

**Appunti dal corso di
Sistemi di Telecomunicazione A.A. 2008/09
Prof. Mario Fossi**

8 - ATTENUAZIONE TROPOSFERICA

Come già precedentemente accennato, nella gamma delle microonde e particolarmente per frequenze superiori al GHz , la propagazione delle onde radio nella troposfera risulta soggetta a perdite (oltre a quelle di spazio libero e per questo motivo dette “supplementari”) dovute all'interazione dell'onda e.m. sia con alcuni tipi di molecole dell'atmosfera, precisamente vapor acqueo ed ossigeno (attenuazione gassosa), sia con eventuali idrometeore in essa presenti quali pioggia, neve, grandine, nebbia (attenuazione da idrometeore).

Come tendenza generale, tali perdite supplementari crescono al crescere della frequenza e in particolare quelle di tipo gassoso presentano dei picchi in corrispondenza di frequenze per le quali le molecole di acqua e ossigeno manifestano fenomeni di risonanza, ovvero assorbimento (e reirradiazione in forma di rumore, come già visto) selettivo con la frequenza.

Attenuazione gassosa

Come accennato, l'attenuazione introdotta dai componenti gassosi dell'atmosfera assume valori che dipendono in maniera notevole dalla frequenza di lavoro del collegamento radio. Senza entrare in un'analisi teorica del fenomeno, nella figura della pagina seguente (Raccomandazione ITU-R P-676) vengono riportati gli andamenti dell'attenuazione specifica sia delle molecole di ossigeno che di quelle dell'acqua, che sono i principali responsabili dell'attenuazione gassosa. Le condizioni di validità dei dati riportati sono quelle indicate nella figura. Nel campo di frequenze in esame, si osservano dei picchi di attenuazione attorno a circa $60\ GHz$ e $120\ GHz$ per quanto riguarda l'ossigeno ed attorno a circa 22 , 183 e $324\ GHz$ per quanto concerne l'acqua. Per le frequenze praticamente impiegate nelle radiocomunicazioni, hanno interesse i due primi picchi di assorbimento: quello dell'acqua a $22\ GHz$ e quello dell'ossigeno a $60\ GHz$. L'attenuazione gassosa complessiva risulta praticamente dalla somma dei due contributi evidenziati.

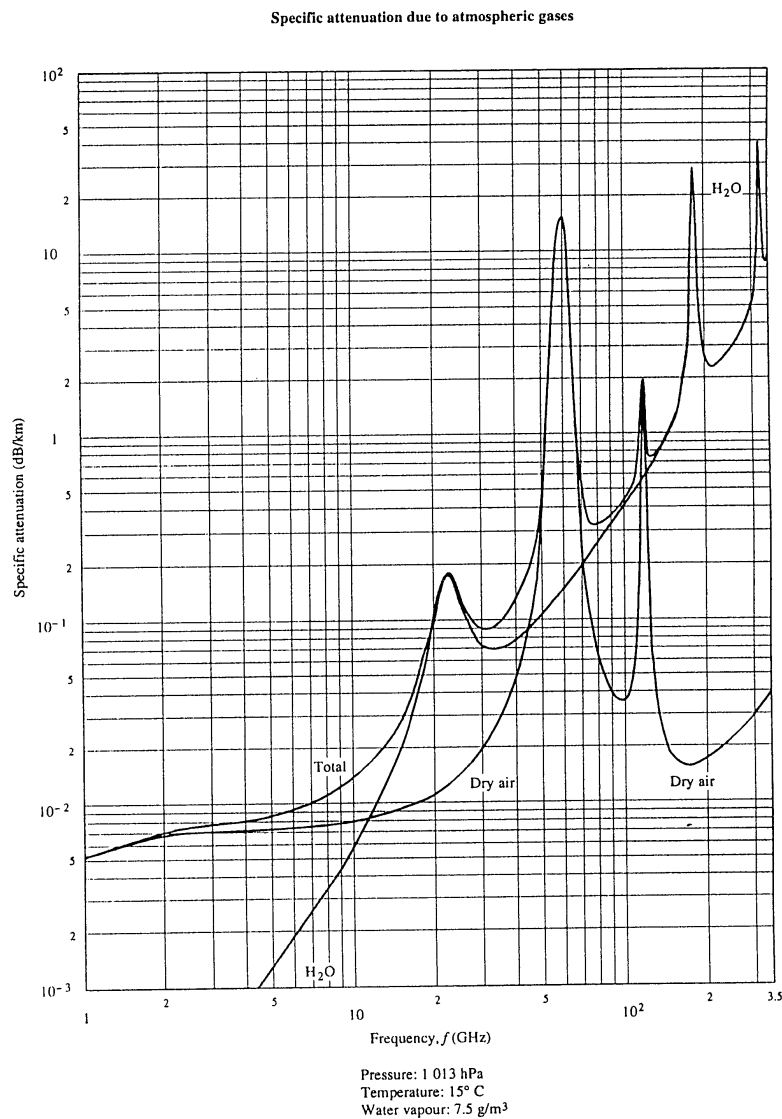
Per quanto riguarda il vapor acqueo, l'andamento riportato in figura risulta dalla seguente espressione analitica generale:

