

Os sistemas multiantena com Modulação Espacial destacam-se entre os sistemas MIMO por apresentarem reduzido custo energético comparado aos sistemas multiantena convencionais, devido ao reduzido número de cadeias de RF requerido no transmissor.

Em meio aos desenvolvimentos existentes para os modelos de comunicação sob a denominação de Modulação Espacial, esta Tese apresenta contribuições à recentemente introduzida Modulação Espacial Generalizada, que combina a transmissão de informação pela escolha das antenas transmissoras, característica dos sistemas de Modulação Espacial, à transmissão paralela de símbolos pelas antenas ativas, como nos sistemas de Multiplexação Espacial.

As contribuições aqui apresentadas concentram-se no desenvolvimento de detectores para os sistemas de Modulação Espacial Generalizada que, por utilizarem estratégias baseadas em abordagens diferentes, oferecem distintas relações entre desempenho de detecção e custo de computação.

A detecção ótima GSM, realizada pelo detector de máxima verossimilhança, teve seu desempenho de detecção obtido numericamente e comparado à expressão analítica da probabilidade de erro de bit. Partindo desta derivação, foram identificados os ganhos de codificação e de diversidade oferecidos pelos sistemas GSM não codificados. Além disso, foram traçadas conclusões sobre a escolha das combinações de antenas transmissoras. Como principal resultado, foi identificado o compromisso existente entre o desempenho de detecção e o número de antenas posicionadas no transmissor. Este compromisso é o resultado da influência da mínima distância de Hamming entre as combinações de antenas empregadas no transmissor. O grande número de testes requerido pelo detector de máxima verossimilhança torna-o uma estratégia de inviável implementação. Por este motivo, foi proposto um algoritmo com igual desempenho, rotulado SD-DI-RC, baseado nos detectores *Sphere Decoding*, que consiste de uma adaptação dos algoritmos SD para sistemas MIMO-SMX, mas que explora as características do sinal GSM. O algoritmo proposto é capaz de reduzir o custo de computação comparado ao detector ML e ao algoritmo SD não adaptado aos sistemas GSM, porém este custo, dependente do nível de ruído observado no receptor, torna-o menos vantajoso em baixos regimes de SNR.

A busca por detectores subótimos menos propensos à influência da

relação sinal-ruído motivou o desenvolvimento dos detectores apresentados no Capítulos 4 e 5. No Capítulo 4 são apresentados detectores que realizam a identificação das duas peças de informação no GSM, a combinação de antenas ativas e os símbolos emitidos, de maneira integrada. A divisão em partições das antenas transmissoras e o agrupamento das componentes do vetor de dados no lado receptor são definidos conjuntamente e formam a base das estratégias de detecção em grupos. Como evolução dos detectores em grupos, foram propostos os esquemas de aninhamento e ordenamento dos grupos, visando explorar de forma mais efetiva a dependência estatística entre os grupos. Levando em consideração o balanço entre desempenho de detecção e custo computacional, verificou-se que o ordenamento por Máxima Distância da Constelação (MLA-M) é de uso mais adequado em canais que se mantêm invariantes por sucessivas transmissões, enquanto o ordenamento por Confiabilidade de Detecção (MLA-C) resulta em detecções mais precisas e, se o canal varia mais rapidamente, seu uso é preferível. O uso de enlace reverso confiável para o envio de informação ao transmissor a respeito do particionamento das antenas foi avaliado no cenário de canal variante, e resultou em melhora de desempenho de detecção. Este conjunto de esquemas aplicados à estratégia de detecção em grupos, apesar de fornecer melhor qualidade de detecção, não são capazes de fornecer desempenho de detecção próximo aos detectores ótimos, limitando a atratividade destas estratégias.

No Capítulo 5 foram abordadas estratégias de detecção que realizam a identificação da combinação de antenas transmissoras e dos símbolos emitidos em fases distintas. A utilização desta abordagem possibilita o desenvolvimento de estratégias melhor direcionadas aos elementos a serem detectados no sinal transmitido GSM. Para a identificação da combinação de antenas ativas, verificou-se que a proposta baseada em um banco de matrizes projetoras possui melhor desempenho que a estratégia baseada em banco de filtros casados. Ademais, o custo computacional associado à construção deste banco pode ser significativamente reduzido com o emprego da forma recursiva de construção de matrizes projetoras. Para a detecção do vetor de símbolos emitidos, a técnica de redução de reticulado combinada ao filtro MMSE resulta em taxas de erro de bit próximas à do detector ótimo, resultado conhecido dos sistemas MIMO com Multiplexação Espacial. Pelo desempenho de detecção desta estratégia mostrar-se limitada pelo desempenho da primeira fase, propôs-se a adição de um esquema de detecção em lista de comprimento variável. Com a adição deste esquema, a perda de desempenho causada pela Fase 1 do detector é reduzida e a estratégia atinge desempenho próximo ao detector ótimo. Além disto, o esquema de lista de comprimento variável oferece maior redução do custo de

