

Simulação da Camada Física do Enlace Direto do Sistema de Comunicação Sem Fio IEEE 802.16m

Luís Gustavo Milán Yamaguti, Ailton Akira Shinoda, Paulo Cardieri, Michel Daoud Yacoub, Álvaro Augusto Machado de Medeiros e Fabricio Lira Figueiredo

Resumo—Este artigo apresenta a implementação de um simulador da camada física do enlace direto do padrão *IEEE 802.16m (WiMAX II)* no ambiente *Simulink/Matlab*. Este padrão de comunicação de banda larga sem fio incorpora diversas técnicas de processamento que visam aumentar a capacidade do sistema, tais como MIMO e codificação convolucional turbo. São apresentados nesse artigo também resultados preliminares de avaliação do desempenho do enlace direto usando o simulador implementado. Em particular, foram avaliadas duas técnicas de estimação de canal em canal com desvanecimento.

Palavras-Chave—*IEEE 802.16m*, *codificação convolucional turbo*, *OFDMA*, *MIMO*.

Abstract—This paper presents a simulation tool for the physical layer downlink of the *IEEE802.16m* wireless communication system. The simulation tool is based on *Simulink/Matlab*, and includes several key features of the *IEEE802.16m* wireless system, such as convolutional turbo coding and MIMO. The paper also presents some preliminary simulation results. Particularly, the performance of channel estimation techniques is investigated under fading environment.

Keywords—*IEEE 802.16m*, *convolutional turbo coding*, *OFDMA*, *MIMO*.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de transmissão sem fio de banda larga baseados no padrão *IEEE 802.16* para comunicações sem fio vem ganhando destaque em resposta à procura crescente por Internet móvel e aplicações multimídia. Visando atender às exigências do *ITU-R/IMT-Advanced* para os sistemas de comunicação sem fio de quarta geração (4G), o *IEEE 802.16 Working Group* iniciou recentemente o desenvolvimento da versão *IEEE 802.16m*, ou *WiMAX II*. Apesar dessa versão ainda não estar totalmente definida, o *IEEE 802.16m System Description Document (SDD) [Draft]* [1] reúne um esboço do que se tornará o padrão futuramente. O presente artigo apresenta o desenvolvimento de um simulador do enlace direto da interface aérea que está sendo estabelecida para o *IEEE 802.16m*. Pretende-se com esse simulador investigar no futuro técnicas de recepção que garantam um desempenho adequado desse sistema nos cenários de operação pretendidos, como definidos no documento *IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EVM)* [2]. Na implementação do simulador, especial atenção foi dada a três componentes do padrão *IEEE 802.16m*: a

codificação convolucional turbo, que agora é mandatória, o sistema MIMO 2×2 e a estimação de canal.

Os objetivos deste artigo são dois: apresentar alguns detalhes de implementação do simulador e reportar resultados preliminares obtidos com o simulador. Especificamente, este artigo apresenta resultados de desempenho de duas técnicas de estimação de canal, etapas de importância vital em sistemas empregando OFDMA, como o sistema *IEEE 802.16m*.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta detalhes da implementação do simulador; na Seção III são apresentadas duas técnicas de estimação de canal; a Seção IV apresenta resultados de simulação extraídos do simulador implementado para os cenários com canal AWGN e com canal com mobilidade e desvanecimento Rayleigh; por fim, a Seção V conclui o artigo.