$$A_{H_2O} = \left[0,067 + \frac{2,4}{(f - 22,3)^2 + 6,6} + \frac{7,33}{(f - 183,3)^2 + 5} + \frac{4,4}{(f - 323,8)^2 + 10} \right] f^2 \rho \cdot 10^{-4} \text{ dB/km}$$

dove la frequenza f è espressa in GHz e ρ rappresenta la densità di vapor acqueo, espressa in g/m^3 .

L'espressione analitica riportata risulta utile in quanto il grado di umidità della troposfera varia significativamente con le condizioni climatiche generali, anche lungo una stessa tratta radio. L'effetto diretto della variazione della temperatura non risulta dalla formula riportata, in quanto trascurabile in prima approssimazione.

In base a queste curve e relative formule, è possibile calcolare in maniera semplice l'attenuazione gassosa per collegamenti di tipo terrestre.



Come considerazione di carattere generale, si osservano valori particolarmente elevati di attenuazione gassosa in corrispondenza della frequenza di risonanza dell'ossigeno (60 GHz). Tale frequenza non è quindi da impiegarsi (nell'ambito di collegamenti all'interno dell'atmosfera terrestre) almeno nel caso di collegamenti di lunghezze significative. Viceversa, può risultare vantaggioso l'impiego di tale frequenza per collegamenti a brevissima distanza, come ad es. accessi radio a reti locali (WLAN), in quanto da un lato l'attenuazione introdotta è sufficientemente piccola in relazione alla lunghezza della tratta (dell'ordine massimo di qualche decina di metri) e dall'altro il collegamento risulta isolato da altri collegamenti posti in prossimità che operino sulla stessa frequenza, i segnali dei quali vengono notevolmente attenuati. Peraltro la tecnologia a 60 GHz è attualmente ancora in fase di sviluppo, almeno per applicazioni a basso costo.

I grafici dell'attenuazione gassosa riportati non sono di immediata applicazione nel caso di collegamenti via satellite, a motivo del fatto che in tal caso il percorso dell'onda elettromagnetica attraversa tutta l'atmosfera terrestre, con conseguente variazione continua di pressione e umidità lungo la tratta. Per tali collegamenti può risultare più vantaggioso fare riferimento a grafici o tabelle relativi all'attenuazione complessiva dell'atmosfera terrestre reperibili in letteratura, come ad es. quelli riportati nel Testo “*Digital satellite communications*” suggerito nei riferimenti bibliografici del Corso.

Attenuazione da idrometeore

Consideriamo un'onda e.m. che si propaga in un dielettrico riempito di idrometeore. Ciascuna idrometeora sottrae energia all'onda e.m. che su di essa incide, per effetto di **2 meccanismi** distinti:

1. **scattering** (diffusione), cioè reirradiazione da parte della particella in molteplici direzioni spaziali rispetto a quella di provenienza dell'onda incidente (compresa questa, che costituisce il cosiddetto “*back-scattering*”). Per inciso tale componente è quella utilizzata dai radar meteorologici per la rilevazione delle idrometeore);
2. **assorbimento**, con conseguente riemissione di tipo termico.

