

Análise de Sistemas Wireless MIMO e MIMO-OFDM de Alta Taxa em Canais de Multipercurso Limitados em Banda

Pedro Caetano de Oliveira*, Ivan Roberto Santana Casella*

*Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil

e-mail: pedro.oliveira11@hotmail.com

Abstract – *Wireless communication has been an important tool in order to allow users' mobility and to eliminate infrastructure cabling for data transfer, creating more connectivity in the personal sphere, through cellphones, and in the industrial sphere, through remote monitoring and control of industrial processes. However, the performance of these systems is limited due to multipath fading and bandwidth constraints. In this work, we will analyze two different techniques to mitigate these problems in two propagation scenarios. The first one employs a MIMO system for flat frequency fading channels and the second one considers a MIMO-OFDM system for frequency selective fading channels.*

Keywords: *Wireless, OFDM, MIMO, MIMO-OFDM, VBLAST.*

Introdução

Atualmente, a comunicação sem fio tem sido amplamente utilizada em diferentes aplicações pessoais e industriais devido a sua capacidade de transmissão de dados com mobilidade. Entretanto, em função da propagação por multipercurso, várias réplicas do sinal transmitido podem chegar ao receptor em instantes diferentes, com amplitudes e fases distintas, causando degradação da informação.

Dependendo das características do canal de propagação e da taxa de transmissão, a degradação do sinal pode ser classificada como plana em frequência, quando a taxa de símbolos é menor que a banda de coerência do canal, ou seletiva em frequência, quando a taxa de símbolos é maior que essa banda [1]. Além das limitações causadas pelos efeitos de multipercurso, a taxa de transmissão dos sistemas sem fio também é limitada pela largura de banda especificada para sua operação [1].

Uma das técnicas mais utilizadas atualmente para a transmissão de dados de alta taxa em canais com desvanecimento seletivo em frequência é a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM) [1], [2], [3]. Nesta técnica, os dados de alta taxa são divididos em fluxos de menor taxa que são transmitidos simultaneamente por subportadoras de frequências ortogonais, proporcionando uma alta eficiência espectral e um excelente desempenho em canais seletivos em frequência.

Por outro lado, uma das formas mais interessantes de aumentar a taxa de dados em canais planos em frequência, sem precisar aumentar a banda de transmissão, é através de sistemas de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO) [4], [5]. Nestes sistemas, é possível transmitir dados não correlacionados simultaneamente numa mesma banda, usando vários transmissores, e separá-los através do processamento dos sinais nas saídas de múltiplos receptores, proporcionando um aumento da eficiência espectral do sistema.

Essa reconstrução na detecção pode ser feita através de um esquema de detecção *Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time* (V-BLAST) [6], [7], [8], onde as características de desvanecimento do canal podem ser levadas em consideração para melhorar a estimativa dos sinais recebidos a partir das potências em cada receptor.

Assim, a associação das técnicas OFDM e MIMO, considerando suas vantagens individuais, se mostra como uma alternativa interessante para compensar os efeitos de seletividade em frequência e limitação de banda do canal para aplicações sem fio de alta taxa. Neste contexto, este trabalho propõe a análise da eficiência dos sistemas MIMO-OFDM em canais com desvanecimento seletivo em frequência usando como referência o desempenho de um sistema MIMO em canais com desvanecimento plano, de modo a verificar a manutenção de altas taxas sob condições mais restritivas de canal. Adicionalmente, será analisada a influência de diferentes configurações de antenas e métodos de detecção no desempenho. Em geral, essa comparação não é feita diretamente sob condições de simulação equivalentes, como é feito nesse trabalho, trazendo uma abordagem nova.

Descrição dos Sistemas

Nos sistemas sem fio de portadora única, à medida que a banda do sistema aumenta em relação à banda de coerência do canal, o desvanecimento de multipercurso se torna mais significativo, transformando um canal plano em frequência em seletivo e gerando, conseqüentemente, Interferência Intersimbólica (ISI) e uma maior degradação da informação transmitida.

