

Esquema de Codificação de Canal MIMO com Combinação de Multiplexação e Diversidade Espacial Através de Seleção de Códigos no Transmissor

Samuel T. Valduga¹, José C. M. Júnior¹, Renato Machado¹, Rogério C. Turchetti¹,
Celio Trois¹, Mário de Noronha Neto²

¹Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Av. Roraima, 1000 – 97105-900 – Santa Maria – RS – Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC)
Rua José Lino Kretzer, 608 – 88103-310 – São José – SC – Brasil

{samucatv,jose.c.m.jr}@smaail.ufsm.br, noronha@ifsc.edu.br,
{renatomachado,turchetti,celio.trois}@redes.ufsm.br

Resumo. Neste artigo, propõe-se um esquema de codificação de canal MIMO que explora o ganho de diversidade que é obtido através do código de Alamouti e o ganho de multiplexação obtido através do código V-BLAST. Através de um canal de realimentação limitado o receptor envia um único bit de realimentação para o transmissor. Essa informação é usada apropriadamente para selecionar um dos dois códigos, Alamouti ou V-BLAST. A cada novo frame o receptor avalia as condições do canal e baseado na SNR, o receptor informa ao transmissor sobre a decisão a ser tomada. Resultados de simulação são apresentados com o intuito de se ilustrar os ganhos obtidos através dessa proposta.

1. Introdução

Segundo a união internacional de telecomunicações (ITU) (*international telecommunications union*), espera-se que os sistemas de próxima geração (*next generation systems*) suportem taxas de dados acima dos Gbits/s e menos custo por bit transmitido [1]. Para atender essas expectativas, torna-se inevitável a consideração de múltiplas antenas nos transmissores e/ou receptores. A exploração adequada da dimensão espacial permite que sistemas MIMO alcancem maiores taxas de transmissão e/ou melhoria da confiabilidade da transmissão em canais com desvanecimento [2].

Além da dimensão espacial outras dimensões podem ser exploradas para se obter melhorias de desempenho no sistema. Por exemplo, no que tange a área de codificação de canal em sistemas MIMO, os códigos espaço-temporais de bloco (STBC) (*space-time block code*) [3], [4] são bons exemplos de como se explorar as dimensões espaço e tempo para se obter ganhos de razão sinal-ruído (SNR) (*signal-to-noise ratio*), que podem ser usados tanto para maximizar a taxa de transmissão ou para minimizar a probabilidade de erro do sistema de comunicação. Atualmente em processo de padronização, o WiMAX [5] já faz uso desse tipo de tecnologia.

O desempenho de sistemas MIMO pode ser consideravelmente melhorado se existir um canal de realimentação, de tal maneira que a informação do estado do canal (CSI) (*channel state information*), isto é, os coeficientes dos desvanecimentos, passem a ser

conhecidos pelo transmissor, viabilizando a aplicação da técnica conhecida por *optimal beamforming* [6]. No entanto, a consideração de um canal de realimentação limitado, permitindo a transmissão confiável de apenas alguns bits de realimentação, é uma suposição muito mais sensata e realista.

Chen *et al.* [7] apresentaram a solução analítica da probabilidade de erro para o chamado esquema de seleção/combinção de máxima razão na transmissão (TAS/MRC) (*transmit antenna selection/maximal-ratio combining scheme*). Nesse artigo, Chen *et al.* conseguiram mostrar que, analiticamente e através de simulações, quando o esquema de comunicação faz uso de um canal de realimentação e se somente STBCs ortogonais (OSTBCs) são considerados, o OSTBC que provê a maior SNR é justamente aquele que considera apenas uma única antena transmissora.

Procurando maximizar a taxa de transmissão de dados em um sistema MIMO, Wolnianski et al. [8] propuseram uma arquitetura conhecida como V-BLAST (*vertical Bell laboratories layered space-time*). Neste sistema o número de antenas receptoras, M_R , deve ser maior ou igual que o número de antenas transmissoras, M_T , as quais transmitem símbolos diferentes entre si a cada intervalo de transmissão. Desta forma, com a utilização da arquitetura V-BLAST, consegue-se o ganho de multiplexação máximo.