II. CAMADA FÍSICA DO SIMULADOR

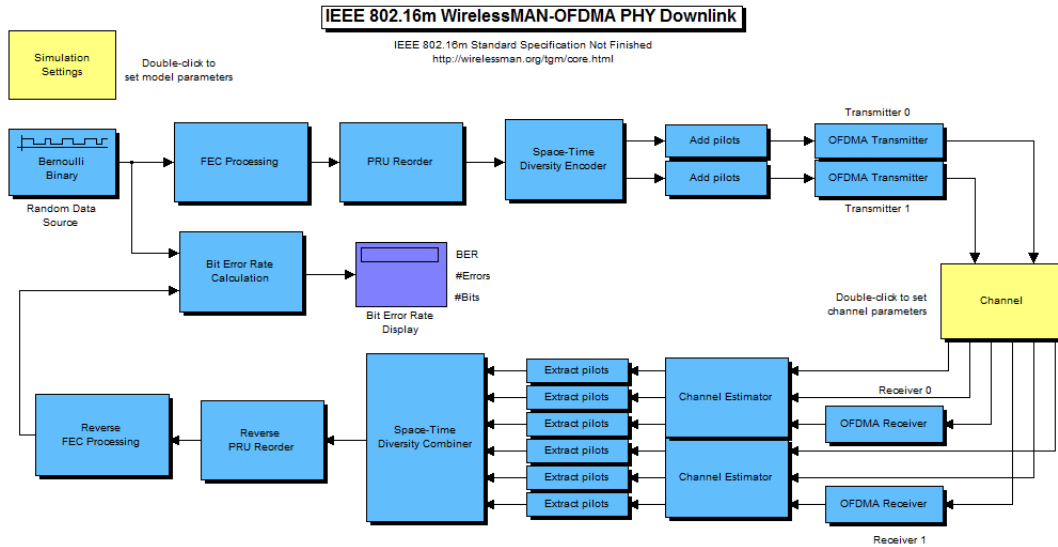
O simulador da camada física do enlace direto do *IEEE 802.16m* foi desenvolvido utilizando-se a ferramenta *Simulink/Matlab*, tomando como base a implementação do simulador do padrão *IEEE802.16-2004* [3], já existente naquela ferramenta. A implementação apresentada no presente artigo seguiu as especificações encontradas em [1] e [2]. A Figura 1 mostra o diagrama em blocos do simulador implementado. A seguir, são apresentados detalhes dos principais blocos do simulador.

A. Transmissor

O processamento de transmissão no simulador inicia com a geração dos bits a serem transmitidos e formação de um bloco de bits que será processado pelo bloco *FEC Processing*. Nesse bloco são realizadas as operações de randomização, codificação corretora de erros, *puncturing*, entrelaçamento e modulação. Na codificação, são empregados códigos convolucional turbo de taxa de codificação $1/2$, $2/3$, $3/4$ e $5/6$, como descrito em [5], que passou a ser mandatória na padrão *IEEE 802.16m*. Para modulação, foram implementadas as modulações QPSK, 16QAM, 64QAM, que, em conjunto com as taxas codificações citadas, formam as oito possibilidades de modulação/codificação possíveis.

A saída do bloco *FEC Processing* forma as chamadas *PRU (Physical Resource Units)*, que são as unidades básicas de alocação de recursos físicos compreendidas em 18 subportadoras contíguas. As *PRUs* podem ser destinadas a usuários distintos e mesmo assim compor o mesmo símbolo *OFDMA*. No simulador, utiliza-se o *subframe* do tipo 1, que consiste em

Ailton A. Shinoda é professor na UNESP - Ilha Solteira, SP, Fabricio L. Figueiredo é pesquisador da Fund. CPqD - Campinas, SP, Luis G. M. Yamaguti é aluno de pós-graduação da FEEC - UNICAMP, Michel D. Yacoub e Paulo Cardieri são professores da FEEC - UNICAMP, e Álvaro A. M. Medeiro é professor da Univ. Federal de Juiz de Fora - MG. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação CPqD e pelo CNPq


 Fig. 1. Visão geral do simulador de camada física do enlace direto do padrão *IEEE 802.16m*

6 símbolos *OFDMA*. Assim, após o *FEC Processing* ocorre um ordenamento de *PRUs*, no bloco *PRU Reorder*, destinadas a vários usuários, antes da codificação de diversidade espaço-temporal.

