

# 1

## Introdução

CDMA (*Code Division Multiple Access*) é um dos métodos mais eficientes para multiplexar usuários em sistemas de comunicações, onde estes são separados por códigos distintos ao invés de bandas de frequências ortogonais, como em FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), ou por *slots* ortogonais, como em TDMA (*Time Division Multiple Access*) [1, 2, 3, 4]. Desta forma, todos os usuários podem transmitir ao mesmo tempo e cada usuário utiliza todo o espectro de frequência disponível para transmissão. Nestes sistemas, uma seqüência ou forma de onda de assinatura distinta é designada para cada usuário e é empregada a fim de modular e espalhar o sinal contendo a informação. A modulação usada nesta tecnologia de acesso é do tipo espalhamento espectral. O uso da seqüência de assinatura é que permite ao receptor a demodulação da mensagem transmitida por múltiplos usuários do canal, que transmitem simultaneamente e, em geral, de forma assíncrona.

Os sistemas CDMA implementados com espalhamento por seqüência direta (DS-CDMA - *Direct-sequence CDMA*) estão entre as tecnologias de multiplexação mais promissoras para sistemas de comunicações sem fio atuais e futuros. Dentre as variações de CDMA encontradas na literatura, destacam-se os sistemas CDMA que empregam saltos em frequência (FH-CDMA - *Frequency-Hopping CDMA*) [1, 2], que são muito usados em aplicações militares, e os sistemas CDMA com múltiplas portadoras (MC-CDMA - *Multicarrier CDMA*) [5]. Recentemente, com o aumento da largura de banda utilizada por estes sistemas, o termo *Wideband CDMA* tornou-se mais comum [6]. As vantagens destas técnicas incluem bom desempenho em canais com múltiplos percursos, flexibilidade na alocação de canais, boa capacidade em ambientes com rajadas ou surtos de erros e desvanecimento e a possibilidade de compartilhar faixas de frequências com sistemas de comunicações de banda estreita sem deterioração do desempenho dos sistemas em operação [1, 2, 3].

A demodulação de um usuário desejado em uma rede CDMA requer

o processamento do sinal recebido de modo a combater diferentes tipos de interferência: interferência de banda estreita (IBE), interferência de múltiplo acesso (IMA), interferência entre símbolos (IES) e o ruído no receptor. A maior fonte de interferência na maioria dos sistemas CDMA é a IMA, que é resultado da impossibilidade de se manter a ortogonalidade entre os sinais dos usuários na recepção [1]-[4]. Em particular, os efeitos do canal de transmissão e os desajustes no tempo entre os sinais podem também contribuir para aumentar os efeitos da IMA [1]-[4]. O detector convencional que emprega um filtro casado à seqüência de assinatura não combate a IMA e é muito sensível às diferenças de potência entre os sinais recebidos [1]-[4, 9]. Este problema é denominado efeito *near-far* e ocorre quando os transmissores possuem localizações diferentes em relação ao receptor, já que os sinais dos mais próximos sofrem menos atenuação daqueles dos usuários mais distantes.

A detecção multiusuário (MUD) é a estratégia desenvolvida para suprimir a IMA, aumentando a capacidade e o desempenho de sistemas CDMA [1, 2]. Na MUD a informação dos vários usuários é usada de forma conjunta a fim de melhorar o processamento de cada usuário, desde que os códigos dos usuários sejam conhecidos pelo receptor. O trabalho de Sérgio Verdú [10], publicado em 1986, propôs e analisou o detector multiusuário ótimo. Contudo, a solução ótima de Verdú requer uma complexidade exponencial, sincronização e o conhecimento das amplitudes e das seqüências de código dos usuários, sendo demasiadamente complexa para implementações práticas. Este fato motivou o desenvolvimento de várias estratégias sub-ótimas: o detector linear de Lupas e Verdú [11], o receptor com decisão realimentada [12], o cancelador de interferência sucessivo (SIC) [13], o detector multi-estágios ou cancelador de interferência paralelo (PIC) [14] e uma abordagem recente que utiliza detecção ótima por grupos [15, 16]. Em particular, os detectores multiusuário podem ser classificados em duas categorias: detectores lineares, e canceladores de interferência. Na detecção multiusuário linear [2, 4, 9, 11], uma transformação linear é aplicada à saída do detector convencional a fim de se obter um conjunto de sinais com IMA reduzida, melhorando o desempenho do receptor. No cancelamento de interferência [12, 13, 14], o receptor procura obter estimativas da interferência e, em seguida, subtraí-las do sinal recebido. O princípio básico da detecção por cancelamento de interferência é a criação no receptor de estimativas separadas da IMA para subtrair toda ou grande parte da IMA em cada usuário. Outros tipos de receptores multiusuário empregam transformações não lineares através da utilização de redes neurais [17]-[19].

