsione della attenuazione sui collegamenti Terra-Spazio, bisogna tener conto anche della struttura verticale delle precipitazioni, oltre che della loro struttura orizzontale, come nei collegamenti terrestri. Tutti i metodi di previsione della struttura verticale delle precipitazioni si basano sulla valutazione della altezza della pioggia, fondata sulla altitudine della isoterma a 0 gradi C.

In generale si suppone che l'intensità di pioggia sia costante tra il suolo e la sommità dello strato piovoso.

Attenuazione dovuta ad altre idrometeore

Sebbene la pioggia costituisca il tipo di idrometeore più importante, che influenza la propagazione delle microonde, è utile menzionare anche l'effetto dovuto alle nubi nei collegamenti Terra-Spazio, alla nebbia,

alla neve e alla grandine.

Nel caso delle nuvole e della nebbia, composte soprattutto di minuscole goccioline di diametro inferiore a 0.01 cm, si può esprimere l'attenuazione per unità di lunghezza in funzione del tenore totale di acqua per unità di volume.

L'attenuazione dovuta alla nebbia può diventare importante a frequenze superiori a 100 GHz.

Le nubi di ghiaccio, avendo caratteristiche differenti dalla pioggia, producono attenuazioni molto minori, a parità di contenuto di acqua.

La neve secca ha anch'essa poco effetto sulla propagazione, almeno a frequenze inferiori a 50 GHz.

Invece la neve bagnata può causare, in confronto a cadute di pioggia di uguale intensità, attenuazioni maggiori. L'esperienza ha mostrato però che questi fenomeni non hanno una importanza fondamentale rispetto alla statistica delle attenuazioni, perchè le nevicate molto intense sono molto più rare dei forti temporali.

Spesso il degrado delle caratteristiche del collegamento, dovuto all'accumulo della neve o del ghiaccio sull'antenna può essere più importante della intensità delle nevicate lungo il tragitto del collegamento. Almeno nella maggior parte dei climi che qui interessano.

Anche la grandine, nei climi che a noi interessano, non ha un effetto sensibile sulla statistica delle attenuazioni: meno dello 0.001 % del tempo totale dell'anno.

Altri effetti della pioggia

La pioggia, oltre alla attenuazione sul tragitto del collegamento, produce anche altri effetti, tra cui in

particolare si devono considerare la depolarizzazione dell'onda trasmessa, le interferenze e il rumore.

Esaminiamo prima la depolarizzazione.

Per aumentare la capacità dei collegamenti in ponte radio e via satellite, come ben noto, viene adottato il sistema del riutilizzo delle frequenze, sfruttando la direzionalità delle antenne e l'incrocio delle polarizzazioni (ossia da orizzontale a verticale e da circolare destra a circolare sinistra o viceversa). I limiti di questo sfruttamento intensivo dello spettro radioelettrico stanno nella imperfezione delle antenne e nel cambiamento di polarizzazione causato dalla propagazione.

Dei due fenomeni ci limiteremo qui a considerare la depolarizzazione causata dalla propagazione e in particolare quella dovuta alla pioggia sulle frequenze al di là di 10 GHz.

Quando due onde polarizzate ortogonalmente a e b sono trasmesse allo stesso livello in un certo canale, il rapporto tra il segnale copolarizzato (ac o bc) e il segnale cross-polarizzato o con polarizzazione incrociata (bx o ax), ossia ac/bx e bc/ax espressi in decibel, viene chiamato isolamento di polarizzazione incrociata (XPI). I due rapporti, prima indicati, non è detto che siano uguali.

Spesso invece di considerare le due onde a e b , polarizzate ortogonalmente nello stesso canale, si preferisce considerare una sola onda. In questo caso si definisce la discriminazione di polarizzazione incrociata (XPD), come il rapporto ac/ax sempre espresso in decibel.

Si è già visto che, quando il volume delle gocce aumenta, la forma delle gocce stesse passa da sferica ad