Técnicas de multiplexação espacial e de codificação espaço-temporal podem ser combinadas para se formar sistemas híbridos com o objetivo de maximizar a taxa de transmissão de dados através de um canal MIMO (ou equivalentemente maximizar o ganho de multiplexação) e ao mesmo tempo garantir um mínimo ganho de diversidade para o sistema. Nesse sentido, Zheng e Tse [9] demonstraram a existência de um compromisso entre a quantidade de cada um destes ganhos que um determinado esquema de codificação pode atingir.

Como o objetivo de alcançar ganhos de multiplexação e diversidade através de um esquema de comunicação MIMO, nesse artigo, propõe-se um esquema de comunicação MIMO com canal de realimentação limitado que prevê o uso de dois códigos bem conhecidos da literatura e amplamente utilizados comercialmente, a saber, o código V-BLAST e o código de Alamouti. Baseado na métrica de maximização da SNR, o receptor informa ao transmissor, através de um bit de realimentação, qual dos dois códigos deve ser considerado na transmissão. A cada novo *frame* o processo de seleção de código se repete e a transmissão é novamente efetuada. Os resultados de simulação revelam que o esquema proposto apresenta ganhos de diversidade e de multiplexação, aproveitando parte dos benefícios que cada um dos códigos tem potencial de oferecer.

Na próxima seção, apresenta-se o modelo do canal considerado nessa proposta. Na Seção 3, faz-se uma breve revisão sobre os STBCs e sobre os códigos de Alamouti e V-BLAST. O esquema proposto é apresentado na Seção 4. Na Seção 5, apresentam-se os resultados de simulação. Finalmente, a Seção 6 conclui o artigo com alguns comentários finais.

2. Modelo do Canal

Neste trabalho, consideramos o sistema de comunicação sem fio com M_T antenas transmissoras na estação rádio-base e uma única antena receptora na estação móvel. O canal sofre desvanecimento do tipo Rayleigh, plano e quase-estático, ou seja, o canal permanece constante durante um *frame* e varia aleatoriamente de um *frame* para o outro.

Os ganhos do canal, h_i , $i = 1, 2, \dots, M_T$, são modelados como variáveis aleatórias Gaussianas, complexas, independentes, com média zero e variância $1/2$ por dimensão complexa. Para cada instante de tempo τ , os sinais s_τ^i , $i = 1, 2, \dots, M_T$, pertencentes a uma constelação de sinais, são transmitidos simultaneamente a partir das M_T antenas transmissoras. A energia média total do sinal em cada instante de tempo é E_s . Logo, a energia média dos símbolos transmitidos por cada antena é normalizada para E_s/M_T . Se um código de comprimento ℓ for usado, então o conjunto de símbolos $s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^{M_T}, s_2^1, s_2^2, \dots, s_2^{M_T}, \dots, s_\ell^1, s_\ell^2, \dots, s_\ell^{M_T}$ é denominado palavra-código. O sinal recebido, y_τ , em um dado instante τ é dado por:

$$y_\tau = \sum_{i=1}^{M_T} h_i s_\tau^i + \eta_\tau \quad (1)$$

em que η_τ representa o ruído complexo Gaussiano com média zero e variância $N_0/2$ por dimensão complexa. Supondo-se que a CSI esta disponível no receptor, então a decodificação de máxima verossimilhança (ML) pode ser obtida calculando-se a métrica de decisão

$$\sum_{\tau=1}^{\ell} \left| y_\tau - \sum_{i=1}^{M_T} h_i x_\tau^i \right|^2 \quad (2)$$

para todas possíveis palavras-código

$$x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{M_T}, x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{M_T}, \dots, x_\ell^1, x_\ell^2, \dots, x_\ell^{M_T}.$$

A decisão é feita em favor da palavra-código que resulte na menor métrica.

3. Códigos Espaço-Temporais de Bloco

Os STBCs [3] são usualmente representados por uma matriz $\mathbf{C}(x_1, x_2, \dots, x_n)$, de ordem $\ell \times M_T$, cujas entradas são combinações lineares dos indeterminantes complexos x_1, x_2, \dots, x_n , e de seus conjugados complexos, com duas restrições, a saber, cada x_i deve ser citado na matriz pelo menos uma vez. Se as colunas da matriz geradora forem, duas a duas, ortogonais, dizemos ter um STBC ortogonal (OSTBC). É estabelecido que $x_i = s_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, em que cada s_i é selecionado de uma constelação de sinais de energia média E_s , e representa um símbolo de informação. No instante τ , em que τ varia de $1, 2, \dots, \ell$, o sinal correspondente à combinação linear do (τ, i) -ésimo elemento da matriz \mathbf{C} é transmitido a partir da antena i . Isso faz com que esse STBC tenha taxa $R = n/\ell$.

