

Adaptação de Modulação e Codificação em Redes de Acesso WiMAX

Relatório Final de Atividades

Orientando: Tiago Pedroso da Cruz de Andrade (064812)

Orientador: Prof. Dr. Nelson Luís Saldanha da Fonseca

Vigência: 08/2009 - 07/2010

Laboratório de Redes de Computador - Instituto de Computação/Unicamp

5 de Fevereiro de 2010

Resumo

As simulações de ambientes bem comportado não reflete o meio ruidoso de uma rede sem fio. Diversos fenômenos físicos influenciam a transferência de pacotes e quando esses fatores não são considerados numa simulação, os resultados podem não representar um cenário real.

Esse trabalho apresenta uma implementação para trazer mais realismo numa simulação de redes IEEE 802.16 com o auxílio da Modulação e Codificação Adaptativa, para o qual um algoritmo foi implementado.

Com essa implementação, poderão ser feitos novos estudos que levam em consideração a qualidade do canal e a perda de pacotes.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Padrões	1
2.1	IEEE 802.16-2004	1
2.2	IEEE 802.16-2005	2
3	Ferramenta Network Simulation 2	2
4	Módulo WiMAX	3
5	Modelos de Propagação	3
5.1	Classificação dos Modelos de Propagação	3
5.2	Exame dos Modelos de Propagação	4
5.2.1	Modelo de Okumura	4
5.2.2	Modelo de Hata	4
5.2.3	Modelo COST 231	5
5.2.4	Modelo Espaço-Livre	5
5.2.5	Modelo SUI	6
6	Modulação e Codificação Adaptativa	6
6.1	Fundamentos da Adaptação do Canal	7
6.2	Funcionamento	7
6.3	Mecanismos Implementados na Literatura	8
6.3.1	QoS-Aware Link Rate Adaptation (Q-LRA)	8
6.3.2	Dynamic Threshold Link Adaptation (DTLA)	8
6.3.3	Modelo de Ramachandran, Bostian e Midkiff	9
7	Modelo de Erros	10
7.1	Modelo de Bustamante	10
7.2	Modelo ICRFE	10
7.3	Modelo no <i>ns-2</i>	10
8	Trabalho Realizado	10
8.1	Modelo Proposto	11
8.2	Simulações	13
9	Resultados	13
9.1	Análise de cobertura	13
9.2	Modelo de Erros	13
9.3	Modulação e Codificação Adaptativa	15
10	Conclusão	16
11	Apoio	16

1 Introdução

O acesso sem fio em banda larga (*Broadband Wireless Access - BWA*) tem recebido grande destaque tanto no meio comercial como no meio acadêmico. A tecnologia BWA é capaz de prover altas taxas de transferência de dados, alto nível de escalabilidade e baixo custo de instalação e manutenção para o acesso residencial e comercial à Internet.

O padrão IEEE 802.16 [2], frequentemente referenciado como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum*) vem sendo desenvolvido com a finalidade de padronizar a tecnologia BWA. O padrão define a interface aérea e o protocolo de acesso ao meio para redes metropolitanas sem fio fornecendo altas taxas de transmissão para o acesso em banda larga à Internet.

Se por um lado o canal sem fio permite uma difusão maior do acesso à Internet do que as redes cabeadas, por outro lado está sujeito a uma série de fenômenos que prejudicam a transmissão e a recepção do conteúdo. Fenômenos físicos como o *path loss* ou *multipath* têm grande influência na qualidade de acesso. Desta forma, é importante levar em consideração as imperfeições do meio.

A simulação é uma ferramenta essencial na pesquisa de redes de computadores, pois permite o desenvolvimento e a análise de novos protocolos e mecanismos em topologias complexas, sem a necessidade de implementá-las fisicamente. Dentre as ferramentas disponíveis para simulação de redes de computadores, o *Network Simulator (ns-2)* [1] é a ferramenta de maior popularidade entre os pesquisadores.

Diversos módulos [5] [4] [7] foram propostos para simulação de redes IEEE 802.16 usando o *ns-2*. Entre eles está o módulo implementado pelo *National Institute of Standards and Technology (NIST)* [7].

Este trabalho apresenta uma extensão para o módulo desenvolvido pelo NIST com uma camada física OFDM e um modelo de propagação realista. A extensão do módulo implementa um modelo de propagação que reflete o ambiente suburbano das redes WiMAX. A implementação conta com dois modelos de erros que simula a perda da qualidade da conexão assim que a distância entre duas estações aumenta. Além disso, foi implementado um algoritmo para resolver o problema da Modulação e Codificação Adaptativa, para o qual o padrão [2] deixa em aberto para que cada fabricante possa implementar o seu da melhor maneira possível.

A implementação tem seu foco na representação mais detalhada da realidade, permitindo que diversos estudos sobre a camada de acesso ao meio seja realizada. Acredita-se que a extensão apresentada é de extrema valia para pesquisadores da área e que deverá ter um impacto positivo em investigações de novos problemas em redes WiMAX.

2 Padrões

2.1 IEEE 802.16-2004

A arquitetura de uma rede que utiliza o padrão IEEE 802.16-2004 [2] possui dois elementos principais: *Base Station (BS)* e *Subscriber Station (SS)*. A BS realiza a comunicação entre a rede sem fio e a rede núcleo e suporta interfaces IP, ATM, Ethernet e E1/T1. A SS fornece ao usuário acesso à rede núcleo através do estabelecimento de conexões com a BS em uma topologia Ponto-Multiponto (PMP). O padrão ainda permite a implementação de uma topologia *Mesh* (opcional). A principal diferença entre as topologias PMP e *Mesh* está no fato de que em uma rede PMP o tráfego flui apenas entre a BS e as SSs, enquanto que no modo *Mesh*, o tráfego pode ser roteado através das SSs e pode ocorrer diretamente entre duas SSs. Este trabalho enfoca redes com topologia PMP.

O padrão IEEE 802.16-2004 [2] define as especificações das camadas MAC (*Medium Access Control*) e física para redes BWA. A camada física opera em um formato de *frames*, os quais são subdivididos em intervalos de tempo chamados *slots físicos*. Em cada *frame* há um *subframe downlink* e um *subframe uplink*. O *subframe downlink* é utilizado pela BS para a transmissão de dados e de informações de controle para as SSs. O *subframe uplink* é compartilhado entre todas as SSs para transmissões que têm como destino a BS.

O padrão [2] define várias camadas físicas para diferentes ambientes. Nesse projeto foi utilizada a camada física WirelessMAN-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). A idéia básica do OFDM consiste em dividir os bits em diversos streams de taxas menores que serão transmitidos por subcanais paralelos. Como consequência, temos que a duração de cada símbolo é maior, tornando o sinal menos sensível a ruídos, à multiplicidade de caminhos e a interferência intersimbólica.

Para a camada física WirelessMAN-OFDM, o padrão [2] define sete esquemas de modulação e codificação como mostrado na Tabela 1. Cada modulação consegue transportar uma quantidade de símbolos e cada tipo de codificação consegue corrigir uma certa quantidade de bits. Dessa forma, cada esquema de modulação e codificação consegue oferecer uma taxa de dados diferente.

O AMC é uma técnica utilizada em diversas redes celulares e em redes sem fio convencionais, como o WI-FI, que visa adaptar a modulação e a codificação de acordo com as condições do canal, para cada usuário obter uma maior taxa de transferência de dados e menor taxa de erro de pacotes. Nesse mecanismo, o transmissor transmite

MCS	FEC code rate
BPSK	1/2
QPSK	1/2 ou 3/4
16QAM	1/2 ou 3/4
64QAM	2/3 ou 3/4

Tabela 1: Modulações e Codificações

os dados na maior taxa possível quando as condições do canal são boas e transmite em taxas menores quando as condições estão ruins, evitando as perdas de pacotes.

O padrão [2] recomenda utilizar como medida de qualidade de sinal a relação sinal-ruído (Signal to Noise Ratio - SNR), mas deixa em aberto os valores ideais para a troca de modulação.

O padrão [2] permite dois modos de acesso ao meio físico: duplexação por divisão de frequência (*Frequency Division Duplexing* - FDD) e duplexação por divisão de tempo (*Time Division Duplexing* - TDD). No modo FDD, os canais *downlink* e *uplink* operam simultaneamente em frequências diferentes. No modo TDD, os *subframes uplink* e *downlink* compartilham a mesma frequência, logo, não é possível realizar transmissões simultâneas nos dois sentidos. Cada *frame* TDD tem um *subframe downlink* seguido por um *subframe uplink*. Neste trabalho, utiliza-se o modo de acesso TDD.

