



Teddy Modesto Surco Espejo

**Interferência Devida à Chuva em Ambientes
Urbanos na Faixa de Ondas Milimétricas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de
Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Coorientador: Prof. Luiz Alencar da Silva Mello

Rio de Janeiro

Abril de 2016



Teddy Modesto Surco Espejo

Interferência Devida à Chuva em Ambientes Urbanos na Faixa de Ondas Milimétricas

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Emanuel Paiva de Oliveira Costa, Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello, Coorientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Dr. Rodolfo Saboia Lima de Souza

INMETRO

Prof. Gláucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Dra. Marta Pudwell Chaves de Almeida

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial de Pós-graduação do CTC – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de abril de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Teddy Modesto Surco Espejo

Gradou-se em Engenharia de Telecomunicações na Universidad Católica Boliviana “San Pablo” UCB, (La Paz – Bolivia) em 2011.

Ficha Catalográfica

Surco Espejo, Teddy Modesto

Interferência devida à chuva em ambientes urbanos na faixa de ondas milimétricas / Teddy Modesto Surco Espejo; orientador: Emanuel Paiva de Oliveira Costa; co-orientador: Luiz Alencar da Silva Mello. – 2016.

114 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) –Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Espalhamento. 3. Interferência. 4. Chuva. 5. Ondas milimétricas. I. Costa, Emanuel Paiva de Oliveira. II. Mello, Luiz Alencar da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Aos meus queridos pais, Modesto e

Hilda, meus irmãos Bladimir,

Yuly e Mijail e sobrinhos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me acompanhar e guiar ao longo da minha vida toda, por ter sido a minha força em tempos de fraqueza e por me brindar uma vida cheia de aprendizagem, experiências e acima de tudo de felicidade. Pela grande generosidade para comigo, permitindo-me realizar meus sonhos.

Aos meus professores, Emanuel Paiva de Oliveira Costa e Luiz Alencar da Silva Mello por todo o suporte oferecido, pela confiança em mim depositada, pelas valiosas sugestões e críticas que me deram durante o período de elaboração desta dissertação.

Agradeço ao meu pai Modesto e a minha mãe Hilda, por todo apoio, pelos valores que me transmitiram, por todo o esforço, empenhado á minha educação e incentivo durante estes anos e pelas palavras de conforto nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos: Juan Carlos, Bladimir, Yuly, Mijail e meus sobrinhos Iker, Ariel, Fabiola e Priscila, pela compreensão com respeito a minha ausência e por todo o amor que nos une. Amo vocês!

Aos meus amigos, Carlos, Marcelo, Mauricio, Andy, Lisseth, Roxana, Keyla, Fátima e todo o CETUC, por ser parte importante da minha vida, e por fazer o papel de uma família em todo momento, obrigado pelo apoio, compreensão e, acima de tudo, amizade, pelas palavras de apoio e pelo grande carinho.

À CAPES pelo apoio financeiro oferecido durante toda esta etapa.

Ao Brasil país maravilhoso e a sua gente que sempre me fez sentir em casa.

Resumo

Surco Espejo, Teddy Modesto; Paiva de Oliveira Costa, Emanuel. **Interferência Devida à Chuva em Ambientes Urbanos na Faixa de Ondas Milimétricas**. Rio de Janeiro, 2016. 114p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A demanda pela transmissão de dados envolvendo aparelhos celulares continua crescendo a um ritmo acelerado. Este crescimento implica que, dentro das próximas décadas, redes celulares precisariam atender até 1000 vezes a capacidade atual. Para enfrentar este desafio, existe um interesse crescente em sistemas celulares operando na faixa de ondas milimétricas. O espectro de ondas milimétricas varia entre 30 GHz e 300 GHz, mas as faixas de frequências de 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz a 90 GHz parecem especialmente promissoras para a próxima geração de sistemas celulares, permitindo a utilização de larguras de canais superiores a 1 GHz. Durante a propagação em ligações de rádio terrestres ou via satélite na faixa das ondas milimétricas, ocorrem atenuações do sinal devidas à absorção e espalhamento causados por partículas atmosféricas e por hidrometeoros. O espalhamento produzido na faixa das ondas milimétricas pode ocasionar interferências cocanal entre sistemas fixos ou entre células de comunicações móveis vizinhas. A interferência devida ao espalhamento pela chuva ocorre quando a energia eletromagnética transmitida por uma antena é interceptada por uma célula de chuva. Isto causa espalhamento lateral do campo incidente, convertido em um sinal interferente que possivelmente será recebido por antenas de outros sistemas fixos ou de outra célula do sistema móvel. Isso afetará a relação (S/I) entre as potências dos sinais desejado e interferente no receptor. Nesta dissertação, será proposto um modelo de previsão de interferência pelo espalhamento devido à chuva baseado na Recomendação ITU-R P.452-16. Este modelo será aplicado na determinação da função distribuição cumulativa da relação (S/I) em áreas urbanas de estruturas realísticas regulares ou irregulares na faixa de ondas milimétricas.