Nesta seção, considera-se os STBCs mais convencionais em que os elementos da matriz \mathbf{C} se restringem às variáveis x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, e seus conjugados, possivelmente multiplicados por -1. Nesse caso, a matriz \mathbf{C} pede uma constante de normalização de energia, igual a $1/\sqrt{M_T}$. Um aspecto importante dos OSTBCs é que um processamento linear simples dos sinais recebidos pelas antenas produz n variáveis de decisão descorrelacionadas, uma para cada determinante, com uma componente de ruído aditivo. A decodificação ML é realizada símbolo a símbolo em cada uma dessas variáveis de decisão.

Assuma que M_R antenas receptoras sejam consideradas no receptor, seja $\mathbf{y}_{i,\tau}$ o vetor coluna que contém os sinais recebidos pela i -ésima antena receptora $i = 1, \dots, M_R$

nos instantes $\tau = 1, \dots, \ell$. Assim,

$$\mathbf{y}_{i,\tau} = \mathbf{C} [h_{1,i} \quad h_{2,i} \quad \dots \quad h_{M_T,i}]^T + \mathbf{n}_{i,\tau},$$

em que T denota transposição matricial e $\mathbf{n}_{i,\tau}$ representa o ruído no τ -ésimo instante de tempo na i -ésima antena receptora. Nesse caso, a SNR, para um OSTBC, após o processamento linear, é dada por:

$$\gamma = \frac{|h_1|^2 + \dots + |h_{M_T}|^2}{M_T} \gamma_0,$$

em que $\gamma_0 = E_s/N_0$. O grau de diversidade obtido é igual a $M_T \times M_R$ [4].

3.1. O Código de Alamouti

O código de Alamouti é descrito pela matriz:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix}$$

em que $*$ representa o conjugado complexo. Os sinais recebidos nos intervalos de tempo 1 e 2, pelas antenas receptoras 1 e 2 são, respectivamente:

$$y_{1,1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (h_{1,1}s_1 + h_{2,1}s_2) + \eta_{1,1}, \quad y_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{2}} (-h_{1,1}s_2^* + h_{2,1}s_1^*) + \eta_{1,2},$$

$$y_{2,1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (h_{1,2}s_1 + h_{2,2}s_2) + \eta_{2,1}, \quad y_{2,2} = \frac{1}{\sqrt{2}} (-h_{1,2}s_2^* + h_{2,2}s_1^*) + \eta_{2,2}.$$

O seguinte processamento linear produz as entradas desejadas para o decodificador ML:

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &= h_{1,1}^* y_{1,1} + h_{2,1} y_{1,2}^* + h_{1,2}^* y_{2,1} + h_{2,2} y_{2,2}^* \\ &= \frac{|h_{1,1}|^2 + |h_{2,1}|^2 + |h_{1,2}|^2 + |h_{2,2}|^2}{\sqrt{2}} s_1 + h_{1,1}^* \eta_{1,1} + h_{2,1} \eta_{1,2}^* + h_{1,2}^* \eta_{2,1} + h_{2,2} \eta_{2,2}^* \\ \hat{s}_2 &= h_{2,1}^* y_{1,1} - h_{1,1} y_{1,2}^* + h_{2,2}^* y_{2,1} - h_{1,2} y_{2,2}^* \\ &= \frac{|h_{1,1}|^2 + |h_{2,1}|^2 + |h_{1,2}|^2 + |h_{2,2}|^2}{\sqrt{2}} s_2 + h_{2,1}^* \eta_{1,1} - h_{1,1} \eta_{1,2}^* + h_{2,2}^* \eta_{2,1} - h_{1,2} \eta_{2,2}^* \end{aligned}$$

A SNR para os dados recebidos em (3) é

$$\gamma_A = \frac{|h_{1,1}|^2 + |h_{2,1}|^2 + |h_{1,2}|^2 + |h_{2,2}|^2}{2} \gamma_0, \quad (3)$$

que resulta em um grau de diversidade igual a 4 [4].

