

7

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre a tese, discussões sobre os resultados obtidos, os novos métodos e suas aplicações, e são propostos alguns tópicos para trabalhos futuros. As características e a aplicabilidade das estruturas e algoritmos desenvolvidos ao longo da pesquisa são discutidas e as contribuições do trabalho são destacadas.

7.1

Resumo dos Resultados e Discussão

O Capítulo 2 apresentou um modelo geral para os sistemas de transmissão CDMA por blocos em canais seletivos em frequência. O uso de prefixo cíclico e de preenchimento de zeros como intervalo de guarda tanto para o caso de portadora única quanto multiportadora é considerado.

No Capítulo 3 foi proposto um receptor multiusuário às cegas que minimiza a variância na saída do receptor, sujeito a um conjunto de restrições lineares que ancora o sinal desejado enquanto minimiza os sinais interferentes. Uma análise de perturbação foi conduzida com o objetivo de avaliar o comportamento deste método de detecção multiusuário na presença de erros de estimação da matriz de correlação do sinal observado. Os experimentos por simulação em computador foram realizados para um canal invariante no tempo e os resultados foram apresentados em termos de taxa de erro de bit e razão sinal-ruído mais interferência variando o E_b/N_0 , a ordem estimada do canal e o número de amostras utilizadas para estimar a matriz de correlação do sinal observado. Observou-se nestas simulações que os sistemas multiportadora apresentam melhores resultados que os sistemas de portadora única, e que os sistemas com intervalo de guarda do tipo preenchimento de zeros tem um melhor desempenho quando comparados com os sistemas com prefixo cíclico. Ainda no Capítulo 3, duas implementações adaptativas para o detector multiusuário de mínima variância foram apresentadas. A primeira, do tipo gradiente estocástico, é apresentada na Seção 3.2, e uma nova estimativa de canal obtida por meio de maximização da variância *a posteriori* da saída do receptor é proposta. As simulações foram realizadas para um canal invariante

e o desempenho foi medido em termos de erro quadrático médio da estimativa do canal e a taxa de erro de bit do sistema de transmissão. Observou-se que o algoritmo proposto além de proporcionar uma redução do custo computacional, apresenta uma velocidade de convergência maior.

A segunda implementação adaptativa, apresentada na Seção 3.3, é do tipo mínimos quadrados. A estimativa do canal é obtida de um processo mini-max como o autovetor associado ao menor autovalor de uma matriz. A decomposição em vetores e valores singulares (SVD) pode ser utilizada para o cálculo desta estimativa, porém, com o objetivo de reduzir o alto custo computacional induzido pela SVD, o método inverso das potências foi utilizado. Este é um método adaptativo de estimação do menor autovalor e o correspondente autovetor, associados a uma matriz.

A Seção 3.3.1 apresentou dois novos algoritmos de estimação de canal voltados para a implementação adaptativa do tipo mínimos quadrados do receptor de mínima variância. Após manipulações algébricas, foi demonstrado que o mesmo procedimento mini-max utilizado na Seção 3.3 fornece uma estimativa de canal baseada na decomposição em autovetores e autovalores de uma matriz de autocorrelação, e que, portanto, métodos mais eficientes podem ser utilizados. Dois tipos de implementação são então propostos. A primeira implementação utiliza o método natural das potências, a segunda utiliza o algoritmo PASTd, que é um algoritmo eficiente de rastreamento do autovetor associado ao maior autovalor de uma matriz de autocorrelação. O custo computacional da atualização da estimativa do canal por meio do algoritmo PASTd é menor que o custo computacional utilizando as outras estimativas do tipo mínimo quadrados apresentadas neste trabalho. As simulações por computador foram realizadas para canais dinâmicos, onde usuários entram e saem do sistema, e para canais variantes no tempo. Observou-se que as estimativas de canal fornecidas pelos algoritmos propostos são similares às estimativas fornecidas seja pela SVD ou pelo método inverso das potências.

No Capítulo 4 foi feita uma introdução aos sistemas MIMO e suas propriedades. O foco do capítulo é o cálculo do ganho de diversidade em canais não seletivos em frequência. Nos Capítulos 5 e 6 as técnicas utilizadas nos sistemas MIMO foram estendidas e ampliadas para o caso de sistemas CDMA por blocos em canais seletivos em frequência.