Da un punto di vista formale, possiamo esprimere le potenze sottratte all'onda incidente sulla singola particella (idrometeora) mediante una relazione analoga a quella utilizzata per schematizzare un'antenna in ricezione: $P = \sigma S$, dove S indica la densità di potenza dell'onda incidente sulla particella, P la potenza “diffusa” oppure “assorbita” e σ un parametro, avente ovviamente le dimensioni di una superficie, detto “area equivalente” o anche “sezione equivalente”, di scattering σ_s , oppure di assorbimento σ_a della particella. Consideriamo ora l'insieme delle idrometeore (es. gocce d'acqua) che riempiono il volume entro cui si propaga l'onda e.m. e consideriamo in esso un piccolo volume $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ a forma di parallelepipedo.

Indichiamo con $\underline{S} = S(z)\underline{i}_z$ il vettore di Poynting dell'onda (localmente) piana che attraversa il suddetto volume ΔV .

Indicando con ΔP la potenza sottratta all'onda e.m. dalle idrometeore contenute nel volume ΔV , si può allora per quanto detto scrivere:

$$\Delta P = \sum_i (\sigma_{ai} + \sigma_{si}) S(z_i) = \sum_i \sigma_{ei} S(z_i), \text{ dove } \sigma_{ei} \stackrel{\text{def}}{=} \sigma_{ai} + \sigma_{si} \text{ si chiama sezione “di estinzione” della particella } i\text{-esima e la sommatoria è estesa a tutte le particelle contenute}$$

nel volume ΔV .

La variazione della densità di potenza dell'onda e.m., relativa alla distanza Δz , si esprime allora:

$$\Delta S(z) \stackrel{\text{def}}{=} S(z + \Delta z) - S(z) = -\frac{\Delta P}{\Delta x \Delta y} = -\Delta P \frac{\Delta z}{\Delta V} = -\Delta z \frac{1}{\Delta V} \sum_i \sigma_{ei} S(z_i) .$$

Con passaggio al limite, per $\Delta z \rightarrow 0$, $S(z_i) \rightarrow S(z)$ e possiamo scrivere:

$$dS(z) = -dz \left[\frac{1}{\Delta V} \sum_i \sigma_{ei} \right] S(z)$$

ovvero:

$$\frac{dS(z)}{dz} = - \left[\frac{1}{\Delta V} \sum_i \sigma_{ei} \right] S(z)$$

e ponendo per semplicità di scrittura:

$$k \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\Delta V} \sum_i \sigma_{ei}$$

si ottiene la seguente equazione differenziale del primo ordine:

$$\frac{dS(z)}{dz} = -k S(z) .$$

Nell'espressione di k , ΔV è da intendersi un volume statisticamente significativo del fenomeno in esame, ovvero un campione rappresentativo della popolazione di particelle considerata.

Se il fenomeno meteorologico che interessa la tratta radio considerata non è uniforme spazialmente, la costante k sarà in generale variabile con z : $k = k(z)$.

Integrando l'equazione differenziale $\frac{dS(z)}{dz} = -k(z) S(z)$ tra le ascisse z_0 e z si ha:

$$\ln S(z) - \ln S(z_0) = - \int_{z_0}^z k(z) dz$$

ovvero:

$$\ln \left(\frac{S(z)}{S(z_0)} \right) = - \int_{z_0}^z k(z) dz$$

da cui infine:

$$S(z) = S(z_0) \exp \left(- \int_{z_0}^z k(z) dz \right) .$$

Se in particolare $k(z) = k$:

$$S(z) = S(z_0) \exp \{ -k(z - z_0) \} = S(z_0) \exp \{ -k \Delta z \} \quad \text{con} \quad \Delta z \stackrel{\text{def}}{=} z - z_0 .$$

Scriviamo ora l'espressione generale dell'attenuazione specifica:

$$A \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{S(z_0)}{S(z)} \right|_{\Delta z=1} = e^k .$$

Espressa nelle unità pratiche dB/km , l'attenuazione specifica vale:

$$A_{dB/km} = 10 \log_{10} \left\{ \left. \frac{S(z_0)}{S(z)} \right|_{\Delta z=10^3} \right\} = 10 \log_{10} \{ e^{k \cdot 10^3} \} = 10^4 k \log_{10} e = 4343 k = 4343 \frac{1}{\Delta V} \sum_i \sigma_{ei} .$$

