



**Juliana Valim Oliver Gonçalves**

**Variabilidade do Sinal, Banda de Coerência e  
Espalhamento Temporal em Ambiente de Rádio  
Propagação Móvel em 3,5GHz**

**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: Prof. Gláucio Lima Siqueira

Rio de Janeiro, setembro de 2009



**Variabilidade do Sinal, Banda de Coerência e  
Espalhamento Temporal em Ambiente de Rádio  
Propagação Móvel em 3,5GHz**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio, aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Dr. Gláucio Lima Siqueira**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Dr. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Dr. Eduardo Javier Arancibia Vásquez**

CLARO RJ/ES

**José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de setembro de 2009

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

### **Juliana Valim Oliver Gonçalves**

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações, no Instituto de Estudos Superiores da Amazônia – IESAM, em Belém/PA, em 2006. Em 2007 ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - Mestrado na área de eletromagnetismo aplicado no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

### Ficha Catalográfica

Valim Gonçalves, Juliana Oliver

Variabilidade do sinal, banda de coerência e espalhamento temporal em ambiente de rádio propagação móvel em 3,5GHz / Juliana Valim Oliver Gonçalves ; orientador: Gláucio Lima Siqueira. – 2009.

143 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Canal de rádio propagação móvel. 3. Desvanecimento em pequena e larga escala. 4. Banda de coerência do canal. 5. Espalhamento de retardos (delay spread). I. Siqueira, Gláucio Lima. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Àqueles que estiveram ao meu lado e me apoiaram  
À minha família e amigos por estarem sempre presentes.

## **Agradecimentos**

Ao professor orientador, Dr. Gláucio Lima Siqueira, pelas sábias palavras de orientação durante todo o percurso da pesquisa e elaboração desta dissertação.

Ao INMETRO pela disponibilização dos equipamentos de medição.

À PUC-Rio pela bolsa de isenção proporcionada e a CAPES pela bolsa de fomento fornecida.

Ao Carlos Rodriguez pela parceria ao longo das medições, discussões intermináveis e disponibilização da viatura de medição.

Ao Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos e Davi Guedes pela cooperação na elaboração dos arquivos em MatLab.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Grivet pelos seus valiosos esclarecimentos.

À Prof. Dra. Terezinha Valim O. Gonçalves pelas sugestões de composição deste texto.

## Resumo

Valim Gonçalves, Juliana Oliver; Siqueira, Gláucio Lima. **Variabilidade do Sinal, Banda de Coerência e Espalhamento Temporal em Ambiente de Rádio Propagação Móvel em 3,5GHz**. Rio de Janeiro, 2009. 143p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação, é apresentado estudo realizado sobre a variabilidade do sinal, da banda de coerência e do espalhamento de retardos em um ambiente de rádio propagação móvel, por meio de medição em campo de um sinal WiMAX propagado ao longo do canal rádio móvel. A análise da estatística do sinal capturado é comparada com valores teóricos. O sinal WiMAX utilizado possui a tecnologia OFDM-256, como base da sua camada física, e frequência central de 3,410 GHz. A partir dos dados coletados durante as medições, são realizadas as análises da variabilidade do sinal, taxa de cruzamento de nível, tempo médio de desvanecimento, verificada a banda de coerência do canal e calculado o espalhamento de retardos (*delay spread*), por meio de fórmulas teóricas, em ambientes de LOS e NLOS. O nível do sinal medido é apresentado na forma de distribuição de probabilidade cumulativa, comparado com as distribuições cumulativas teóricas Rayleigh e m-Nakagami, sendo possível verificar a satisfatória adaptação dos dados às distribuições teóricas. São apresentados gráficos com a informação de taxa de cruzamento de nível e tempo médio de desvanecimento de determinadas subportadoras do sinal capturado, bem como os valores teóricos dos parâmetros supracitados, de acordo com as distribuições Rayleigh e m-Nakagami. Novamente, é possível verificar a satisfatória adaptação entre as informações teóricas e os dados medidos em campo. Por fim, é realizada a correlação entre as subportadoras, com o intuito de averiguar a banda de coerência definida, neste trabalho, para um valor de correlação igual a 0,5. De posse dessa informação, o cálculo do parâmetro de espalhamento de retardos é realizado, com base em fórmulas presentes na literatura.

