Sistemas de Informação MIMO: Desempenho, Limitantes e Perspectivas

Charles Casimiro Cavalcante Antônio Alisson Pessoa Guimarães Raymundo Nogueira de Sá Netto Walter da Cruz Freitas Júnior

Resumo—Este trabalho aborda os aspectos de processamento estatístico de sinais e teoria da informação para supressão (cancelamento) de interferência em sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, do inglês multiple input multiple output) e aspectos de modelagem considerando aspectos geométricos nos sistemas de recuperação da informação. As ferramentas das quais lançamos mão neste trabalho permitem uma aplicação em um grande número de sistemas de informação, não só no problema clássico de comunicações digitais, tais como processamento de voz, imagens, além de áreas por vezes menos conhecidas da comunidade de processamento de sinais, como por exemplo sensoriamento remoto e desconvolução sísmica.

I. INTRODUÇÃO

Modernas e eficientes técnicas de processamento de sinais têm sido um fator determinante na evolução dos sistemas de comunicação e de detecção em diversos contextos devido à sua capacidade de cancelamento (ou supressão) de interferência. Por interferência, entendemos qualquer perturbação inserida no sinal de interesse, quer seja proveniente de ruído, de outras fontes de sinal ou ainda de diferentes sistemas que compartilham algum recurso comum.

Por sistemas de informação definimos qualquer tipo de ambiente no qual se deseja extrair parte ou toda a informação existente no mesmo. No nosso entendimento, este termo é mais geral do que sistemas de comunicação por exemplo, por englobar cenários tais como processamento de imagens, de voz, de sinais biomédicos, etc.

No contexto de separação de múltiplos sinais, temos vários usuários de interesse, que ao mesmo tempo são interferência uns para os outros no sinal observado (recebido). Ao olharmos para um determinado sinal, buscando a remoção dele de um conjunto de contribuições de várias outras fontes, a meta é o cancelamento das outras fontes. Numa abordagem genérica os sinais ou fontes podem possuir características bastante diferentes uns dos outros.

Detecção multiusuário, um problema de grande interesse em comunicações digitais, é um caso particular do descrito acima. Também procuramos remover a contribuição dos diversos usuários de um determinado sinal de interesse. Normalmente, temos de identificar todos os usuários e por isso o processo de cancelamento da interferência ocorre de maneira conjunta para

Os autores são vinculados à Universidade Federal do Ceará (UFC), Dpto. Eng. Teleinformática, Fortaleza. E-mails: charles@gtel.ufc.br, alisson@gtel.ufc.br, raymundo@gtel.ufc.br, walter@gtel.ufc.br.

Este trabalho foi parcialmente suportado pelo CNPq, CAPES e BNB.

cada um dos sinais de interesse. Nesta abordagem, os sinais das fontes apresentam geralmente as mesmas características.

Finalmente, temos o problema de desconvolução, no qual deseja-se remover a interferência inserida pela dispersão temporal do sinal. A interferência intersimbólica é o exemplo mais comumente tratado na literatura, embora existam outras denominações em problemas de desconvolução sísmica e de imagens.

De fato, a interferência é um fator extremamente limitante do desempenho de sistemas digitais sendo então sua supressão um aspecto de importância fundamental na correta detecção dos sinais. Desta forma, técnicas de filtragem, separação de fontes, equalização, codificação espaço-temporal e outras técnicas avançadas de processamento de sinais têm se destacado na viabilização de sistemas de informação confiáveis [1], [2], [3], [4].

No nosso caso, estamos interessados em trabalhar no contexto mais geral possível, ou seja, sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas, não só para permitir uma melhor caracterização do tipo de interferência passível de existir nos casos de interesse, como também para diversificar ao máximo as soluções possíveis [5], [6]. De uma forma simples, podemos escrever o modelo do sinal no receptor de um sistema MIMO como sendo dado por:

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{a} + \mathbf{v},\tag{1}$$

em que a matriz ${\bf H}$ representa o meio de transmissão, o vetor a o conjunto de sinais emitidos e ${\bf v}$ o ruído considerado no modelo

Entretanto, mesmo em um modelo simples como o da Equação (1) a remoção dos sinais contidos em a pode ser uma tarefa bastante complexa. No caso de não dispormos de informação suficiente sobre o meio de transmissão e/ou os sinais emitidos, ferramentas avançadas para medida da informação, tais como informação mútua e negentropia, devem ser utilizadas para permitir o cancelamento da interferência em cada um dos sinais [2], [7], [8]. Ou ainda, se tivermos um ambiente com dispersão temporal, os aspectos das correlações nas diversas dimensões são outros fatores complicadores do processo.