computação quando o ruído aditivo no sistema é baixo. Pelo desempenho de detecção desta estratégia, aliado ao custo computacional comparável ao dos detectores integrados, esta estratégia mostrou-se mais atrativa para a detecção em sistemas GSM.

O Capítulo 6 abordou o problema de detecção GSM em sistemas com codificação espaço-temporal, que possibilitam ganhos de diversidade na transmissão. Foi proposta uma forma alternativa de implementação do detector ótimo, que resulta em menor custo de computação. Em seguida, tomando como base desenvolvimentos existentes de códigos espaço-temporais para sistemas SM, foi proposta uma estratégia de detecção quase-ótima para sistemas GSM-STBC. Este detector possui estrutura análoga ao detector em duas fases List-BMP-MMSE-LR, mas utiliza-se das simplificações possíveis devido a ortogonalidade da matriz do canal. Como resultado, reduções do custo computacional são atingidas, ao custo de pequena perda de desempenho de detecção.

O conjunto de propostas reunidas nesta Tese constitui técnicas aplicáveis a este sistema de comunicação multiantena. No entanto, por tratar-se de um sistema recentemente proposto, há inúmeros tópicos de pesquisa em aberto e cujo estudo pode produzir importantes contribuições.

Dentre as estratégias de detecção, existem implementações do algoritmo *Sphere Decoding* que apresentam desempenho subótimo, mas que possuem custo de computação menos sensíveis, ou independentes, da relação sinal-ruído. Estudos que avaliem se a estrutura de combinações de antenas dos sistemas SM que possam fixar o custo computacional do algoritmo SD poderiam aumentar a atratividade desta classe de detectores.

Uma possível abordagem para o desenvolvimento de detectores para sistemas de modulação espacial é o uso da teoria de *Compressive Sensing*, que é baseada na compressão de dados esparsos em uma nova base ortonormal. Considerando que, dependendo da relação entre antenas transmissoras e ativas, o sinal SM pode ser considerado esparsos, as técnicas, que normalmente apresentam baixa complexidade computacional, podem fornecer soluções atrativas. Poucos estudos dedicaram-se a aplicação desta técnica [69, 70].

As propostas de detecção aqui apresentadas baseiam-se na suposição de que a matriz do canal é perfeitamente conhecida pelo receptor, ou no conhecido erro médio quadrático do estimador MMSE para sistemas MIMO. Estratégias de estimação de canal através de pilotos são parte integrantes de um sistema de comunicação e, para os sistemas MIMO convencionais, diversas propostas já foram apresentadas [71, 72]. No entanto, ao considerar as características de um sistema de Modulação Espacial, em que apenas um subconjunto das antenas é ativada a cada transmissão, esquemas de estimação, com o uso de pilotos, por

exemplo, devem ser adequadamente projetados para minimizar o tempo gasto com treinamento.

Nesta Tese foi apresentado que a combinação de antenas ativas selecionada para o transmissor influencia o ganho de codificação do sistema GSM. Baseado neste resultado, estratégias que realizem a coordenação do conjunto de combinações de antenas usado no transmissor, e também conhecido pelo receptor, pode promover ganho de desempenho ao sistema GSM.

Como verificado no Capítulo 5, o desempenho de detecção da combinação de antenas ativas tem grande influência no desempenho geral do sistema. De maneira ampla, a detecção da combinação de antenas baseia-se nas características das submatrizes do canal, que funcionam como assinaturas da combinação de antenas empregadas a cada transmissão. Uma possibilidade de tornar estas assinaturas mais diferenciáveis entre si pode dar-se através de métodos de alocação de potência entre as antenas transmissoras ou aproveitando-se de desbalanceamentos de potência entre os enlaces.

O paradigma de transmissão de dados pela combinação de antenas constitui um desafio para o estabelecimento de estratégias de comunicação multiusuário nos sistemas de Modulação Espacial. Hoje são escassos os trabalhos que lidam com este cenário [73].