Na camada física, para verificar se um pacote foi recebido com uma potência suficiente, utiliza-se o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e o SNR (*Signal to Noise Ratio*). O SNR é a relação entre a potência recebida e o ruído mais a interferência do canal.

A camada de acesso ao meio (*Medium Access Control layer* - MAC) é orientada a conexão. Cada conexão é identificada por um identificador (*Connection Identifier* - CID) de 16 bits e cada SS tem um endereço MAC único que a identifica e é utilizado para registrá-la e autenticá-la na rede. Todo o tráfego, incluindo o tráfego não orientado a conexão, é mapeado para uma conexão. Além do gerenciamento das conexões, a camada MAC é responsável pelo controle de acesso ao meio e pela alocação de banda.

2.2 IEEE 802.16-2005

O adendo IEEE 802.16-2005 trouxe a característica, talvez a mais atrativa da tecnologia WiMAX, mobilidade. Essa mobilidade deve vir associada a grande largura de banda e vasta área de cobertura, para isto o padrão utiliza tecnologias como a SOFDMA, AAS (Adaptive Antenna System) e MIMO (Multiple Input Multiple Output). Porém, há um novo problema a ser enfrentado: o processo de handover.

O handover é o processo no qual uma estação móvel (MS - mobile station) está se deslocando para uma célula próxima, então ela deixa a conexão com a BS da antiga célula e estabelece uma nova conexão com a BS da nova célula. Todo este processo deve ser imperceptível para o usuário, a conexão com a Internet deve ser contínua, ou seja, o usuário deve ser capaz de se movimentar sem perder a conexão. Existem três tipos de handover: HHO (Hard Handover), MDHO (Macro Diversity Handover) e FBSS (Fast Base Station Switching).

O HHO é definido como obrigatório, enquanto os outros são opcionais. Ele funciona da seguinte maneira, primeiramente a MS tenta descobrir a topologia da rede onde está e procura por BSs próximas que ofereçam sinal de qualidade, e irá trocar essas informações com a sua atual BS. Dentre essas BSs a BS atual irá escolher uma que possua a melhor qualidade de sinal, que será chamada de BS alvo. A MS irá enviar uma mensagem a atual BS para informar que deseja iniciar o processo de handover. A antiga BS irá responder sua requisição, e então a MS deixa a conexão com a antiga BS e faz conexão com a BS alvo. Todo esse processo foi apenas para reconhecimento da rede, o processo de handover será agora iniciado e ele possui 6 fases: re-seleção de células, decisão e iniciação do handover, sincronização, ranging, término do contexto da MS e cancelamento do handover.

As fases de re-seleção de célula e decisão e iniciação de handover podem ser encurtadas, já que consiste nos mesmos procedimentos realizados pela etapa de reconhecimento da rede. Porém a decisão de qual BS será a BS alvo pode vir também da MS. Após, ocorre a sincronização com o canal de downlink e uplink da nova BS, na fase de sincronização. Na fase ranging ocorre autenticação, autorização e todos os processos para se registrar a MS em sua nova BS, a fim de evitar problemas de segurança. E depois, na fase de término do contexto da MS, a antiga BS elimina todos os registros da MS. A fase de cancelamento é opcional, a MS tem liberdade de cancelar o processo de handover a qualquer momento.

3 Ferramenta Network Simulation 2

O Network Simulator 2 (*ns-2*) [1] é um simulador de eventos discretos de domínio público que contém grande parte dos protocolos utilizados na Internet, incluindo redes cabeadas e sem fio.

O *ns-2* é um dos simuladores mais populares entre os pesquisadores e em conjunto com a ferramenta de visualização *Network Animator (nam)* constitui uma plataforma didática para o ensino de redes de computadores.

O desenvolvimento do *Network Simulator* se iniciou em 1989 a partir de uma variação do simulador de redes *REAL* e, desde então, tem sido constantemente aperfeiçoado.

A implementação do simulador é orientada a objetos, escrita em C++ com um interpretador *OTcl* como front-end. O simulador possui uma hierarquia de classes C++, chamada hierarquia compilada, e uma hierarquia de classes similar dentro do interpretador *OTcl*, chamada hierarquia interpretada. As duas hierarquias são fortemente relacionadas. Do ponto de vista do usuário, há uma correspondência um-para-um entre uma classe na hierarquia interpretada e uma classe na hierarquia compilada. O usuário cria um novo objeto através do interpretador, este objeto é instanciado dentro do interpretador e um objeto correspondente é criado na hierarquia compilada.

Para realizar a simulação de uma rede, o usuário deve escrever um script em *oTcl* que inicializa um escalonador de eventos, configura a topologia da rede utilizando objetos e funções disponíveis na hierarquia e cria a lista de eventos que serão escalonados durante o período de simulação.

4 Módulo WiMAX

O desenvolvimento do trabalho foi feito sobre o módulo *WiMAX* desenvolvido pelo NIST, que implementa a camada física *OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)* baseado na especificação *WirelessMAN OFDM PHY*.

A camada física do módulo conta com diversos parâmetros configuráveis, tais como potência de transmissão, prefixo cíclico, faixa de frequência e *MCS (Modulation and Coding Scheme)*. O *MCS* conta com 7 diferentes perfis de modulação e codificação: *BPSK 1/2*, *QPSK 1/2*, *QPSK 3/4*, *16QAM 1/2*, *16QAM 3/4*, *64QAM 2/3* e *64QAM 3/4*.

A camada *MAC* contém algumas mensagens de gerenciamento, tais como *Downlink Channel Descriptor (DCD)*, *Uplink Channel Descriptor (UCD)*, *Downlink MAP (DL-MAP)*, *Uplink MAP (UL-MAP)*, *ranging request*, *ranging response*, *registration request* e *registration response*.

5 Modelos de Propagação

O modelo de propagação consiste em prever a potência do sinal no receptor, considerando os diversos fenômenos físicos, como *perda de percurso*, *multi-path delay spread*, *fading*, etc. O modelo de canal é amplamente utilizado no planejamento de área de cobertura das células.

O planejamento das áreas de cobertura das estações requer a estimativa dos níveis de sinal dessas estações, bem como das outras operando nas mesmas frequências adjacentes. É essencial prever as zonas limites (onde o nível de sinal é mínimo) e as zonas onde pode haver interferência.

A previsão do sinal envolve a estimativa do valor médio. As coberturas são estabelecidas para determinadas percentagens de locais e de tempo. É muito importante que os modelos de propagação se aproximem da realidade o melhor possível de forma que possam se tornar ferramentas fidedignas e indispensáveis no planejamento celular de uma rede de comunicação móvel.

A maioria dos modelos fornece o valor médio do sinal recebido no ponto de recepção. Torna-se assim necessário conhecer a estatística do sinal para determinar a sua variância. A abordagem do problema da estimativa do sinal não pode ser feita de modo exclusivamente determinístico. A estimativa correta e o desenvolvimento de modelos implicam no conhecimento de todos os que influenciam a propagação em comunicações móveis.

5.1 Classificação dos Modelos de Propagação

Para cálculos de atenuação em enlaces são utilizados em sua grande maioria modelos de propagação. Todos os modelos devem levar em consideração o comportamento aleatório do sinal propagado, que é principalmente relacionado com os instantes nos quais os diferentes sinais vindos de diferentes caminhos irão atingir o receptor.

Os modelos de propagação podem ser empregados para prever qual o comportamento dentro de um ambiente de propagação utilizando ferramentas computacionais que levem em consideração o ambiente. Essas ferramentas são bastante úteis, pois podem ajudar na localização dos pontos de acesso para reduzir os efeitos de atenuação ocasionados principalmente por multipercursos.

Os modelos de propagação dividem-se em duas grandes categorias:

- Empíricos
- Teóricos

5.2 Exame dos Modelos de Propagação

Na literatura encontra-se uma infinidade de modelos de propagação aplicáveis em ambientes outdoor, onde a estação móvel encontra-se do lado externo de construções, prédios e casas, e ambientes indoor, onde a estação móvel encontra-se interna as construções, bem como em pico células, micro células e macro células.

5.2.1 Modelo de Okumura

O Modelo de Okumura é amplamente usada para áreas urbanas, sendo um modelo empírico, desenvolvido com base em experimentos de medidas.