3.2. O Código V-BLAST

O código V-BLAST [10] é descrito pela matriz:

$$\mathbf{V} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \end{bmatrix}.$$

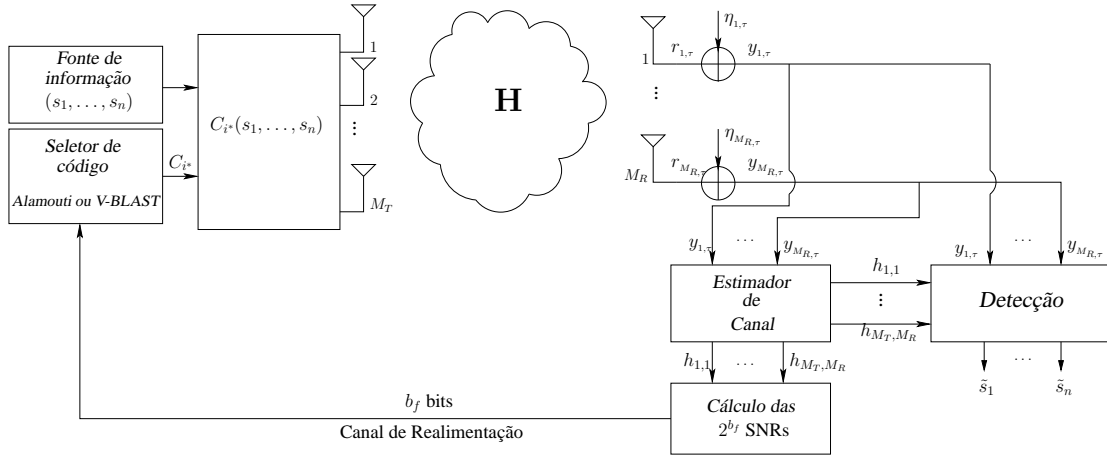


Figura 1. Esquema de transmissão MIMO considerando códigos de dispersão linear.

Os sinais recebidos pelas antenas receptoras 1 e 2 são, respectivamente:

$$y_{1,1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (h_{1,1}s_1 + h_{2,1}s_2) + \eta_{1,1}, \quad y_{2,1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (h_{1,2}s_1 + h_{2,2}s_2) + \eta_{2,1}.$$

Assumindo que a estimação do canal é feita corretamente no receptor, considera-se que a detecção é feita pelo detector ML após o cálculo da distância Euclidiana quadrática entre os sinais recebidos pelas antenas receptoras e os sinais formados pelos símbolos da constelação considerada na modulação sujeitos aos ganhos dos canais estimados no receptor.

$$\hat{s}_k = \arg \min_{x_i \in \mathcal{X}} d_E^2(y_{1,1}, f(h_{1,1}, h_{2,1}, x_i)) + d_E^2(y_{2,1}, f(h_{1,2}, h_{2,2}, x_i)) \quad (4)$$

em que \mathcal{X} é a constelação de símbolos (real ou complexa) e d_E^2 é a distância Euclidiana quadrática.

O receptor assume como o par de símbolos recebido corretamente aquele que resulta na menor métrica, ou seja, na menor distância d_E^2 .

4. Ganho de Multiplexação e Diversidade Espacial Através de Seleção de Códigos no Transmissor

Considera-se o sistema MIMO descrito na Figura 1 com M_T antenas transmissoras e M_R antenas receptoras. Assume-se que os coeficientes dos desvanecimentos dos canais sejam perfeitamente estimados pelo receptor, e que exista um canal de realimentação totalmente livre de erros e de atrasos, através do qual b_f bits possam ser enviados ao transmissor.

No esquema de transmissão aqui proposto, baseado nas condições instantâneas do canal, o receptor determina qual STBC, dentro de um conjunto de 2^{b_f} STBCs, produz a máxima SNR *instantânea*. Então, o receptor envia um índice (b_f bits) através do canal de realimentação indicando qual STBC (o que produz a maior SNR) deve ser usado pelo transmissor.

Em nossa proposta, assume-se que os STBCs disponíveis no transmissor são os códigos de Alamouti e V-BLAST. A cada novo *frame*, o processo de seleção de código se repete e a transmissão é efetuada.