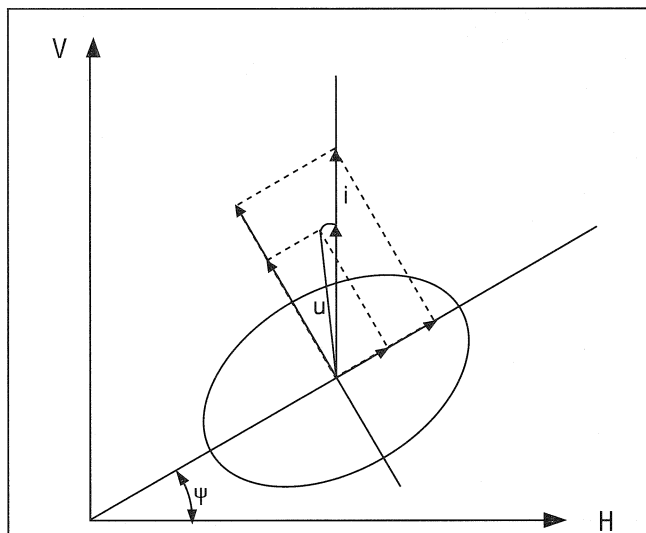
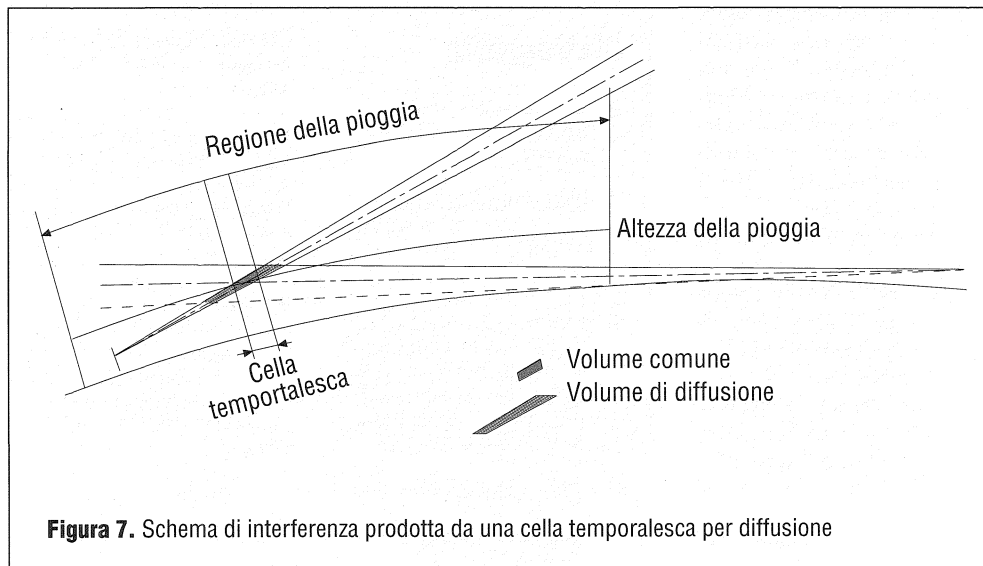


Figura 6. Rappresentazione schematica della depolarizzazione introdotta da una goccia ellissoidale con angolo di caduta ψ rispetto all'orizzonte
 i - polarizzazione dell'onda incidente
 u - polarizzazione dell'onda all'uscita



uno sferoide oblato, con la dimensione maggiore in orizzontale, fino a presentarsi una deformazione concava nella parte inferiore nel caso della dimensione massima delle gocce. Questo fa

sì che la componente di polarizzazione dell'onda secondo le dimensioni maggiori delle gocce sia trattata in modo diverso, per attenuazione e sfasamento, rispetto alla componente se-

condo le dimensioni minori delle gocce. Il risultato è che, quando un'onda elettromagnetica ha una polarizzazione non coincidente con gli assi delle gocce di pioggia, essa esce dallo strato piovov-

so con una componente di polarizzazione ortogonale a quella originaria, come mostrato nella **figura n.6**.

Consideriamo ora il peggioramento delle interferenze tra le stazioni terrestri e le stazioni spaziali. I meccanismi che causano questo peggioramento sono essenzialmente due.

La diffusione, causata dalla pioggia, su un segnale che attraversa l'atmosfera con un percorso inclinato, può investire un'altra stazione terrestre, estranea al collegamento spaziale, come mostrato in **figura n.7**.

Viceversa lo stesso può avvenire per stazioni di servizio fisso di collegamento terrestre sulla stessa banda, le quali possono produrre interferenze sulla ricezione del collegamento spaziale.

La attenuazione differenziale, dovuta alla pioggia,

tra due collegamenti Terra-Spazio, può peggiorare il rapporto di protezione in ricezione sul satellite. Infatti può succedere che il segnale utile, proveniente dalla stazione di Terra desiderata, subisca una forte attenuazione a causa della pioggia intensa, mentre il segnale interferente, proveniente da un'altra stazione, subisca una attenuazione molto minore a causa di una pioggia più lieve o addirittura in presenza di cielo chiaro.

Il meccanismo più importante, per l'interferenza dovuta alla diffusione della pioggia, si ha quando una cella temporalesca di grande intensità si trova nel volume comune individuato dai fasci della antenna trasmittente e della antenna ricevente interferita, come mostrato in **figura n.7**.

Consideriamo infine il problema del rumore.

Come è ben noto, oltre al rumore termico ed elettronico presente nelle apparecchiature, si deve considerare che una sensibile quantità di rumore può venire captata dalle antenne riceventi.