O modelo pode ser expresso pela equação:

$$(1) \quad L = Lf + A(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G(\text{area})$$

Onde:

L é o valor médio da perda devido ao caminho de propagação em dB

Lf é o valor da perda de propagação no Modelo Espaço-Livre em dB

$A(f, d)$ é o valor encontrado em curvas empíricas em dB

$G(h_{te})$ é o fator de ganho da estação transmissora em dB

$G(h_{re})$ é o fator de ganho da estação receptora em dB

$G(\text{area})$ é o valor encontrado em curvas empíricas; expressa o ganho devido ao ambiente em que o sistema está operando em dB

h_{te} é a altura efetiva da antena transmissora em metros

h_{re} é a altura efetiva da antena receptora em metros

f é a frequência em MHz

5.2.2 Modelo de Hata

O Modelo de Okumura foi tomado como referência para o desenvolvimento do Modelo de Hata, que na verdade, apresenta uma formulação prática do modelo de Okumura.

O modelo de Hata, de grande aceitação, leva em consideração a morfologia sem detalhamento, isto é, utiliza 'manchas' morfológicas para diferentes ambientes de propagação como área suburbana, área urbana, área urbana densa, área rural, etc.

O modelo de Hata é uma formulação empírica do modelo de Okumura. Aplica-se a uma faixa de frequências entre 150 e 1500MHz.

Esse modelo é melhor adequado para macro células por cobrir áreas maiores que 1 km. Como as áreas cobertas por uma micro célula são inferiores a esta distância o mesmo então não é recomendado.

O valor médio da perda de propagação de uma área urbana é:

$$(2) \quad L_u = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,90 - 6,55 \log(h_{te})) \log(d)$$

Onde:

L_u é a atenuação média em dB

h_{te} é a altura efetiva da antena transmissora em metros

h_{re} é a altura efetiva da antena receptora em metros

d é a distância da estação móvel até a estação base em quilômetros

f é a frequência em MHz

$a(h_{re})$ é o fator de correção da altura efetiva da antena receptora da unidade móvel, a qual é uma função do tamanho da área de cobertura em dB

Esse fator pode ser calculado desse modo:

• **Para uma região urbana:**

$$(3) \quad a(h_{re}) = (1,10 \log(f) - 0,70) h_{re} - (1,56 \log(f) - 0,80)$$

• **Para áreas urbanas densas e $f \leq 300 \text{ MHz}$:**

$$(4) \quad a(h_{re}) = 8,29 (\log(1,54 h_{re}))^2 - 1,10 h_{re}$$

- Para áreas urbanas densas e $f > 300\text{MHz}$:

$$(5) \quad a(hre) = 3,20(\log(11,75hre))^2 - 4,97hre$$

O valor médio da perda de propagação para uma área suburbana é:

$$(6) \quad L = L_u - 2(\log(f/28))^2 - 5,40$$

O valor médio da perda de propagação para uma área rural é:

$$(7) \quad L = L_u - 4,78\log(f)^2 - 18,33\log(f) - 40,98$$

5.2.3 Modelo COST 231

Esse modelo, desenvolvido a partir dos modelos de Walfish-Bertoni e Ikegami, leva em consideração a morfologia detalhada do terreno, com informações de altura de prédios, distância entre prédios, lagura média das ruas e orientação destas com relação à direção de propagação.

O Comitê de Pesquisas Europeu COST 231 desenvolveu este modelo para propagação em ambientes urbanos para utilização na faixa de frequência compreendida entre 800 e 2000 MHz, e aplica-se tanto a projetos de sistemas macro celulares, como micro celulares, podendo as antenas das estações rádio base estar situadas abaixo das alturas dos prédios.

A grande inovação do modelo do COST 231 está relacionada com o fenômeno da propagação guiada quando existe linha de visada entre a estação-base e a móvel na direção de uma rua cercada por edifícios. A propagação desta forma é diferente da propagação em espaço livre.

O valor da perda de propagação para este modelo é dada por:

Para $d \geq 20$ metros:

$$(8) \quad L_t = 42,6 + 26\log(d) + 20\log(f)$$

Para $d < 20$ metros:

$$(9) \quad L_t = L_0$$

Onde:

L_t é a atenuação total em dB

L_0 é a atenuação de espaço livre em dB

d é a distância da estação móvel até a estação base em quilômetros

f é a frequência em MHz

5.2.4 Modelo Espaço-Livre

O Modelo Espaço-Livre é o modelo de propagação que tem a situação mais otimista de perda de percurso, onde o transmissor e o receptor estão imersos em um espaço livre de obstruções e de reflexões em qualquer direção. O mecanismo de propagação envolvido é o de linha-de-visada, onde não há nenhum obstáculo entre o transmissor e o receptor. Embora a propagação em espaço livre seja uma situação bastante particular, este modelo é bastante utilizado devido sua simplicidade.

O seu entendimento e cálculo é útil para o estudo da propagação em diferentes ambientes e para diferentes sistemas.

A atenuação do sinal de rádio é determinada pela relação entre a potência recebida e a potência transmitida. No modelo de propagação espaço-livre, calcula-se a propagação entre antenas isotrópicas (irradiação uniforme em todas as direções) e os ganhos de antenas do transmissor e do receptor.

O cálculo da perda de percurso para o modelo é dada pela equação:

$$(10) \quad PL = 92,44 + 20\log(f) + 20\log(d) - 10\log(G_T) - 10\log(G_R)$$

Onde:

PL é a atenuação total em dB

d é a distância da estação móvel até a estação base em quilômetros

f é a frequência em MHz

5.2.5 Modelo SUI

O Modelo SUI (*Stanford University Interim*) [10], também conhecido como Modelo de Erceg, é um modelo de propagação empírico que se baseia em dados recolhidos em campo de forma experimental na faixa de 1,9 GHz em 95 macrocélulas em todo Estados Unidos. As medições foram feitas, em sua maioria, em áreas suburbanas de New Jersey, Seattle, Chicago, Atlanta e Dallas. Esse modelo também inclui o fenômeno físico *fading*, que é passagem da onda por obstáculos.

Uma vez que os sistemas WiMAX operam numa faixa de frequência de 2-11GHz e é capaz de transmitir sem linha-de-visada, o modelo é recomendado pelo IEEE 802.16 *working group* para ser utilizado em simulações de sistemas WiMAX.

O Modelo SUI tem três variantes com base no tipo de terreno:

- Categoria A é aplicável ao terreno montanhoso com forte densidade urbana
- Categoria B é aplicável ao terreno montanhoso com baixa densidade urbana ou terreno plano
- Categoria C é aplicável ao terreno plano com baixa densidade urbana

O Modelo de Erceg é um modelo *slope-intercept* dado por ($d \geq d_0$):

$$(11) \quad A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\gamma}\right)$$

$$(12) \quad PL = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s$$

Onde:

PL é a atenuação total em dB

d é a distância da estação móvel até a estação base em metros

A é o ponto de intercessão em dB

d_0 é a distância do ponto de intercessão até a estação base igual a 100 metros

γ é expoente de perda de percurso que varia de acordo com o tipo de terreno

s é o componente *fading* que é calculado com uma variável Gaussiana aleatória de média zero

Parâmetro	Terreno A	Terreno B	Terreno C
a	4,6	4,0	3,6
b	0,0075	0,0065	0,0050
c	12,6	17,1	20,0
σ_γ	0,57	0,75	0,59
μ_σ	10,6	9,6	8,2
σ_σ	2,3	3,0	1,6

Tabela 2: Parâmetros do Modelo SUI

6 Modulação e Codificação Adaptativa

A Modulação e Codificação Adaptativa visa adaptar a modulação e a codificação do canal de acordo com a qualidade do mesmo, ou seja, de acordo com a qualidade do sinal recebido. Isso garante que os usuários obterão uma boa taxa de transferência de dados com uma menor taxa de erro dos pacotes.

Como a tecnologia WiMAX esta sujeita a diversos tipos de interferências no sinal, faz-se necessário o uso desse mecanismo para melhorar a comunicação entre a BS e a SS.

É importante entender que o padrão IEEE 802.16 [2] apenas definiu o framework de modulação adaptativa, permitindo a um sistema WiMAX comunicar-se utilizando vários bursts profiles de acordo com a qualidade do canal. Ele não especificou os valores de threshold para a troca de modulação nem o algoritmo de adaptação.

Por isso, várias pesquisas estão sendo realizadas com relação a algoritmos de adaptação do canal.

