

1 Introdução

1.1. Descrição e motivação

As faixas de frequência acima de 10 GHz, sujeitas à atenuação por chuva, são muito utilizadas no acesso-rádio ao cliente (estação remota), numa configuração do tipo estrela, com enlaces convergentes a partir de uma estação nodal.

Durante a vida profissional na seção de projeto rádio da Embratel, observamos que o cálculo de indisponibilidade por chuva de enlaces-rádio era realizado de maneira pessimista, causando uma utilização relativamente ineficiente do espectro de frequências. No cálculo, considerávamos apenas a atenuação por chuva no enlace desejado, supondo que o enlace interferente não sofria atenuação. Evidentemente, este cálculo, embora pessimista, é simples.

A consideração de que a célula de chuva atenua ambos os enlaces (desejado e interferente) traz como consequência importante a possibilidade de redução do ângulo mínimo de projeto entre dois enlaces convergentes, permitindo o aumento da eficiência espectral. De fato, para aumentar a eficiência espectral, é necessário que o número de enlaces convergentes na estação nodal aumente, atendendo a um grande número de estações remotas, ou seja, que uma mesma frequência seja reutilizada o maior número de vezes possível neste conjunto de enlaces.

Considerando-se um modelo com dois enlaces convergentes (desejado e interferente), é conveniente reduzir o ângulo entre os enlaces. Tal redução angular causa dois efeitos opostos no valor da interferência, que afeta o enlace desejado:

- diminui a discriminação angular das antenas, na estação nodal. Isto causa um aumento de interferência no enlace desejado e, conseqüentemente, um aumento na sua indisponibilidade. Assim, considerando apenas este fator, haverá um determinado “ângulo mínimo de projeto”, correspondente a um objetivo de indisponibilidade;

- aumenta a probabilidade de que a célula de chuva, ao interceptar e atenuar o enlace desejado, também intercepte e atenuar o enlace interferente. Isto causa uma redução da interferência no enlace desejado e, conseqüentemente, da sua indisponibilidade. Este é um efeito benéfico, contrário ao anterior.

Então, ao considerarmos também a atenuação por chuva no enlace interferente, poderemos diminuir o “ângulo mínimo de projeto” entre dois enlaces; ou seja, aumentar o número de estações remotas atendidas por uma estação nodal.

1.2.

Métodos disponíveis na literatura para o cálculo da distribuição cumulativa de atenuação diferencial entre enlaces convergentes

Diversos métodos foram propostos na literatura para a determinação da distribuição cumulativa de atenuação diferencial entre enlaces convergentes. Uma classe de métodos pode ser considerada paramétrica [1]-[5]: supõem modelos para as funções densidade de probabilidade conjunta das atenuações nos dois enlaces, supostas correlacionadas, e da taxa de precipitação. Em seguida, determinam os parâmetros do modelo a partir da distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida e das características espaciais da estrutura da precipitação. Em seguida, a função densidade de probabilidade da atenuação diferencial entre os dois enlaces é determinada analítica ou numericamente [6]. As previsões dos métodos são, finalmente, comparadas com resultados de medidas realizadas [7], [8].

Modelos empíricos também são descritos na literatura [9]. Estes modelos baseiam-se em medidas da distribuição da atenuação diferencial em diversos pares de enlaces, bem como nas medidas da distribuição de atenuação por chuva de cada enlace. A predição baseia-se em expressão analítica cujos coeficientes resultaram de ajuste a dados experimentais.

1.3.

Cálculo da distribuição cumulativa da atenuação diferencial devida à chuva entre dois enlaces convergentes e sua aplicação no cálculo da indisponibilidade

Como principal objetivo deste trabalho, apresentaremos um modelo teórico para a determinação da distribuição cumulativa da atenuação diferencial devida à chuva entre dois enlaces convergentes operando em frequências superiores a 10 GHz. O desenvolvimento estende o modelo de Misme e Fimbel [10], que determina a distribuição cumulativa da atenuação devida à chuva em um enlace isolado de frequência de operação, comprimento e polarização conhecidos, a partir de dados radiometeorológicos da região (distribuição cumulativa da taxa de precipitação, bem como a variação do diâmetro da célula de chuva com esta taxa de precipitação), assim como de conceitos fundamentais da teoria das probabilidades.