## Palavras-chave

Canal de rádio propagação móvel; desvanecimento em pequena e larga escala; banda de coerência do canal; espalhamento de retardos (*delay spread*).

## Abstract

Valim Gonçalves, Juliana Oliver; Siqueira, Gláucio Lima (Advisor). **Signal Variability, Coherence Bandwidth and Delay spread on Mobile Radio Propagation Environment at 3.5GHz.** Rio de Janeiro, 2009. 143p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a study of signal variability, coherence bandwidth and *delay spread* of a WiMAX signal transmitted through a mobile radio propagation environment. The statistical analysis of the received signal is compared with theoretical distributions. The transmitted WiMAX signal has its physical layer based on OFDM-256 and 3.4 GHz as central frequency. Based on the signal received during the measurements campaign some analysis are done: signal variability; level crossing rate; average fade duration; coherence bandwidth; and *delay spread* calculation, based on theoretical formulas, in LOS and NLOS environment. The received signal amplitude is plotted as a function of the cumulative probability and compared to the theoretical Rayleigh and m-Nakagami cumulative distributions. It's possible to notice a good characterization of the measured data based on those two distributions. Some graphs show the level crossing rate and average fade duration of a specific subcarrier of the received signal. In the same graphs are also plotted the theoretical values of Nakagami-m and Rayleigh distributions for those two parameters and we are able to see the good agreement. The correlation between subcarriers is also calculated in order to find out the correlation bandwidth for a correlation of 0.5. Once that the correlation bandwidth is known, the *delay spread* is calculated based on theoretical formulas.

## Keywords

Mobile radio propagation channel; small scale fading; coherence bandwidth; *delay spread*.

## Sumário

Introdução	15
1 . Tecnologia WiMAX	18
1.1. Padrão WiMAX	20
1.1.1. Camada Física (PHY)	21
1.2. Camada MAC	25
1.3. Aspectos sistêmicos	26
1.3.1. Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais – OFDM	26
1.3.2. SubCanalização em WiMAX	29
1.3.3. Modulação adaptativa	31
1.3.4. Arquitetura de rede	31
1.4. Tecnologias competitivas	32
1.5. OFDM – Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais	33
2 . Canal de rádio propagação móvel	38
2.1. Atenuação com a distância, desvanecimento em pequena e larga escala	40
2.2. Mecanismos de propagação	44
2.3. Características do canal de rádio propagação móvel	45
2.3.1. Perfil de retardos ( <i>Power delay profile</i> )	46
2.3.2. Banda de coerência	47
2.3.3. Espalhamento Doppler	48
2.3.4. Tempo de coerência	49
3 . Análise estatística do sinal	51
3.1. Distribuição log-Normal	52
3.2. Distribuição Rayleigh	55
3.2.1. Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento	57
3.3. Distribuição de Rice	58
3.3.1. Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento	60
3.4. Distribuição m-Nakagami	60
3.4.1. Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento	62



3.5. Dimensão de um setor	63
4 . Campanhas de medidas e equipamentos de medição	65
4.1. Sistema de medidas	66
4.2. Primeira campanha de medição: varredura de espectro	71
4.3. Segunda campanha de medição: determinação do raio de cobertura da antena transmissora	72
4.4. Terceira campanha de medição: aquisição da informação de fase e quadratura do sinal transmitido para realização das análises estatísticas	73
4.4.1. Características do sinal, parâmetros de transmissão e recepção	74
4.4.2. Balanço de potência	76
4.4.3. Frequência de amostragem	78
5 . Resultados	79
5.1. Variabilidade do sinal	79
5.1.1. Função distribuição cumulativa	80
5.1.2. Desvanecimentos em ambientes com e sem linha de visada	88
5.1.3. Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento	90
5.2. Banda de coerência	107
5.3. Espalhamento temporal ( <i>Delay Spread</i> )	117
6 . Conclusões	119
6.1. Estatística do sinal	119
6.2. Banda de coerência	121
6.3. Espalhamento de retardos ( <i>Delay Spread</i> )	123
6.4. Trabalhos futuros	123
Referências	125
Apêndices	130
Apêndice A	131
Apêndice B	136
Apêndice C	138