Desta forma, nas seções seguintes, iremos descrever alguns dos problemas que podemos atuar quando considerando sistemas de informação MIMO.

II. Transceptores MIMO: projeto e cálculo de limitantes

Os sistemas com uso de transceptores MIMO podem ser atualmente classificados em dois tipos no que diz respeito à concentração ou distribuição da informação nos elementos envolvidos:

- Sistemas não-coordenados: quando não há conhecimento ou disponibilização das informações dos diversos elementos (antenas ou nós/relays) para os demais, sendo as decisões e métricas definidas localmente para cada elemento;
- Sistemas coordenados: neste caso, há um elemento central que dispõe das informações acerca dos diversos elementos envolvidos no sistema. O processamento pode então tomar proveito de tais informações para permitir um melhor desempenho do sistema.

A Figura 1 ilustra a diferença entre os sistemas não-coordenados e coordenados, no tocante à distribuição de informação entre os pontos do sistema.

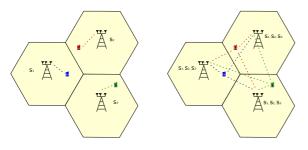


Fig. 1. Cenário sem cooperação (à esquerda) e cenário com MIMO distribuído (à direita).

Nesta tema abordamos diferentes aspectos relacionados aos sistemas MIMO, conforme descrito a seguir.

A. Sistemas Não-Coordenados

Arquiteturas de transmissão e recepção MIMO baseadas no uso de múltiplas antenas transmissoras e receptoras, desempenham papel fundamental na definição das tecnologias a serem implementadas na quarta geração dos sistemas de telecomunicações digitais e, em particular, dos sistemas de comunicações móveis [9]. O objetivo principal dos estudos mais recentes é o de oferecer uma grande variedade de serviços agregados ao usuário final, permitindo a fusão de serviços mistos em uma plataforma única.

A importância dos sistemas MIMO neste cenário está fortemente ligada aos ganhos teóricos de capacidade e eficiência espectral sem precedentes que os mesmos podem oferecer, uma vez que a capacidade do canal aumenta linearmente com o aumento do número de antenas empregadas no transmissor ou no receptor [10], [11], [12], [13]. Com isso, para efeitos de projeto, de acordo com a taxa de transmissão e qualidade do enlace almejados, uma arquitetura adequada para o transceptor é definida. Basicamente, as arquiteturas de transceptores MIMO podem ser divididas em duas grandes categorias, possuindo os seguintes objetivos:

- Prover ganho de diversidade espacial, visando aumentar a confiabilidade do enlace de rádio, i.e. atingir taxas de erro de bits reduzidas [14], [15];
- Prover ganho de multiplexação, visando aumentar a eficiência espectral, i.e. atingir taxas de transmissão elevadas [10], [16].

Recentemente, várias configurações híbridas foram reportadas na literatura buscando combinar os dois ganhos e assim permitir uma melhor adequação a certos requisitos de qualidade de serviço visualizadas para os sistemas de comunicações móveis [17], [18], [19], [20].

Para permitir a extração dos ganhos teóricos de capacidade e eficiência espectral em ambientes de propagação sem fio realistas, caracterizados por forte interferência de múltiplos usuários e seletividade em freqüência do canal, técnicas eficientes de processamento de sinais e modelos de transceptores MIMO facilmente configuráveis desempenham papel fundamental. O primeiro passo rumo à integração de sistemas MIMO em ambiente multiusuário consiste na combinação de transceptores MIMO com técnicas CDMA. Nesta vertente, diversas configurações têm sido investigadas conforme pode ser observado na literatura [21], [22], [23], [24], [25], [26]. Por outro lado, na perspectiva de maximizar a taxa de transmissão em canais seletivos em frequência, sistemas MIMO-OFDM representam uma alternativa promissora uma vez que além dos ganhos dos sistemas MIMO, o uso de múltiplos canais paralelos planos na frequência permitem uma melhor manipulação da interferência existente nos sistemas devido à natureza do meio de propagação [27].