Em seguida, no bloco *Time-Space Diversity Encoder*, a sequência de símbolos é preparada para a transmissão em um sistema MIMO 2×2 , segundo o esquema proposto por Alamouti [6]. Ou seja, a cada dois símbolos, digamos s_0 e s_1 , uma antena transmite s_0 , seguido de $-s_1^*$, enquanto que a outra transmite s_1 , seguido de s_0^* .

Na sequência, são adicionados os símbolos pilotos, que serão utilizados na recepção para a estimação do canal, como descrito mais adiante. Por fim, os dois fluxos de símbolos são processados no bloco *OFDMA Transmitter*. Nesse bloco, são realizadas as operações de inserção do preâmbulo, adição das bandas de guarda, cálculo da *IFFT* e adição do prefixo cíclico.

O preâmbulo adicionado consiste em um símbolo *OFDMA*, cujas subportadoras podem também ser utilizadas na recepção para estimação do canal. Após a inserção do preâmbulo, ocorre a adição das bandas de guardas à esquerda e direita do símbolo, que correspondem às subportadoras nulas. Destaca-se aqui a inexistência da subportadora DC, conforme a especificação *IEEE 802.16m* [1], diferentemente dos padrões anteriores, que previam tal subportadora central nula [4]. A seguir, tem-se o reordenamento das subportadoras de forma a deixar as bandas de guarda no centro do quadro do símbolo *OFDMA* antes do processamento *IFFT*. Após este processamento, adiciona-se o prefixo cíclico, que pode ser de tamanho igual a $1/8$, $1/4$ ou $1/16$ de um máximo de 2048 subportadoras. Em seguida, ocorre a conversão paralelo-série dos símbolos, finalizando a operação do transmissor.

B. Canal de Propagação

Para o modelo do canal de propagação, considerou-se apenas o desvanecimento não seletivo em frequência de pequena escala do tipo Rayleigh, além do ruído gaussiano aditivo. Como o sistema de transmissão simulado emprega MIMO

2×2 , são implementados no simulador quatro canais entre as duas antenas transmissoras e as duas receptoras, denotados por $h_i(t)$, $i = 0, \dots, 3$.

Considera-se que o canal permanece invariante durante a transmissão de dois símbolos *OFDMA* consecutivos, tal que

$$h_i(t) = h_i = \alpha_i e^{j\theta_i} \quad \text{para } i = 0, 1, 2 \text{ e } 3, \quad (1)$$

no intervalo $0 < t \leq 2T$. Na expressão (1), α_i são variáveis aleatórias com distribuição Rayleigh, enquanto θ_i são amostras de uma distribuição uniforme no intervalo $[0, 2\pi]$. O modelo de canal inclui os efeitos da velocidade do terminal de usuário, com espectro de Doppler de Jakes [11] e espalhamento de Doppler calculado em função da velocidade do terminal, de acordo com [2].

C. Receptor

Na etapa de recepção, são realizados todos os processamentos inversos àqueles realizados na etapa de transmissão, além de outros auxiliares, como brevemente descrito nessa seção.

No bloco *OFDMA Receiver* ocorre a remoção do prefixo cíclico, o cálculo da *FFT* do sinal recebido, a remoção das bandas de guarda e, por fim, o reordenamento dos dados.

No bloco *Channel Estimator* é realizada a estimação do canal, mais especificamente, dos parâmetros h_i , $i = 0, \dots, 3$, do modelo de canal. Foram implementadas três formas de estimação de canal, descritas na Seção III. Após a estimação do canal, as subportadoras pilotos são removidas e o sinal restante compõe as entradas do *Space-Time Diversity Combiner*, juntamente com os valores dos quatro canais estimados.

