

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Luciana Ferreira Vieira

**Análise do Efeito da Propagação
em Canais com Múltiplas Entradas e
Múltiplas Saídas (MIMO) com Base
no Traçado de Raios**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Rio de Janeiro

Julho de 2005



Luciana Ferreira Vieira

**Análise do Efeito da Propagação
em Canais com Múltiplas Entradas e
Múltiplas Saídas (MIMO) com Base
no Traçado de Raios**

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. Fernando José da Silva Moreira

UFMG

Prof. Gláucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de julho de 2005

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

Ficha Catalográfica

Vieira, Luciana Ferreira

Análise do efeito da propagação em canais com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) com base no traçado de raios / Luciana Ferreira Vieira ; orientador: Emanuel Paiva de Oliveira Costa : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

94 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Traçado de raios. 3. Propagação. 4. Comunicações móveis. 5. Sistemas MIMO. 6. Capacidade. I. Costa, Emanuel Paiva de Oliveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Ao meu avô Paulo Marques Ferreira.

Agradecimentos

Ao meu orientador Emanuel Paiva de Oliveira Costa pelos ensinamentos, por todo apoio, compreensão e parceria para a realização deste trabalho.

Ao CNPQ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

À minha Família por todo apoio e carinho em todas as horas. Em especial, ao meu avô Paulo Marques Ferreira que partiu antes da conclusão deste trabalho.

Ao meu marido, Márcio Ferreira da Silva, que com amor e carinho me deu apoio incondicional nos momentos mais difíceis.

À minha cunhada, Prof^a. Olívia Silva Goulart, pelas revisões de língua portuguesa.

Aos meus amigos Marcela, José Antônio, Mariana e Pedro Paulo pelos momentos de estudo e descontração.

Aos meus colegas do PAA.

À todos os professores do CETUC, pelos ensinamentos.

Aos funcionários do CETUC, em especial à Maria Lúcia.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

Resumo

Vieira, Luciana; Costa, Emanuel Paiva de Oliveira (Orientador). **Análise dos Efeitos da Propagação em Canais com Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO) com base no Traçado de Raios.** Rio de Janeiro, 2005. 94p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um modelo de traçado de raios baseado no método das imagens será aplicado para estudar a propagação de ondas de rádio nas regiões de Copacabana e Ipanema no Rio de Janeiro. Nesses ambientes altamente urbanizados, pode-se assumir que a propagação é restrita à seção horizontal dos vales nas ruas que são formados pelos blocos de edificações. Várias classes de raios, caracterizados pelo número, tipo (reflexão ou difração), e ordem de ocorrência de interação com as faces laterais dos blocos são considerados no modelo. As direções de partida e chegada, assim como a amplitude e o atraso no tempo, caracterizam cada raio, considerando seu comprimento total, além dos produtos dos coeficientes associados com cada interação com o ambiente. Neste trabalho, demonstra-se o aumento na capacidade do canal com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), usando conjunto de antenas na transmissão e na recepção para um sistema faixa estreita, operando a 1.9 GHz, estudando situações com linha de visada (LOS) e sem linha de visada (NLOS). Sistemas de comunicações *wireless* com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), utilizando conjunto de antenas na transmissão e na recepção apresentam grande interesse atualmente, devido a grande eficiência espectral apresentada e ao aumento na capacidade do canal. O efeito dos sistemas MIMO na capacidade do canal é estudado para situações LOS e NLOS, visando compreender sua relação em função do ambiente de propagação. Apresenta-se a relação da capacidade do canal em função do crescimento da relação sinal-ruído (SNR), da potência de transmissão, da distância, do atraso e do espalhamento angular para pontos de recepção em LOS e NLOS. Além disso, resultados simulando um canal Rayleigh também são comparados com os resultados obtidos.

Palavras-chave

Traçado de Raios; Propagação; Comunicações Móveis; Sistemas MIMO; Capacidade.

