2 ANÁLISE DO PROBLEMA DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS

2.1. Propagação nas faixas de microondas e ondas milimétricas

Os fatores que mais limitam a propagação em faixas de freqüência acima de 10 GHz são a absorção, o espalhamento e a refração devidos aos gases atmosféricos e hidrometeoros. A figura 2.1 apresenta um gráfico da atenuação específica (dB/km), em função da freqüência de propagação (GHz), para os casos de gases atmosféricos e hidrometeoros líquidos.

Nesta figura verificamos que a atenuação específica é fortemente dependente da taxa de precipitação e cresce rapidamente com a freqüência. Em enlaces terrestres extensos, ocorrem ainda outros efeitos tais como multipercurso atmosférico.



Figura 2.1 – Atenuação específica devida a gases atmosféricos e hidrometeoros.

2.2. Atenuação por chuvas

A atenuação por hidrometeoros é conseqüência do espalhamento e da absorção das ondas eletromagnéticas. A chuva provoca o efeito mais significativo na atenuação de ondas rádioelétricas para enlaces operando em freqüências superiores a 10 GHz. Um fator chave para determinação desta atenuação é o conhecimento da climatologia de precipitação da região em que o enlace está implantado.

A atenuação de uma onda que atravessa um meio com chuva é obtida pela soma das contribuições individuais das gotas presentes neste meio. Considerando que as gotas têm dimensões diferentes, a atenuação específica é calculada, de acordo com Brussaard e Watson [1], pela integração das contribuições de cada gota, como segue:

$$\gamma = 4,343 \int_{0}^{\infty} Q_{t}(D).N(D).dD$$
 [dB/km] (2.1)

onde:

Qt (D) [cm²] é a seção reta de espalhamento e absorção da gota de diâmetro D;

N(D) [m⁻³ mm⁻¹] é o número de gotas por unidade de volume com diâmetro entre D e D+dD;

A função Qt(D) é determinada teoricamente com base na teoria clássica de espalhamento de Mie, para freqüências superiores a 3 GHz, e pela aproximação de Rayleigh, para freqüências entre 1 e 3 GHz.

Para aplicações práticas, a relação entre a atenuação específica [dB/km] e a taxa de precipitação R [mm/h] adotada corresponde a uma aproximação da formulação descrita acima, proposta por Olsen et al. [2] e adotada como padrão pela Recomendação ITU-R P.838-1 [3]:

$$\gamma = k.R^{\alpha} \qquad [dB/km] \quad (2.2)$$

A determinação dos parâmetros k e α foi feita para freqüências entre 1 e 1000 GHz, considerando a forma das gotas como esferóides oblatos ou prolatos

Uma vez estabelecida a equação que relaciona a atenuação específica γ [dB/km] com a taxa de precipitação R [mm/h], resta calcular a atenuação em um determinado percurso L. Se a taxa de precipitação fosse constante ao longo do percurso, a atenuação seria dada simplesmente por:

$$A = \gamma L \qquad [dB] \qquad (2.3)$$

onde as unidades são: A[dB], γ [dB/km], L [km].

Como a intensidade da chuva varia no espaço e no tempo, a relação acima descrita não é válida em casos reais. Assim torna-se necessário integrar a atenuação específica ao longo do percurso que atravessa a estrutura da chuva. Por sua vez, a atenuação específica é função da taxa de precipitação ao longo do percurso:

$$A = \int_{0}^{L} k.R^{\alpha}(l).dl \qquad [dB] \qquad (2.4)$$

onde:

l é o comprimento medido a partir da antena ao longo do enlace, em km;

L é o comprimento do enlace que atravessa a estrutura de chuva, em km;

R é a taxa de precipitação ao longo do percurso, em mm/h.

