

1 Introdução

1.1 Evolução dos Sistemas de Comunicações Móveis

Nos sistemas de telecomunicações sem fio de primeira geração (1G) comercialmente disponíveis na década de 1980, o foco principal era apenas a transmissão de voz. Estes sistemas eram analógicos e utilizaram o FDMA (*frequency division multiple access*) como técnica de múltiplo acesso. Já nos sistemas de segunda geração (2G) foram desenvolvidas técnicas de modulação e acesso mais avançadas com o objetivo de prover a transmissão da voz em forma digital, e de fornecer transmissão de dados em taxas de até 10 kbps. Estes sistemas foram comercialmente disponíveis na década de 1990 e seus principais representantes são: *Global Systems for Mobile Telecommunications* (GSM) [1] e o *Personal Digital Cellular* (PDC) [2] usando a técnica de múltiplo acesso TDMA (*time division multiple access*), e o *Interim Standard-95* (IS-95) [3] usando a técnica de múltiplo acesso DS-CDMA (*direct sequence code division multiple access*).

Os sistemas de terceira geração (3G), baseados também em tecnologias digitais, são capazes de transmitir voz, dados e tráfego multimídia através de redes comutadas e redes de pacotes. Estes padrões suportam diferentes serviços com taxas de transmissão de 144 kbps em veículos em movimento, 384 kbps em ambientes externos, e 2 Mbps em ambientes internos [4]. Os sistemas 3G têm dois padrões amplamente difundidos, o *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) e o *International Mobile Telecommunications-2000* (IMT-2000). Em ambos padrões, o DS-CDMA é a tecnologia predominante entre as técnicas de múltiplo acesso devido às vantagens que ela possui, tais como: privacidade, alta rejeição à interferência e resistência ao canal multipercurso [5].

No âmbito das redes de computadores, padrões de altas taxas de transmissão têm sido desenvolvidos, como o IEEE802.11a [6], *high-performance radio LAN type two* (HIPERLAN/2) [7], e *multimedia mobile access communication* (MMAC) [8], todos eles baseados em técnicas OFDM

(*orthogonal frequency-division multiplexing*) e que proporcionam taxas de transmissão de até 54 Mbps [4]. Estes padrões são projetados basicamente para fornecer comunicação entre computadores em ambientes internos, permitindo pouca mobilidade ao usuário (redes nômadas).

Já para os sistemas de quarta geração (4G) ou “além da terceira geração” os requerimentos de transmissão de dados, capacidade, eficiência e mobilidade são ainda mais exigentes, com taxas de transmissão de até 100 Mbps para aplicações de alta mobilidade a 1 Gbps para aplicações de baixa mobilidade [9], isto com uma alta eficiência espectral de até 10 b/s/Hz [10]. Os principais padrões 4G são *Long Term Evolution Advanced* (LTE Advanced), WiMAX (802.16e) e IEEE802.20. Os padrões LTE e WiMAX utilizam como técnica de múltiplo acesso o OFDMA (*orthogonal frequency division multiple access*). Esta é uma técnica de acesso multiusuário construída sobre OFDM, onde a cada usuário é alocado um conjunto de subportadoras ortogonais para a transmissão. A principal vantagem do OFDMA é a flexibilidade e escalabilidade do espectro e a principal desvantagem é que não pode garantir uma transmissão em banda estreita (isto é, apenas em algumas subportadoras) devido à possibilidade de nulos no espectro. Já o IEEE802.20 utiliza, no enlace direto, como técnica de múltiplo acesso o CDMA em multiportadora, que é a combinação de OFDM e DS-CDMA, como será visto nas seguintes seções. A importância do padrão IEEE802.20 está no fato de que é o único padrão para comunicações sem fio em que o grupo de trabalho considera as melhores opções técnicas sem se restringir à compatibilidade de infraestrutura já existente, assim, espera-se que este padrão possa atender requerimentos agressivos sem sub-otimizar o padrão [11].

