

Simulação de Rádio Sobre Fibra Integração e Validação de Módulos para Simulação de WiMAX sobre redes ópticas

Relatório Final

Orientando: Tiago Pedroso da Cruz de Andrade (064812)

Orientador: Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca

Local: Laboratório de Redes de Computador - Instituto de Computação/Unicamp

Vigência: 08/2008 - 07/2009

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

Conteúdo

1	Introdução	1
2	O padrão IEEE 802.16	1
3	Ferramenta NS-2	2
4	Módulo WiMAX	2
5	Modelo de Canal	2
5.1	Modelo de Hata	2
5.2	Modelo de COST 231	3
5.3	Modelo Espaço-Livre	4
5.4	Modelo SUI	4
6	Atividades	4
6.1	Modelo proposto	5
6.1.1	Modelo de Erros - Bustamante	5
6.1.2	Modelo de Erros - ICRFE	5
6.1.3	Modelo de Erros no <i>ns-2</i>	5
6.2	Simulações	6
7	Resultados	6
7.1	Análise de cobertura	6
7.2	Modelo de Erros	7
8	Conclusão	9
9	Apoio	10
10	Agradecimentos	10

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 [1], 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 de 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)* [2] é a ferramenta de maior popularidade entre os pesquisadores.

Diversos módulos [3] [4] [6] foram propostos para simulação de redes IEEE 802.16 usando o *ns-2*. Entre deles está o módulo implementado pelo *National Institute of Standards and Technology (NIST)* [6].

Este trabalho apresenta uma extensão para o módulo desenvolvido pelo NIST com uma camada física OFDM e um modelo de canal realista. A extensão do módulo implementa um modelo de canal 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 o a distância entre duas estações aumenta.

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 O padrão IEEE 802.16

A arquitetura de uma rede que utiliza o padrão IEEE 802.16 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 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 IEEE 802.16 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.

3 Ferramenta NS-2

O Network Simulator 2 (*ns-2*) [2] 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 Modelo de Canal

O modelo de canal 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 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 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:

$$(1) \quad L_u = 69,55 + 26,16\log(f) - 13,82\log(hre) - a(hre) + (44,90 - 6,55\log(hre))\log(d)$$

Onde:

L_u é a atenuação média em dB

hre é a altura efetiva da antena transmissora em metros

hre 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

$a(hre)$ 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:

$$(2) \quad a(hre) = (1,10\log(f) - 0,70)hre - (1,56\log(f) - 0,80)$$

- Para áreas urbanas densas e $f \leq 300MHz$:

$$(3) \quad a(hre) = 8,29(\log(1,54hre))^2 - 1,10hre$$

- Para áreas urbanas densas e $f > 300MHz$:

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

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

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

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

$$(6) \quad L = L_u - 4,78\log(f)^2 - 18,33\log(f) - 40,98$$

5.2 Modelo de 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, largura 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:

$$(7) \quad L_t = 42,6 + 26\log(d) + 20\log(f)$$

Para $d < 20$ metros:

$$(8) \quad L_t = L_0$$

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

5.3 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 de 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:

$$(9) \quad PL = 92,44 + 20\log(f) + 20\log(d) - 10\log(G_T) - 10\log(G_R)$$

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

5.4 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 ($d \geq d_0$):

$$(10) \quad A = 20\log\left(\frac{4\pi d_0}{\gamma}\right)$$

$$(11) \quad PL = A + 10\gamma\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s$$

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

6 Atividades

No projeto original, foi proposto a integração entre o módulo WiMAX/NIST e o módulo WDM na ferramenta *ns-2*, o que permitiria a simulação de redes Rádio sobre Fibra, possibilitando o estudo detalhado do desempenho de protocolos de alto nível de redes BWA em enlaces ópticos.

Mas esse projeto sofreu modificações em relação as sua proposta ao decorrer do seu desenvolvimento.

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, primeiramente, 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 providencia 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 [8] foram estudados na literatura para serem incorporados na camada física do módulo WiMAX utilizado, assim chegando a um modelo mais realista possível.

6.1 Modelo proposto

O modelo proposto implementa um modelo de canal 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 canal, determina se um pacote foi recebido corretamente. O modelo de canal 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.