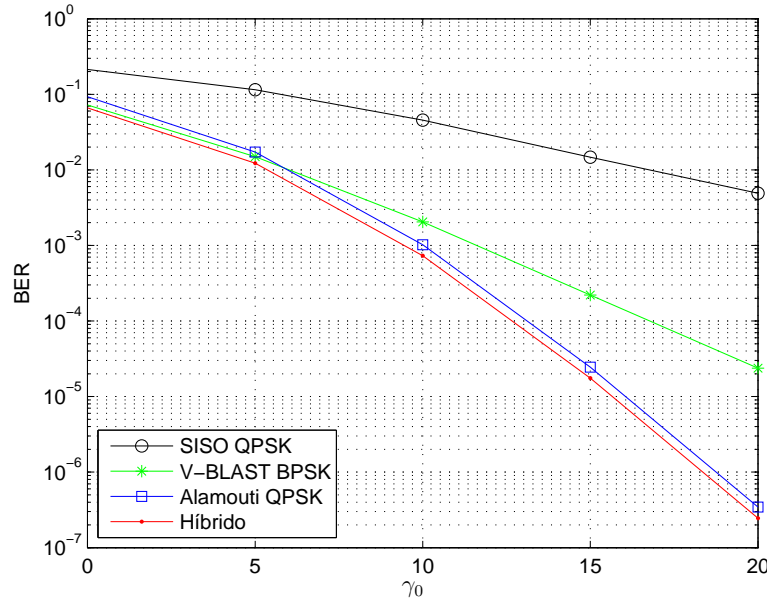


Figura 2. BER \times SNR: SISO, V-BLAST, Alamouti, Híbrido

5. Resultados de Simulação

Nesta seção, apresentamos as curvas de BER versus SNR para os esquemas de comunicação MIMO com canal de realimentação limitado, obtidas a partir de simulações do tipo Monte Carlo. A comparação desses esquemas é feita em termos de grau de diversidade espacial e taxa de transmissão espacial média. Em todas as simulações consideramos o canal com desvanecimento do tipo Rayleigh, plano e quase-estático, com $M_T = 2$ antenas transmissoras e $M_R = 2$ antenas receptoras. No receptor o sinal é contaminado com a presença de ruído aditivo Gaussiano branco de média zero e variância 1/2 por dimensão complexa.

Na Figura 2, simulamos três esquemas de comunicação: o sistema MIMO utilizando o código de Alamouti, modulação QPSK, o sistema MIMO considerando o código V-BLAST, modulação BPSK, o esquema híbrido que faz uso dos códigos Alamouti e V-BLAST com canal de realimentação limitado e o sistema de comunicação SISO, modulação QPSK, como uma curva de referência. Todos os esquemas simulados aqui apresentam taxa e transmissão igual a 2 bits/intervalo de modulação, a fim de realizarmos uma comparação justa. O esquema que usa o código de Alamouti apresenta um desempenho de erro inferior ao código V-BLAST para valores de SNR baixos e um desempenho de erro superior em relação ao código V-BLAST para valores de SNR mais elevados. Esse resultado revela que é possível se extrair benefícios de ambos os códigos desde que o sistema considere um canal de realimentação confiável e que este seja utilizado de maneira adequada. Como pode ser observado na Figura 2 o esquema híbrido possui o melhor desempenho em relação aos outros esquemas. No esquema híbrido, o código de Alamouti foi selecionado em torno de 75 % das vezes enquanto que o código V-BLAST em torno de 25 %, resultando em uma taxa de transmissão espacial média igual a 1,25.