O uso de múltiplas antenas no transmissor e/ou no receptor faz com que se formem vários canais de transmissão que podem ser explorados para enviar ou receber sinais. O canal assim formado é conhecido como canal MIMO (*multiple input - multiple output*) e seu uso nos padrões 4G é cada vez mais comum, uma vez que oferecem um aumento significativo na taxa de transmissão de dados e na confiabilidade do sistema, sem aumentar a largura de banda ou potência do sinal transmitido. Isto é conseguido devido a uma alta eficiência espectral e robustez ao desvanecimento.

O aumento da capacidade do enlace reverso é atingido por meio do uso de técnicas de múltiplo acesso por divisão espacial (*space division multiple access*, SDMA). Na unidade móvel, a robustez ao desvanecimento é atingida com o uso de técnicas de diversidade, tais como codificação espaço-temporal [9, 12]. Técnicas de *beamforming* em conjunto com as técnicas MIMO são também consideradas para aumentar a taxa de transmissão de dados em regiões de alta

e baixa razão sinal-ruído mais interferência (SINR) [11].

1.2

Transmissão por Blocos e OFDM

Nos sistemas convencionais de transmissão serial, um dos efeitos deletérios do canal é o aparecimento da interferência intersímbolo (ISI). Uma alternativa para lidar com a ISI é a adoção de transmissão por blocos unido à inserção de um intervalo de guarda para evitar a interferência interbloco (IBI). Duas das técnicas mais bem sucedidas para a implementação do intervalo de guarda são: inserção de prefixo cíclico (CP) e preenchimento de zeros (ZP) [5]. Os blocos de símbolos podem ser transmitidos em forma de portadora única ou multiportadora.

Uma possibilidade de transmissão multiportadora é a realização convencional de multiplexação por divisão de frequência, onde cada subportadora é completamente separada no domínio da frequência, porém, devido a limitações na implementação do filtros de *roll-off*, o espaçamento entre subportadoras deve ser maior que a largura de banda de Nyquist para evitar interferência co-canal (ICI). Um outro esquema mais eficiente é fazer com que as subportadoras sejam ortogonais entre si, eliminando a interferência co-canal. Este esquema é conhecido como OFDM e sua implementação pode ser realizada de forma eficiente mediante a transformada rápida de Fourier.

Em [13]- [16], entre outros, são realizados estudos comparativos entre sistemas de usuário único. Nestes trabalhos foi considerada a transmissão com portadora única e preenchimento de zeros (*ZP-only*) e a transmissão multiportadora com prefixo cíclico (OFDM-CP), as conclusões dos autores resumem-se a seguir:

- esquemas de modulação com prefixo cíclico ou com preenchimento de zeros têm a mesma eficiência espectral;
- o uso de preenchimento de zeros como intervalo de guarda garante a recuperação do símbolo;
- a técnica *ZP-only* atinge o máximo ganho de diversidade e codificação;
- quando existe perfeito conhecimento do canal, a transmissão em OFDM-CP tem melhor desempenho em termos de taxa de erro de bit que a transmissão em portadora única sem preenchimento de zeros;
- os receptores *ZP-only* têm, em geral, maior complexidade computacional que os receptores OFDM-CP,

- a técnica *ZP-only* tem menor *peak-to-average power ratio*¹ (PAPR) e a degradação da razão sinal-ruído (SNR) devido a desvio na frequência de subportadora é muito menos severa que no caso OFDM-CP;
- os requerimentos de *power backoff* para evitar os efeitos das não linearidades são maiores nos transmissores com preenchimento de zeros do que nos transmissores com prefixo cíclico;
- com códigos controladores de erro (FEC) em cenários típicos, *ZP-only* é melhor que OFDM-CP quando a taxa de codificação é alta (3/4), mas com maior complexidade computacional. Quando a taxa de codificação é baixa, OFDM-CP é melhor que *ZP-only*;
- os sistemas *ZP-only* sem codificação têm melhor desempenho que os sistemas OFDM-CP em canais aleatórios seletivos em frequência, mas OFDM-CP tem menor custo computacional;
- em aplicações de broadcast OFDM-CP oferece a possibilidade de operar em redes de única frequência com fator de reuso igual a um. A interferência de outras células é tratada como ISI artificial. Porém, se as outras células têm carga completa, o uso do fator de reuso igual a um faz com que o sistema seja suscetível de interferência intercélula [17].