2.3. Características da precipitação em climas tropicais

A estrutura espacial da chuva consiste de um conjunto de gotas de água que se estende horizontalmente por até alguns quilômetros e cujo limite superior é denominado altura de chuva. A célula de chuva é formada por um núcleo, onde ocorre a precipitação mais intensa e uma franja de precipitação mais moderada. A dimensão da célula cai com o aumento das taxas de precipitação observadas. Medidas realizadas com radares mostram que as dimensões das células de chuva intensa quando não aglomeradas em clima tropical varia entre 2 e 20 km. O tempo de vida de células de chuva individuais de chuva intensa é geralmente baixo, entre 10 e 20 minutos. Na região do Amazonas existem células aglomeradas de chuvas intensas que variam de 20 a 200 km e com duração de chuvas de horas a dia, conforme descrito por Houze [5,6].

A chuva pode ser classificada em dois tipos gerais: estratiforme e convectiva. As precipitações estratiformes se espalham por uma ampla região, persistem por longos períodos de tempo e têm intensidade da chuva média ou baixa, sendo resultado da formação de pequenas partículas de gelo nas camadas elevadas da troposfera. Ao cairem, estas partículas agregam-se umas às outras, formando núcleos cada vez maiores. Estes núcleos tornam-se instáveis e, ao passar por uma faixa de altitudes denominada camada de derretimento ("melting layer"), que se estende por cerca de 500 m a 1 km abaixo da isoterma de 0°C, transformam-se em gotas de chuva que se precipitam em direção à superfície da terra.

As precipitações convectivas estão associadas a nuvens formadas, em geral, acima da isoterma de 0°C, que são impelidas para cima por fortes movimentos de massas de ar devido a diferenças de pressão na troposfera. A chuva convectiva atinge intensidades bastante altas e há ocorrência de trovões e relâmpagos. Nuvens convectivas podem ocorrer individualmente ou, mais tipicamente, em grupos formando um conjunto de células. No pior caso, a estrutura da nuvem consiste em uma larga camada de nimbostratus com torres cumulonimbus acima desta camada. A distância média entre as torres é 20 a 25 km. Neste processo formam-se gotas de água que crescem de tamanho até o momento em que a força da gravidade as precipite em direção ao solo. As chuvas tropicais, em particular, são predominantemente convectivas, caracterizadas por altas taxas de precipitação que ocorrem geralmente em áreas pouco extensas e têm curta duração.

A característica da precipitação e a estrutura da célula de chuva, numa região tropical está detalhadamente descrito nos artigos de Houze [6,7] e Houze e

Shumacher [8]. Para a região Amazônica estudos detalhados são apresentados nos artigos de Negri et al. [9,11] e Anagnostou et al. [10].

A figura 2.2 representa a distribuição horizontal da chuva na região Amazônica, numa altitude acima de 2,0 km no dia 19 de dezembro de 1997 de 04:47 a 05:02 GMT. Esta distribuição foi obtida através de um algoritmo utilizando dados do radar do satélite Tropical Rain Measuring Mission (TRMM) e do sensor de infravermelho (IR) do satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). A região representada está localizada no noroeste do Brasil, a 500 km de Porto Velho, Estado de Rondônia, sobre o rio Amazonas.

A figura 2.3 apresenta a mesma imagem da figura 2.2 em três dimensões, permitindo uma visualização da estrutura da chuva convectiva. Esta distribuição de chuva é referente ao corte AB da figura 2.2. Os tons mais claros representam as partes excluídas devido a forte refletividade vinda da superfície. A existência de chuva convectiva chega a cerca de 16 km de altitude. Estas figuras confirmam uma atividade convectiva intensa na floresta Amazônica e foram obtidas pela National Space Development of Japan, Communications Research Laboratory e National Aeronautic and Space Administration (NASDA/CRL-NASA) [12].



Figura 2.2 – Distribuição da chuva horizontal na região Amazônica.



Figura 2.3 – Estrutura em 3D da chuva na região Amazônica: corte AB da figura 2.2

2.4. Dinâmica da chuva em regiões tropicais

A estrutura da chuva é variante no tempo e no espaço porque as células de chuva dividem-se ao cair e movem-se conforme a direção dos ventos. O comportamento temporal pode ser analisado com medidas utilizando pluviômetros, que registram pequenos intervalos de chuva intensa que ocorrem dentro de longos períodos de chuva fraca. A variação espacial pode ser observada com radares meteorológicos, que mostram pequenas áreas com altas taxas de precipitação no interior de áreas extensas onde ocorre chuva fraca.