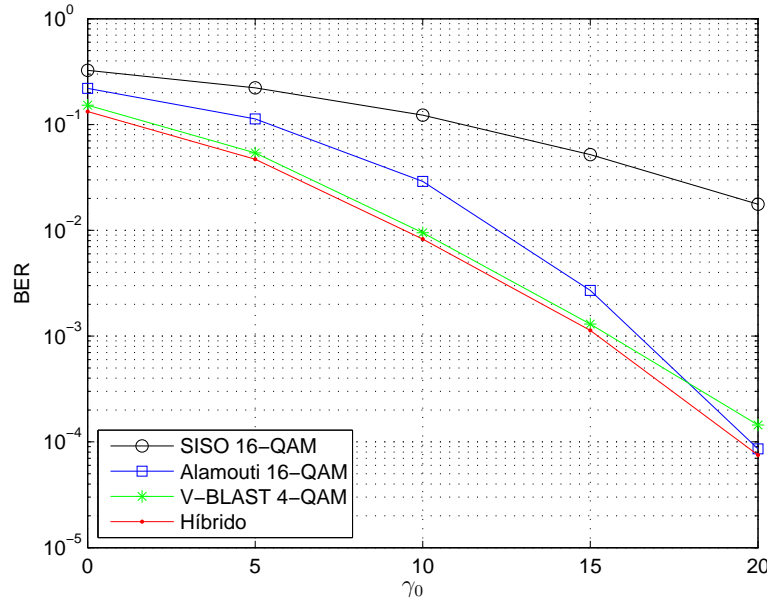


Figura 3. BER \times SNR: SISO, V-BLAST, Alamouti, Híbrido

Na Figura 3, apresentam-se as curvas referentes a simulação do esquema de comunicação com o código de Alamouti, modulação 16-QAM, o código V-BLAST, modulação 4-QAM, o esquema híbrido que faz uso dos códigos Alamouti e V-BLAST com canal de realimentação limitado e o sistema de comunicação SISO, modulação 16-QAM, como uma curva de referência. Todos os esquemas simulados aqui apresentam taxa e transmissão igual a 4 bits/intervalo de modulação, a fim de realizarmos uma comparação justa. Como pode ser observado nessa figura, o esquema híbrido possui o melhor desempenho em relação aos outros esquemas. Para esse exemplo, com constelações de ordem superior, o esquema híbrido teve o código de Alamouti selecionado em torno de 20 % das vezes enquanto que o código V-BLAST em torno de 80 %, resultando em uma taxa de transmissão espacial média igual a 1,8. Isso nos sugere que para sistemas que consideram modulação de maior ordem é possível se obter maiores ganhos de multiplexação através do uso da técnica de seleção de códigos no transmissor.

Com relação aos parâmetros analisados e sabendo que o canal de realimentação é algo previsto para os sistemas de comunicação de próxima geração, e que a demanda por altas taxas de transmissão já é uma realidade para os sistemas de comunicações atuais, a proposta apresentada neste artigo torna-se uma solução bastante atrativa.

6. Conclusões e Comentários Finais

Neste artigo, apresentou-se um esquema de codificação de canal MIMO com seleção de códigos no transmissor. Através de um canal de realimentação limitado o receptor envia um único bit de realimentação para o transmissor. Essa informação é usada apropriadamente para selecionar um dos dois códigos presentes no transmissor, Alamouti ou V-BLAST. A cada novo *frame* de transmissão, o receptor avalia as condições do canal e baseado nos valores de SNR o transmissor é informado sobre qual código deve ser considerado para a transmissão. Os resultados de simulação revelam que o esquema proposto

apresenta ganhos de diversidade e de multiplexação. A taxa de transmissão espacial média alcançada é sempre superior da taxa obtida com o código de Alamouti e a ordem de diversidade alcançada bem próxima à máxima possível, tornando a proposta desse trabalho bastante atraente para os sistemas de comunicação de próxima geração.

Agradecimentos

Esse trabalho foi patrocinado em parte pela Rede de Pesquisa e Inovação em Tecnologias Digitais (RENAPI).

Referências

- [1] *ITU-R Draft New Recommendation*, “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced”
- [2] G. J. Foschini, and M. J. Gans, “On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas,” *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [3] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, “Space-time block codes from orthogonal designs,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1456-1467, July. 1999.
- [4] S. M. Alamouti, “A Simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE Journal on Select Areas in Communications.*, Vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [5] *IEEE Std 802.16e-2005*, Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands
- [6] D. Gore and A. J. Paulraj, “Space-time block coding with optimal antenna selection,” in *Proc. ICASSP*, pp. 2441-2444, May. 2001.
- [7] Z. Chen, J. Yuan, and B. Vucetic, “Analysis of transmit antenna selection/maximal-ratio combining in Rayleigh fading channels,” *IEEE Trans. on Vehicular Technol.* vol. 54, no. 4, pp. 1312-1321, July. 2005.
- [8] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, “V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel”, in *Proc. ISSSE98 URSI International Symposium*, pp. 295-300, Sept. 1998.
- [9] L. Zheng and D. N. C. Tse, “Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels”, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, (5), pp. 1073-1096, May 2003.
- [10] G. J. Foschini, “Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas,” *Bell Labs. Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41-59, Autumn. 1996.