1.3 DS-CDMA e CDMA por Blocos

O DS-CDMA, da forma que é usado hoje nos sistemas 3G (*Wide Band CDMA*, WCDMA), tem dentre outras as seguintes características:

- devido ao grande fator de espalhamento, os sinais são resistentes a interferência intercélula [17], podendo utilizar um fator de reuso igual a um;
- privacidade, alta rejeição à interferência e resistência ao canal multipercurso [5],
- sofre de pouca flexibilidade e escalabilidade do espectro.

De forma a projetar sistemas mais robustos e flexíveis, a combinação de técnicas DS-CDMA com técnicas de modulação multiportadora (OFDM) foi proposta, e diversos esquemas de múltiplo acesso que utilizam transmissão por blocos surgiram. Na literatura basicamente encontramos três técnicas: CDMA multiportadora (MC CDMA) [18], DS CDMA multiportadora (MC DS CDMA) [19] e *Multi Tone* CDMA (MT CDMA) [20]. MC CDMA está baseada

¹O PAPR é uma medida da variação da envoltória do sinal.

na concatenação do espalhamento por seqüência direta (DS) e a técnica OFDM. Os símbolos de cada usuário são espalhados e os chips são transmitidos simultaneamente, cada um dos chips em diferentes subportadoras de banda estreita (espalhamento no domínio da freqüência). A supressão de interferência multipercurso em MC CDMA não depende do ganho de processamento [21].

O esquema de modulação MC DS CDMA, diferentemente do MC CDMA, espalha os símbolos no domínio do tempo, e a seqüência de chips resultante é transmitida em uma subportadora que satisfaz a condição de ortogonalidade entre subportadoras. O MT CDMA é uma variação do MC DS CDMA, onde a condição de ortogonalidade entre subportadoras é satisfeita antes do espalhamento, isto é, depois do espalhamento as portadoras não são ortogonais [22].

MC DS CDMA permite o estabelecimento de um canal quase-síncrono e tem um PAPR menor se comparado com MC CDMA [13], isto faz com que este esquema seja originalmente proposto para o enlace reverso [22]. Já a alta eficiência espectral e baixa complexidade computacional do receptor fazem do MC CDMA um bom candidato para o enlace direto em sistemas celulares [13].

O esquema CDMA por blocos tem sido proposto também em modulação de portadora única ([23], [24]). O sistema CDMA de portadora única (SC CDMA) é o conhecido DS CDMA com intervalos de guarda entre símbolos. Os chips são transmitidos seqüencialmente em toda a largura de banda designada para o usuário. Este esquema não tem os problemas que afetam qualquer sistema multiportadora, tais como alto PAPR e sensibilidade ao ruído de fase e ao desvio da portadora [24].

1.4

Tópicos Desenvolvidos Nesta Tese e Estado da Arte

Na primeira parte deste trabalho é abordada a transmissão CDMA por blocos em canais SISO. Considera-se a transmissão multiportadora e a transmissão em portadora única, utilizando os intervalos de guarda prefixo cíclico e preenchimento de zeros, originando quatro sistemas diferentes:

- CDMA multiportadora com prefixo cíclico. Na literatura técnica este sistema é denominado MC CDMA ou CP CDMA, porém, neste trabalho, para diferenciá-lo dos outros esquemas abordados será referenciado como MC CDMA CP,
- CDMA multiportadora com preenchimento de zeros, MC CDMA ZP,
- CDMA de portadora única com prefixo cíclico, SC CDMA CP,
- CDMA de portadora única com preenchimento de zeros, SC CDMA ZP.