De acordo com um estudo de estruturas de sistemas de mesoescalas convectiva feito por Houze [7], sistemas de nuvens mesoescalas convectiva produzem as chuvas intensas em latitudes médias. As figuras 2.4 a 2.7 representam a seqüência do desenvolvimento de um agrupamento de células de nuvens tropicais.

Na primeira fase ocorre apenas precipitação convectiva em forma de torre.



Figura 2.4 - Primeira fase: precipitação convectiva isolada em torre

Na fase madura, as células convectivas estão na região da área Ac e também se apresentam precipitações estratiformes. A precipitação estratiforme ocorre no nível médio da nuvem na área Ae e a área Ao, que corresponde ao nível superior da nuvem, cobre todas as áreas. As setas largas representam o sistema mesoescala, ou seja, condensação subindo e evaporação descendo. A faixa azul representa a faixa de derretimento, onde começa a precipitação estratiforme.

Segue-se uma fase de enfraquecimento, em que as células convectivas desaparecem e as precipitações estratiformes se enfraquecem. Nesta fase, ainda não se sabe se ocorre um sistema de mesoescala.

Finalmente, chega-se à fase de dissipação, em que as precipitações estratiformes desaparecem e a parte da nuvem superior torna-se fina e desmembrada.



Figura 2.5 – Fase madura em que a nuvem cobre a área Ag.



Figura 2.6 – Fase de enfraquecimento



Figura 2.7 – Fase de dissipação

Como visto anteriormente, a previsão determinística da atenuação por chuvas num enlace exigiria o conhecimento detalhado das variações da taxa de precipitação ao longo do percurso de propagação. A variação aleatória temporal e espacial da chuva, associada ao processo descrito acima, e a conseqüente dificuldade em se contabilizar o número de gotas existentes no percurso fez surgir o conceito de estruturas equivalentes de chuva. A modelagem destas estruturas pode ser feito definindo o comprimento equivalente da célula de chuva ou utilizando uma intensidade de chuva equivalente para representar a variação da taxa de precipitação no percurso. A maior parte dos métodos de previsão utiliza um modelo simplificado da célula de chuva para levar em conta, de forma estatística, a variação espacial e temporal de sua estrutura.

2.5. Análise estatística da atenuação por chuvas

A análise estatística das atenuações por chuvas num radio-enlace é baseada nas atenuações que são dependentes da freqüência do sinal transmitido e na climatologia do local do enlace. A série temporal obtida das atenuações por chuvas permite análises estatísticas tais como a obtenção de distribuições cumulativas de probabilidade da atenuação, caracterização da duração média de eventos, análise do tempo que separa dois eventos sucessivos, obtenção de distribuições cumulativas de probabilidade da taxa de variação da atenuação e análise do cruzamento de níveis para uma dada atenuação.

Para exemplificar os tipos de dados analisados e os tipos de resultados obtidos, a figura 2.8 apresenta a série temporal obtida com resolução de dois segundos para um sinal recebido, atenuado devido à chuva, no enlace Bradesco-Rua dos Ingleses na cidade de São Paulo no dia 12/02/1994. Estes dados experimentais são um exemplo dos resultados de medidas realizadas durante dois anos em São Paulo pelo Centro de Estudos de Telecomunicações da PUC-Rio. As características do enlace estão apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Característica do enlace terrestre.

Enlace	Freqüência	Comprimento	Polarização	Azimute	Duração
	(GHz)	(km)			
Bradesco – SP	14,5500	12,8	Horizontal	171°	2 anos



Figura 2.8 – Exemplo de sinal recebido no enlace Bradesco – RIS – SP no dia 12/02/1994

A figura 2.9 representa uma parte do período da figura 2.8 em que ocorrem atenuações por chuvas bastante acentuadas. Em azul vê-se as atenuações por chuvas excedida de 40 dB. A partir da análise destes eventos nos quais um determinado nível de atenuação é excedida são construídas as distribuições de número e duração de eventos.