Para mitigar esses efeitos e manter taxas de transmissão aceitáveis, podem ser usados sistemas multiportadora, como o OFDM [1].

O núcleo deste sistema são as operações de Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT) e Transformada Rápida de Fourier (FFT). A aplicação da IFFT sobre um conjunto de N símbolos (que seriam transmitidos sequencialmente através de uma única portadora) gera um sinal OFDM passa-baixa correspondente a transmissão simultânea dos símbolos alocados ortogonalmente na frequência. De forma inversa, na recepção, a aplicação da FFT em N amostras do sinal recebido recupera os símbolos transmitidos.

A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos de um sistema OFDM, onde o sinal de informação é codificado, mapeado (modulação digital), convertido em N fluxos paralelos, aplicado à operação de IFFT e, por fim, convertido novamente em um fluxo único para ser transmitido pelo canal. No receptor, o sinal recebido é submetido às operações inversas realizadas no transmissor para a devida recuperação da informação transmitida.

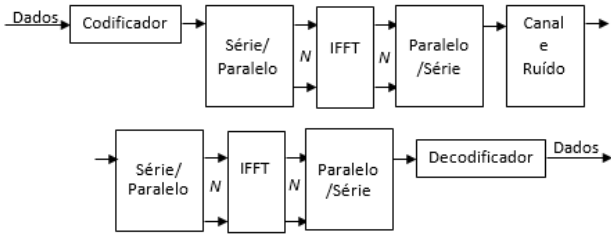


Figura 1. Diagrama de um sistema OFDM.

Diante do compartilhamento do mesmo canal entre diferentes sistemas sem fio e a consequente limitação de banda estabelecida para cada sistema, os sistemas MIMO foram propostos para proporcionar taxas de transmissão mais elevadas sem a necessidade de um aumento de banda.

Um canal MIMO consiste basicamente em uma conexão sem fio entre N_T antenas transmissoras e N_R antenas receptoras, criando-se um coeficiente na matriz do canal para cada par transmissor/receptor.

Nesta condição, um aspecto importante é a separação do sinal transmitido por cada antena, uma vez que as transmissões são simultâneas e na mesma banda. Para isso, uma técnica bastante explorada é a *Bell Laboratories Layered Space-Time* (BLAST), dividida nas arquiteturas vertical (V-BLAST) e diagonal (D-BLAST). A diferença básica entre elas é o processo de codificação do sinal transmitido.

Na técnica D-BLAST, é criada redundância entre os blocos de símbolos transmitidos através de uma codificação diagonal no tempo e espaço, levando a uma alta eficiência espectral para um dado número de transmissores e receptores [8]. Por outro lado, na

V-BLAST, o processo de codificação é apenas uma operação de demultiplexação seguida de uma conversão bit-símbolo independente para cada fluxo paralelo de dados, sem que haja uma codificação específica entre eles. Essa simplificação torna essa arquitetura uma das mais promissoras do ponto de vista prático [8].

A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos de um sistema MIMO com arquitetura V-BLAST, em que um único fluxo de dados é demultiplexado em N_T subfluxos que são codificados e transmitidos pelos respectivos transmissores.

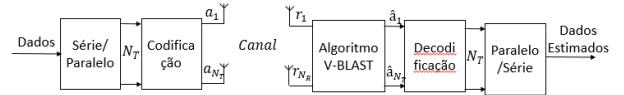


Figura 2. Diagrama de um sistema MIMO empregando V-BLAST.

A técnica V-BLAST pode ser implementada através do algoritmo recursivo apresentado abaixo. Este algoritmo é baseado, sem perda de generalidade, no método *Zero Forcing* (ZF) [8].