6.1 Fundamentos da Adaptação do Canal

A idéia básica por trás do emprego de técnicas de adaptação de link é utilizar um link da forma mais eficiente possível dentro das condições prevalentes do canal. Tudo é feito para sustentar uma conexão, mesmo se algum comprometimento da qualidade da conexão tenha que ser empregado. Na maioria dos sistemas que empregam adaptação de link, isso resulta em um equilíbrio entre a robustez do link e eficiência de largura de banda.

Existem três mecanismos principais pelos quais um sistema poderia melhorar a robustez da conexão em detrimento da eficiência de largura de banda total:

- Modulação Adaptativa
- Forward Error Correction Adaptativo (FEC)
- Automatic Repeat Request (ARQ)

6.2 Funcionamento

A codificação dos dados é dividida em 5 etapas:

- aleatorização de dados (data randomization)
- codificação do canal (channel coding)
- ajuste de taxa (rate matching)
- H-ARQ (hybrid automatic Repeat request)
- entrelaçamento (interleaving)

Na **aleatorização de dados** os bits são reorganizados de maneira aleatória, com objetivo de fazer uma encriptação e prevenir que um receptor ‘não desejado’ receba os dados. Depois, são formados blocos chamados FEC (forward error correction) nos quais os dados são divididos. Cada bloco FEC é formado por um número de subcanais (contendo assim várias subportadoras de dados e subportadoras piloto).

Podem ser usados vários tipos de codificação para os dados:

- Codificação Turbo
- Codificação Reed-Solomon (polinomial)
- Codificação Convolutacional

A codificação Convolutacional é a mais usada dentre as outras e é a que foi usada no padrão [2] (em conjunto com a Reed-Solomon). A codificação Convolutacional consiste em transformar uma palavra de m bits em uma palavra de n bits, de acordo com uma função definida pelos últimos k bits a serem codificados, e sua taxa de codificação é dada por m/n . No padrão é usado k igual a 7 e m/n , geralmente, igual a $1/2$. Essa taxa significa que em cada palavra a ser codificada serão inseridos bits redundantes de tal forma que após a codificação teremos uma palavra com o dobro do tamanho da palavra original, ou seja, metade da palavra que realmente será transmitida é informação redundante. Assim teremos apenas a metade de nossa banda para transmitir informação útil.

Depois, na **fase de ajuste de taxa**, são adicionados ou retirados bits. A fase **H-ARQ**, que pode ser ou não usada, consiste em dar aos blocos que precisam ser reenviados uma redundância a mais para que tenham uma chance maior de serem recebidos no receptor. O próximo passo é o **entrelaçamento**, onde os bits são reposicionados em subportadoras diferentes para espalhar a informação, e assim evitar que algum erro atinja toda a informação original, lembremos que o processo de codificação inclui muitos bits redundantes.

Por fim, ocorre a modulação.

As Modulações mais utilizadas são apresentadas na Tabela 1.

6.3 Mecanismos Implementados na Literatura

6.3.1 QoS-Aware Link Rate Adaptation (Q-LRA)

Esse algoritmo proposto em [3] leva em consideração, para determinar a melhor modulação, a demanda de QoS e a qualidade do sinal no canal. A demanda de QoS de uma conexão é representada como a taxa de pacotes perdidos (PER).

Com base no PER, a BS calcula o threshold do SNR (signal-to-noise rate) de cada modulação.

Pela comparação do SNR calculado com o threshold do SNR de todas as modulações, a BS sugere à SS a melhor modulação.

O algoritmo Q-LRA consiste de duas fases:

1. Derivação da faixa de SNR aceitável:

Para derivar o SNR threshold de cada modulação, nós assumimos que os pacotes tem tamanho fixo B. Assim, dado o PER, a taxa de erro de bit P_{be} pode ser calculada desso modo:

$$(13) \quad P_{be} = 1 - \sqrt[B]{1 - PER}$$

2. Seleção da Modulação

- (a) A SS informa à sua BS a condição do PER do novo fluxo de serviço i .
- (b) Com o modelo de erro de canal adotado e a condição do PER especificado, a BS calcula a correspondente faixa de SNR aceitável (denotada como E_b/N_0) de todas as modulações.
- (c) Comparando o E_b/N_0 calculado com a faixa SNR obtida de cada modulação, a BS sugere à SS a melhor modulação, digamos que seja a modulação m .

A BS aloca $Num_slots[i]$ slots para a SS de acordo com a taxa de dados suportada pela modulação m (denotada como R_m) e do tamanho da fila de dados do fluxo de serviço i . $Num_slots[i]$ é calculado com a seguir:

$$(14) \quad Num_slot[i] = \frac{data_queue[i]}{R_m \times T_{slot}}$$

6.3.2 Dynamic Threshold Link Adaptation (DTLA)

Esse algoritmo proposto em [9] foi desenvolvido para ser utilizado em redes WiMAX que utilizam a tecnologia Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO).

Essa tecnologia, MIMO, provê uma solução promissora no aumento da robustez dos dados transmitidos enquanto não sacrifica as taxas de transmissão através da diversidade do meio.

Esse algoritmo foi proposto para a mudança de modulação do canal downlink (DL) da SS, enquanto o canal uplink adota o BPSK 1/2, o burst profile mais robusto, para que mensagens sejam transmitidas para a BS.

A seleção do burst profile do DL é baseado nos SNRs thresholds na camada física através de um mecanismo dinâmico de sondagem para lidar com diferentes condições do canal.

1. Atualização das Estatísticas:

O algoritmo mantém estatísticas do número de pacotes corrompidos, pacotes corrompidos sucessivos e pacotes recebidos com sucesso. para cada MCS. O SNR estimado e o cálculo do número de Demmel são mantidos para cada burst. O SNR é atualizado pela média do SNR atual com os valores anteriores de acordo com a equação:

$$(15) \quad SNR_{est} = (1 - \alpha) * SNR_{est} + \alpha * SNR_{cur}$$

, where $\alpha = [0,1]$

2. Atualização dos Thresholds:

Dois tipos de thresholds são introduzidos no algoritmo: o burst profile enter threshold (BPET) e o burst profile probe threshold (BPPT).

- (a) BPET: Cada MCS mantém um BPET no qual é o SNR inicial que o MCS esta habilitado a usar. Um MCS que tem um valor de BPET menor do que o valor de SNR atual será um forte candidato para a adaptação de taxa. As regras de adaptação são baseadas em estatísticas colhidas como o PER e BER do MCS.
- (b) BPPT: O BPET do MCS atualmente em uso é atualizado para o valor do SNR estimado, SNR_{est} , somente se SNR_{est} cair abaixo do valor de SNR_{BPET} e o pacote é recebido com sucesso, porque isso mostra que o MCS pode ser usado em um menor SNR. O BPET é incrementado linearmente por 2 dB se o pacote recebido esta corrompido e SNR_{est} esta acima do BPET do MCS atualmente em uso porque isso mostra que o MCS pode não funcionar bem com esse BPET.

3. Escolher um MCS:

Um MCS onde $SNR_{est} > SNR_{BPET}$ torna-se um candidato. A ordem dos MCSs é obtida do resultados das simulações na camada física.

A Tabela 3 mostra a ordem das taxas adotadas pelo algoritmo.

O algoritmo primeiro inicia com uma taxa maior do que a taxa atual e passa através de todas as taxas onde o $SNR_{est} > SNR_{BPET}$. Se o MCS falhar no recebimento de cinco pacotes consecutivos ou o número de condição Demmel aumenta ao longo das últimas amostras com a diminuição do SNR, o MCS não é selecionado. Se o MCS satisfizer o critério, o número de condições do número de bins no qual satisfizer $SNR_{est} > SNR_{BPET}$ será contado e o MCS com o maior número de bins satisfeitas será escolhida como o melhor.

4. Ajuste da escolha de acordo com as condições do canal:

Se o MCS escolhido é menor do que a taxa atual recebida, a escolha deve ser ajustada. Se o número da condição Demmel esta aumentando em todo o número de condição armazenado com um decremento do SNR_{est} , o MCS que esta uma posição abaixo do rate ID atual será selecionado. Caso contrário, o MCS escolhido será enviado para a BS através do DBPC-REQ se ele for diferente do atual.