O sinal recebido a cada dois símbolos *OFDMA* (de um total de 6 símbolos *OFDMA*) é processado pelo *Space-Time Diversity Combiner*, que calcula \tilde{s}_0 e \tilde{s}_1 como

$$\begin{aligned} \tilde{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1 r_1^* + h_2^* r_2 + h_3 r_3^* \\ \tilde{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0 r_1^* + h_3^* r_2 - h_2 r_3^* \end{aligned} \quad (2)$$

em que $r_i, i = 0, \dots, 3$, são os sinais recebidos nos dois canais referentes aos dois símbolos *OFDMA* recebidos, ou seja

$$\begin{aligned} r_0 &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\ r_1 &= -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \\ r_2 &= h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \\ r_3 &= -h_2 s_1^* + h_3 s_0^* + n_3 \end{aligned} \quad (3)$$

e n_i são as amostras do ruído AWGN.

Antes do sinal ser processado pelo bloco *Reverse FEC Processing*, ocorre o reordenamento de *PRU* no bloco *Reverse PRU Reorder*, para que o receptor separe apenas as *PRU* destinadas a ele, descartando as demais *PRU*.

No bloco *Reverse FEC Processing*, é realizada a demodulação, seguida dos processamentos reversos referentes ao *unpuncturing* e ao entrelaçamento. Em seguida, é realizada a decodificação do código convolucional turbo, onde foi empregada a técnica *Max-LogMAP*. Por fim, o processamento de randomização é revertido, completando-se o processamento de recepção.

III. ESTIMAÇÃO DE CANAL POR MEIO DE PRÉ-ÂMBULOS E PILOTOS

Uma etapa fundamental na recepção do sistema *IEEE 802.16m* é a estimação do canal, necessária para corrigir as distorções provocadas pelos efeitos de propagação no sinal recebido. Neste trabalho, analisamos o desempenho do sistema *IEEE 802.16m* quando dois tipos de estimação de canal são empregados, quais sejam, estimação de canal baseada em pré-âmbulos e estimação de canal baseada em subportadoras piloto, que serão descritas a seguir.

A. Estimação de canal por meio de pré-âmbulos

Inicialmente deve-se notar que, a partir do sinal recebido em cada receptor *OFDMA*, precisamos estimar dois canais, ou seja, entre as duas antenas de transmissão do sistema MIMO 2×2 e a antena conectada àquele receptor. Portanto, para possibilitar que um único pré-âmbulo na recepção seja utilizado para estimar dois canais a partir do sinal de um receptor, utilizam-se pré-âmbulos distintos e complementares nas transmissões dos transmissores *OFDMA*. São, então, utilizados um *pré-âmbulo do tipo par* e um *pré-âmbulo do tipo ímpar*, sendo que o pré-âmbulo do tipo par possui símbolos não-nulos nas subportadoras pares e zeros nas subportadoras ímpares, enquanto que o pré-âmbulo do tipo ímpar possui símbolos não-nulos nas subportadoras ímpares e zeros nas subportadoras pares.

O pré-âmbulo recebido por cada um dos receptores *OFDMA* é separado em dois pré-âmbulos menores, sendo que um contém as subportadoras pares e o outro, as subportadoras ímpares. Tais pré-âmbulos menores são comparados com as subportadoras não-nulas dos dois pré-âmbulos transmitidos (do tipo par e do tipo ímpar). Dessa comparação resulta um conjunto de números complexos correspondentes ao estado do canal (amplitude e fase) durante a transmissão dos pré-âmbulos. Esta estimativa de canal é usada nos seis símbolos *OFDMA* subsequentes. A estimação de canal com base no pré-âmbulo é indicada quando se deseja acompanhar as variações do

canal no domínio da frequência (pois o canal é estimado a cada duas subportadoras subsequentes), em detrimento ao acompanhamento das variações do canal no domínio do tempo.

B. Estimação de canal por meio de subportadoras piloto

Na estimação do canal baseada em pilotos, o estimador identifica as subportadoras referentes ao piloto e, através da avaliação da degradação desse sinal, estima o canal no momento da transmissão. Inicialmente é importante observar que a localização das subportadoras referentes aos pilotos se altera conforme o número de símbolos *OFDMA* por quadro, porém existe um padrão que se repete em cada *PRU* [1]. Com base nesse padrão, é possível fazer a estimação dos canais entre as duas antenas transmissoras e as duas receptoras do sistema MIMO 2×2 .