Trascurando qui il contributo di rumore dovuto alle sorgenti extraterrestri, in particolare il Sole, il rumore legato alla pioggia cresce con l'aumentare della attenuazio-

ne dovuta alla stessa pioggia. Infatti una antenna puntata verso un satellite riceve una quantità di rumore relativamente bassa quando il cielo è chiaro, mentre il rumore cresce quando tra Terra e satellite è interposta una cella temporalesca di forte intensità. In pratica mentre il cielo chiaro può essere assimilato a un "corpo nero" di bassa temperatura (meno di 100 gradi Kelvin) e dunque con basso rumore, quando vi si interpone la cella temporalesca carica di pioggia, praticamente l'antenna ricevente è puntata su un "corpo nero" quasi alla temperatura ambiente (circa 300 gradi Kelvin), dunque con rumore molto maggiore. Il collegamento spaziale risulta compromesso per due motivi: l'attenuazione del segnale e l'aumento del rumore.

Conclusioni

L'effetto della pioggia sui segnali a frequenza superiore a 10 GHz costituisce uno dei principali problemi nello studio della propagazione in questi ultimi anni. Lo stesso satellite Olympus lanciato dall'ESA, l'Agenzia Spaziale Europea, ha tra le proprie missioni lo studio della propagazione nella gamma

Bibliografia

- 1) M. R. Spiegel - "Probabilità e Statistica". Etas Libri. Milano.
- 2) CCIR - "Radiometeorological data". Report 563-3. Volume V. Dubrovnik, 1986.
- 3) CCIR - "Attenuation by hydrometeors, in particular precipitations, and other atmospheric particles". Report 721-2. Volume V. Dubrovnik, 1986.
- 4) CCIR - "Propagation data and prediction methods required for Earth-Space telecommunication systems". Report 564-3. Volume V. Dubrovnik, 1986.
- 5) CCIR - "Cross-polarisation due to the atmosphere". Report 722-2. Volume V. Dubrovnik, 1986.
- 6) E. Damosso - "Fisica della propagazione di onde elettromagnetiche nella pioggia". CSELT. Torino, 1982.
- 7) E. Damosso, S. De Padova - "Effetti delle precipitazioni atmosferiche su collegamenti terrestri a frequenze superiori a 10 GHz". CSELT. Torino, 1982.
- 8) E. Damosso - "Note aggiuntive sui criteri di calcolo dell'attenuazione del disaccoppiamento di polarizzazione e delle interferenze dovute a pioggia". CSELT. Torino, 1982.
- 9) A. Paraboni - "Antenne e propagazione". CLUP. Milano, 1980.
- 10) A. Paraboni - "Fenomeni di propagazione e scelta delle frequenze". Politecnico di Milano, 1988.
- 11) G. Pacini - "Collegamenti televisivi tramite satellite ECS di riserva". Elettronica e Telecomunicazioni n.3, 1983.

delle onde centimetriche.

I metodi di previsione della attenuazione dovuta alla pioggia, elaborati da diversi ricercatori e proposti dal CCIR, sono controllati sperimentalmente, verificando i calcoli con i risultati delle attenuazioni misurate.

In generale si nota un buon accordo tra le previsioni e le misure, soprattutto alle alte latitudini, quelle corrispondenti ai climi temperati della fascia settentrionale del Globo.

Sotto i 30 gradi di latitudine i vari metodi di previsione tendono a sovraestimare l'attenuazione più la latitudine diventa piccola.

Certamente la precisione dei calcoli di previsione dipende molto dai dati di partenza. Soprattutto dipende dalla conoscenza dettagliata delle caratteristiche pluviometriche della zona interessata dai collegamenti a microonde. Infatti l'esperienza

mostra che, se vengono adottate misure locali di intensità di pioggia, la precisione dei valori di attenuazione previsti è superiore a quella che si ottiene con dati meteorologici generali.

I vari metodi infine, va ricordato, forniscono valori di attenuazione sulla statistica a lungo periodo.

Quando si confrontano le previsioni con i risultati delle misure, bisogna tener conto anche della grande variabilità statistica che ci può essere da un anno all'altro.

L'EUTELSAT (il Consorzio Europeo per le Telecomunicazioni mediante Satelliti) nel calcolo del "link budget" si riferisce alla attenuazione supplementare dovuta alla pioggia per l'1% del mese peggiore, corrispondente a circa lo 0.25% dell'anno medio, e adotta i valori di attenuazione che sono riportati nella **Tabella 1**.



I VALORI DI EUTELSAT

Valori adottati da EUTELSAT per il calcolo delle attenuazioni supplementari dovuti a gas atmosferici e a pioggia nelle diverse gamme di frequenza, validi per 1% del mese peggiore, corrispondente a 0.25% dell'anno medio.

Gamma di frequenze [GHz]	Attenuazione a cielo chiaro [dB]	Attenuazione con pioggia [dB]
10.8 - 11.7	0.2	1.25
11.7 - 12.5	0.25	1.3
14	0.3	2.0
17.7	0.5	4.5

TABELLA 1