## Lista de figuras

Figura 1.1: Multiplexações FDM e OFDM: (a) espectro FDM;	
(b) espectro OFDM.	27
Figura 1.2: Sinal recebido com transmissão de portadora única e OFDM.	27
Figura 1.3: Estrutura do símbolo OFDM no domínio do tempo.	28
Figura 1.4: Subportadoras OFDM no domínio da frequência.	28
Figura 1.5: Subportadoras OFDMA no domínio da frequência.	29
Figura 1.6: Subcanalização do sistema WiMAX: (a) OFDM; (b) OFDMA.	30
Figura 1.7: Modulação adaptativa.	31
Figura 1.8: Arquitetura WiMAX 802.16-2004.	32
Figura 1.9: Cobertura WiFi e WiMAX.	33
Figura 1.10: Subportadoras de um sinal OFDM: (a) domínio da	
frequência; (b) domínio do tempo.	35
Figura 1.11: Diagrama de blocos de um modulador OFDM.	37
Figura 2.1: Componentes em fase e quadratura em coordenada polar.	39
Figura 2.2: Componentes em fase e quadratura em coordenadas	
cartesiana e polar.	39
Figura 2.3. Típico sinal recebido por uma unidade móvel.	40
Figura 2.4: Desvanecimento em larga escala.	42
Figura 2.5: Desvanecimento em pequena escala.	43
Figura 2.6: Reflexão.	44
Figura 2.7: Difração.	45
Figura 2.8: Perfil de retardos.	46
Figura 2.9: Efeito Doppler.	49
Figura 3.1: Gráfico da função densidade de probabilidade log-Normal.	53
Figura 3.2: Gráfico da função densidade de probabilidade Gaussiana.	53
Figura 3.3: Gráfico da função de distribuição cumulativa: (a) log-	
normal; (b) normal.	54
Figura 3.4: Função densidade de probabilidade Rayleigh.	55
Figura 3.5: Função distribuição cumulativa Rayleigh.	57
Figura 3.6: Gráfico da função densidade de probabilidade de Rice: (a)	
$K \rightarrow 0$ ; (b) $k \cong 1$ ; (c) $k \gg 1$ .	59
Figura 3.7: Função densidade de probabilidade da distribuição m-Nakagami.	62

Figura 4.1: Percurso realizado ao longo das medições.	65
Figura 4.2: Bloco de transmissão do sistema de medidas.	67
Figura 4.3: Bloco de recepção do sistema de medidas.	67
Figura 4.4: Reta de amplificação do equipamento Milmega.	68
Figura 4.5: Antena painel, modelo HG3515P-120.	69
Figura 4.6: Diagrama de irradiação da antena painel modelo HG3515P-120: (a) plano horizontal; (b) plano vertical.	69
Figura 4.7: Antena omni direcional, modelo HG3505RD-RSP.	70
Figura 4.8: Diagrama de irradiação da antena omni direcional (a) plano horizontal (b) plano vertical.	70
Figura 4.9: Fotografia dos blocos de transmissão e recepção em ambiente laboratorial.	71
Figura 4.10: Varredura do espectro entre 3,4GHz a 3,6GHz.	72
Figura 4.11: Região abrangida pela terceira campanha de medição.	73
Figura 4.12: Sinal OFDM, no domínio da frequência, transmitido ao longo das medições.	75
Figura 4.13: Disposição das subportadoras do sinal transmitido (domínio da frequência).	76
Figura 4.14: Pontos de referência de parâmetros do balanço de potência.	78
Figura 5.1: Distribuição cumulativa das subportadoras piloto de um setor da Rua Mário Ribeiro, a 315m da antena transmissora. Ambiente LOS.	81
Figura 5.2: Distribuição cumulativa das subportadoras piloto de um setor da Rua Mário Ribeiro, a 1,5 km da antena transmissora. Ambiente LOS.	81
Figura 5.3: Distribuição cumulativa das subportadoras piloto de um setor da Rua Padre Leonel. Ambiente NLOS.	82
Figura 5.4: Distribuição cumulativa das subportadoras piloto de um setor da Rua Marquês de São Vicente. Ambiente NLOS.	82
Figura 5.5: Função distribuição cumulativa do nível de sinal obtido em um setor da Rua Mário Ribeiro (LOS) e distribuição cumulativa teórica Rayleigh e de m-Nakagami.	85
Figura 5.6: Função distribuição cumulativa do nível de sinal obtido em um setor da Rua Padre Leonel (NLOS) e distribuição cumulativa teórica Rayleigh e de m-Nakagami.	88