No Capítulo 5 um modelo para a transmissão CDMA por blocos em canais SIMO seletivos em frequência usando codificação de Alamouti foi apresentado. De forma similar ao que foi feito no Capítulo 2, este modelo foi generalizado para sistemas de transmissão de portadora única e multiportadora usando prefixo cíclico ou preenchimento de zeros como intervalo de guarda. A

Seção 5.2 apresentou um receptor *zero forcing* para este sistema e o ganho de diversidade para este receptor foi calculado. Porém, as limitações práticas do receptor para atingir tal ganho de diversidade conduzem à implementação de um segundo receptor baseado no critério de mínimo erro quadrático médio (MMSE) na Seção 5.3. As simulações por computador para o receptor MMSE foram realizadas para canais seletivos em frequência e variantes no tempo. Notou-se um desempenho superior em termos de taxa de erro de bit (BER) para os sistemas MC CDMA CP, para diferentes valores de potência dos usuários interferentes (efeito “perto-longe”) e diferentes cargas do sistema. Na Seção 5.4 uma implementação adaptativa do tipo mínimos quadrados foi sugerida e o cancelamento da auto-interferência nessa implementação foi analisado na Seção 5.4.2. Concluiu-se que se a estimativa do vetor de restrições é uma estimativa precisa do canal, o cancelamento da auto-interferência é garantido para este receptor. Assim como na Seção 3.3, a estimativa do canal resulta de um processo mini-max e é obtida como o autovetor associado ao menor autovalor de uma matriz. A decomposição em vetores e valores singulares (SVD) pode ser utilizada para o cálculo desta estimativa, porém, com o objetivo de reduzir o alto custo computacional induzido pela SVD, o método inverso das potências foi utilizado. Este é um método adaptativo de estimação do menor autovalor e o correspondente autovetor, associados a uma matriz.

A Seção 5.4.4 sugeriu dois novos algoritmos de estimação de canal para a implementação adaptativa do tipo mínimos quadrados do receptor de mínima variância. Estes dois algoritmos de estimação de canal são uma extensão para o caso de canais SIMO dos algoritmos propostos na Seção 3.3.1. Assim, após manipulações algébricas, demonstrou-se que o mesmo procedimento mini-max utilizado na Seção 5.4 fornece uma estimativa de canal baseada na decomposição em autovetores e autovalores de uma matriz de autocorrelação, e portanto, métodos mais eficientes podem ser utilizados. Assim como na Seção 3.3.1, foram considerados o método natural das potências e o uso do algoritmo PASTd. O custo computacional da atualização da estimativa do canal por meio do PASTd resultou menor que o custo computacional utilizando as outras estimativas do tipo mínimo quadrados apresentadas neste trabalho. As simulações por computador foram realizadas para canais dinâmicos, onde usuários entram e saem do sistema, e para canais variantes no tempo. Pôde ser observado, que a estimativa do canal obtida com o PASTd apresenta uma velocidade de convergência comparável com o SVD e o método inverso das potências, mas o erro resultante é maior.

Uma segunda estrutura para os sistemas de transmissão CDMA

por blocos em canais MISO foi proposta no Capítulo 6. Esta estrutura utiliza a técnica de reversão temporal que, admitindo-se o conhecimento do canal, permite desacoplar os símbolos recebidos para serem demodulados independentemente, diminuindo assim o custo computacional. O ganho de diversidade deste sistema para o receptor de máxima verossimilhança foi analisado e condições para atingir o máximo ganho de diversidade foram discutidas na Seção 6.3, considerando-se os quatro sistemas focados neste trabalho (MC CDMA CP, MC CDMA ZP, SC CDMA CP e SC CDMA ZP). Um receptor de mínimo erro quadrático médio foi proposto para estes sistemas. Foi verificado por meio de simulações que embora tal receptor seja subótimo, ele é capaz de explorar a informação redundante nos múltiplos percursos do canal de transmissão e melhorar o desempenho em termos de taxa de erro de bit.

7.2

Direções Futuras

Levando em consideração os comentários feitos anteriormente, os possíveis desdobramentos desta tese são sugeridos para futuras investigações:

- Adaptar o modelo unificado dos sistemas de transmissão CDMA por blocos obtido no Capítulo 2 (canal SISO) para o caso de outros sistemas de transmissão por blocos como OFDM e OFDMA.
- Utilizar no receptor de mínima variância diferentes implementações adaptativas como gradiente conjugado e quase-Newton, usando a estimativa de canal proposta na Seção 3.2.
- Realizar a implementação adaptativa do tipo mínimos quadrados da estimativa de canal proposta na Seção 3.2.
- Estender a estimativa de canal proposta na Seção 3.3, que utiliza o algoritmo PASTd, para sistemas OFDM-ZP e OFDM-CP com matriz de pré-codificação [85], [89].
- Adaptar o modelo unificado dos sistemas de transmissão CDMA por blocos com codificação espaço-temporal do Capítulo 5 (canal MISO) e do Capítulo 6 (canal MISO) para outros sistemas de transmissão por blocos como OFDM e OFDMA.
- Estender as técnicas propostas na Seção 5.4.4 para a estimação de canal às cegas, aos sistemas OFDM-CP com pré-codificação.
- Investigar a implementação adaptativa gradiente estocástico para sistemas CDMA por blocos em canais MISO seletivos em frequência e estender a técnica proposta na Seção 3.2.

- Implementar o receptor de mínima variância com restrições lineares para o sistema de transmissão CDMA por blocos com reversão temporal, e analisar a possibilidade de implementação rápida da estimação do canal por meio de métodos de rastreamento de sub-espacos.
- Averiguar o uso de receptores que minimizam a função custo módulo constante com restrições lineares nas estruturas de transmissão apresentadas neste trabalho.