Com uma variável aleatória, determina-se se o pacote recebido deve ser descartado ou não.

Dois modelos de erros foram implementados para simular o descarte de pacotes: o modelo de Bustamante e o modelo proposto pelo ICRFE.

6.1.1 Modelo de Erros - Bustamante

Para encontrar o valor de PER, [8] propôs um modelo que usa um simulador OFMA desenvolvido em *MatLab*, configurado 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.

6.1.2 Modelo de Erros - 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:

$$(12) \quad PER = 1 - (1 - BER)^L$$

Onde L é o tamanho do pacote.

6.1.3 Modelo de Erros 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.

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 1: Parâmetros usados nas simulações

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.

6.2 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 1

7 Resultados

7.1 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(a) 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 1(b), 1(c) e 1(d) 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 o dois modelos simulados, observa-se que o modelo de 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*).

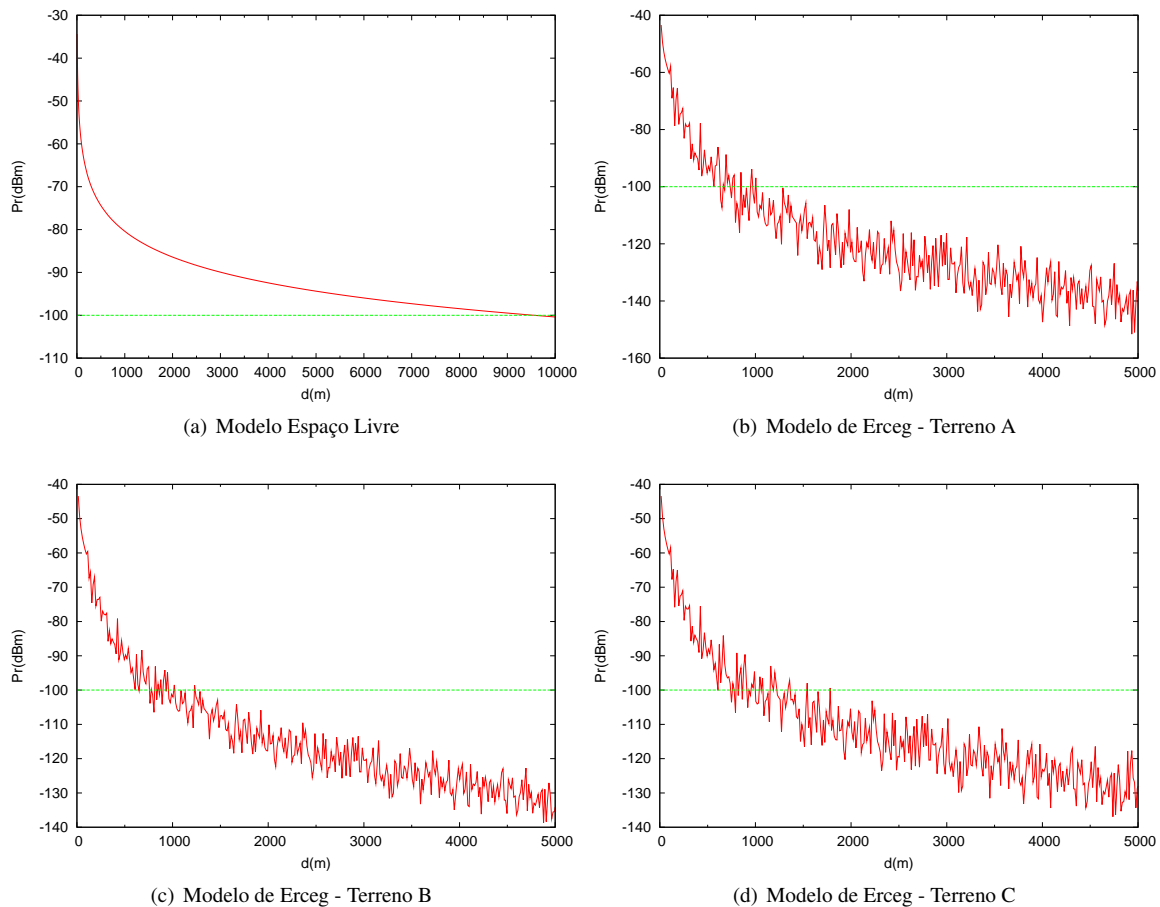


Figura 1: Potência recebida em diversos cenários

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, Macro model e Model 9999.