Figura 5.7: Comparação de sinais obtidos em LOS e NLOS.	89
Figura 5.8: Sinal recebido em ambiente de LOS.	89
Figura 5.9: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da primeira subportadora piloto de um setor em situação de LOS.	91
Figura 5.10: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da segunda subportadora piloto de um setor em situação de LOS.	92
Figura 5.11: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da terceira subportadora piloto de um setor em situação de LOS.	93
Figura 5.12: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da quarta subportadora piloto de um setor em situação de LOS.	94
Figura 5.13: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da quinta subportadora piloto de um setor em situação de LOS.	95
Figura 5.14: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da sexta subportadora piloto de um setor em situação de LOS.	96
Figura 5.15: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da sétima subportadora piloto de um setor em situação de LOS.	97
Figura 5.16: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da oitava subportadora piloto de um setor em situação de LOS.	98
Figura 5.17: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da primeira subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.	99
Figura 5.18: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da segunda subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.	100
Figura 5.19: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da terceira subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.	101
Figura 5.20: Taxa de cruzamento de nível e duração média do	

desvanecimento da quarta subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.	102
Figura 5.21: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da quinta subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.	103
Figura 5.22: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da sexta subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.	104
Figura 5.23: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da sétima subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.	105
Figura 5.24: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da oitava subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.	106
Figura 5.25: Correlação da quadragésima subportadora (primeira subportadora piloto) de um setor, em LOS, da Rua Mário Ribeiro.	108
Figura 5.26: Correlação da 166ª subportadora (sexta subportadora piloto) de um setor, em LOS, da Rua Mário Ribeiro.	108
Figura 5.27: Correlação da quadragésima subportadora (primeira subportadora piloto) de um setor, em LOS, da Rua Vice-Governador Rubens Berardo.	109
Figura 5.28: Correlação da quadragésima subportadora (primeira subportadora piloto) de um setor, em LOS, da Rua Padre Leonel.	109
Figura 5.29: Correlação das subportadoras piloto de um setor, em LOS, da rua Mário Ribeiro.	113
Figura 5.30: Correlação das subportadoras piloto de um setor, em NLOS, da Rua Vice-Governador Rubens Berardo.	116

## Lista de tabelas

Tabela 1.1: Classificação de acesso fixo a móvel de acordo com o padrão WiMAX.	19
Tabela 1.2: <i>Profile</i> criado pelo WiMAX fórum para o padrão IEEE 802.16-2004.	24
Tabela 1.3: Parâmetros do símbolo OFDM-256	24
Tabela 1.4: <i>Profile</i> para o padrão IEEE 802.16e-2005	24
Tabela 1.5: Parâmetros de um símbolo OFDM e OFDMA.	25
Tabela 5.1: Médias da banda de coerência em ambientes LOS e NLOS.	117
Tabela 5.2: Valor calculado de <i>delay spread</i> , com base na média ponderada da BC, para ambientes LOS e NLOS.	117
Tabela 5.3: Valor calculado de <i>delay spread</i> , com base na média aritmética da BC, para ambientes LOS e NLOS.	117
Tabela 5.4: Valores de delay spread calculados a partir da regressão linear sugerida por [10].	118