

1

Introdução

A demanda por meios que possam prover comunicação de dados a elevadas taxas e com alta disponibilidade é o fator que impulsiona o desenvolvimento de sistemas de comunicação mais aprimorados e eficientes. Há pouco mais de uma década os sistemas que empregam múltiplas antenas nas estações transmissoras e receptoras, comumente chamados de sistemas MIMO (multiple-input multiple-output) constituíram-se como uma importante forma de prover aumento significativo da taxa de transmissão de dados, assim como de permitir maior confiabilidade dos enlaces de comunicação [1]. Os ganhos promovidos por este novo método de transmissão foram tão significativos que em poucos anos foi adotado em diversos padrões e tecnologias, como em redes locais e metropolitanas sem fio e redes celulares [2].

Nos dias atuais, soluções capazes de oferecer redução aos gastos energéticos dos sistemas de telecomunicações são de grande importância. Neste cenário, os sistemas MIMO aumentam sua notoriedade, pois apresentam relação eficiência energética – eficiência espectral vantajosa quando comparado aos sistemas que empregam antenas simples operando à taxa equivalente [3]. No entanto, ainda que a energia despendida por um sistema MIMO seja reduzida, parte considerável deste gasto reside no consumo dos filtros, conversores analógico-digital e amplificadores de potência que compõem as múltiplas cadeias de radiofrequência (RF) necessárias para a transmissão de sinal em simultâneo em várias antenas.

Neste contexto, os sistemas de Modulação Espacial (Spatial Modulation, SM) propõem-se a manter os benefícios típicos dos sistemas MIMO convencionais, como a elevada eficiência espectral e a possibilidade de ganhos de multiplexação e diversidade, com o emprego de menor número de antenas simultaneamente ativas e conseqüentemente, maior eficiência energética. Esta característica é decorrente do fato de apenas um subconjunto das antenas transmissoras ser ativado em simultâneo a cada transmissão, e a escolha das antenas transmissoras ser um elemento portador de informação. Desta forma, a taxa de transmissão de um sistema SM pode ser aumentada com o uso de mais antenas posicionadas no lado transmissor, significando que mais bits de informação podem ser associados à escolha destas antenas.

Existe uma variedade de propostas de sistemas MIMO que empregam este princípio, e todas podem ser consideradas categorias de sistemas MIMO com

Modulação Espacial (MIMO-SM). As propostas iniciais deste tipo de sistema foram desenvolvidas em dois trabalhos independentes [4, 5] e apresentam estratégias semelhantes. Nestes trabalhos, uma das N_T antenas posicionadas no transmissor é ativada a cada transmissão. Desta forma, a cada uma das N_T possibilidades de escolha de transmissor é associada uma sequência binária, e este elemento transmissor deve ser identificado na recepção, caracterizando o transporte de informação pela escolha do transmissor. Em desdobramento à esta forma de comunicação, duas categorias de sistemas são identificadas na literatura: quando esta antena ativa emite um sinal cuja função é apenas identificar para o lado receptor qual a antena ativa no transmissor, este sistema é denominado Chaveamento por Comutação Espacial (*Space Shift Keying*, SSK) [6]. Na segunda categoria, a antena ativa emite um símbolo de uma modulação digital conhecida. Este é o caso propriamente conhecido como Modulação Espacial, SM [5]. Em relação aos sistemas MIMO convencionais, a ativação de uma antena por transmissão incorre em duas vantagens. Do ponto de vista do detector, não ocorre interferência entre os elementos emitidos pelas antenas e o processo de detecção é simplificado, visto que há apenas um fluxo de dados a ser detectado; sob a ótica da complexidade de construção do sistema, é dispensada a implementação de circuitos de sincronização das antenas.

Diferentes estratégias de detecção de sinais para sistemas SM são encontradas na literatura. O desempenho do detector ótimo foi apresentado em [7] e simulações numéricas evidenciaram resultados próximos ao desempenho de sistemas MIMO em que todas as antenas emitem fluxos de dados independentes por todas as antenas transmissoras, chamados sistemas MIMO com Multiplexação Espacial (*Spatial Multiplexing*, MIMO-SMX). Devido à elevada complexidade de implantação do detector ótimo, abordagens subótimas foram desenvolvidas [5, 8, 9], por vezes usando adaptações de estratégias conhecidas para sistemas MIMO com Multiplexação Espacial [10].