Do ponto de vista do transmisssor, as arquiteturas existentes são geralmente projetadas para operar em modos de transmissão fixos (diversidade ou multiplexação) ou em modos de transmissão híbridos fixos ou ainda em modos chaveados. Do ponto de visto do receptor, a maioria das estruturas existentes assumem o conhecimento prévio do canal no processo de detecção. Os indicadores de desempenho geralmente assumem uma estimação perfeita (sem erros) do canal no receptor, o que é uma consideração irreal visto que, na prática, tais medidas não são factíveis de serem obtidas. Além disso, as soluções propostas se baseiam no uso de estruturas sub-ótimas de filtragem linear e não-linear sensíveis ao ruído e à propagação de erro, o que torna o desempenho real ainda mais distante do ganhos teóricos anunciados.

No projeto de um modelo de transceptor MIMO, duas questões de projeto devem ser levadas em conta, às quais estão ligadas ao processamento do sinal no transmissor e no receptor, respectivamente:

- Como projetar uma arquitetura de transmissão híbrida que combine ganhos de diversidade e de multiplexação em diferentes proporções, e que seja flexível no sentido de oferecer diferentes modos de transmissão adaptáveis ao estado do canal?
- Como projetar um receptor que realize conjuntamente as operações de estimação do canal e decodificação, mesmo em situações adversas de forte interferência?

A gama de estratégias que podem ser utilizadas para o

projeto e escolha do transceptor MIMO é bastante variada. De uma forma geral, podemos escolher o método baseado na métrica que estamos interessados em otimizar. Por exemplo, como já citado nos casos de diversidade e multiplexação, a escolha é feita por meio de qual figura de mérito se deseja otimizar (taxa de erro ou taxa de dados, respectivamente).

Um aspecto importante que pode explorar os graus de liberdade inseridos pelo uso de múltiplas antenas e por uma condição de canal favorável para alguns dos enlaces (par de antenas transmissora e receptora) é a *seleção de antenas*. Esta técnica consiste em escolher um subconjunto de antenas dentre as disponíveis para a transmissão por meio de algum critério de otimização. Em sistemas práticos, os requisitos são diversos e ainda antagônicos e concorrentes.

Diante deste quadro, faz-se necessário o uso de algoritmos robustos para respeitar os diversos requisitos do sistema e prover uma solução adequada no contexto multiusuário. Adicionalmente, *teoria dos jogos* é uma ferramenta que se mostra bastante adequada a tal problema uma vez que permite tratar de grandezas concorrentes e encontrar a melhor solução/configuração para as restrições impostas [28], [29], [30].

A partir do trabalho de Shannon [31], o conhecimento de um valor limitante à eficiência espectral, chamado de capacidade de canal, tem sido um importante aliado no projeto de sistemas de comunicações digitais. No final dos anos 90, Telatar buscou, para sistemas MIMO, a generalização de resultados conhecidos de capacidade para sistemas SISO [12]. Em seu trabalho, ele destacou a importância dos autovalores da matriz de potência do canal no cálculo da capacidade e mostrou como estes se relacionam diretamente com as características físicas do canal em questão.

No entanto, mesmo com o resultado da fórmula da capacidade conhecido e dependendo do tipo de canal ou do cenário, em termos computacionais por exemplo, fica por muitas vezes inviável a implementação de tal resultado, devido a complexidade da referida fórmula. Desta forma, buscam-se limitantes inferior e/ou superior, os quais proporcionam aproximações à capacidade.

Por sua vez, não é tarefa simples a obtenção de expressões fechadas para tais limitantes, além disso, se as expressões obtidas forem tão complexas quanto à capacidade em questão, em termos práticos, pode ser que não apresente nenhum ganho ou vantagem em considerar uma ou outra situação.