Dentro de cada *PRU* existem 12 subportadoras correspondentes a sinais pilotos, distribuídos uniformemente. Esse padrão de localização das subportadoras piloto no *PRU* se repete ao longo dos seis símbolos *OFDMA*. Na transmissão, diferem-se dois tipos de *PRU*: *PRU* do tipo par e *PRU* do tipo ímpar, sendo que cada tipo de *PRU* é transmitido por apenas uma das antenas de transmissão do sistema MIMO 2×2 . A distinção entre os pilotos localizados em portadoras pares e aqueles localizados em portadoras ímpares permite a estimação dos dois canais “vistos” por uma antena receptora.

Os pilotos recebidos por cada um dos receptores *OFDMA* dentro dos seis símbolos *OFDMA*, e que compõem o mesmo *PRU*, são separados e comparados com os pilotos não-nulos e pré-definidos, permitindo a estimação do canal.

Cada subportadora piloto será responsável por estimar o canal para o *PRU* ao qual pertence. Uma vez que, no conjunto das seis subportadoras piloto, cada piloto se refere a um símbolo *OFDMA* distinto, então uma subportadora piloto é usada para estimar o canal referente às outras 17 subportadoras dentro do mesmo *PRU* e também dentro do mesmo símbolo *OFDMA*. Portanto, o canal estimado através de uma subportadora piloto é assumido ser aquele para as outras 17 subportadoras de dados que se encontram no mesmo *PRU* e no mesmo símbolo *OFDMA*.

A estimação baseada em pilotos é indicada para casos em que o canal apresenta variações intensas no domínio do tempo, pois a cada símbolo *OFDMA* é realizada uma nova estimação para o canal. Porém, esse tipo de estimação é inapropriado quando há grandes variações no domínio da frequência, pois são utilizadas somente duas subportadoras de pilotos a cada 16 subportadoras de dados.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE

Nesta seção são apresentados e analisados resultados preliminares de desempenho do enlace direto do sistema *IEEE 802.16m* obtidos com o simulador descrito. Começamos essa seção com a apresentação dos resultados para o caso de canal AWGN com estimação de canal ideal. Em seguida, discutimos o desempenho do sistema em cenários com desvanecimento Rayleigh, sob as formas de estimação de canal descritas acima.

A Tabela I mostra a configuração do simulador usada nos experimentos, como sugerido em [2].

TABELA I
PARÂMETROS DO SISTEMA SIMULADO.

Parâmetro	Valor
Freq. portadora (f_c)	2.5 GHz
Largura de banda (BW)	10 MHz
No. de pts na FFT (N_{FFT})	1024
Fator de sobreamostragem	25/28
Fator de Banda de guarda no OFDMA (G)	1/8
Freq. de amostr. ($F_s = \lceil \frac{n \cdot BW}{8000} \rceil \cdot 8000$)	11.2 MHz
Espac. subportadoras ($\Delta f = F_s / N_{FFT}$)	10.9375 kHz
Tempo de símbolo útil ($T_b = 1 / \Delta f$)	91.43 μs
Tempo de intervalo de guarda ($T_g = G \times T_b$)	11.43 μs
Tempo de símbolo ($T_s = T_b + T_g$)	102.86 μs
No. bits simulados	10^6

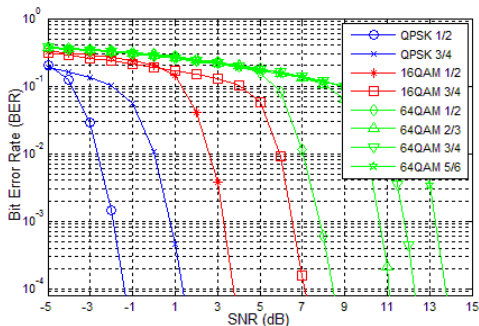


Fig. 2. BER vs. SNR, para cenário com canal AWGN.