Primeira Iteração:

$$i = 1$$

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{H}^+ \quad (I)$$

$$k_1 = \underset{j}{\operatorname{argmin}} \|(\mathbf{G}_1)_j\|^2 \quad (II)$$

Recursivo em i :

$$\mathbf{w}_{k_i} = (\mathbf{G}_i)_{k_i} \quad (III)$$

$$\mathbf{y}_{k_i} = \mathbf{w}_{k_i}^T \mathbf{r}_i \quad (IV)$$

$$\hat{\mathbf{a}}_{k_i} = Q(\mathbf{y}_{k_i}) \quad (V)$$

$$\mathbf{r}_{i+1} = \mathbf{r}_i - \hat{\mathbf{a}}_{k_i}(\mathbf{H})_{k_i} \quad (VI)$$

$$\mathbf{G}_{i+1} = \mathbf{H}_{k_i}^+ \quad (VII)$$

$$k_{i+1} = \underset{j \notin \{k_1, k_2, \dots, k_i\}}{\operatorname{argmin}} \|(\mathbf{G}_{i+1})_j\|^2 \quad (VIII)$$

onde, \mathbf{H} é a matriz de canal, \mathbf{H}^+ é a matriz pseudo-inversa de Moore-Penrose, \mathbf{G}_i é a matriz de peso, utilizada para determinar o sinal recebido com maior potência dentre todos os transmitidos, $(\mathbf{G}_i)_j$ é a j -ésima linha de \mathbf{G}_i , responsável por determinar a ordenação de detecção, $\mathbf{H}_{k_i}^+$ indica que são zerados os elementos até o transmissor k_i na matriz \mathbf{H}^+ , \mathbf{w}_{k_i} é o vetor de anulação, \mathbf{y}_{k_i} é o sinal recebido referente ao transmissor k_i , eliminando-se a influência dos outros transmissores, \mathbf{r}_i é o vetor dos sinais recebidos em cada receptor e $\hat{\mathbf{a}}_{k_i}$ é o símbolo estimado, nesse caso, por uma quantização direta.

Um elemento importante do algoritmo V-BLAST é o detector linear, utilizado na escolha do sinal mais forte no processo de anulação e como base para as

demais etapas do processo de detecção (matriz \mathbf{G}_i). Além do método ZF (1), será analisado também o método *Minimum Mean Square Error* (MMSE) (2).

$$\hat{a} = (H^*H)^{-1}H^*r = H^+r \quad (1)$$

$$\hat{a} = E_S H^* (E_S H^* H + N_0 I_{N_R})^{-1} r \quad (2)$$

onde, \hat{a} é o sinal estimado, r o sinal recebido, H a matriz do canal, E_S a energia média de símbolo.

Nos sistemas MIMO-OFDM, os mesmos processos de detecção serão adotados na recepção, logo após a aplicação da FFT aos sinais recebidos.

Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação para os sistemas MIMO em canais planos em frequência e para os sistemas MIMO-OFDM em canais seletivos em frequência na presença de ruído do tipo AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

Nas análises apresentadas, foi considerado que ambos os sistemas empregam modulação 16-QAM (*16-Quadrature Amplitude Modulation*) e que cada simulação considera a transmissão de $8 \cdot 10^4 / N_T$ símbolos por transmissor.

Nos sistemas MIMO, o canal plano em frequência foi modelado como uma variável aleatória gaussiana complexa e, nos sistemas MIMO-OFDM, o canal seletivo em frequência foi modelado como um vetor aleatório gaussiano complexo de 10 elementos, cujo padrão de potência apresenta um decaimento exponencial com fator de atenuação igual a 2.

Na Figura 3 é apresentado o desempenho de um sistema MIMO com 2 antenas de transmissão e 2 de recepção (2x2) em função de E_b/N_o para os diferentes tipos de detectores analisados.

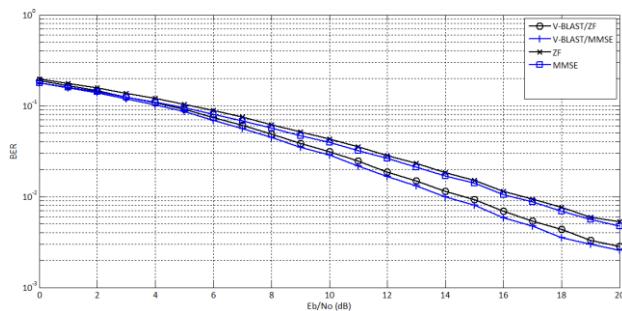


Figura 3. Desempenho de um sistema MIMO 2x2 para diferentes detectores.