Rate ID	MCS	FEC code rate	MIMO mode
0	<i>QPSK</i>	1/2	STBC
1	<i>QPSK</i>	2/3	STBC
2	<i>QPSK</i>	1/2	SM
3	<i>16QAM</i>	1/2	STBC
4	<i>QPSK</i>	3/4	SM
5	<i>16QAM</i>	3/4	STBC
6	<i>16QAM</i>	1/2	SM
7	<i>64QAM</i>	2/3	STBC
8	<i>64QAM</i>	3/4	STBC
9	<i>16QAM</i>	3/4	SM
10	<i>64QAM</i>	2/3	SM
11	<i>64QAM</i>	3/4	SM

Tabela 3: Ordem das Taxas

6.3.3 Modelo de Ramachandran, Bostian e Midkiff

Esse modelo proposto em [8] utiliza o SNR como métrica para a escolha da melhor MCS para a comunicação entre a BS e a SS.

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um algoritmo simples para implementar a adaptação de canal usando o framework definido no padrão [2].

Nesse modelo, a SS calcula o SNR e verifica a melhor MCS para aquele SNR como é recomendado pelo padrão [2]. A SS fica constantemente calculando o SNR e quando seu valor excede ou cai abaixo do nível de threshold do MCS atual, a SS requisita a troca do downlink burst profile para um que seja melhor para a situação de comunicação atual.

Essa requisição de troca de modulação é feita utilizando a mensagem Range Request (RNG-REQ) definida no padrão [2]. A SS utiliza o intervalo da manutenção inicial ou o intervalo da manutenção da estação para transmitir essa mensagem para a BS com o DIUC do burst profile desejado.

7 Modelo de Erros

7.1 Modelo de Bustamante

Para encontrar o valor de PER, [6] propôs um modelo que usa um simulador OFDMA desenvolvido em *MatLab*, configurando um perfil MCS, informação do canal e tamanho do pacote. O simulador conta com os seguintes componentes: gerador de pacotes aleatório, *Reed Solomon Coder*, *Convolutional Coder*, *Scrambler* e *Interleaver*, Modulador, Equalizador e uma modelo de canal *multipath*.

Executando diversas simulações, os valores de BER para cada perfil de modulação e codificação foi encontrado, para um intervalo de SNR, como mostra o gráfico. Para obter os valores de PER, o pacote era codificado e adicionado um número aleatório de erros, para depois ser decodificado e analisado se estava correto ou não. O valor do PER para cada número de erro pode ser visualizado na figura.

7.2 Modelo ICRFE

Um simulador WiMAX que implementa a camada física OFDM do padrão IEEE 802.16-2004 foi proposto pelo ICRFE da Vienna University of Technology. O simulador foi desenvolvido em *Matlab* e conta com três elementos básicos (Transmissor, Receptor e Modelo de Canal) para realizar a avaliação de desempenho das redes WiMAX.

Esse modelo apresenta apenas os valores de BER, e as estimativas são feitas no receptor. O receptor é composto pelos seguintes componentes: Conversor FFT, filtros, *Disassembler*, *Demapper* e *Decoder*.

Geralmente, o número de erros em uma sequência de *bits* é modelado através de uma distribuição binomial, supondo que os erros são independentes e ocorrem com a mesma probabilidade.

O valor de PER pode ser obtido a partir do BER com a equação:

$$(16) \quad PER = 1 - (1 - BER)^L$$

Onde L é o tamanho do pacote.

7.3 Modelo no ns-2

Por conta da complexidade nos cálculos, é inviável realizar uma simulação *bit a bit* na ferramenta *ns-2*. Por causa disto, as simulações são executadas em um simulador desenvolvido em *MatLab*. Para incluir esses modelos na ferramenta *ns-2*, as simulações *bit a bit* são executadas no *MatLab* e os resultados são importados em forma de tabela para o módulo WiMAX. Desta maneira, os valores de *BER* e de *PER* são retornados de forma rápida, porém, perde-se precisão, uma vez que não é possível armazenar os infinitos pontos da curva.

Para contornar o problema da precisão, ao consultar a tabela de valores, os dois valores mais próximos são recuperados e então é feita uma interpolação linear. A interpolação é o método mais viável a ser aplicado, visto que as outras alternativas, como utilizar uma interpolação com uma *Q-function* ou uma função *Arc-Tangente*, tem uma alta complexidade de implementação.

Os valores são consultados na tabela da seguinte forma. Com o *SNR* medido do pacote, os dois valores mais próximos do *SNR* são consultados na tabela de *BER*. É feita uma interpolação com esses dois valores e é encontrado um valor de *BER*. Se estiver sendo utilizado o Modelo de Erros - Bustamante, a consulta é repetida na tabela de *PER*. No caso do Modelo de Erros - ICRFE, o valor é obtido analiticamente com a equação.

Depois de feita a estimativa do *PER*, considera-se que o valor de *PER* é a probabilidade de perda de pacote. Uma variável uniforme aleatória com intervalo de 0 a 1 é utilizada. Se o valor da variável for menor ou igual ao valor da probabilidade de perda de pacote, o pacote é descartado, senão, o pacote é recebido pela camada física OFDM.

8 Trabalho Realizado

Foi verificado que o módulo WiMAX que integraríamos com o simulador *ns-2* não implementava modelos de erros na camada física nem modelos de canais realistas, ou seja, modelos de canais que se adequam aos ambientes reais onde o WiMAX poderá ser implantado. Então, para uma primeira etapa do projeto, modelos de canais realistas e modelos de erros foram implementados no simulador *ns-2*.

Um dos modelos de canal mais utilizados em simulações é o Modelo Espaço-Livre, no qual já está implementado no *ns-2*. Porém, ele não providência uma medição realista. Já o Modelo SUI, é um modelo empírico (como vismos na seção de modelos de canal), ou seja, um modelo mais realista, porém ele não está implementado no *ns-2*, assim sendo necessário sua implementação e validação.

Para implementar o Modelo SUI, foi procurado na literatura as informações necessárias para o funcionamento desse modelo, como as variáveis, as equações, etc., para que o modelo implementado fosse o mais realista possível.

Além disso, modelos de erros [6] foram estudados na literatura para serem incorporados na camada física do módulo WiMAX utilizado, assim chegando a um modelo mais realista possível.

Como o padrão [2] apenas define um framework para a modulação adaptativa sem definir nenhum algoritmo como padrão, resolvemos estudar na literatura [8] [3] [9] formas de se fazer essa implementação. Depois desse estudo, um algoritmo foi implementado e validado, deixando o nosso módulo com a capacidade de efetuar a adaptação dinamicamente.

8.1 Modelo Proposto

O modelo proposto implementa um modelo de propagação para ambientes das redes WiMAX e uma camada física realista que leva em conta as imperfeições do meio.

A camada física, em conjunto com o modelo de propagação, determina se um pacote foi recebido corretamente. O modelo de propagação retorna um valor de SNR (*Signal to Noise Ratio*), que indica a qualidade do sinal em relação ao ruído no receptor. Com o valor de SNR, a camada física calcula o BER (*Bit Error Rate*) e, de acordo com o tamanho do pacote, calcula o PER (*Packet Error Rate*). O valor do PER indica a probabilidade do pacote conter um erro.

Além disso, um algoritmo de AMC foi implementado no nosso modelo para resolver o problema da adaptação dinâmica da modulação.

Esse algoritmo está de acordo com o padrão [2], ou seja, leva em consideração a qualidade do sinal medido pelo SNR para saber quando a modulação deve ser trocada. Como o padrão [2] não especifica qual o valor de SNR para cada modulação, um estudo específico para determinar esse valor foi feito levando em conta somente as interferências no sinal.

Para que esse algoritmo servisse para os modelos de propagação mais utilizados, um estudo mais detalhado desse algoritmo sobre o modelo SUI foi feito, pois como mostram as figuras 2, 3 e 4, o valor do SNR instantâneo tem uma grande variação em comparação com o SNR instantâneo do modelo espaço-livre na figura 1. Por esse motivo, o SNR usado foi o médio que é calculado com a equação 15.