Figura 2.9 – Exemplo de atenuação por chuvas expandida mostrando em azul a atenuação excedida de 40dB. Parte do período do tempo da figura 2.8.

A figura 2.10 representa a distribuição cumulativa de probabilidade da atenuação medida neste enlace num período de dois anos. A figura 2.11 representa a distribuição cumulativas de chuva da cidade de São Paulo obtida no mesmo período [13].



Figura 2.10 – Exemplo de distribuições cumulativas de probabilidades da atenuação por chuvas Enlace Bradesco-RIS.



Figura 2.11 – Exemplo de distribuições cumulativas anuais da taxa de precipitação por chuvas.

2.6. Análise estatística da taxa de variação da atenuação por chuvas

A taxa de variação das atenuações é expressa em dB/s. Normalmente os dados de medidas são analisados após um procedimento de filtragem das flutuações do sinal. Esta filtragem é aplicada para que efeitos de alta freqüência, tais como cintilações, que não estão associados à chuva, possam ser eliminados da análise.

A expressão básica para obtenção da taxa de variação da atenuação é dada por:

$$\zeta(i) = \frac{A(i) - A(i - t_a)}{t_a} [dB / s]$$
(2.5)

onde:

 $\zeta(i)$ – taxa da atenuação no instante (i), em dB/s;

A(i) – atenuação por chuva no instante (i), em dB;

ta – tempo de aquisição entre os valores subseqüentes da atenuação, em segundos.

A figura 2.12 representa um exemplo da série temporal da taxa de variação da atenuação, obtida de 2 em 2 segundos, sem filtragem, para o mesmo trecho de registro do exemplo apresentado na figura 2.8.



Figura 2.12 – Exemplo de taxa de variação da atenuação obtida de 2 em 2 segundos.

As análises estatísticas da taxa de variação da atenuação por chuvas permitem a obtenção de histogramas, densidade de probabilidades e da distribuição de probabilidades para determinado nível excedido de atenuação.

O conhecimento da taxa de variação da atenuação representa a base para a predição do comportamento da série temporal da atenuação. Modelos de predição podem ser usados em técnicas de compensação dos efeitos da atenuação, um resumo das quais está incluído no apêndice B.

As próximas seções apresentam dois estudos relativos a taxa de variação da atenuação realizados por outros autores. O apêndice C descreve aplicações dos modelos a enlaces tropicais.

2.6.1. Método da célula equivalente de chuva

Este método foi desenvolvido por Sweeney e Bostian [14]. O estudo baseia-se na obtenção da equação da taxa da atenuação através das equações da atenuação por chuvas e da hidrodinâmica do volume de chuva enchendo a primeira zona de Fresnel deste enlace terrestre.

A equação da taxa de variação da atenuação por chuvas obtida é função da taxa de precipitação, da característica do primeiro elipsóide de Fresnel e da

velocidade da gota de chuva que atravessa o enlace. Este modelo prediz que a taxa de variação da atenuação é mais sensível à velocidade da gota de chuva do que à taxa de precipitação propriamente dita, como indica a expressão obtida para a taxa de variação:

$$\frac{dA_D(t)}{dt} = 1.5.10^{-3} (kR^{\alpha}) v_D \left(\frac{b}{a}\right) \left[1 - \left(\frac{a - tv_D}{a}\right)^2\right] (dB/s)$$
(2.6)

onde:

- $\frac{dA_D(t)}{dt}$ taxa de variação da atenuação, em dB/s;
- AD(t) atenuação por chuvas em dB no instante (t);

k e α - parâmetros dependentes da freqüência do sinal obtidos na ITU-R P838 [3];

a e b – parâmetros do primeiro elipsóide de Fresnel em metros representada na figura 4.6;

vD – velocidade da gota de chuva em m/s;

R – taxa de chuva em mm/h;

t – tempo em segundos.