Na literatura, no caso do canal com desvanecimento de Rice, existem importantes trabalhos em se tratando na determinação de limitantes para a capacidade. Por exemplo, Mckay e Collings [32] e Jin et. al [33] obtêm limitantes à capacidade no caso de um canal MIMO espacialmente descorrelacionados considerando as seguintes hipóteses: o posto da matriz da componente de linha de visada (LOS, do inglês) é igual a 1; o receptor com perfeito conhecimento dos estados do canal (CSI, do inglês) e o transmissor sem CSI. Jayaweera e Poor [34] seguindo, basicamente, as mesmas condições, abordam a situação em que os elementos da matriz são descorrelacionados. Por sua vez, Lebrun et. al [35] tratam de casos assintóticos.

No entanto, grande parte destes trabalhos, dentre outros

que tratam de expressões fechadas à capacidade do canal, bem como no caso de expressões para limitantes, envolvem geralmente em seus desenvolvimentos a matriz de potência do canal, a partir da distribuição de Wishart, a qual tem um tratamento matemático complexo, principalmente, no que se refere a obtenção da função densidade de probabilidade conjunta dos autovalores de tal matriz [36].

Numa linha diferente há o trabalho de Zhong et. al [37], no qual os autores apresentam um método alternativo, via teoria de majorização, o qual permite a obtenção de limitantes sem que fosse necessário o uso direto da distribuição de Wishart [38]. Tal método apresenta a grande vantagem de permitir evitar de trabalhar diretamente com as características estatísticas da matriz de Wishart. Esta abordagem no projeto de transceptores pode melhorar/otimizar o desempenho do sistema como um todo e avaliar o seu desempenho através do cálculo da capacidade, utilizando a teoria de majorização para avaliar a capacidade através de limitantes, e assim, evitar o alto custo de complexidade do cálculo da matriz de Wishart.

B. Sistemas Coordenados

Sistemas coordenados ou cooperativos consistem no uso de várias células com diferentes estações radio-base sendo utilizadas de forma conjunta para transmitir dados para un conjunto de usuários de forma unificada. É esperado que a cooperação ou coordenação entre estações rádio base (bases) obtenha melhores resultados do que abordagens totalmente distribuídas uma vez que a cooperação possibilita o acesso a informações adicionais acerca do sistema e de seus usuários, como por exemplo métricas de qualidade do enlace, as quais podem ser utilizadas pelos algoritmos de gerência de recursos de rádio.

Neste contexto de cooperação entre bases pode-se identificar três linhas principais de atuação para gerência da interferência:

- Escalonamento inter-celular;
- Precodificação em sistemas com antenas distribuídas;
- Técnicas conjuntas de escalonamento e precodificação.

O escalonamento inter-celular [39], [40], [41] faz uso da cooperação entre bases para estimar o impacto da interferência sobre os usuários escalonados, de forma a escolher o conjunto de usuários que melhor satisfaça algum critério de otimização, e.g., maximizar a vazão total ou maximizar a mínima SINR.

Com relação às antenas das estações rádio-base pertencentes ao grupo de cooperação, estas podem ser utilizadas como um arranjo virtual de antenas, sobre o qual podem ser aplicadas técnicas de transmissão MIMO. Como ilustrado na Fig. 1, a precodificação neste cenário consiste em se utilizar este arranjo virtual de antenas para transmitir de forma conjunta os sinais destinados aos usuários do grupo de cooperação [42], [43], [44], [45]. Técnicas comuns de precodificação, como o *Zero Forcing* e o *Minimum Mean Square Error* [46] podem ser utilizadas nesse cenário, sob certas considerações.

No entanto, alguns aspectos diferenciam a precodificação no cenário cooperativo do MIMO convencional, o que se deve principalmente ao fato de as antenas transmissoras estarem localizadas em estações rádio-base distintas. Estes aspectos são, por exemplo: sincronismo dos sinais, restrições de potência por base, macrodiversidade e condicionamento do canal [42], as quais merecem atenção quando do projeto de transceptores em cenários de cooperação.

Tais condições de projeto tornam ainda mais complexa a tarefa de encontrar a capacidade de um sistema MIMO coordenado, uma vez que cada uma das bases pode enxergar diferentes condições de propagação e consequentemente diferentes propriedades estatísticas para os diversos canais. Além disso, o fato que os usuários recebem sinalização de todas as células envolvidas a modelagem é bastante crítica e complexa neste cenário.