O modelo que desenvolveremos aqui determina, inicialmente, a distribuição cumulativa conjunta das atenuações devidas à chuva nos dois enlaces, a partir dos mesmos dados e conceitos. Para tanto, realiza integração numérica de função que representa a razão entre a interseção das áreas de dois lugares geométricos e a área da base da célula de chuva, multiplicada pela função densidade de probabilidade da taxa de precipitação. A interseção das áreas de dois lugares geométricos é obtida por intermédio de procedimentos da geometria computacional, tais como determinação de pontos interiores a polígonos, interseções entre curvas elementares, ordenações de pontos e decomposição de polígonos convexos em figuras geométricas simples.

A partir da distribuição cumulativa conjunta, após manipulações matemáticas que evitam a necessidade de determinação da função densidade de probabilidade conjunta das atenuações, obteremos a pretendida distribuição da atenuação diferencial entre dois enlaces. Este modelo generaliza o trabalho apresentado por Stola [11], limitado à determinação da distribuição cumulativa da atenuação simultaneamente excedida em dois enlaces convergentes, também a partir dos procedimentos propostos por Misme e Fimbel.

As previsões do modelo serão comparadas com os resultados de medidas realizadas em lances operando na frequência de 15 GHz e convergentes na estação Rua dos Ingleses, São Paulo, Brasil [7] e com os resultados de medidas realizadas

em três lances curtos operando na frequência de 19 GHz e convergentes no Masashino Electrical Communication Laboratory (ECL), Japão [3]. Adicionalmente, serão analisados os efeitos da variação do ângulo entre os enlaces e do comprimento do enlace interferente sobre a distribuição cumulativa da atenuação diferencial.

Finalmente, a partir da distribuição cumulativa da atenuação diferencial devida à chuva entre dois enlaces convergentes, desenvolveremos metodologia para o cálculo da indisponibilidade, que foi a motivação inicial para este trabalho. Esta metodologia considera que a célula de chuva atenua ambos os enlaces (desejado e interferente). Será mostrado que, atendendo ao mesmo critério de indisponibilidade, este procedimento leva a uma utilização mais eficiente do espectro de frequências que o procedimento conservador, que considera apenas a atenuação por chuva no enlace desejado, supondo que o enlace interferente não sofre atenuação.

1.4. Descrição dos capítulos

Em seqüência à presente Introdução, no capítulo 2 apresentaremos breves descrições dos modelos citados na seção 1.2. Em seguida, no capítulo 3 apresentaremos o modelo de Misme e Fimbel [10] para a determinação da distribuição cumulativa da atenuação devida à chuva em um enlace isolado. Com base neste modelo original, apresentaremos, no capítulo 4, uma descrição detalhada do modelo teórico estendido para a determinação da distribuição cumulativa da atenuação diferencial entre dois enlaces convergentes. No capítulo 5, faremos a comparação entre as previsões do modelo e os resultados provenientes de medidas feitas pelo CETUC/PUC-Rio em enlaces convergentes da Embratel situados na cidade de São Paulo [7], [9] e pelo Electrical Communication Laboratories no Japão [1]-[3]. Adicionalmente, apresentaremos previsões do modelo para os efeitos das variações do ângulo entre os enlaces, assim como dos seus comprimentos, sobre a distribuição cumulativa da atenuação diferencial. No capítulo 6, indicamos como efetuar o cálculo da indisponibilidade do enlace desejado. Inicialmente, partimos da situação em que existem somente dois enlaces convergentes (descrita no capítulo 4), simplesmente calculando a

probabilidade da distribuição da atenuação diferencial entre os enlaces, para um determinado valor de atenuação. Em seguida estendemos o cálculo de indisponibilidade para outras situações. Apresentaremos observações finais e conclusões no capítulo 7.