A. Desempenho em canal AWGN

A Figura 2 mostra a taxa de erro de bit (BER) vs. a relação sinal-ruído (SNR) para as oito combinações de modulação e codificação possíveis, em ambiente AWGN. Note-se que em canal AWGN os parâmetros do modelo do canal são ajustados para $h_i = 1$ e $\theta_i = 0$, sendo, portanto, desnecessária a estimação do canal.

Infelizmente, não foram encontrados na literatura resultados de simulação do enlace direto do sistema *IEEE 802.16m* para comparação e validação dos nossos resultados. Não obstante, descrevemos a seguir uma comparação dos resultados da Figura 2 com resultados de simulação dos sistemas *IEEE 802.16-2004* e *IEEE 802.16e*, justificando os diferentes desempenhos com as diferenças entre os dois sistemas.

Comparando-se os resultados mostrados na Figura 2 com aqueles apresentados em [8] para o sistema *IEEE 802.16-2004*, observamos que as diferenças são bastante acentuadas. Por exemplo, para as modulações *QPSK 3/4*, *16QAM 3/4* e *64QAM 3/4*, o sistema *IEEE 802.16m* apresenta ganhos de desempenho, em termos de SNR, de 8.5 dB, 8.8 dB e 9.3 dB, respectivamente, para taxa de erro 10^{-4} . Essa diferença pode ser explicada pela utilização no sistema *IEEE 802.16m* de *MIMO*, códigos convolucionais turbo, dentre outras características.

Uma das principais alterações presentes no padrão *IEEE 802.16m* é a obrigatoriedade da codificação convolucional turbo (CTC), que era opcional no padrão *IEEE 802.16e*. No entanto, há na literatura [9] [10] estudos de desempenho do padrão *IEEE 802.16e* com a codificação CTC. A Tabela II mostra os valores de SNR à taxa de erro 10^{-4} para

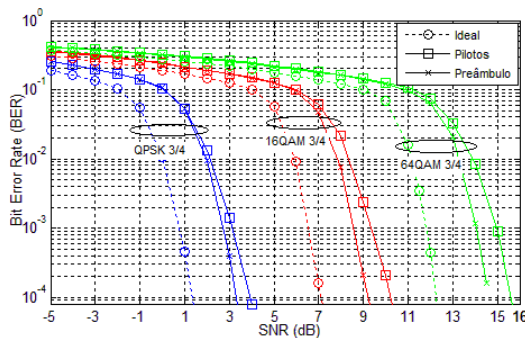


Fig. 3. BER vs. SNR, para canal AWGN (sem desvanecimento), para os casos de estimação ideal, estimação por préambulo e estimação por piloto.

algumas combinações de modulação/codificação com CTC, para os sistemas *IEEE 802.16e*, extraídos de [9] e [10], e *IEEE 802.16m*, extraídos da Figura 2. Ressalta-se que ambos sistemas simulados empregavam CTC, mas o sistema *IEEE 802.16e* não continha *MIMO*. A diferença $\Delta SNR \approx 4$ dB na

TABELA II
SNR @ 10^{-4} NOS SISTEMAS *IEEE 802.16e* ([9] [10]) E *IEEE 802.16m*.

Mod/Cod	<i>IEEE 802.16m</i>	<i>IEEE 802.16e</i>	ΔSNR (dB)
	SNR(dB)	SNR(dB)	
QPSK 1/2	-1.5	2.3	3.8
QPSK 3/4	1.5	5.4	3.9
16QAM 1/2	3.7	8.0	4.3

SNR requerida pode ser justificada pelo uso de *MIMO* 2×2 no sistema *IEEE 802.16m*.