Palavras-chave

Espalhamento; interferência; chuva; ondas milimétricas.

Abstract

Surco Espejo, Teddy Modesto; Paiva de Oliveira Costa, Emanoel (Advisor). **Interference Due to Rain in Urban Environments for Millimeters Waves**. Rio de Janeiro, 2016. 114p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the recent years, the demand for data transmission over the cellular network has been growing at a fast pace. This growth implies that in the next decades, the cellular network will need to provide 1000 times the existing capacity. To meet this challenge, there is an increasing interest in the development of cellular systems operating at millimeter waves. The corresponding frequency spectrum range from 30 GHz to 300 GHz. In particular, the frequency bands centered around 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz, 70 GHz and 90 GHz look rather promising for the next generation of cellular systems, allowing the use of 1-GHz wide channels (or even wider). During the propagation of both terrestrial and satellite links in the spectrum of millimeter waves, attenuation takes place due to absorption and scattering caused by atmospheric particles and hydrometeors. Scattering induced in the range of millimeter waves can cause co-channel interference between both fixed and mobile systems as well as between neighbor cells. Interference due to scattering caused by rain occurs as the electromagnetic transmitted energy of an antenna is intercepted by a rain cell. This leads to lateral scattering and antennas of other fixed systems, mobile system cells, or user equipment may receive the resulting interference signals. This affects the S/I ratio between the powers of the desired and the interference signals at the receiver. In this dissertation, a model will be presented to predict the interference power through scattering due to rain on the basis of ITU-R P.452-16 Recommendation. This model will be applied to determine the cumulative distribution function of the S/I ratio in urban scenarios (considering both regular and irregular structures) in the range of the millimeter waves.

Keywords

Scattering; interference; rain; millimeter waves.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Descrição do Problema	15
1.2 Objetivos do Trabalho	16
1.3 Resultados Obtidos	17
1.4 Organização do Texto	17
2 COMUNICAÇÕES MÓVEIS E ONDAS MILIMÉTRICAS	19
2.1 Evolução das Tecnologias Móveis	19
2.2 Primeira Geração	20
2.3 Segunda Geração	20
2.4 Entre Gerações (2,5G)	23
2.5 Terceira Geração	24
2.6 Quarta Geração	26
2.7 Quinta Geração	27
2.7.1 Ondas Milimétricas	28
2.7.2 Características de Propagação das Ondas Milimétricas	30
2.7.3 Aplicações das Ondas Milimétricas	34
3 EFEITOS DA CHUVA NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS MILIMÉTRICAS	37
3.1 Absorção e Espalhamento Pelas Gotas De Chuva	38
3.1.1 Espalhamento pela Chuva	38
3.2 Interferência Devida ao Espalhamento Pela Chuva	39
3.3 Fatores Relevantes na Atenuação por Chuvas	40
3.3.1 Distribuição de Tamanhos das Gotas de Chuva	41
3.3.2 Taxa de Precipitação	43
3.3.3 Distribuições Cumulativas da Taxa de Precipitação	43
3.4 Atenuação Atmosférica	44
3.5 Atenuação Devida a Chuvas	48
3.5.1 Modelos de Previsão da Atenuação por Chuvas	49
3.6 Chuva em Regiões Tropicais	53