Uma possibilidade é o uso de precodificadores baseados somente no conhecimento estatístico do canal resultando de um sistema coordenado, uma vez que as estatísticas mudam de forma mais lenta quando comparadas com o canal em si [47], [48]. O desafio nesta linha é a determinação da métrica de otimização a ser utilizada e como se fazer uso dela frente às restrições impostas pelo modelo e uma limitada quantidade de informação à respeito do canal.

Nesta linha, pode-se pensar em projetos de precodificadores que utilizam somente informações estatísticas acerca do canal, utilizando métodos de otimização adequados a este fim. Adicionalmente, é possível visualizar também o uso de teoria de majorização como uma das possíveis ferramentas para encontrar limitantes da capacidade de sistemas coordenados, complementando os resultados para sistemas MIMO não-coordenados.

III. Compressive Sensing: APLICAÇÕES EM COMUNICAÇÕES SEM FIO

Compressive sensing¹ (CS) é uma técnica bastante recente que surgiu por volta de 2004, quando se verificou que a quantidade de dados necessários para recuperação de imagens era muito menor que a quantidade de dados fornecida pelo critério da amostragem de Shannon-Nyquist que diz que a taxa de amostragem deve ser pelo menos duas vezes que a taxa do sinal [49]. Este aspecto inovador motivou uma maior investigação na área sobre os princípios relacionados à tal redução de dados [50], [51]. A área de processamento de imagens tem sido rica no desenvolvimento de novos algoritmos e métodos utilizando-se os princípios de CS por permitir ganhos muito maiores em relação às tradicionais técnicas de compressão de dados, utilizando princípios de entropia, conforme a teoria de Shannon [52], uma vez que o número de amostras usadas nos dados comprimidos seriam muito menores.

O princípio do CS é baseado no uso da métrica l_1 como mecanismo de comparação entre sinais que apresentam esparsidade (existências de vários coeficientes próximos a zero) na sua estrutura [53]. Este é o mesmo princípio observado em compressão com perdas, onde alguns coeficientes da representação são anulados por não possuirem informação sobre a estrutura dos dados. Desta forma pode-se aproveitar uma menor quantidade de dados para representar uma informação que estaria comprimida em uma quantidade

maior de bits através de processos de codificação de fonte usuais.

Em sistemas de comunicações móveis, a recuperação de informação é uma tarefa bastante importante para a melhoria do desempenho. Exemplos são a utilização do conhecimento ou estimação do canal para projeto de transceptores, precodificadores ou ainda melhoria de receptores em sistemas de detecção de informação. Tradicionalmente, a avaliação do desempenho é realizada assumindo-se o conhecimento do estado do canal (CSI, do inglês Channel State Information) de forma perfeita ou parcial, como, por exemplo, nos esquemas de Alamouti e detectores de máxima verossimilhança [54], [1]. Ainda assim, a estimação de tal dado não é fácil de ser realizada uma vez que a quantidade de dados é limitada devido às restrições nos canais de controle que são desejados possuírem a menor sinalização possível para não diminuir a taxa de transmissão efetiva. Com isso, o uso de técnicas que permitam recuperar informação a partir de uma quantidade menor de dados torna-se, além de atrativa computacionalmente, com importante apelo prático.

Nesta linha, há vários problemas em comunicações sem fio que potencialmente se beneficiariam do uso de métodos de estimação de informação a partir de uma quantidade reduzida de dados. A seguir são listados alguns exemplos.