B. Desempenho com Estimação de Canal em Ambientes com Desvanecimento e Mobilidade

Nessa seção são avaliados os efeitos da estimação do canal no desempenho do sistema em ambientes com desvanecimento. Como discutido, a estimação do canal é uma importante etapa na recepção quando o canal é variante no tempo. No entanto, começamos pela avaliação do desempenho do sistema com estimação de canal, mas operando em canal do tipo AWGN sem desvanecimento. Ou seja, analisaremos a situação em que a estimação do canal não é, de fato, necessária, mas está sendo usada. Note-se que esse cenário é comum na prática, uma vez que o receptor não é capaz de identificar que o canal é invariante no tempo. A Figura 3 mostra o desempenho do sistema *IEEE 802.16m* para os casos de estimação ideal (ou seja, ajusta-se no receptor $h_i = 1$ e $\theta_i = 0$, $i = 1, \dots, 4$), estimação por préambulo e por pilotos. Para garantir uma melhor visualização, foram mostrados apenas os resultados para *QPSK 3/4*, *16QAM 3/4* e *64QAM 3/4*. Nota-se que a ação desnecessária da estimação do canal degrada o desempenho do sistema em ~ 2 dB e ~ 3 dB, para os estimadores por préambulo e por piloto, respectivamente. Essa degradação pode ser explicada pela ação do ruído aditivo na estimativa dos parâmetros do canal.

Consideramos agora o desempenho do sistema quando o canal é variante no tempo, ou seja, quando os estimadores de canal são, de fato, necessários. Consideraremos aqui os

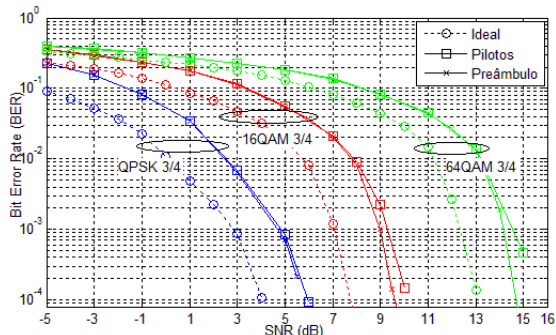


Fig. 4. BER vs. SNR, para canal Pedestrian B (3 km/h), para as estimação ideal, estimação por préambulo e estimação por piloto.

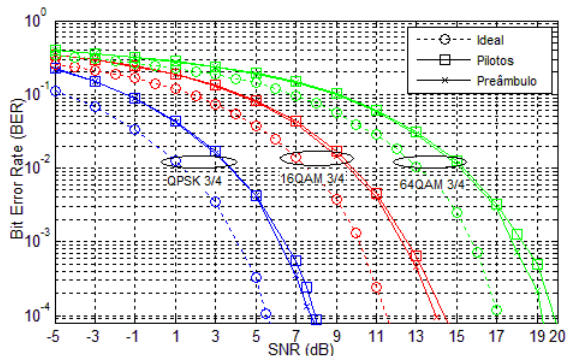


Fig. 5. BER vs. SNR, para canal Vehicular A (60 km/h), para as estimação ideal, estimação por préambulo e estimação por piloto.

cenários de propagação denominados *Pedestrian B* e *Vehicular A*, definidos em [7], que correspondem às velocidades do terminal móvel de 3 km/h e 60 km/h, respectivamente, ou, equivalentemente, aos desvios máximos de *Doppler* de 6,94 Hz e 138,8 Hz. As Figuras 4 e 5 mostram os resultados para os cenários *Pedestrian B* e *Vehicular A*, respectivamente, para as situações com estimação ideal, estimação por préambulo e estimação por pilotos. Como esperado, observa-se uma degradação no desempenho do sistema com relação ao caso com canal AWGN, mostrado na Figura 2. A Tabela III mostra essa degradação do sistema em termos do aumento da SNR requerida para atingir BER = 10⁻⁴ na modulação QPSK 3/4.