A extensão dos sistemas SSK e SM, chamados SSK e SM generalizados (GSSK e GSM), é caracterizada pela ativação simultânea de N_A antenas no lado transmissor, $1 < N_A < N_T$, e a cada possível padrão de ativação das N_A antenas é associada uma sequência binária. Esta mudança de estratégia confere características particulares a estes sistemas generalizados. Com a ativação de múltiplas antenas, as vantagens de ausência de interferência entre os dados emitidos pelas antenas e a dispensa de circuitos de sincronização são eliminadas. No entanto, taxas de transmissão mais elevadas podem ser atingidas com menos antenas posicionadas no transmissor, além de ser removida a limitação de N_T ser necessariamente potência de dois, existente nos sistemas não generalizados. Por sua vez, internos à categoria dos sistemas GSM, há o es-

quema de transmissão em que as N_A antenas ativas emitem o mesmo símbolo da modulação digital empregada [11, 12], e o esquema em que são emitidos símbolos independentes por cada antena ativa [13], portanto combinando as características da Modulação Espacial e da Multiplexação Espacial. Existem trabalhos que dedicam-se à unificação do modelo matemático das variações acima descritas pertencentes à classe de sistemas MIMO-GSM, assim como a unificação das expressões da probabilidade de erro de detecção [14, 15].

Em meio a esta variedade de modelos MIMO-SM, esta Tese abordará técnicas de detecção de sinais em sistemas GSM com transmissão de símbolos independentes pelas antenas ativas. Dentre todas as variações apresentadas, esta é a técnica que oferece a distribuição da informação a ser transmitida mais balanceada entre os bits emitidos pela escolha da combinação de antenas transmissoras e pelos símbolos emitidos por estas antenas. Duas são as estratégias de detecção mais relevantes aplicadas a estes sistemas, e introduzem abordagens subótimas de detecção do sinal GSM. A primeira proposta [13] apresentou a forma de detecção dividida em duas fases, separando a identificação da combinação de antenas ativas e a detecção dos símbolos emitidos em dois estágios separados no receptor. Este paradigma serviu de base para o desenvolvimento de uma classe de detectores propostos nesta Tese. A segunda estratégia, recentemente proposta [16], reduz a diferença de desempenho em relação ao detector ótimo e é usada como estratégia competidora de algumas das propostas aqui elaboradas.

Pelos sistemas GSM amalgamarem o uso de combinação de antenas transmissoras como unidade transportadora de informação à emissão de símbolos independentes pelas antenas ativas, as propostas de detecção de sinais existentes para sistemas MIMO com Multiplexação Espacial são importantes ferramentas para o desenvolvimento de novas propostas para os sistemas GSM. Em meio à variedade de técnicas empregadas para a detecção em sistemas MIMO-SMX, algumas mostram-se convenientes para a adaptação e uso nos sistemas GSM. Os detectores baseados na técnica chamada *Sphere Decoding* [17, 18] reduzem a exaustiva busca pela solução de máxima verossimilhança, analisando apenas os vetores pertencentes ao domínio do sinal desejado cuja distância aos dados recebidos é menor ou igual a um limiar inicialmente definido. Diversas adaptações que visam a otimização do processo de busca, por vezes admitindo perda do desempenho de detecção, também foram desenvolvidas para a detecção em sistemas MIMO-SMX [19, 20, 21]. Os equalizadores lineares *zero-forcing* (ZF) e de mínimo erro médio quadrático (MMSE) são amplamente utilizados em sistemas de comunicação pelo seu reduzido custo computacional. Quando empregados isoladamente nos detectores de sistemas MIMO-SMX, resultam em

desempenhos de detecção severamente desfavorecidos pelo reduzido ganho de diversidade característico destas estratégias. Por este motivo, são comumente combinados a outros esquemas como os detectores de Sucessivo Cancelamento de Interferências (*Successive Interference Cancellation*, SIC) [22] ou, com as mais recentemente propostas técnicas de Redução de Reticulado (*Lattice Reduction*, LR) [23] e de Múltiplas Ramificações (*Multi-branching*) [24].

Os detectores apresentados nesta Tese foram desenvolvidos e publicados à mesma época das estratégias acima citadas para sistemas GSM e propõem formas alternativas de se alcançar desempenhos de detecção iguais ou próximos ao detector ótimo através de técnicas menos custosas computacionalmente.

1.1

Organização da Tese

As propostas apresentadas nesta Tese foram divididas em três categorias quanto ao desempenho de detecção e à abordagem empregada, que são refletidas na estruturação dos capítulos.