7.2 Modelo de Erros

Para a avaliar a desempenho da rede com o modelo de erros, simulações foram realizadas utilizando a vazão como métrica.

O parâmetros desta simulação está descrito na seção *Simulações*.

As figuras 2 e 3 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 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 2 e 3 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 [8] 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 estimando estatisticamente, encontrando a probabilidade mais pessimista de perder o pacote.

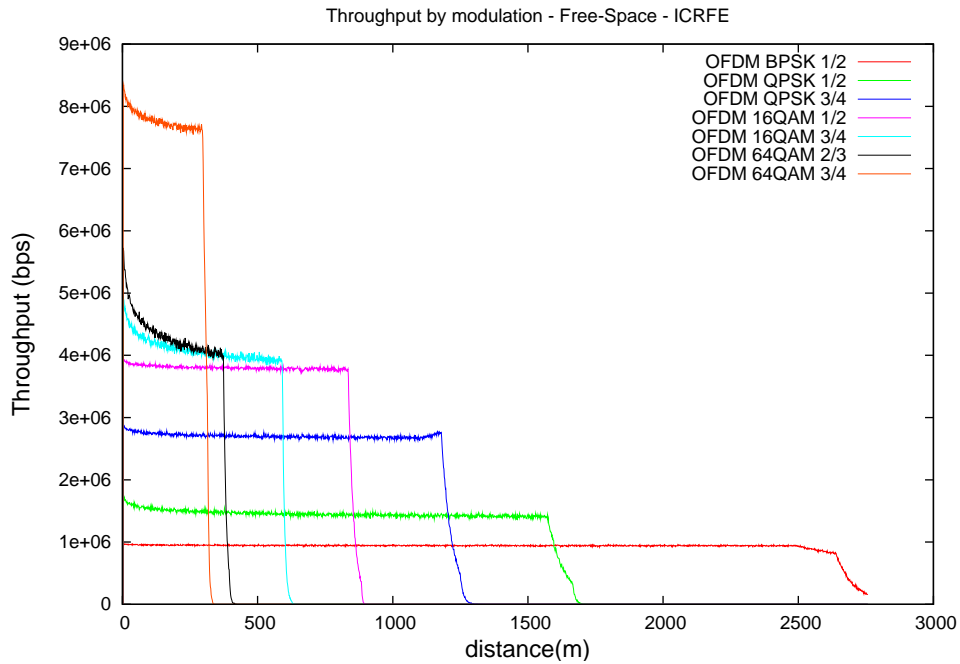


Figura 2: Vazão vs. Distância - modelo ICRFE - Espaço Livre

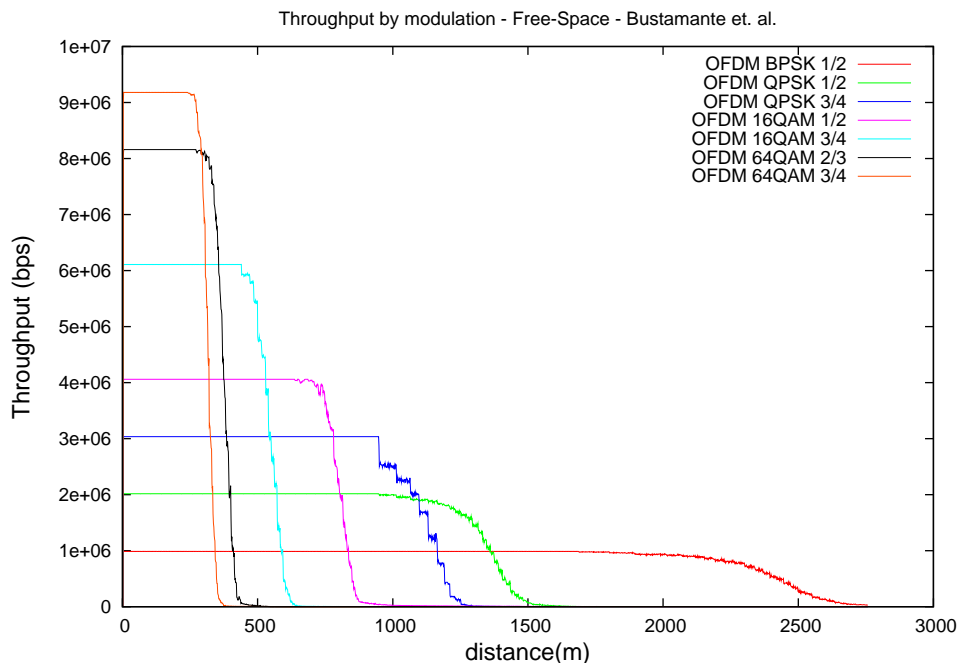


Figura 3: Vazão vs. Distância - modelo Bustamante - Espaço Livre

As figuras 4 e 5 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.

Um exemplo de pesquisa é estudar as trocas de modulação e codificação. Como o padrão IEEE 802.16 especificam uma camada física que opera com diversas modulações, é possível que seja feita a adaptação do *link* dinamicamente, com *Adaptive Modulation and Coding* (AMC).