- Limited feedback Em sistemas com canal de retorno limitado, é requisito que o sistema trabalhe com informação bastante reduzida para prover tarefas como projeto e seleção de precodificadores, seleção de antenas, dentre outras. Além destas, mesmo quando a informação é obtida com um grande número de bits de informação, métodos de CS podem ser úteis para fazer uma amostragem esparsa e transmitir pelo canal de retorno uma quantidade bastante reduzida de dados, capazes de permitir a recuperação da informação no receptor. Um exemplo deste processo pode ser encontrado em [55].
- Processamento distribuído em redes de sensores sem fio - Redes de sensores sem fio (WSN, do inglês Wireless Sensor Networks) utilizam nós que capturam informação em pontos espacialmente distintos para tentar inferir sobre alguma propriedade e/ou característica do ambiente. Uma vez que os nós devem ser dispositivos de baixo custo e alta eficiência energética (baixo consumo de baterias) sua capacidade de processamento e armazenagem é bastante limitada. Assim, Desta feita, usualmente se utiliza um centro de fusão de dados, que possui capacidade de processamento bastante elevado para condensar as informações dos diversos nós. Entretanto, alguns nós podem apresentar problemas como desligamento total ou parcial, o que torna a tarefa do centro de fusão mais complexa vista a limitação de informações acerca do ambiente como um todo. Com isso, o uso de técnicas de CS se mostram adequadas no uso do processamento de informações parciais como maneira de reconstruir os dados completos a partir de informações esparsas, quer de forma intencional (poucos sensores atuando) quer de forma não-intencional (nós com problemas) [56], [57], [58], [59], [60], [61].

¹A técnica apresenta ainda na literatura os seguintes sinônimos: *compressed* sensing, *compressive sampling* e *sparse sampling*

REFERÊNCIAS

- J. G. Proakis, *Digital Communications*, 3rd ed., ser. (Electrical Engineering Series). McGraw-Hill, 1995.
- [2] A. Hyvärinen, E. Oja, and J. Karhunen, Independent Component Analysis. John Wiley & Sons, 2001.
- [3] G. L. Stuber, J. R. Barry, S. W. McLaughlin, Y. G. Li, M. A. Ingram, and T. G. Pratt, "Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications," *Proceedings of IEEE*, vol. 92, pp. 271–294, February 2004.
- [4] J. R. Barry, D. G. Messerschmitt, and E. A. Lee, *Digital Communication*, 3rd ed. Kluwer Academic Publishers, December 2003.
- [5] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bölcskei, "An Overview of MIMO Communications - A Key to Gigabit Wireless," *Proceedings* of the IEEE, vol. 92, no. 2, pp. 198–218, February 2004.
- [6] H. Bölcskei, D. Gesbert, C. B. Papadias, and A.-J. van der Veen, Eds., Space-Time Wireless Systems: From Array Processing to MIMO Communications. Cambridge University Press, 2006.
- [7] A. Cichocki and S. ichi Amari, Adaptive Blind Signal and Image Processing: Learning Algorithms and Applications. John Wiley & Sons, 2002.
- [8] J. V. Stone, Independent Component Analysis: A Tutorial Introduction. MIT Press, 2004.
- [9] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bolcskei, "An overview of MIMO communications: A key to gigabit wireless," *Proc. of IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 198–218, Feb. 2004.
- [10] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41–59, 1996.
- [11] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications when using multiple antennas," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 311–335, 1998.
- [12] Î. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna gaussian channels," European Trans. on Telecomm., vol. 10, no. 6, pp. 585–595, Nov. 1999.
- [13] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 684–702, Jun. 2003.
- [14] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Oct. 1998.
- [15] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communications: performance criterion and code construction," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 744–765, Mar. 1998.
- [16] G. Golden, G. Foschini, R. Valenzuela, and P. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using the V-BLAST space-time communications architecture," *IEE Electronics Letters*, vol. 35, no. 7, pp. 14–15, 1999.
- [17] B. Hassibi and B. M. Hochwald, "High-rate codes that are linear in space and time," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 48, no. 7, pp. 1804–1824, July 2002.
- [18] H. El Gamal and M. O. Damen, "Universal space-time coding," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 49, no. 5, pp. 1097–1119, 2003.
- [19] W. C. F. Jr., F. R. P. Cavalcanti, and R. R. Lopes, "Hybrid transceiver schemes for spatial multiplexing and diversity in mimo systems," *Journal of Communication and Information Systems (JCIS) - Special* issue technically co-sponsored by the IEEE Communications Society, vol. 20, 2005.
- [20] A. L. F. de Almeida, G. Favier, and J. C. M. Mota, "Space-time multiplexing codes: A tensor modeling approach," in *IEEE 7th Workshop* on Sig. Proc. Advances in Wireless Commun. (SPAWC), Cannes, France, July 2006.
- [21] B. Hochwald, T. L. Marzetta, and C. B. Papadias, "A transmitter diversity scheme for wideband CDMA systems based on space-time spreading," *IEEE J. Selec. Areas Commun.*, vol. 19, no. 1, pp. 48–60, 2001.
- [22] H. Huang, H. Viswanathan, and G. J. Foschini, "Multiple antennas in cellular CDMA systems: transmission, detection, and spectral efficiency," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 1, no. 3, pp. 383–392, 2002.
- [23] R. Doostnejad, T. J. Lim, and E. Sousa, "Space-time spreading codes for a multiuser MIMO system," in *Proc. of 36th Asilomar Conf. Signals*, *Syst. Comp.*, Pacific Grove, USA, Nov. 2002, pp. 1374–1378.
- [24] S. Sfar, R. D. Murch, and K. B. Letaief, "Layered space-time multiuser detection over wireless uplink systems," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 2, no. 4, pp. 653–668, July 2003.
- [25] L. Mailaender, "Linear MIMO equalization for CDMA downlink signals with code reuse," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 4, no. 5, pp. 2423–2434, Sep. 2005.