Primeiramente, notamos que em ambos modelos de canal móvel (*Pedestrian B* e *Vehicular A*) não há mudança significativa do canal de um símbolo para outro. Além disso, considerando que um símbolo préambulo é enviado juntamente a cada seis símbolos (*subframe* tipo 1 [1]), não há mudança significativa neste tempo também. Assim, a estimação por préambulo apresentou um resultado ligeiramente melhor (~ 0.3 dB) que a estimação por pilotos devido a utilização de todas as subportadoras do símbolo préambulo. Ademais, ambas técnicas de estimação de canal apresentam uma degradação de ~ 2 dB com relação ao desempenho com estimação ideal, nas duas velocidades testadas.

É interessante notar a forte degradação à alta velocidade, mesmo quando se utiliza estimação ideal de canal. Por exemplo, no caso de estimação de canal ideal, o aumento da SNR requerida para taxa de erro 10⁻⁴ passa de 0.7 dB, para 3 km/h,

TABELA III

AUMENTO NA SNR REQUERIDA PARA TAXA DE ERRO DE 10⁻⁴ COM RELAÇÃO AO CASO COM CANAL AWGN, PARA MODULAÇÃO QPSK 3/4.

Estimação do canal	Pedestrian B (3 km/h)	Vehicular A (60 km/h)
Ideal	0.7 dB	4.4 dB
Por préambulo	2.6 dB	6.9 dB
Por piloto	2.9 dB	7.3 dB

para 4.4 dB, para 60 km/h. Essa degradação com a velocidade, mesmo no caso de estimação ideal, deve-se ao fato de que a correção do sinal recebido é feita com base no estado do canal observado nos instantes e nas frequências de transmissão do piloto ou préambulo. Ou seja, supõe-se que o canal apresenta pouca variação entre dois momentos de estimação do canal. No entanto, para velocidades altas, esta suposição não é válida. Pretende-se em trabalhos futuros investigar o desempenho dessas técnicas de estimação de canal em ambientes com desvanecimento seletivo, quando comportamentos diferentes para as duas técnicas são esperados.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a implementação de um simulador do enlace direto do sistema *IEEE 802.16m*, baseada na ferramenta *Simulink/Matlab*. Usando o simulador implementado, foi apresentada também uma análise do desempenho do sistema *IEEE 802.16m* em diferentes combinações de modulação e taxa de codificação do codificador convolucional turbo.

Os resultados de simulação mostraram inicialmente a degradação devido a ação de estimadores de canal nas situações em que essa estimação não é necessária. Avaliou-se também o desempenho em ambientes com baixa e média níveis de mobilidade. Os resultados mostraram que as formas de estimação de canal estudadas não apresentaram bom desempenho quando a variação do canal é intensa.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE 802.16m System Description Document (SDD) [Draft] IEEE 802.16m-09/0034, IEEE 802.16 Task Group m (TGm).
- [2] IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD) IEEE 802.16m-08/004r5, IEEE 802.16 Task Group m (TGm).
- [3] The Mathworks Inc, IEEE 802.16-2004, OFDM PHY Link.
- [4] IEEE 802.16e-2005, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, December 2005.
- [5] IEEE 802.16-2004, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, June 2004.
- [6] Siavash M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", IEEE JSAC, Vol 16, no. 8, October 1998.
- [7] ITU-R M.1225, Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000, ITU-R Recommendation, International Telecommunication Union, 1997.
- [8] C. E. R. Araujo, A. F. Toledo, "An Evaluation of Effects of Propagation Channels on the Performance of WiMAX (IEEE 802.16-2004)", The 7th International Telecommunications Symposium, Manaus - AM, 2010.
- [9] G. A. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2007.
- [10] B. Baumgartner, M. Reinhardt, G. Richter, M. Bossert, Performance of Forward Error Correction for IEEE 802.16e, University of Ulm, Dept. of Telecommunications and Applied Information Theory.
- [11] M. D. Yacoub, Wireless Technology: Protocols, Standards, and Techniques. CRC Press, 2001.