Espressione dell'attenuazione specifica nel caso di pioggia

Abbiamo visto come l'attenuazione specifica espressa in dB sia proporzionale all' "area equivalente complessiva" delle idrometeore per unità di volume:

$$k = \frac{1}{\Delta V} \sum_i \sigma_{ei} .$$

Riferiamoci ora in particolare al caso di **pioggia**. Da un punto di vista operativo, risulta più pratico esprimere l'attenuazione specifica tramite la distribuzione dei diametri delle gocce (o dei diametri equivalenti, dato che gocce con diametro maggiore di $0,35 \text{ mm}$ presentano una forma non più sferica, ma di "sferoide oblato": una specie di sfera schiacciata inferiormente a causa dell'attrito con l'aria durante la caduta). I diametri possibili variano tra un minimo di $0,1 \text{ mm}$ ed un massimo di $6-8 \text{ mm}$: infatti gocce con diametri inferiori a $0,1 \text{ mm}$ non cadono al suolo, mentre gocce più grandi di $6-8 \text{ mm}$ tendono a spezzarsi in 2 gocce più piccole.

Per facilitare il calcolo analitico, le DSD (*Drop Size Distribution*) utilizzate sono funzioni di tipo continuo dei diametri, anche se in realtà il fenomeno è di tipo discreto.

Indicando con $N(D)$ la distribuzione dei diametri delle gocce, allora $N(D) dD$ rappresenta il numero di gocce con diametro compreso tra D e $D+dD$ presenti nel volume di riferimento ΔV , ovvero il numero di gocce con tali diametri, per unità di volume.

Le unità pratiche in cui conviene esprimere la DSD sono $\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$.

Nota allora $N(D)$ e la sezione di estinzione in funzione del diametro $\sigma_e(D)$, l'attenuazione specifica si esprime:

$$A = 4343 \int_0^{\infty} \sigma_e(D) N(D) dD \quad \text{dB/km.}$$

L'integrale rappresenta una sezione di estinzione complessiva, per unità di volume.

Espressioni delle distribuzioni dei diametri delle gocce

Sono state condotte sia indagini di tipo teorico che misure sperimentali sulle distribuzioni dei diametri delle gocce di pioggia (DSD) delle precipitazioni. Il parametro **più significativo** da cui dipendono tali distribuzioni è rappresentato dal **tasso di precipitazione**, inteso come altezza raggiunta dallo strato di acqua caduta a terra nell'unità di tempo (misurato in m/s o meglio in mm/h).

La DSD dipende però anche da altri fattori secondari, non sempre trascurabili, quali il tipo di precipitazione piovosa, la regione geografica della Terra in cui avviene, la stagione, il momento considerato all'interno della durata della precipitazione.

A livello di tipo della precipitazione, alle nostre latitudini esse possono ricondursi sostanzialmente a due: stratiformi oppure convettive. Quelle stratiformi possono coprire aree geografiche anche molto estese, ma normalmente non assumono intensità molto elevate. Al contrario, quelle convettive sono localizzate in aree ristrette, hanno durate inferiori ma possono assumere intensità molto elevate, potendo così interferire pesantemente sull'efficienza di un collegamento radio a microonde.

Un modello di DSD storicamente molto utilizzato è quello esponenziale, introdotto da Marshall e Palmer nel 1948:

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad \text{con: } N_0 = 8 \cdot 10^3 \text{ m}^{-3} \text{mm}^{-1} \text{ e } \Lambda = 4,1 R^{-0,21} \text{ mm}^{-1}$$

dove R indica il valore del tasso di pioggia espresso in mm/h .

Questa distribuzione rappresenta peraltro un caso particolare di una forma più generale proposta da Ulbrich nel 1983:

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\Lambda D} \quad \text{con: } \mu \in [-3, +8] .$$

Nella figura della pagina seguente sono riportati gli andamenti della DSD secondo tale modello, in corrispondenza di 3 tassi di precipitazione, paragonati con i risultati analoghi suggeriti da Laws e Parsons (linea a tratti) e con una serie di osservazioni sperimentali condotte nella città di Ottawa (linee punteggiate).

Per una valutazione delle sezioni di estinzione $\sigma_e(D)$ delle gocce di pioggia, possono essere utilizzati i risultati teorici ricavati da Mie (nel 1908), relativi allo *scattering* da sfere. Una rappresentazione grafica di tali risultati, analiticamente molto complessi, è riportata nella figura della pagina seguente.