Abstract

Vieira, Luciana; Emanuel Paiva de Oliveira (Advisor). **Ray Tracing Analysis of the Effects of Propagation on Multiple-input Multiple-output (MIMO) Channels**. Rio de Janeiro, 2005. 94p. M.Sc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A ray tracing model based on the method of images has been applied to study the propagation of radio waves in the regions of Copacabana and Ipanema in Rio de Janeiro. In such highly urbanized environments, it can be realistically assumed that propagation is restricted to a horizontal section of the street canyons characterized by the blocks of buildings. Several classes of rays, characterized by the number, type (reflection and diffraction), and order of occurrence of interaction with the lateral faces of the blocks are considered by the model. The directions of departure and arrival, as well as the amplitude and the time delay characterize each ray, considering its total length, as well as product of the coefficients associated with each interaction with the environment. In addition to analyzing the behaviors of the ray parameters considering both line-of-sight (LOS) and non line-of-sight (NLOS) situations, the capacity growth of multiple-element antenna arrays (MEAs) will be demonstrated for a narrowband system operating at 1.9 GHz. Indeed, multiple-input, multiple-output (MIMO) wireless communications systems, making use of smart antenna arrays at both ends of the communications link, has been receiving increased interest due to their high spectral efficiency and channel capacity. The effect of MIMO systems in the channel capacity will be studied for representative LOS and NLOS situations to understand how the results change as a function of the environment. It will be seen how the capacity scales with increasing signal-to-noise ratio (SNR) for a large but practical number of antenna elements at both transmitter and receiver. The increase in capacity with transmitter power, distance, delay and angular spreads for LOS and NLOS cases will also be presented, as well as a comparison of the results with those corresponding to a Rayleigh channel.

Keywords

Ray Tracing; Propagation; Wireless Communication; MIMO Systems; Capacity.

Sumário

1	Introdução	13
2	Teoria Geométrica da Difração - Teoria Uniforme da Difração.	15
2.1.	Ótica Geométrica	15
2.1.1.	Relações de Amplitude, Polarização e Fase da Onda Eletromagnética.	18
2.1.2.	Campo da Onda Direta e Campo da Onda Refletida	20
2.2.	Teoria Geométrica da Difração	25
2.3.	Teoria Uniforme da Difração	27
3	Técnica de Traçado de Raios	34
3.1.	Introdução	34
3.2.	Dados das Edificações	36
3.3.	Traçado de Raios no Plano Horizontal	37
4	Sistemas MIMO, Multiple Input Multiple Output	43
4.1.	Modelos de Canais Espaço-Temporais em Sistemas MIMO	44
4.1.1.	Modelo de Lee [13,14].	44
4.1.2.	Modelo de Stapleton et al. [13,14], extensão do modelo de Lee.	45
4.1.3.	Modelo de Distribuição Discreta Uniforme [13,14]	45
4.1.4.	Modelos Geométricos e Estatísticos Baseados em Interação Única, <i>GBSB</i> – <i>Geometrically Based Single Bounce</i> [13,14]	46
4.1.5.	Modelo de Espalhamento Gaussiano Descorrelatado e Estacionário no Sentido Amplo (GWSSUS) [13,14]	47
4.1.6.	Modelo Gaussiano de Ângulo de Chegada (GAA) [13,14]	48
4.1.7.	Modelo de Rayleigh [13,14]	49
4.1.8.	Modelos GSM para Simulação (<i>Typical Urban</i> e <i>Bad Urban</i>) [13,14]	49
4.1.9.	Modelo de Distribuição Setorizada Uniforme [13,14]	50
4.1.10.	Modelo de Saleh-Valenzuela [13,14]	51
4.1.11.	Modelo baseado em Sub-regiões Elípticas [13,14]	51

4.1.12. Modelo de Traçado de Raios [13,14]	52
4.2. Capacidade para Canais MIMO	53
5 Implementação e Análise de Resultados	55
5.1. Introdução	55
5.2. Canal Rayleigh	60
5.3. Canal Determinístico	63
5.4. Características Espaciais	72
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	78
7 Referências Bibliográficas	80