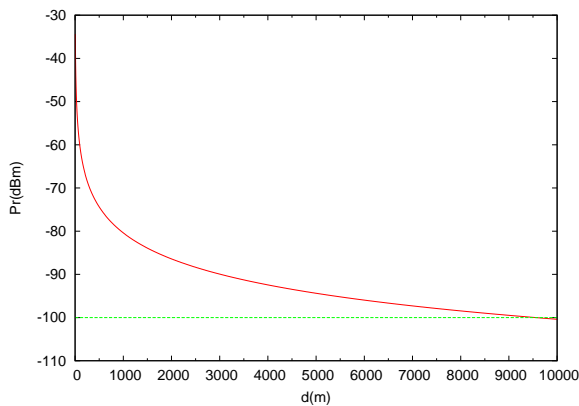


Figura 1: SNR instantâneo no Modelo Espaço-Livre

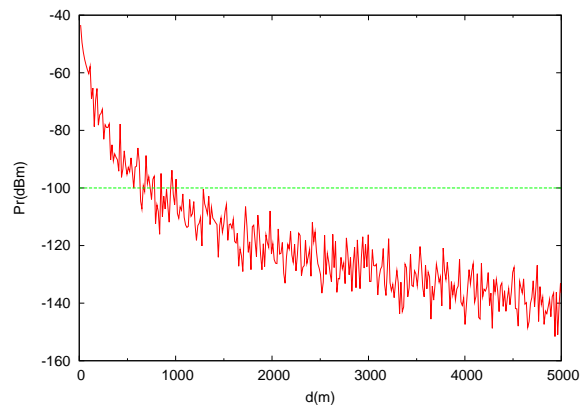


Figura 2: SNR instantâneo no Modelo SUI - Terreno A

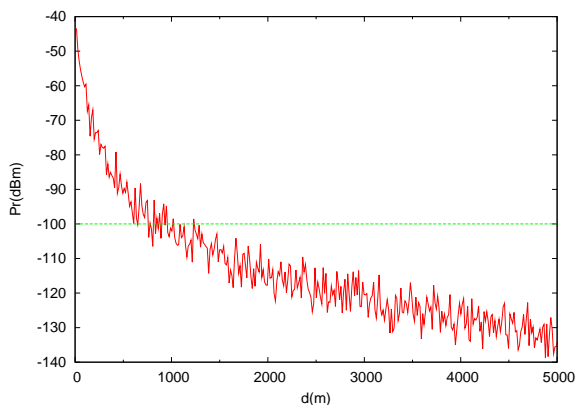


Figura 3: SNR instantâneo no Modelo SUI - Terreno B

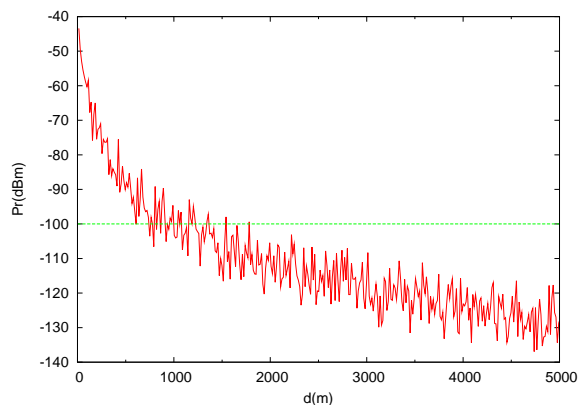


Figura 4: SNR instantâneo no Modelo SUI - Terreno C

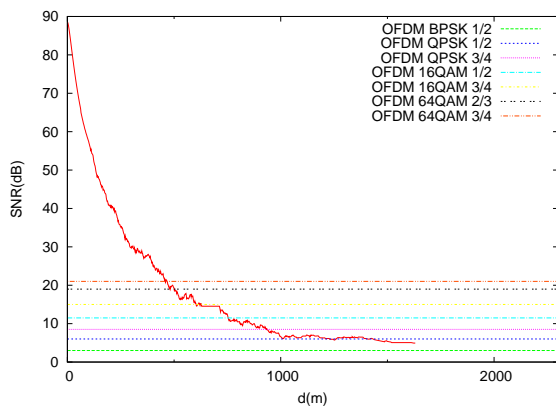


Figura 5: SNR médio no Modelo SUI - Terreno A

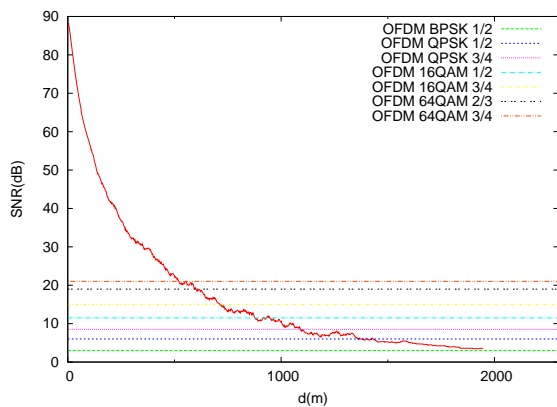


Figura 6: SNR médio no Modelo SUI - Terreno B

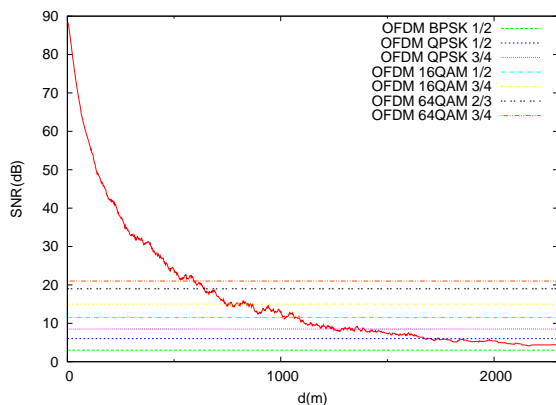


Figura 7: SNR médio no Modelo SUI - Terreno C

Podemos observar, nas figuras 5, 6 e 7, que os SNR médios para os Terrenos A, B e C do modelo de propagação SUI respectivamente, com o valor de α da equação 15 igual a 0.05 (o que corresponde a 5%), tem uma variação muito menor que o SNR instantâneo, assim servindo como medida para o valor do SNR das trocas de modulação.

A partir desse estudo, um algoritmo cujas características principais serão discutidas abaixo, foi implementado.

Características principais:

1. O SNR médio é calculado pela Base Station para cada Subscriber Station

Através da modelo de propagação adotado, a BS calcula o SNR e com a equação 15 ela calcula o SNR médio de cada pacote recebido para cada SS.

2. O algoritmo usa duas tabelas para relacionar o valor do SNR à modulação correta:

- Uma das tabelas usa um intervalo de valores que é usado quando o SNR tem uma variação aleatoriamente muito grande
- A outra tabela usa um valor único que é usado quando o SNR não tem uma variação aleatória acentuada

3. A Estação Base troca a modulação do downlink da Subscriber Station

4. A modulação do uplink não é alterada

Dois modelos de erros foram implementados para simular o descarte de pacotes:

- modelo de Bustamante
- modelo proposto pelo ICRFE

8.2 Simulações

Diversos cenários foram projetados para avaliar o modelo de camada física implementado. As topologias e os parâmetros de redes foram implementados em *scripts TCL* e simulados no módulo WiMAX do *ns-2*.

Apenas uma célula foi modelada com uma configuração PMP (*Point Multi-Point*), utilizando uma estação base (BS) e uma estação cliente (SS). A estação cliente se inicia na mesma localização da estação base e vai se distanciando com velocidade constante. Foram executadas simulações para diferentes MCS, desde a mais robusta BPSK 1/2 até a mais eficiente 64QAM 3/4

Com potência de 0.01 watt para o modelo de Espaço Livre e 0.1 watt para o modelo SUI, a estação base transmite para uma estação cliente que se distancia com velocidade constante. A fonte de tráfego utilizado foi um agente CBR, com pacotes de 100 bytes, a uma taxa de 10Mbps sobre o protocolo UDP. Foi escolhido o protocolo UDP para que o mecanismos de controle de congestionamento não influenciasse a taxa de vazão da rede.

Os parâmetros de configuração dos dispositivos da simulação foram definidos de acordo com a especificação do documento desenvolvido pelo WiMAX Forum, que descreve a metodologia para avaliação de sistemas WiMAX.

Os principais parâmetros estão descritos na tabela 4.

Parâmetro	Valor
Ganho de antena(BS)	16 dBi
Ganho de antena(SS)	0 dBi
Tamanho da antena(BS)	32 m
Tamanho da antena(SS)	1.5 m
Figura de ruído(BS)	4 dB
Figura de ruído(SS)	8 dB
Total Bandwidth	10 MHz
Frequência de operação	2.5 GHz
Potência de transmissão	0.1 watt / 0.01 watt

Tabela 4: Parâmetros usados nas simulações

9 Resultados

9.1 Análise de cobertura

Para a avaliar a degradação do sinal com o modelo de propagação, foi feita uma análise de cobertura da célula WiMAX com uma antena isotrópica.