Risulta anche una notevole dipendenza della $\sigma_e(D)$ dalla temperatura.

Valutazione dell'attenuazione da pioggia

Sulla base di questi risultati, fissato un valore del tasso di pioggia R , risulta possibile - per ciascuna frequenza - integrare l'espressione dell'attenuazione specifica prima riportata, ottenendo una famiglia di curve a tasso di precipitazione costante, in funzione della frequenza di lavoro. Un esempio di tali curve è riportato nella figura della pagina 8.

Si osserva come in generale l'attenuazione causata dalla pioggia cresce al crescere della frequenza di trasmissione utilizzata, divenendo significativa a partire da frequenze dell'ordine del GHz . A parità di frequenza, cresce al crescere del tasso di pioggia. Ad esempio, considerando un tasso di pioggia pari a 50 mm/h , valore elevato ma che può verificarsi con probabilità non trascurabile, si osserva che esso genera un'attenuazione specifica di $0,1 \text{ dB/km}$ se si lavora a $f=5 \text{ GHz}$ (banda C), di $1,3 \text{ dB/km}$ se si lavora a 10 GHz (banda K_u) e di ben 10 dB/km se si lavora a 30 GHz (banda K_a). Si comprende bene quindi come specie i collegamenti radio in banda K_a siano pesantemente influenzati dal fenomeno della pioggia già quando essa interessa anche solo qualche km della tratta radio. E' questo uno dei meccanismi che penalizza maggiormente l'impiego di tali frequenze sia nei collegamenti radio terrestri che in quelli satellitari.

La famiglia di curve ricavata suggerisce una relazione tra attenuazione specifica e tasso di precipitazione, per ogni prefissata frequenza. L'espressione analitica di tale relazione può essere ricavata sia teoricamente, che anche sperimentalmente mediante campagne di misura sulle tratte radio e risulta del tipo $A = k R^\alpha$, dove i coefficienti k ed α dipendono dalla frequenza e dal tipo di polarizzazione dell'onda e.m.. A tale proposito, l'ITU-R (Raccomandazione P-838) fornisce la Tabella riportata nella pagina 9, dove al solito l'attenuazione è espressa in dB/km e il tasso di pioggia in mm/h .

I modelli di attenuazione illustrati fanno riferimento ad una trattazione **deterministica** del fenomeno. Ha interesse anche un approccio di tipo **statistico**, facilitato anche dal fatto che esistono a livello mondiale una notevole serie di dati medi statistici sul tasso di precipitazione annuo nelle varie zone della Terra. Sulla base di questi dati e della relazione vista tra tasso di pioggia a attenuazione, sono stati proposti in letteratura modelli statistici di tale fenomeno di attenuazione, i cui dettagli non possono essere approfonditi in questo Corso. A titolo di informazione, per quanto riguarda i collegamenti Terra-Spazio si può fare

riferimento alla Raccomandazione ITU-R P-618.

Un altro modello, valido anche per collegamenti terrestri, è quello proposto da Crane, una descrizione del quale è riportata anche nel testo citato “*Digital satellite communications*”.

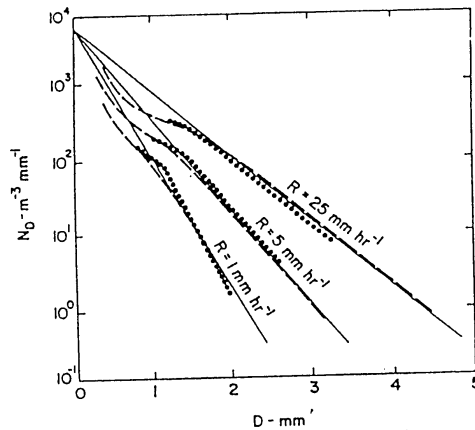


Fig. 4.4. Distribution function (solid straight lines) compared with results of Laws and Parsons (broken lines) and Ottawa observations (dotted lines). From Marshall and Palmer (1948).