Como mencionado anteriormente, o sistema MC CDMA CP foi proposto há mais de uma década, porém a possível inclusão para o enlace direto nos padrões 4G e especificamente no padrão IEEE802.20, junto com as vantagens que ele oferece têm tornado sua pesquisa cada vez mais atraente. Uma das características principais dos sistemas MC CDMA CP, do ponto de vista computacional, é a facilidade de realizar a equalização no domínio da frequência, onde é preciso apenas um filtro de um coeficiente para cada chip, uma vez que devido à modulação multiportadora e à inserção do prefixo cíclico, cada chip é transmitido através de um canal não seletivo em frequência.

Os outros três sistemas CDMA por blocos abordados neste trabalho, são apresentados na literatura técnica como esquemas alternativos ao MC CDMA CP, de forma a solucionar problemas inerentes à transmissão com prefixo cíclico ou à transmissão multiportadora. No caso dos sistemas com preenchimento de zeros, é comumente utilizado no receptor um método conhecido como *overlap and add* (OLA), que faz com que, à exceção do ruído, o sinal recebido tenha forma similar ao caso de prefixo cíclico, facilitando assim a equalização no domínio da frequência.

Embora sejam sistemas similares, na literatura não foram encontradas comparações entre eles, sob diversas métricas como: taxa de erro de bit, potência de transmissão, razão sinal-ruído mais interferência, ganho de diversidade, etc.

Em relação ao projeto do receptor, várias técnicas de detecção de único usuário (SUD) têm sido exploradas principalmente para o caso MC CDMA CP. Estas técnicas equalizam o sinal no domínio da frequência para depois realizar o desespalhamento. Em [13] são abordadas várias técnicas de equalização, entre elas: *maximal ratio combining* (MRC), *equal gain combining* (EGC), *zero forcing* (ZF) e mínimo erro quadrático médio (MMSE) [25]. Em [26] um detector MMSE com *decision feedback* é proposto para atenuar a ISI residual e os efeitos do ruído correlato.

No caso dos sistemas de transmissão DS-CDMA, os esquemas de detecção multiusuário (MUD) têm ganho uma grande popularidade especialmente nas comunicações pessoais e celulares, já que elas podem aumentar significativamente a capacidade de transmissão. Estas técnicas são frequentemente divididas em dois grupos: detecção assistida e detecção às cegas.

As técnicas de detecção às cegas são especialmente atraentes no enlace direto devido ao fato de que em ambientes dinâmicos é muito difícil para o usuário móvel obter informação precisa a respeito dos outros usuários do canal, e o uso frequente de seqüências de treinamento consome a largura de banda

disponível [27]. Uma das técnicas de detecção assistida mais bem sucedida é o detector de mínimo erro quadrático médio, que é um detector multiusuário linear subótimo que minimiza o efeito total da interferência múltiplo acesso e do ruído de ambiente [27]. Na detecção às cegas, este detector é implementado em técnicas que exploram a estrutura do sinal induzido pelo espalhamento e ancorando o sinal desejado enquanto eliminam a interferência de outros usuários [28].

No caso do CDMA por blocos estas técnicas de detecção multiusuário oferecem as mesmas vantagens que nos sistemas DS-SS. Assim, a extensão de tais técnicas aos sistemas CDMA por blocos é de grande interesse. Em [29] são apresentadas várias técnicas de detecção multiusuário assistida para o caso MC CDMA CP, dentre elas: detector decorrelatado, detector de mínimo erro quadrático médio, detector RAKE decorrelatado. Em [13] também são apresentadas duas técnicas de cancelamento de interferência: estimação de sequência por máxima verossimilhança (MLSE) e estimação símbolo-a-símbolo por máxima verossimilhança (MLSSE).

No caso de detecção às cegas, detectores que utilizam como função custo o erro quadrático médio são propostos em [30], [31], [32] e [33]. Estes detectores utilizam restrições lineares implementando uma estrutura similar ao estimador espectral de Capon [34]. Em [26] é proposto um detector que utiliza a matriz de correlação cruzada entre dois símbolos consecutivos; a função custo a ser minimizada é o erro quadrático médio. Outros

Detectores que minimizam a função custo de módulo constante são propostos em [35] e [36] dentre outros. Da mesma forma, estes detectores utilizam restrições lineares que se assemelham ao estimador espectral de Capon [34].