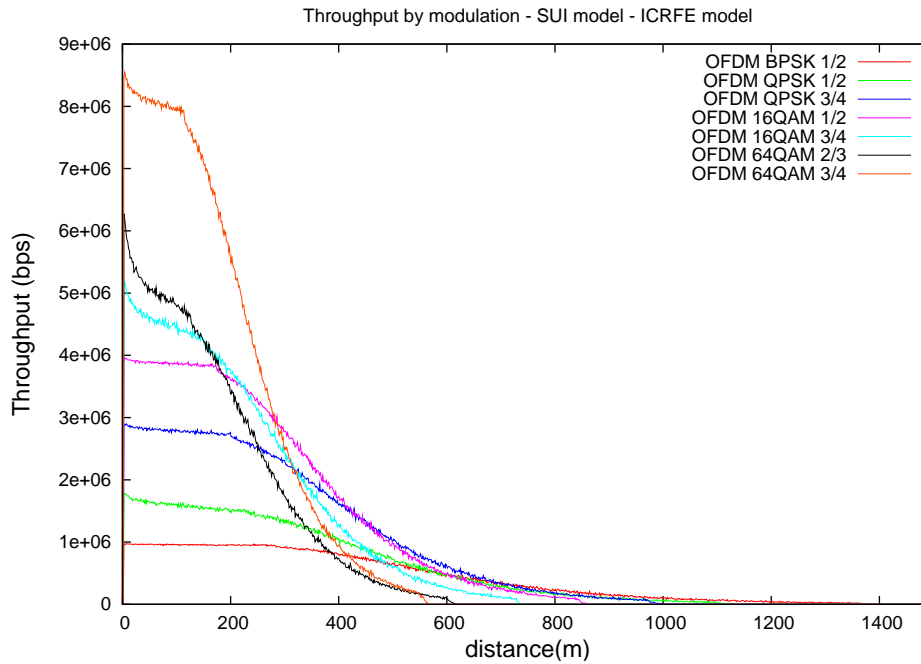


Figura 4: Vazão vs. Distância - modelo ICRFE - modelo SUI

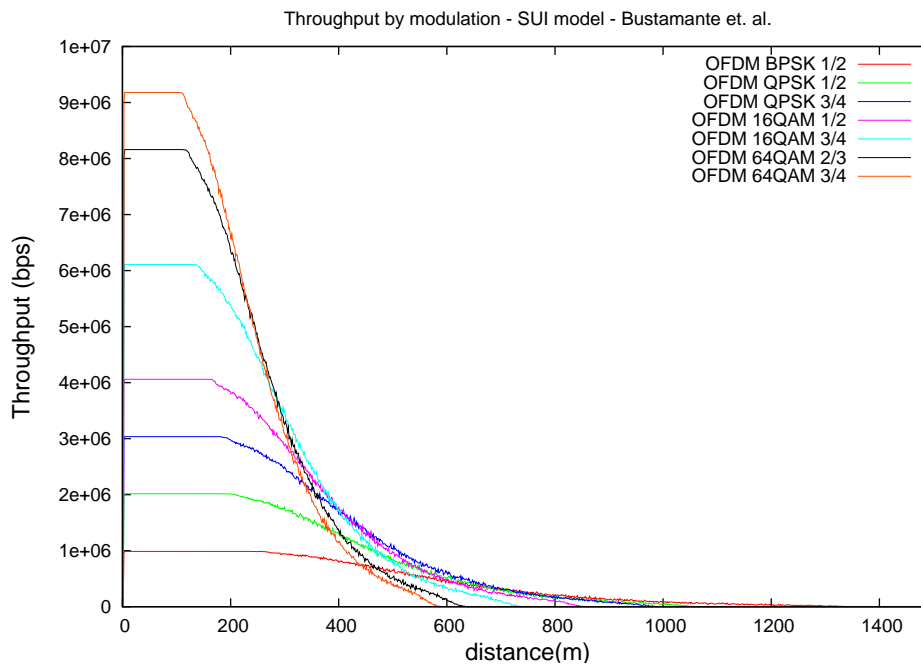


Figura 5: Vazão vs. Distância - modelo Bustamante - modelo SUI

8 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.

9 Apoio

- Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - Pibic/CNPq - PRP

10 Agradecimentos

- Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca
Professor Titular/MS6 - IC/Unicamp
- Laboratório de Redes de Computador - Instituto de Computação/Unicamp
- Flávio Adalberto Kubota
Aluno de Mestrado - IC/Unicamp
- Pedro Henrique Gomes
Aluno de Mestrado - IC/Unicamp

Referências

- [1] 'IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems', IEEE Std 802.16-2004, 2004.
- [2] 'The Network Simulator - ns-2', <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [3] J. Chen, C. C. Wang, F. C. D. Tsai, C. W. Chang, S. S. Liu, J. Guo, W. J. Lien, J. H. Sum e C. H. Hung, 'The design and implementation of WiMAX module for ns-2 simulator', no WNS2'06: Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator, pp. 5, ACM, 2006.
- [4] J. Freitag e N. L. S. da Fonseca, 'WiMAX Module for the ns-2 Simulator', pp. 1-6, Sept. 2007.
- [5] 'DOCSIS Research Project', <http://www.cs.clemson.edu/jmarty/docsis.html>, 2005.
- [6] 'The Network Simulator NS-2 NIST add-on - IEEE 802.16 model (MAC+PHY)', National Institute of Standards and Tecnology, 2007.