Pode-se constatar que os receptores lineares, sem o uso do V-BLAST, apresentaram uma Taxa de Erro de Bit (BER) maior que seus equivalentes utilizando o V-BLAST. O V-BLAST/MMSE apresentou o melhor desempenho (BER de $3,5 \cdot 10^{-3}$ em 18 dB), apesar do V-BLAST/ZF apresentar um desempenho bem próximo (BER de $4,5 \cdot 10^{-3}$ em 18 dB). Esse

comportamento ocorreu tanto nas simulações com o V-BLAST quanto nas sem, sendo que o V-BLAST/MMSE teve um desempenho praticamente equivalente ao do ZF sem o algoritmo de recursão.

Na Figura 4 é apresentado o desempenho de um sistema MIMO com 8 antenas de transmissão e 8 de recepção (8x8) em função de E_b/N_o para os esquemas de detecção analisados.

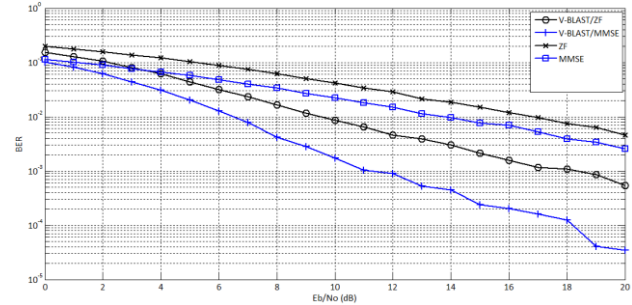


Figura 4. Desempenho de um sistema MIMO 8x8 para diferentes detectores.

Assim como na análise anterior, os receptores empregando o V-BLAST apresentaram um desempenho melhor do que seus equivalentes lineares. Entretanto, neste caso, todos os sistemas apresentaram uma melhora de desempenho em relação à configuração anterior (2x2). Pode-se verificar que o V-BLAST/MMSE apresentou o melhor desempenho (BER de $1,0 \cdot 10^{-4}$ em 18 dB).

Na Figura 5 é apresentado o desempenho de um sistema MIMO com 8 antenas de transmissão e 12 de recepção (8x12) variando E_b/N_o para os esquemas de detecção analisados.

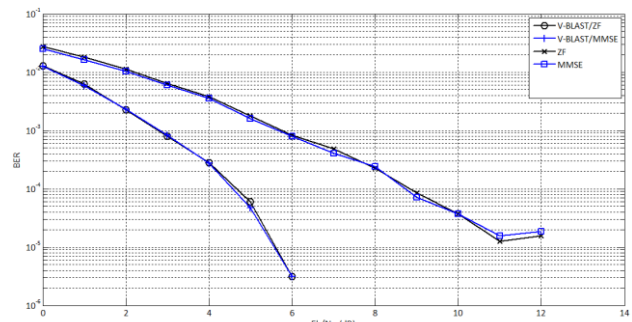


Figura 5. Desempenho de um sistema MIMO 8x12 para diferentes detectores.

Analisando os resultados apresentados, pode-se verificar que, ao se utilizar mais antenas receptoras do que transmissoras, a BER cai consideravelmente. Ela se torna praticamente nula a partir de 8 dB para os receptores baseados no V-BLAST e a partir de 13 dB para os baseados apenas em detectores lineares. Pode-se verificar que o ZF passa a ter uma melhora de desempenho, se aproximando ao obtido pelo MMSE.

Uma observação interessante sobre o ZF é que, apesar dele apresentar uma perda de desempenho ao aumentar a quantidade de antenas do sistema por não levar em consideração o efeito do ruído em cada antena, ao aumentar o número de antenas de recepção em relação ao de transmissão, seu desempenho melhora bastante, pois a degradação causada pelo ruído é compensada pela melhor utilização da diversidade do canal.

Na Figura 6 e na Figura 7 são apresentadas comparações de desempenho entre os sistemas MIMO e MIMO-OFDM nas configurações 8x8 e 8x12, respectivamente, utilizando o V-BLAST/ZF.