Neste trabalho são abordados os detectores assistidos e cegos que minimizam o erro quadrático médio. No caso dos detectores cegos, utiliza-se um conjunto de restrições lineares similares às propostas em [37].

Na segunda parte desta tese é abordada a transmissão CDMA por blocos em canais MIMO seletivos em frequência. Da mesma forma que no caso SISO, as modulações em multiportadora e portadora única são consideradas, ambas com intervalo de guarda do tipo prefixo cíclico e do tipo preenchimento de zeros. Como o interesse é no enlace direto, é utilizada como técnica MIMO a codificação espaço-temporal de Alamouti [38]. Duas estruturas de transmissão diferentes são apresentadas.

A primeira estrutura é uma extensão ao caso CDMA por blocos em canais seletivos em frequência, da técnica empregada em [28], que considera os sistemas DS-SS em canais não seletivos em frequência. Receptores

multiusuário às cegas para esta estrutura são propostos em [39], [40], onde a restrição utilizada é similar à proposta em [28] e que fornece uma estrutura de detecção similar ao estimador de Capon.

A segunda estrutura apresentada neste trabalho utiliza a técnica de reversão temporal, aplicada com sucesso em sistemas OFDM [41, 42]. Para o caso de sistemas DS-CDMA esta técnica também é introduzida em [43] e receptores multiusuário do tipo MMSE são propostos no mesmo trabalho.

1.5

Organização da Tese

No Capítulo 2 é apresentado o modelo do sinal para os quatro esquemas de modulação CDMA por blocos considerados neste trabalho: multiportadora com prefixo cíclico (MC CDMA CP), multiportadora com preenchimento de zeros (MC CDMA ZP), portadora única com prefixo cíclico (SC CDMA CP) e finalmente portadora única com preenchimento de zeros (SC CDMA ZP). Em todos os casos é considerada a transmissão em um canal SISO seletivo em frequência. É também derivado um modelo generalizado para estes sistemas, o que permitirá realizar comparações entre eles utilizando o mesmo critério de desempenho, o mesmo cenário de simulação e o mesmo tipo de receptor.

Já no Capítulo 3 é apresentado, para os sistemas mencionados acima, um projeto de receptor às cegas que minimiza a variância da saída do filtro receptor. Resultados analíticos do erro na recepção são derivados e a comparação com o filtro receptor ótimo é apresentada. A implementação de estruturas adaptativas para este tipo de receptores multiusuário às cegas é também abordada. São implementados algoritmos do tipo gradiente estocástico (SG) e do tipo mínimos quadrados (RLS). Em cada caso, novos algoritmos para a estimação do canal são propostos. Parte deste trabalho foi publicado em [44], [45] e [46].

No Capítulo 4 uma pequena introdução aos sistemas MIMO em canais não seletivos em frequência é realizada e no Capítulo 5 será abordado um primeiro modelo de transmissão CDMA por blocos para canais MIMO seletivos em frequência, nas mesmas modulações apresentadas para o caso de canais SISO. Um receptor de mínimo erro quadrático médio (MMSE) é implementado e simulações comparando os sistemas mencionados são apresentadas. Na parte final desse capítulo é implementado um receptor de mínima variância com restrições lineares e é demonstrado que este receptor consegue eliminar a auto-interferência. Uma implementação do tipo RLS é abordada e uma nova estimativa de canal é proposta para este receptor. Parte deste capítulo foi publicada em [47] e [48].

Um segundo modelo de transmissão MIMO nas modulações MC, SC CDMA com CP e ZP é proposto no Capítulo 6 e uma análise do ganho de diversidade em canais multipercurso é conduzida, as condições para atingir tal ganho são também especificadas. Um receptor MMSE é implementado na parte final desse capítulo. Alguns dos resultados da pesquisa conduzida neste tema foram publicados em [49] e serão complementados em um artigo submetido em [50].

Finalmente, o Capítulo 7 resume os principais resultados alcançados neste trabalho, assim como as conclusões e sugestões para a continuidade do mesmo.