4	CÁLCULO DA INTERFERÊNCIA DEVIDA AO ESPALHAMENTO PELA CHUVA	54
4.1	Método Proposto Para o Cálculo da Interferência	55
4.1.1	Equação do Radar Biestático	56
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	63
5.1	Parâmetros de Entrada	63
5.2	Organização da Simulação	65
5.2.1	Descrição do Cenário	66
5.2.2	Posicionamento dos Pontos de Acesso	69
5.2.3	Posicionamentos dos Usuários	72
5.2.4	Ligação entre Ponto de Acesso e Usuário	74
5.2.5	Pesquisa dos Pontos de Acesso Interferentes	75
5.2.6	Seleção da Antena do Ponto de Acesso Interferente e Registro do Azimute Correspondente	75
5.2.7	Cálculo da Potência Desejada no Receptor	77
5.2.8	Cálculo da Potência Interferente no Receptor	79
5.2.9	Cálculo S/I	84
5.3	Análise dos Resultados	84
5.3.1	Resultados no Cenário Urbano Regular	84
5.3.2	Resultados no Cenário Urbano Irregular	98
6	CONCLUSÕES	105
6.1	Contribuições da Pesquisa	106
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	107
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

Lista de Figuras

Figura 2.1: Gerações das tecnologias móveis.	20
Figura 2.2: Evolução anual dos celulares por tecnologia.	23
Figura 2.3: Características em desenvolvimento para o sistema de quinta geração.	28
Figura 2.4: Quadro de atribuição de faixas de frequências no Brasil.	29
Figura 2.5: a) Feixes direcionais; b) Bloqueio humano.	32
Figura 3.1: Absorção e espalhamento da gota de chuva.	38
Figura 3.2: Tipos de espalhamento da gota de chuva.	38
Figura 3.3: Espalhamento Rayleigh e Mie.	39
Figura 3.4: Distribuição de tamanho de gota de chuva Marshall e Palmer.	42
Figura 3.5: Mapa da taxa de precipitação excedida durante 0,01 % do tempo na América do Sul, de acordo com a Recomendação ITU-R P.837-6.	44
Figura 3.6: Atenuação específica devida a gases atmosféricos, de acordo com o modelo da Recomendação ITU-R P.676-10.	48
Figura 3.7: Atenuação devida a chuvas com diferentes taxas de precipitação.	52
Figura 4.1: Geometria da interferência devida ao espalhamento pela chuva.	55
Figura 4.2: Interferência das múltiplas estações rádio bases em um terminal do usuário.	56
Figura 4.3: (a) Fator de correção S para uma frequência de 30 GHz (b) Fator de correção para diferentes frequências na faixa de ondas milimétrica.	58
Figura 4.4: Variação do índice de refração complexo para frequências de 1 GHz a 80 GHz e temperatura de 25 °C.	60
Figura 5.1: Organização dos módulos da ferramenta da simulação.	65
Figura 5.2: Mapa de Madrid, Espanha.	67
Figura 5.3: Área de cobertura, Ipanema, Rio de Janeiro.	68

Figura 5.4: Mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, construído a partir de dados do IPP.	68
Figura 5.5: Localização dos pontos de acesso no mapa de Madrid.	69
Figura 5.6: Localização dos pontos de acesso no Mapa de Ipanema, Rio de Janeiro.	72
Figura 5.7: Simulação da posição dos usuários em Madrid.	73
Figura 5.8: Simulação da posição dos usuários em Ipanema.	73
Figura 5.9: Representação dos pontos de acesso, esquinas, usuário e base do volume comum.	76
Figura 5.10: Histograma (percentual de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e ajuste Normal.	85
Figura 5.11: CDF para a relação S/I supondo o mapa de Madrid, baseada na frequência de 30 GHz e antenas de pontos de acesso com feixe de meia potência de 10°.	86
Figura 5.12: Histogramas (percentuais de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e para as frequências de operação iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz.	87
Figura 1.13: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e para as frequências de operação iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz	88
Figura 5.14: Dependência entre a relação entre S/I e a frequência de operação para cinco usuários fixos.	89
Figura 5.15: Histogramas (percentuais de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e para as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h, 100 mm/h.	90
Figura 5.16: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h, 100 mm/h.	91
Figura 5.17: Histogramas (percentuais de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e para as distribuições de tamanho de gota: De Wolf, Marshall e Palmer e ITU-R P.452.	92
Figura 5.18: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e os modelos de distribuição do tamanho da gota propostas por Marshall e Palmer, De Wolf e ITU-R P.452-16.	93