O Capítulo 2 apresenta modelos de canais de propagação MIMO, incluindo o modelo de correlação entre os coeficientes do canal, utilizados nos cenários de simulação. Na sequência são apresentados o modelo de sinais GSM, usado como base para os capítulos seguintes e o modelo do erro de um estimador MMSE de canal MIMO, também empregado nos cenários de simulação.

O Capítulo 3 dedica-se à detecção ótima GSM. É apresentado o detector de máxima verossimilhança, que fornece a solução que minimiza a probabilidade de erro de detecção, porém de alta complexidade computacional. Um limitante superior para a probabilidade de erro, baseado em desenvolvimentos feitos para sistemas MIMO-SMX, é apresentado, e comparado à curva da taxa de erro de bit dos sistemas GSM obtida numericamente. Partindo destes desenvolvimentos, são apresentadas conclusões a respeito da escolha das combinações de antenas ativas empregadas pelo transmissor GSM. Por fim, são apresentados os fundamentos do detector *Sphere Decoding*, originalmente aplicado aos sistemas MIMO-SMX. É então desenvolvida uma proposta com modificações que exploram as características do sinal GSM.

No Capítulo 4 é apresentada uma família de receptores subótimos baseados na estratégia de detecção em grupos. Esta estratégia, utilizada em diferentes contextos, como para a detecção multiusuário em sistemas CDMA [25] e em sistemas de comunicação em blocos OFDM [26], foi empregada no problema de detecção GSM, através do casamento entre a escolha de formação dos grupos e as possibilidades de combinação de antenas que podem ser ativadas no transmissor. Métodos de aninhamento dos grupos no receptor, ordenamento dos

grupos e de atualização das combinações de antenas ativas, realizada no transmissor, são esquemas propostos que são adicionados ao esquema de detecção em grupos visando a melhora do desempenho de detecção.

Diferentemente do Capítulo 4, em que a detecção da combinação de antenas ativas e dos símbolos emitidos por elas são feitos de forma conjunta, no Capítulo 5 é desenvolvido um detector que realiza estas tarefas em fases distintas no receptor, aqui chamado de detector em duas fases. São apresentadas estratégias de identificação da combinação de antenas ativas no transmissor, seguido de um estudo da influência do conjunto de combinações de antenas transmissoras ativas no desempenho destas estratégias. Em seguida, para a segunda fase do detector, que realiza a detecção dos símbolos emitidos, é empregado um detector que utiliza o filtro MMSE aliado à técnica de redução de reticulado. Este detector, adicionado a um esquema de detecção em lista de comprimento variável, oferece um desempenho de detecção próximo ao detector ótimo, com reduzida complexidade computacional.

Os capítulos anteriores dedicaram-se ao desenvolvimento de estratégias de detecção em sistemas GSM não codificados. Verifica-se que o esquema de ativação das combinações de antenas, em função dos dados a serem transmitidos, é incapaz de prover ganho de diversidade oferecido pelo transmissor. Por esta razão, estratégias que utilizam códigos espaço-temporais foram desenvolvidos para sistemas GSM. No entanto, as estratégias de detecção desenvolvidas a estes esquemas exibem custo de computação que crescem em taxa não linear com o número de palavras-código, acima do custo linear necessário para identificação dos símbolos embarcados nestas palavras-código. No Capítulo 6 é proposta uma forma alternativa de implementação do detector ótimo, menos complexa computacionalmente. Também é apresentada uma estratégia de detecção que, através do processamento de apenas uma fração do número total de palavras-código, oferece desempenho de detecção quase-ótimo, o que possibilita a redução do custo de computação em relação à estratégia ótima.

As propostas apresentadas nesta Tese são avaliadas quanto ao seu desempenho de detecção, em termos da taxa de erro de bits, e quanto a sua complexidade computacional, expressa em função do número de operações de ponto flutuante necessário para a decodificação de um bloco de dados. Além disto, a análise do desempenho das estratégias é complementada considerando condições comumente verificadas em situações práticas. Os desempenhos são apresentados considerando o caso em que os coeficientes da matriz do canal são correlacionados, representando o caso em que o espaçamento entre as antenas transmissoras ou receptoras e as condições de propagação tornam as componentes dos vetores do sinal emitido ou coletado com dependência es-

tatística produzida pelo canal. Também considera-se o caso em que a matriz do canal não é perfeitamente conhecida pelo receptor, gerando degradação no desempenho dos detectores.