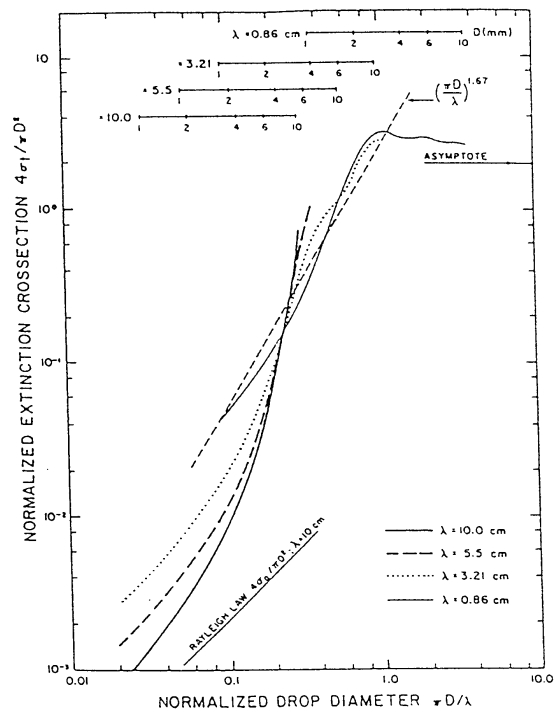


Fig. 8.11. The normalized extinction cross section versus normalized drop diameter for spherical water drops at a temperature of 0°C and at four wavelengths. (Data from Herman *et al.*, 1961.) The solid straight line is the asymptotic absorption cross section in the Rayleigh limit. The dashed straight line shows the power law for normalized cross section that fits the data at $\lambda = 0.86$ cm (see Section 8.4.2).

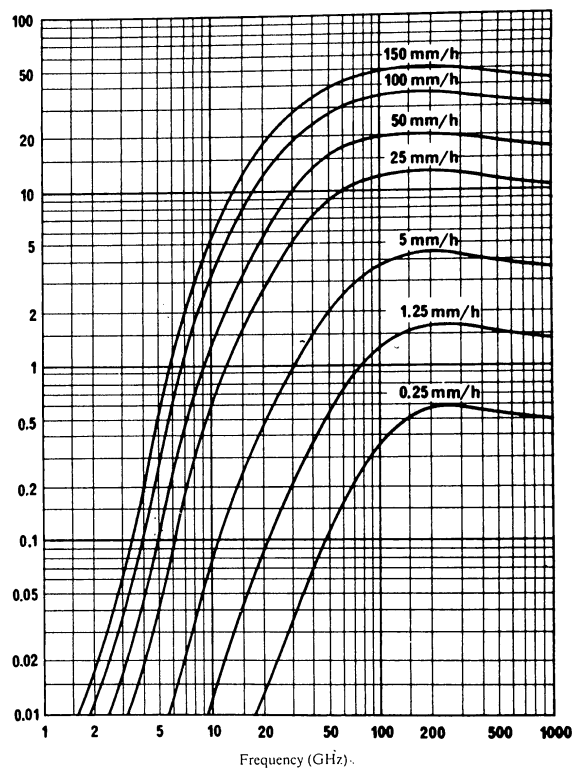


TABLE 1

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

Effetti dell'attenuazione da pioggia sulla temperatura di rumore d'antenna

Tra i vari tipi di idrometeore, risulta che la pioggia è quella che, sia statisticamente che in termini di valori di attenuazione introdotta, genera le maggiori degradazioni delle prestazioni dei collegamenti radio.

Come l'attenuazione da assorbimento gassoso ha come conseguenza anche un incremento del rumore esterno (il rumore da assorbimento atmosferico a suo tempo discusso), così avviene per l'attenuazione da idrometeore: la degradazione introdotta dalla presenza di pioggia non riguarda solo l'introduzione di una notevole attenuazione supplementare, come visto nel paragrafo precedente, ma in determinati casi - come ora vedremo - anche un incremento del rumore esterno captato dall'antenna ricevente: in quest'ultimo caso ambedue i fenomeni concorrono alla degradazione del rapporto segnale/rumore del collegamento radio.

Occorre quindi valutare gli effetti della pioggia sulla temperatura di rumore di un'antenna ricevente. Si ha che, per lunghezze d'onda superiori al *cm* (frequenze inferiori a 30 GHz), il contributo prevalente nel meccanismo dell'attenuazione risulta essere quello dell'assorbimento, rispetto allo *scattering*, per cui è possibile considerare tale attenuazione praticamente di tipo dissipativo e quindi generatrice di rumore termico. Possiamo allora valutarne gli effetti mediante il parametro temperatura equivalente di rumore.