Figura 5.19: Histogramas (percentuais de ocorrência) de S/I para o mapa de Madrid e para as larguras do feixe de média potência da antena interferente: 8°, 10°, 20°, 30°.	94
Figura 5.20: CDFs de S/I para o mapa de Madrid considerando os ângulos de meia potência da antena transmissora iguais a 8°, 10°, 20°, 30°.	95
Figura 5.21: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e para as frequências de operação iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz, considerando a interferência adicional com linha de visada direta ao usuário.	96
Figura 5.22: CDFs de S/I para o mapa de Madrid e para a frequência de operação igual a 30 GHz, considerando interferência causada por o ruído térmico produzido por as gotas de chuva.	97
Figura 5.23: CDFs de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro e para as frequências de operação iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz	99
Figura 5.24: CDFs de S/I para o mapa de Ipanema e as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h, 100 mm/h.	100
Figura 5.25: CDFs de S/I para o mapa de Ipanema e os modelos de distribuição do tamanho da gota propostas por Marshall e Palmer, De Wolf e ITU-R P.452-16.	102
Figura 5.26: CDFs de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, considerando os ângulos de meia potência da antena transmissora iguais a 8°, 10°, 20°, 30°.	103

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Sistemas móveis de primeira geração.	21
Tabela 2.2: Sistemas móveis de segunda geração.	22
Tabela 2.3: Regiões para concessões definida pela Anatel.	26
Tabela 3.1: Coeficientes para k e α .	51
Tabela 5.1: Parâmetros iniciais para a simulação.	64
Tabela 5.2: Parâmetros iniciais para os pontos de acesso.	64
Tabela 5.3: Parâmetros iniciais para o equipamento de usuário.	64
Tabela 5.4: Posicionamento dos Pontos de Acesso no Mapa de Madrid.	70
Tabela 5.5: Posicionamento dos Pontos de Acesso no Mapa de Ipanema.	71
Tabela 5.6: Os pontos de acessos interferentes e suas distâncias ao receptor.	75
Tabela 5.7: Setores Interferentes dos Pontos de Acesso.	76
Tabela 5.8: Resultados dos ângulos e as seções retas de Espalhamento.	81
Tabela 5.9: Resultados das distâncias entre o Ponto de Acesso interferente, volume comum e usuário.	81
Tabela 5.10: Resultados das atenuações entre o Ponto de Acesso interferente e usuário.	82
Tabela 5.11: Resultados do cálculo do volume comum.	83
Tabela 5.12: Resultados do cálculo das potências interferentes.	83
Tabela 5.13: Indicadores de S/I para o mapa de Madrid e as frequências iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz.	88
Tabela 5.14: Indicadores de S/I para o mapa de Madrid e as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h e 100 mm/h.	91

Tabela 5.15: Indicadores de S/I para o mapa de Madrid, considerando as distribuições de tamanho de gota: ITU-R P.452-16, De Wolf e Marshall e Palmer.	93
Tabela 5.16: Resultados de S/I para o mapa de Madrid e os ângulos de meia potência iguais a 8°, 10°, 20° e 30°.	95
Tabela 5.17: Indicadores de S/I para o mapa Madrid e as frequências iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz, considerando a interferência adicional com linha de visada direta ao usuário.	97
Tabela 5.18: Indicadores de S/I para o mapa Madrid e para a frequência de operação igual a 30 GHz, considerando a interferência causada por o ruído térmico produzido por as gotas de chuva.	98
Tabela 5.19: Indicadores de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, e as frequências iguais a 30 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz.	99
Tabela 5.20: Resultados de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, e para as taxas de precipitação iguais a 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h e 100 mm/h.	101
Tabela 5.21: Indicadores de S/I para o mapa de Ipanema, supondo as distribuições de tamanho de gota: ITU-R P.452-16, De Wolf e Marshall e Palmer	102
Tabela 5.22: Indicadores de S/I para o mapa de Ipanema, Rio de Janeiro, considerando ângulos de meia potência iguais a 8°, 10°, 20°, 30°.	104