Lista de Figuras

Figura 2.1: Superfícies eikonais: cilíndricas, planas e astigmáticas (reproduzidas da referência [17]).	17
Figura 2.2: Tubo de raios (reproduzida da referência [18]).	18
Figura 2.3: Sistema de coordenadas esféricas associado à antena transmissora (reproduzida da referência [18]).	21
Figura 2.4: Reflexão e sistema de coordenadas fixo ao raio para a reflexão (vista do plano de incidência - reproduzida da referência [17]).	21
Figura 2.5: Raio incidente sobre aresta de obstáculo, mostrando a formação da região de sombra e suas fronteiras ISB e RSB (reproduzida da referência [17]).	25
Figura 2.6: Geometria 3D do obstáculo para o cálculo de difração (reproduzida da referência [6]).	27
Figura 2.7: Sistema de coordenadas fixo ao raio (reproduzida da referência [6]).	28
Figura 2.8: Magnitude e fase da função de transição $F(\beta La)$, onde $a = a^+$ ou a^- (reproduzida da referência [6]).	31
Figura 2.9: Variação de N^\pm em função de β (reproduzida da referência [17]).	32
Figura 3.1: Raios que partem do transmissor e atingem receptor em NLOS em Ipanema.	39
Figura 3.2: Raios que partem do transmissor e atingem receptor em NLOS em Copacabana.	40
Figura 3.3: Diagrama de Potência versus Retardo em Copacabana.	42
Figura 4.1: Modelo de Lee (reproduzida da referência [14]).	44
Figura 4.2: Geometria Discreta Uniforme (reproduzida da referência [14]).	46
Figura 4.3: Geometria circular (reproduzida da referência [14]).	47
Figura 4.4: Geometria elíptica (reproduzida da referência [14]).	47
Figura 4.5: Geometria GWSSUS (reproduzida da referência [14]).	48
Figura 4.6: Geometria GAA (reproduzida da referência [14]).	48
Figura 4.7: Ambiente de propagação modelo de Rayleigh (reproduzidas da referência [14]).	49
Figura 4.8: Geometria modelo <i>Bad Urban</i> (reproduzida da referência [14]).	50
Figura 4.9: Geometria da Distribuição Setorizada Uniforme (reproduzida da referência [14]).	50
Figura 4.10: Sub-regiões elípticas (reproduzida da referência [14]).	51
Figura 5.1: Região de Copacabana utilizada nos cálculos, coberturas convexas das edificações contidas em cada quadra e pontos de recepção.	56
Figura 5.2: Região de Ipanema utilizada nos cálculos, coberturas convexas das edificações contidas em cada quadra e pontos de recepção.	57
Figura 5.3: Distribuição Cumulativa Complementar da Capacidade do Canal Rayleigh para 2 Antenas com valores de SNR iguais a 18 dB e 21 dB.	60
Figura 5.4: Distribuição Cumulativa Complementar da Capacidade do Canal Rayleigh para 4 Antenas com valores de SNR iguais a 18 dB e 21 dB.	61
Figura 5.5: Distribuição Cumulativa Complementar da Capacidade do Canal Rayleigh para 2, 4 e 8 Antenas com valor de SNR igual a 21 dB.	62
Figura 5.6: Capacidade Excedida para 90% dos casos em Copacabana, 4 antenas	63
Figura 5.7: Capacidade Excedida em 10% dos casos em Copacabana, 4	

antenas	64
Figura 5.8: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função da distância para pontos em LOS.	66
Figura 5.9: Capacidade Excedida para 90% dos casos em função da distância para pontos em NLOS.	67
Figura 5.10: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função da distância para pontos em LOS.	68
Figura 5.11: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função da distância para pontos em LOS.	68
Figura 5.12: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função da distância para pontos em NLOS.	69
Figura 5.13: Função distribuição cumulativa complementar da capacidade em função da potência de transmissão.	70
Figura 5.14: Desvio padrão no ângulo de recepção em função da distância para pontos em LOS.	72
Figura 5.15: Desvio padrão no retardo em função da distância para pontos em LOS.	73
Figura 5.16: Desvio padrão no ângulo de recepção em função da distância para pontos em NLOS.	74
Figura 5.17: Desvio padrão no retardo em função da distância para pontos em LOS.	74
Figura 5.18: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função do desvio padrão do ângulo de transmissão.	75
Figura 5.19: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função do desvio padrão do ângulo de recepção.	76
Figura 5.20: Capacidade Excedida em 90% dos casos em função do desvio padrão do retardo	77

Lista de tabelas

Tabela 5.1: Capacidade excedida em 90% e 10%

62