Sotto questa ipotesi si può quindi valutare il contributo di rumore causato dalla pioggia alla temperatura di rumore complessiva di un'antenna ricevente, ricorrendo al modello di sistema 2-porte passivo già analizzato nel caso del rumore interno. Se allora indichiamo con A_p , T_p rispettivamente l'attenuazione dovuta alla pioggia che interessa il canale radio e la temperatura assoluta della massa piovosa, si può esprimere la temperatura di rumore di sistema, in presenza di pioggia, relativa ad un **collegamento Spazio-Terra** (per es. il *downlink* di un collegamento via satellite), nella forma:

$$T_{sys} = T_r + T_a' = T_r + (1 - \eta_a) T_{ant} + \eta_a \left[T_a + \left(1 - \frac{1}{A_p} \right) T_p \right] = T_{sys}' + \eta_a \left(1 - \frac{1}{A_p} \right) T_p$$

dove T_{sys}' indica la temperatura di sistema **in assenza** di precipitazione discussa a suo tempo e il termine $\left(1 - \frac{1}{A_p} \right) T_p$ rappresenta l'**incremento** ΔT_a della temperatura T_a , causato dalla presenza della precipitazione piovosa. In realtà l'incremento è un po' minore, in quanto esso avviene solo per il contributo di rumore proveniente dal cielo, mentre come abbiamo visto a suo tempo in T_a c'è anche un contributo di rumore del terreno, non influenzato dall'attenuazione piovosa.

Ai fini dell'impiego della formula riportata, l'ITU-R suggerisce per T_p valori compresi tra 260 e 280 K, un po' più bassi dell'effettiva temperatura dell'idrometeora pioggia, questo anche allo scopo di tener conto che in A_p c'è un piccolo contributo dovuto a *scattering*, che quindi non genera rumore.

A parte le considerazioni appena fatte, l'espressione scritta è praticamente esatta nella regione di frequenze al di sopra di qualche GHz (bande C, Ku, Ka), essendo a tali frequenze trascurabile il contributo di rumore galattico, rispetto a quello di assorbimento atmosferico, come visto a suo tempo, e tenuto conto che il fenomeno attenuazione da pioggia e il relativo rumore può considerarsi praticamente **additivo** rispetto a quello gassoso.

Come osservazione generale, si vede che in presenza di attenuazioni da pioggia non trascurabili, si possono avere significativi incrementi della temperatura T_a rispetto al caso

di assenza di precipitazioni. A titolo di esempio, per $A_p = 10 \text{ dB}$ e $T_p = 280 \text{ K}$ si ha un incremento $\Delta T_a \simeq 250 \text{ K}$, a fronte di una T_a valutata dell'ordine di 40 K in assenza di precipitazione.

Quanto finora detto è valido per antenne riceventi a terra di collegamenti spaziali. Invece, nel caso di un'antenna ricevente **a bordo del satellite** o anche di un'antenna ricevente di un **collegamento terrestre**, l'espressione da considerare è del tipo:

$$T_{sys} = T_r + T_a' = T_r + (1 - \eta_a) T_{ant} + \eta_a \left[\frac{T_a}{A_p} + \left(1 - \frac{1}{A_p} \right) T_p \right] \simeq T_{sys}'$$

dove come già detto T_{sys}' indica la temperatura di sistema in assenza di precipitazione.

Questo perché in questo caso il rumore esterno in assenza di precipitazione (contributo

T_a) è sostanzialmente quello generato dal terreno, il quale viene **attenuato** dalla precipitazione piovosa, inoltre possiamo supporre dello stesso ordine di grandezza sia T_p che T_a .

Riassumendo, possiamo quindi affermare che, a parità di attenuazione introdotta, la pioggia incide più pesantemente nei collegamenti Satellite-Terra rispetto agli altri in quanto in questo caso, oltre a decrementare come negli altri la potenza di segnale utile ricevuto, incrementa anche la potenza media di rumore con cui questo si confronta.

Da questo punto di vista, risulta anche giustificata per i collegamenti satellitari l'attribuzione della frequenza più bassa al *downlink*, in quanto a frequenze minori corrispondono attenuazioni supplementari da pioggia minori e quindi anche incrementi di rumore d'antenna minori.