- [26] R. Doostnejad, T. J. Lim, and E. Sousa, "Space-time multiplexing for MIMO multiuser downlink channels," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 5, no. 7, pp. 1726–1734, 2006.
- [27] G. R. Stuber, J. R. Barry, S. W. Mclaughlin, Y. Li, M. A. Ingram, and T. G. Pratt, "Broadband MIMO-OFDM wireless communications," *Proc.* of the IEEE, vol. 92, no. 2, pp. 271–294, Feb. 2004.
- [28] G. Scutari, D. P. Palomar, and S. Barbarossa, "Optimal Linear Precoding Strategies for Wideband Noncooperative Systems Based on Game Theory - Part I: Nash Equilibria," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 3, pp. 1230–1249, March 2008.
- [29] —, "Optimal Linear Precoding Strategies for Wideband Noncooperative Systems Based on Game Theory - Part II: Algorithms," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 3, pp. 1250–1267, March 2008.
- [30] I. M. Guerreiro and C. C. Cavalcante, "A Distributed Approach for Antenna Subset Selection in MIMO Systems," in *Proceedings of The* Seventh International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS2010), York, UK, September 2010, pp. 199–203.
- [31] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell Systems Technical Journal*, vol. Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July 1948.
- [32] M. R. Mckay and I. B. Collings, "Capacity bounds for correlated Rician MIMO channels," in *Proc. of IEEE International Conference* on Communications, Seoul, Korea, May 2005, pp. 772–776.
- [33] S. Jin, X. Gao, and X. You, "On the Ergodic Capacity of Rank-1 Ricean-Fading MIMO Channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 2, pp. 502–517, February 2007.
- [34] S. K. Jayaweera and H. V. Poor, "On the Capacity of Multiple Antenna Systems in Rician Fading," *IEEE Transaction on Communications*, vol. 4, no. 3, pp. 1102–1111, March 2005.
- [35] G. Lebrun, M. Faulkner, M. Shafi, and P. J. Smith, "MIMO Ricean Channel Capacity: An Asymptotic Analysis," *IEEE Transaction on Wireless Communications*, vol. 5, no. 6, pp. 1343–1350, June 2006.
- [36] G. Fraidenraich, O. Leveque, and J. M. Cioffi, "On the MIMO Channel Capacity for the Nakagami-m Channel," *IEEE Transactions* on *INformation Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3752–3757, August 2008.
- [37] C. Zhong, K.-K. Wong, and S. Jin, "Capacity Bounds for MIMO Nakagami-m Fading Channels," *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 57, no. 9, pp. 3613–3623, September 2009.
- [38] A. A. P. Guimarães, "Sobre Limitantes de Capacidade de um Canal MIMO com Desvanecimento de Rice: Uma Abordagem via Teoria de Majorização," Master's thesis, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Julho 2010.
- [39] M. Rahman, H. Yanikomeroglu, M. H. Ahmed, and S. Mahmoud, "Opportunistic nonorthogonal packet scheduling in fixed broadband wireless access networks," vol. 2006, pp. 1–11, 2006.
- [40] C. Koutsimanis, "Inter-cell interference coordination techniques for multi-cell ofdma networks supporting narrow band and elastic services," Master's thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, May 2007.
- [41] R. B. Moreira and F. R. P. Cavalcanti, "An hierarchical approach for inter-cell scheduling in interference-limited cellular networks," Sep. 2006, pp. 1–5.
- [42] H. Zhang and H. Dai, "Cochannel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks," vol. 2004, no. 2, pp. 222–235, 2004.
- [43] G. J. Foschini, K. Karakayali, and R. A. Valenzuela, "Coordinating multiple antenna cellular networks to achieve enormous spectral efficiency," vol. 153, no. 4, pp. 548–555, Aug. 2006.
- [44] D. Gesbert, S. G. Kiani, A. Gjendemsjø, and G. E. Øien, "Adaptation, coordination, and distributed resource allocation in interference-limited wireless networks," vol. 95, no. 12, pp. 2393–2409, Dec. 2007.
- [45] V. D. B. Correia, F. R. P. Cavalcanti, and Y. C. B. Silva, "Analysis of MIMO precoding with base station cooperation and imperfect channel estimation," Rio de Janeiro, Brazil, Sep. 2008.
- [46] M. Joham, W. Utschick, and J. A. Nossek, "Linear transmit processing in MIMO communications systems," vol. 53, no. 8, pp. 2700–2712, Aug. 2005
- [47] L. M. C. Sousa, T. F. Maciel, and C. C. Cavalcante, "Multiuser CoMP transmit processing with statistical channel state information at the transmitter," in *Proceedings of The Seventh International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS2010)*, York, UK, September 2010, pp. 194–198.
- [48] L. M. C. S. Cordeiro, "Statistical Modelling ad Precoder Design for Coordinated MIMO Wireless Communication Systems," Ph.D.

