

1 Introdução

1.1. Caracterização do problema

As regiões mais baixas da atmosfera são as regiões onde ocorrem os fenômenos climáticos. As propriedades destas regiões são bastante variáveis, sujeitas a mudanças em períodos de horas, dias, meses e anos, e têm efeitos na propagação de ondas de rádio causando variações aleatórias de amplitude, fase, frequência, polarização e direção de propagação. Como as variações são aleatórias, o conhecimento das estatísticas de um ou mais destes efeitos pode ser necessário para o projeto de um sistema [01].

No caso de sistemas de comunicação sem fio operando em frequências superiores a 10 GHz, vapor de água e moléculas de oxigênio na atmosfera causam absorção do sinal enquanto nuvens e chuvas causam seu espalhamento. Todos estes fatores contribuem para aumentar as perdas ao longo do percurso do enlace reduzindo a magnitude do nível de sinal que chega ao receptor. A Figura 1.1 apresenta um gráfico que ilustra a relação entre estes fatores e a atenuação do sinal em função de sua frequência.

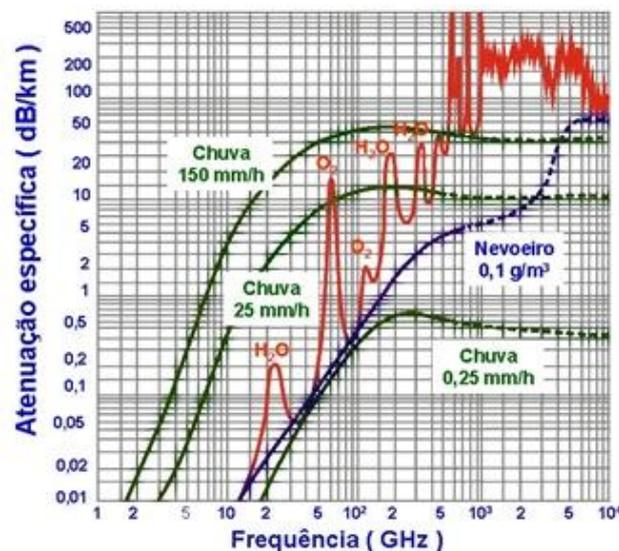


Figura 1.1 – Atenuação específica por chuvas, gases atmosféricos e vapor de água

É possível observar neste gráfico que a chuva, dependendo de sua intensidade, é o fator de maior impacto na propagação em frequências de até 500 GHz. Sendo assim, o projeto de sistemas de comunicação para regiões que são mais sujeitas a chuvas, como as regiões de clima tropical e equatorial, requer que as características da atenuação por chuva sejam conhecidas nestas regiões.

As estatísticas de atenuação por chuva, duração dos desvanecimentos e taxa de variação da atenuação (*fade-slope*) descrevem as características da atenuação de cada região e são importantes para o projeto dos sistemas de comunicações e de suas técnicas de mitigação de desvanecimentos (*fade mitigation techniques – FMT*) cujos algoritmos irão atuar em tempo real na tomada de decisão sobre a maneira de compensar os desvanecimentos que ocorrerem durante a operação do sistema.

As estatísticas de atenuação, em termos da probabilidade de que um certo nível de atenuação seja excedido, são importantes no projeto de um sistema de comunicação porque estão diretamente ligadas às especificações de disponibilidade do sistema. As estatísticas de duração de desvanecimentos permitem a obtenção de informações sobre o número de vezes de interrupção da operação do sistema e a probabilidade de que o sistema fique indisponível por um período de tempo maior que uma dada duração. No caso das FMTs, estas estatísticas permitem avaliar as durações de tempo em que o sistema permanecerá na configuração de compensação. Como os canais de propagação produzem erros em blocos, a duração dos eventos tem impacto direto na escolha dos códigos corretores de erros e dos esquemas de modulação [02]. A importância das informações sobre *fade-slope* é determinar a rapidez com que uma FMT precisa entrar em operação.

1.2. Objetivo

Séries temporais contendo dados experimentais de atenuação por chuva podem ser utilizadas para testar os algoritmos das FMTs, mas, se não existirem dados experimentais disponíveis, é possível utilizar séries temporais de atenuação por chuva que sejam sintetizadas a partir do conhecimento dos parâmetros do enlace e das características climatológicas da região de sua operação. Um

benefício da utilização de um sintetizador de séries temporais é que múltiplas séries podem ser sintetizadas.

Neste sentido, são objetivos deste trabalho: a caracterização do canal de rádio de enlaces terrestres localizados em uma região tropical, a área metropolitana de São Paulo, e operando em frequência acima de 10 GHz; a apresentação de modelos existentes de sintetização de séries temporais de atenuação por chuva; o estudo de um modelo que foi desenvolvido com base em dados experimentais de enlaces de comunicação via satélite em região de clima temperado; a aplicação do modelo para os dados experimentais dos enlaces terrestres e a proposta e a validação de modelos específicos para enlaces terrestres.

1.3. Estado da arte na sintetização de séries temporais de atenuação por chuva

Nos anos 80, Maseng & Bakken [03] propuseram um modelo estocástico para atenuação por chuva baseado na premissa de que a atenuação por chuva tem distribuição de longo prazo Lognormal e pode ser modelada por um processo de Markov estacionário gaussiano de primeira ordem. O modelo foi baseado em enlaces de comunicação por satélite localizados em regiões de clima temperado.