Com potência de 0.1 watt, a estação base transmite para uma estação cliente que se distancia com velocidade constante.

No primeiro cenário, o modelo de propagação utilizado foi o Espaço Livre. A figura 1 mostra a cobertura do sinal num cenário ideal. Considerando um *threshold* de referência de -100 dBm, a área de cobertura tem um raio de aproximadamente 9,5 quilômetros.

Foram simulado os diversos tipos de terrenos do modelo SUI descritos anteriormente. As figuras 2, 3 e 4 mostram a cobertura do sinal em ambientes suburbanos de diferentes características. No terreno A, a área de cobertura é de aproximadamente 800 metros, no terreno B, o sinal chega a aproximadamente 1000 metros e no terreno C, a 1300 metros.

Comparando os modelos simulados (figuras 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10 e 11) observa-se que o modelo Espaço-Livre possui um raio de cobertura irreal, enquanto que o modelo SUI simula três tipos de ambientes mais realista.

Em um ambiente real, para conseguir um alcance maior, diversas técnicas são utilizadas, como por exemplo a utilização de várias antenas (*MIMO - Multiple In Multiple Out*).

Uma experimentação de Milanovic realiza um estudo comparando modelos de propagação com algumas medidas realizadas nas áreas urbanas e suburbanas de Osijek, Croácia. O modelo de Erceg apresentou os resultados mais precisos quando comparados com os modelos de COST 231, Hata, etc.

9.2 Modelo de Erros

Para a avaliar a desempenho da rede através da AMC e do modelo de erros, simulações foram realizadas utilizando o throughput e o SNR como métricas.

O parâmetros desta simulação está descrito na seção 8.

As figuras 12 e 13 mostram a taxa de vazão de cada MCS de acordo com a distância no Modelo Espaço-Livre, mostrando que o modelo proposto melhora a implementação quando comparado com uma implementação sem a

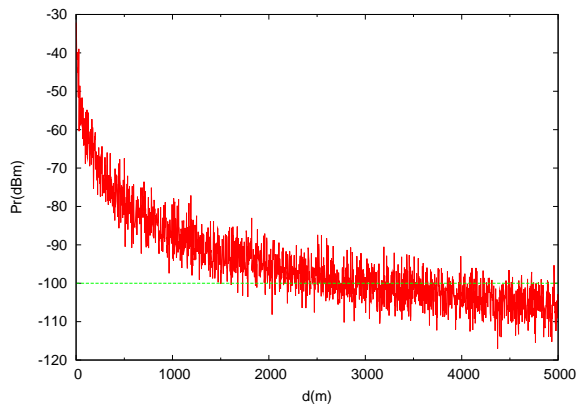


Figura 8: SNR instantâneo no Modelo Shadow

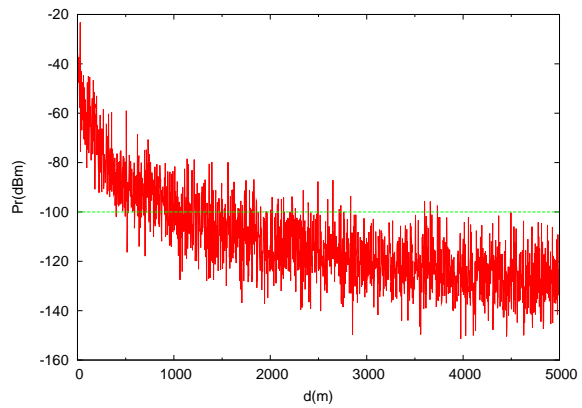


Figura 9: SNR instantâneo no Modelo Shadow

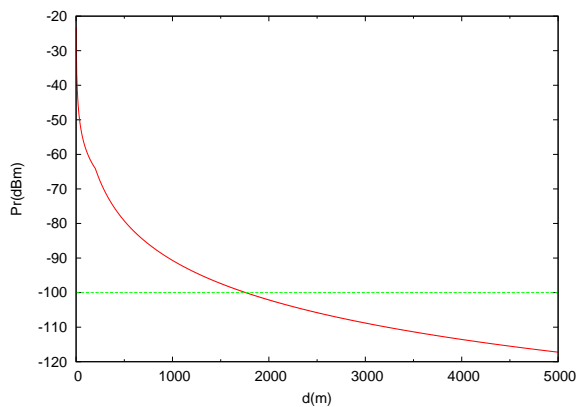


Figura 10: SNR instantâneo no Modelo Nakagami

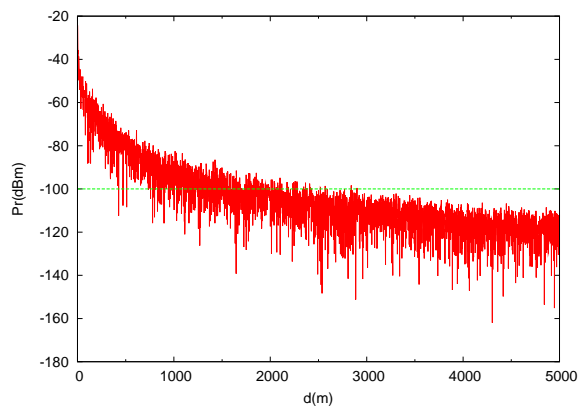


Figura 11: SNR instantâneo no Modelo Nakagami

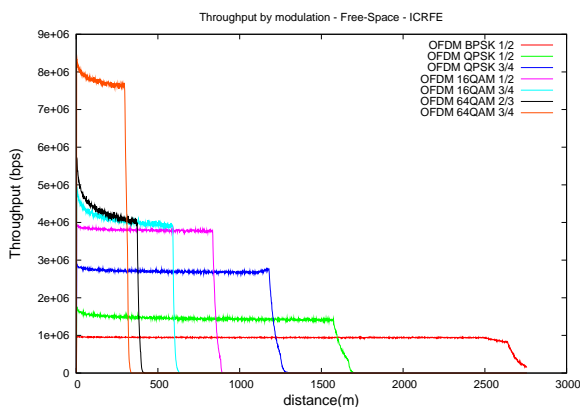


Figura 12: Modelo ICRFE - Espaço Livre

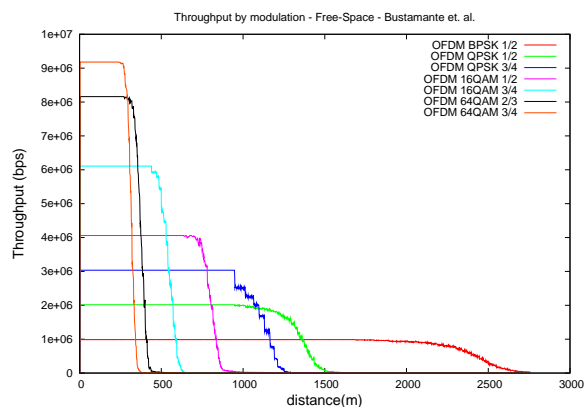


Figura 13: Modelo Bustamante - Espaço Livre

modelagem de erros. O modelo é uma representação mais detalhada da realidade, visto que quando um *link* é estabelecido utilizando um certo MCS, a qualidade da conexão degrada progressivamente quando a distância entre a estação base e a estação cliente aumenta.

Pelas figuras 12 e 13 observa-se que ambos os modelos trazem um maior realismo nas simulações, entretanto, o Modelo de Erros - Bustamante apresenta um melhor resultado pois as curvas têm uma queda na taxa de vazão mais suave, enquanto que o Modelo de Erros - ICRFE apresenta um resultado mais pessimista.

Isso é devido ao fato de que o modelo proposto em [6] realiza uma simulação para encontrar o BER e realiza outra simulação para encontrar o PER, enquanto que o modelo proposto pelo ICRFE realiza simulação apenas para o encontrar o valor de BER. Neste caso, o PER é estimado estatisticamente, encontrando a probabilidade mais pessimista de perder o pacote.

9.3 Modulação e Codificação Adaptativa

Pela figura 14 observamos o mecanismo AMC implementado em ação, adaptando a modulação para obter o melhor throughput de acordo com a variação do SNR com o aumento da distância da SS em relação a BS. Nas figuras 15, 16 e 17 observamos as trocas de modulação de acordo com o SNR para cada tipo de terreno do modelo SUI.