- dissertation, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza CE, Maio 2011.
- [49] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications, 4th ed. Prentice-Hall, 2007.
- [50] E. J. Candès, J. K. Romberg, and T. Tao, "Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements," *Communications on Pure* and Applied Mathematics, vol. 59, no. 8, pp. 1207–1223, Aug. 2006. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1002/cpa.20124
- [51] D. L. Donoho, "Compressed sensing," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306, 2006.
- [52] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2006.
- [53] E. J. Candes and M. B. Wakin, "An Introduction To Compressive Sampling," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 21–30, Mar. 2008. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1109/ MSP.2007.914731
- [54] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 16, pp. 1451–1458, October 1998.
- [55] H. Song, W. Seo, and D. Hong, "Compressive feedback based on sparse approximation for multiuser mimo systems," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 2, pp. 1017 –1023, feb. 2010.
- [56] W. Bajwa, J. Haupt, A. Sayeed, and R. Nowak, "Compressive

- wireless sensing," in *Proceedings of the 5th international conference on Information processing in sensor networks*, ser. IPSN '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 134–142. [Online]. Available: http://doi.acm.org/10.1145/1127777.1127801
- [57] W. U. Bajwa, A. Sayeed, and R. Nowak, "Compressed Sensing of Wireless Channels in Time, Frequency, and Space," in *Proc. 42nd Asilomar Conf. Signals, Systems, and Computers*, 2008.
- [58] J. Luo, L. Xiang, and C. Rosenberg, "Does Compressed Sensing Improve the Throughput of Wireless Sensor Networks?" in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'10)*, Cape Town, South Africa, May 2010.
- [59] M. Balouchestani, K. Raahemifar, and S. Krishnan, "Compressed sensing in wireless sensor networks: Survey," *Canadian Journal on Multimedia and Wireless Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 1–4, February 2011.
- [60] J. Haupt, W. Bajwa, M. Rabbat, and R. Nowak, "Compressive sensing for networked data: a different approach to decentralized compression," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 92–101, 2008.
- [61] Z. Liu, J. Liu, and Z. Qiu, "A new adaptive compressed sensing algorithm for Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Signal Processing (ICSP2010)*, October 2010, pp. 2452 –2455.