Em 2001, o modelo de Maseng & Bakken (MB) foi aplicado para a sintetização de séries temporais de atenuação por chuva por Audoire et al. [04]. No mesmo ano, Gremont [05] propôs uma generalização do modelo MB para enlaces de comunicação via satélite com diversidade espacial e Audoire [06] propôs com o apoio do grupo de pesquisas francês ONERA-CNES um aperfeiçoamento do modelo MB permitindo a sintetização de séries temporais de atenuação por chuva, cintilação ou ambas. A sintetização de séries temporais de atenuação por chuva através deste aperfeiçoamento do modelo MB, denominado *Enhanced Maseng-Bakken* (EMB), foi testada e teve uma metodologia de validação apresentada em [07].

Seguindo na mesma linha de considerar que a atenuação por chuva é um processo estacionário markoviano de primeira ordem e que a distribuição de atenuação por chuva é Lognormal, Carrie et al. [08] apresentou em 2009 uma proposta de modelo de canal derivada do modelo EMB para a sintetização de

séries temporais de atenuação por chuva para bandas Ku, Ka e Q/V. O modelo permite a geração sob demanda de eventos isolados de atenuação por chuva.

Em 2010, Rodrigues [09] propôs um modelo que utiliza a teoria de cadeias de Markov de 2 estados para modelar as transições numa série temporal entre períodos de céu claro e de chuva e gerar eventos sob demanda usando o modelo Lacoste-Carrie [08] para compor os períodos de chuva da série temporal.

Os modelos mencionados foram concebidos com base em dados experimentais de enlaces de comunicação via satélite localizados em regiões de clima temperado, exceto o modelo proposto por Rodrigues [09] cuja base de dados é composta por dados experimentais de enlaces satélite localizados em regiões de climas subtropical, tropical e equatorial no Brasil.

No caso de enlaces terrestres, Heder et al. [10] propôs em 2006 um modelo de sintetizador de séries temporais de atenuação baseado em cadeias de Markov de N-estados onde os estados são níveis de atenuação e as probabilidades de transição são determinadas pelas estatísticas de *fade-slope*. O modelo também foi concebido com base em dados experimentais de região de clima temperado, mas foi testado apenas para a característica estacionária da atenuação.

Em 2010, Andrade et al. [11] aplicou o modelo EMB para enlaces terrestres localizados em uma região tropical e propôs um modelo baseado em uma adaptação do modelo EMB, denominado TMB (*Terrestrial Maseng-Bakken*), que possibilita aperfeiçoar a sintetização nas atenuações mais altas.

1.4. Contribuições

A aplicação do modelo EMB aos enlaces terrestres é uma contribuição deste trabalho e possibilitou a proposta de um modelo (TMB) baseado em sua adaptação para enlaces terrestres localizados em regiões sujeitas a atenuações mais severas.

Também foi realizado um estudo sobre a modelagem das estatísticas da atenuação por chuva na região de São Paulo através de diferentes tipos de distribuição que mostrou que a modelagem tradicionalmente considerada a nível mundial utilizando a distribuição Lognormal não é a mais adequada para a situação analisada neste trabalho. Foi mostrado que as características da atenuação por chuva na região analisada variam conforme o período do dia e que apenas

uma parte do dia tem distribuição de atenuação por chuva que pode ser modelada por uma distribuição Lognormal.

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de um novo modelo de sintetização de séries temporais de atenuação por chuva baseado na modelagem estatística da atenuação por chuva através da distribuição Gamma.

Foi apresentado um estudo que indica a existência de uma relação entre a distância do enlace terrestre e o parâmetro que descreve as características dinâmicas da atenuação por chuva. Com base neste estudo uma proposta de modelagem desta relação foi apresentada, testada e proporcionou bons resultados.

Adicionalmente, é apresentado um estudo do canal e das influências de algumas características dos dados experimentais em sua caracterização.

1.5. Estrutura deste trabalho

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte em sintetização de séries temporais de atenuação por chuva e descreve com detalhes o modelo EMB para aplicação aos enlaces terrestres brasileiros.

O Capítulo 3 descreve o sistema de medidas que gerou os dados experimentais dos enlaces terrestres, apresenta as características dos enlaces utilizados no trabalho e os períodos a que se referem os seus dados e descreve as atividades de pré-processamento dos dados que são necessárias para retirar dados espúrios e inválidos.

As estatísticas da atenuação por chuva dos enlaces terrestres são apresentadas no Capítulo 4 e são comparadas em função das diferenças entre as características dos enlaces.

O Capítulo 5 apresenta a modelagem estatística dos dados experimentais dos enlaces terrestres através da aplicação do modelo EMB, propõe o modelo TMB como uma adaptação do modelo EMB para enlaces terrestres localizados em regiões sujeitas a atenuações mais intensas e apresenta estudos para modelagem das estatísticas de atenuação por chuva dos enlaces terrestres através de outras distribuições.

O Capítulo 6 apresenta a contribuição mais importante deste trabalho: propõe um novo modelo de sintetização de séries temporais de atenuação baseado na distribuição Gamma.

O Capítulo 7 apresenta e compara os resultados da aplicação dos três modelos, valida os resultados através de procedimentos recomendado pelo ITU e propõe uma forma de estimar o parâmetro dinâmico dos modelos em função da distância do enlace.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.