A figura 2.13 representa o primeiro elipsóide de Fresnel num enlace terrestre com um volume de chuva.



Figura 2.13 – Interseção da chuva com o primeiro elipsóide de Fresnel.

A figura 2.14 representa a taxa de variação da atenuação por chuvas obtida pela equação deste modelo (2.6) versus a velocidade da gota de chuva de 1, 2, 4 m/s, considerando a taxa de precipitação constante de 20 mm/h. Nos gráficos foram considerados: comprimento do enlace de 4 km e freqüência de 20 GHz.

Apesar da base física dos resultados de Bostian e Sweeney, o uso da velocidade da gota torna esta abordagem muito difícil de se realizar em condições reais. Por esta razão, a abordagem usada neste trabalho utilizará diretamente a série temporal de atenuação.



Figura 2.14 – Taxa de variação da atenuação por chuvas versus a velocidade da gota de chuva de 1, 2, 4 m/s para uma taxa de precipitação de 20 mm/h.

2.6.2. Distribuição de Van de Kamp

A formulação de Van de Kamp [15] permite obter a distribuição de taxa de variação da atenuação por chuvas condicionada a um determinado nível de atenuação por chuvas para enlaces terra – satélite, através das seguintes equações:

$$f(\varsigma/A) = \frac{2}{\pi \sigma_{\nu k} [1 + (\varsigma/\sigma_{\nu k})^2]^2} [(dB/s)^{-1}]$$
(2.7)

$$\zeta(i) = \frac{A(i+1) - A(i-1)}{\Delta t} [dB/s]$$
(2.8)

onde:

 $\zeta(i)$ – taxa de variação de atenuação por chuvas no instante (i), em dB/s;

A(i) – atenuação por chuvas no instante (i), em dB;

 $f(\zeta/A)$ – distribuição da taxa de variação de atenuação por chuvas condicionada a um nível de atenuação A, em s/dB;

 σ_{vk} – desvio padrão de Van de Kamp da taxa de variação por chuvas condicionada a um nível de atenuação A, em dB/s;

 Δt – tempo de aquisição entre as atenuações para obtenção da taxa, em segundos.

No modelo de Van de Kamp, o desvio padrão da taxa de variação por chuvas condicionada a um nível de atenuação A, é dado por:

$$\sigma_{vk} = s.F(f_c, \Delta t).A[(dB/s)]$$
(2.9)

$$F(f_c, \Delta t) = \sqrt{\frac{2\pi^2}{\left[\left(1 / f_c^b \right) + \left(2.\Delta t \right)^b \right]^{1/b}}}$$
(2.10)

onde:

s – parâmetro que depende da climatologia e ângulo de elevação da antena;

fc – freqüência de corte do filtro passa baixa, em Hz;

A – nível de atenuação, em dB;

 Δt – tempo de aquisição entre as atenuações para obtenção da taxa, em s;

 $F(f_{c},\Delta t) - função de ajuste;$

b – valor constante igual a 2,3;

 σ_{vk} – desvio padrão de Van de Kamp da taxa de variação por chuvas condicionada a um nível de atenuação A, em dB/s.

O parâmetro (s) para enlaces satélites localizados na Europa ou Estados Unidos com ângulo de elevação entre 10° e 50° é de 0,01.

A figura 2.16 representa as distribuições de Van de Kamp para taxa de variação da atenuação de enlaces de satélite – Terra na Europa, com freqüências

de 12GHz, 20GHz e 30GHz e condicionado a vários níveis de atenuação. Esta distribuição é simétrica em 0 dB/s.



Figura 2.15 – Distribuições de Van de Kamp da taxa de variação de atenuação de desvio padrão σvk (dB/s) condicionada a um valor de atenuação por chuvas.

Verifica-se, destas curvas, que a concentração de pontos perto da média tende a decair com a atenuação. Outro ponto importante é que as distribuições são condicionadas ao nível de atenuação, e não ao nível excedido de atenuação.