- [7] A. Belghith e L. Nuaymi, 'Design and implementation of a QoS-included WiMAX module for NS-2 simulator', no Simutools'08: Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops, (ICST, Brussels, Belgium, Belgium), pp. 1-8, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.
- [8] L. Betancur, R. C. Hincapi e R. Bustamante, 'WiMAX channel: PHY model in network simulator 2', no WNS2'06: Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator, (New York, NY, USA), pp. 6, ACM, 2006.
- [9] C. Mehlführer, S. Caban e M. Rupp, 'Experimental Evaluation of Adaptive Modulation and Coding in MIMO WiMAX with Limited Feedback', EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Special Issue on MIMO Systems with Limited Feedback, vol. 2008, Article ID 837102, 2008.
- [10] V. Erceg, L. Greenstein, S. Tjandra, S. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. Julius e R. Bianchi, 'An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments', Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 17, pp. 1205-1211, Jul 1999.
- [11] Y. Y. Kim e S. Q. Li, 'Modeling multipath fading channel dynamics for packet data performance analysis', Wirel. Netw., vol. 6, no. 6, pp. 481-492, 2000.
- [12] WiMAX Forum, 'WiMAXTM System Evaluation Methodology v2.1', WiMAX Forum, 2008.
- [13] J. Milanovic, S. Rimac-Drlje e K. Bejuk, 'Comparison of Propagation Models Accuracy for WiMAX on 3.5 GHz', pp. 111-114, Dec. 2007.