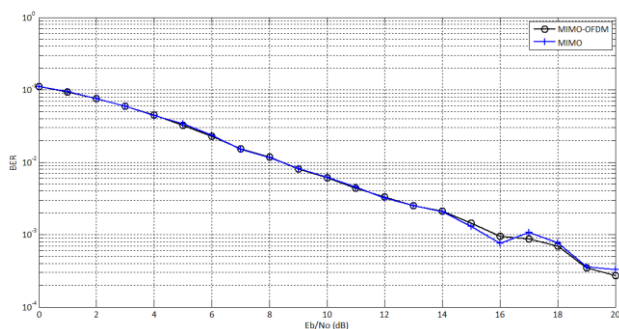


Figura 6. Comparação entre sistemas MIMO e MIMO-OFDM (8x8).

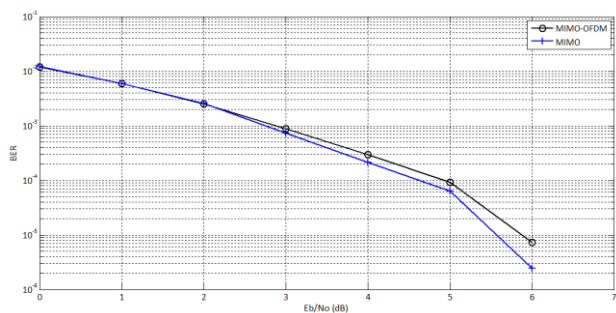


Figura 7. Comparação entre sistemas MIMO e MIMO-OFDM (8x12).

Pode-se verificar que, para ambos os casos, as BER apresentadas pelos 2 sistemas para uma mesma configuração de antenas são praticamente iguais, mostrando a efetividade da técnica OFDM quando associada aos sistemas MIMO para conversão de canais seletivos em frequência em planos. Também é possível verificar que os sistemas 8x12 apresentam adicionalmente um ganho de desempenho em relação aos sistemas 8x8 por explorarem melhor a diversidade espacial do canal.

Conclusões

Neste artigo, foi analisado o desempenho dos sistemas MIMO e MIMO-OFDM em diferentes

condições de propagação e para diferentes esquemas de detecção. Os resultados obtidos mostram que o uso conjunto da técnica OFDM e MIMO possibilita explorar a multiplexação espacial e aumentar a taxa de transmissão mesmo em canais seletivos em frequência de banda limitada.

Analisando o desempenho em função do tipo de detector para diferentes condições de propagação e diferentes configurações de antenas, pode-se verificar que os sistemas empregando V-BLAST foram superiores aos equivalentes empregando apenas esquemas lineares e dentre os esquemas V-BLAST analisados, o baseado em detecção MMSE foi o que apresentou os melhores resultados.

Referências

- [1] Y. Cho, MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. Wiley, 2011.
- [2] R. Chang and R. Gibby, "A Theoretical Study of Performance of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme", IEEE Transactions on Communications, vol. 16, no. 4, pp. 529-540, 1968.
- [3] L. Cimini, "Analysis and Simulation of a Digital Mobile Channel Using Orthogonal Frequency Division Multiplexing", IEEE Transactions on Communications, vol. 33, no. 7, pp. 665-675, 1985.
- [4] J. Winters, "Optimum Combining in Digital Mobile Radio with Cochannel Interference", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 2, no. 4, pp. 528-539, 1984.
- [5] J. Winters, "Optimum Combining for Indoor Radio Systems with Multiple Users", IEEE Transactions on Communications, vol. 35, no. 11, pp. 1222-1230, 1987.
- [6] G. J. Foschini, "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when Using Multi-Element Antennas", Bell Labs Technology Journal, vol. 1, no.2, pp. 41-59, 1996.
- [7] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden & R. A. Valenzuela, "BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel", Bell Laboratories, 1999.
- [8] Y. Yapici, "V-BLAST/MAP: A New Symbol Detection Algorithm for MIMO Channels", Institute of Engineering and Science of Bilkent University, 2005.