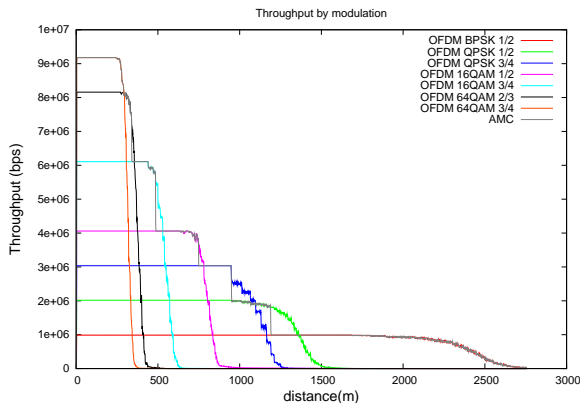


Figura 14: Modelo Bustamante - Espaço Livre

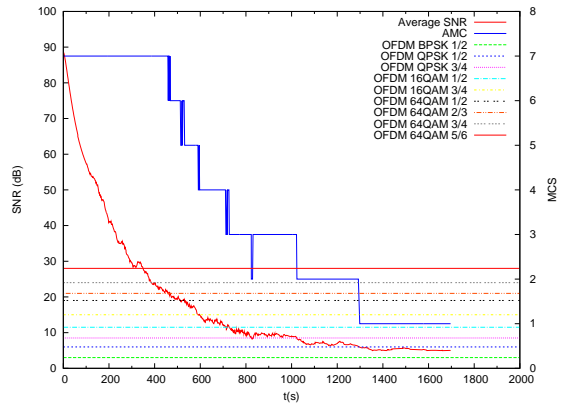


Figura 15: Modelo SUI - Terreno A

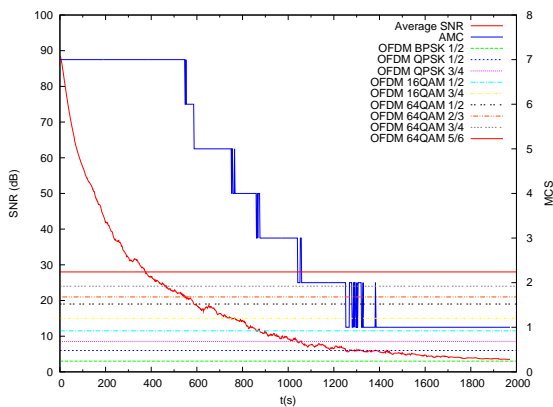


Figura 16: Modelo SUI - Terreno B

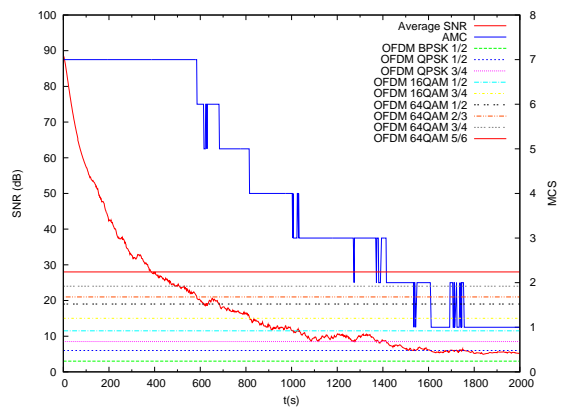


Figura 17: Modelo SUI - Terreno C

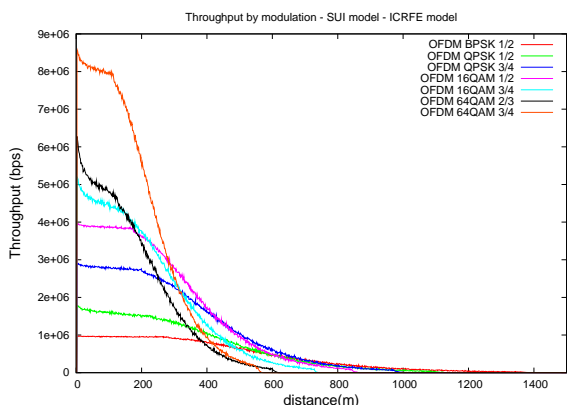


Figura 18: Modelo ICRFE - modelo SUI

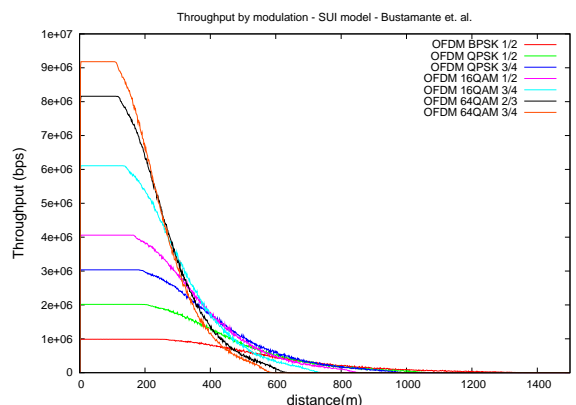


Figura 19: Modelo Bustamante - modelo SUI

As figuras 18 e 19 mostram a taxa de vazão de cada MCS de acordo com a distância num ambiente suburbano, com os fenômenos físicos *perda de percurso* e *fading*.

Com o Modelo SUI, nota-se um aumento da aleatoriedade na rede devido ao componente de aleatoriedade.

Devido à esse comportamento mais aleatório, acredita-se que as simulações com o Modelo SUI se aproximam mais da realidade. Entretanto, esse comportamento torna o estudo da rede mais difícil de ser realizado.

Os modelos implementados trazem uma grande contribuição para as pesquisas de redes WiMAX, pois permitem que estudos de desempenho ou de algoritmos que levam em conta o canal sejam realizados.

10 Conclusão

Este trabalho apresenta a implementação de uma extensão para um módulo para simulação de redes WiMAX.

A extensão proposta neste trabalho é capaz de realizar simulações de nível de *link* sem a complexidade das simulações de *bit a bit*.

Os resultados apresentados mostram que os modelos implementado trazem mais realismo nas simulações de redes WiMAX e levam em conta os efeitos do canal sem fio. Com o modelo de canal, o raio de cobertura da célula é mais realista. Já com o modelo de erros, a qualidade da rede cai progressivamente assim que a distância vai aumentando.

Mostramos também que o módulo WiMAX, com a implementação da camada MAC, da camada física realista e do modelo de canal, abre uma grande variedade de estudos em sistemas WiMAX, tornando-se uma importante contribuição no estudos de redes sem fio.

11 Apoio

- Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - Pibic/CNPq - PRP
- Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca
Professor Titular/MS6 - Instituto de Computação/Unicamp
- Laboratório de Redes de Computador - Instituto de Computação/Unicamp
- Flávio Adalberto Kubota
Aluno de Mestrado - Instituto de Computação/Unicamp
- Pedro Henrique Gomes
Aluno de Mestrado - Instituto de Computação/Unicamp

Referências

- [1] *The network simulator - ns-2*, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [2] *Ieee standard for local and metropolitan area networks part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems*, IEEE Std 802.16-2004 (2004).
- [3] Yu-Ting Yu e Hsi-Lu Chao, *Qos-aware link rate adaptation in ieee 802.16 broadband wireless access systems*, 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (2007).
- [4] J. Freitag e N. L. S. da Fonseca, *wimax module for the ns-2 simulator*, **Set.** (2007), 1–6.
- [5] F. C. D. Tsai C. W. Chang S. S. Liu J. Guo W. J. Lien J. H. Sum e C. H. Hung J. Chen, C. C. Wang, *The design and implementation of wimax module for ns-2 simulator*, WNS2'06: Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator (2006), 5.
- [6] R. C. Hincapi e R. Bustamante L. Betancur, *wimax channel: Phy model in network simulator 2*, WNS2'06: Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator (2006), 6.
- [7] National Institute of Standards and Tecnology, *The network simulator ns-2 nist add-on - ieee 802.16 model (mac+phy)*, (2007).
- [8] C. W. Bostian e S. F. Midkiff S. Ramachandran, *A link adaptation algorithm for ieee 802.16*, IEEE Wireless Communications and Networking Conference **3** (2005), no. Mar, 1466–1471.
- [9] Tsz, *A link adaptation algorithm in mimo-based wimax systems*, Journal of Communications **2** (2007), no. 5.
- [10] S. Tjandra S. Parkoff A. Gupta B. Kulic A. Julius e R. Bianchi V. Erceg, L. Greenstein, *An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments*, Selected Areas in Communications, IEEE Journal **17** (1999), 1205–1211.