Dentre as vantagens das técnicas de supressão de interferência destacam-se o aumento significativo de capacidade, maior eficiência na utilização do espectro alocado, redução nas exigências de controle de potência e mais eficiência na utilização da potência disponível [5]. Como os sistemas DS-CDMA são considerados limitados no canal reverso, o emprego de detectores multiusuário nas estações rádio-base é fundamental no aumento de capacidade do sistema. A melhoria no canal reverso devido à redução da interferência, permite a operação com um ganho de processamento menor e conseqüentemente permite maiores taxas de transmissão. Com o emprego da MUD, o impacto da IMA e do efeito *near-far* são reduzidos, da mesma forma que a necessidade dos sinais dos usuários chegarem ao receptor com a mesma potência, ou seja, as exigências com relação ao controle de potência são menores. Dentre as desvantagens e limitações da detecção multiusuário destacam-se a dificuldade de implementação no canal direto e a existência de IMA em células adjacentes em sistemas de comunicações celulares. Devido às questões de peso, custo e tamanho de terminais móveis, a implementação de detectores multiusuário no canal direto é um tópico de grande interesse, uma vez que nas redes de comunicações futuras espera-se que o tráfego na direção dos usuários aumente consideravelmente. Por este motivo, há um grande esforço de pesquisa no sentido de desenvolver receptores que realizam supressão de interferência com baixos requisitos de complexidade.

Nos últimos anos a maior parte do esforço de pesquisa na área tem se concentrado no desenvolvimento de soluções sub-ótimas, que são viáveis para implementação, têm baixa complexidade computacional e que buscam desempenhos próximos ao detector ótimo [10]. Neste contexto, técnicas de processamento de sinais no receptor são fundamentais na supressão e cancelamento da IMA e da IES nos sistemas de comunicações modernos. Em particular, métodos eficientes de processamento de sinais podem fazer uma diferença significativa no desempenho destes sistemas. Como os sistemas móveis operam em situações altamente dinâmicas devido à mobilidade e natureza aleatória do canal de acesso, técnicas adaptativas são de especial interesse para estas aplicações. O estudo de técnicas de processamento adaptativo para supressão de interferência tem sido uma área bastante ativa nos últimos anos. Dentre as questões importantes de pesquisa destacam-se o desenvolvimento de técnicas supervisionadas e às cegas com convergência rápida e boa capacidade de rastreamento de canais sujeitos a desvanecimento e propagação com múltiplos percursos.

É importante ressaltar que recentemente, um grande número de trabalhos tem se concentrado no uso de sistemas com múltiplas antenas ou

arranjo de antenas, resultando na exploração espacial e temporal do sinal, e que é capaz de aumentar significativamente a capacidade de transmissão e auxiliar na supressão de interferência [20, 21, 22, 23, 24, 26]. No que se refere ao emprego de antenas, os sistemas que utilizam múltiplas antenas na transmissão e na recepção são denominados MIMO (*Multi-Input Multiple-Output*) e aqueles que usam apenas uma antena na transmissão e na recepção são chamados SISO (*Single-Input Single-Output*). Apesar deste trabalho ter enfoque em sistemas multiusuário do tipo SISO, as técnicas desenvolvidas são também adequadas e promissoras para sistemas MIMO.

Uma outra questão que merece ser considerada é o tipo de códigos, quanto ao período, adotado nesta tese. Ao invés de códigos longos, que são adotados nos padrões de terceira geração de telefonia celular [25, 7, 8] e em recentes técnicas de detecção multiusuário [27, 28, 29, 30, 31], optou-se pelo uso de códigos curtos pela sua maior simplicidade. Além disso, com alguns novos avanços na área, como por exemplo métodos de matrizes aleatórias [32], é possível usar técnicas desenvolvidas originariamente para sistemas DS-CDMA com códigos curtos em implementações com códigos longos.

Ao longo da pesquisa que resultou neste trabalho foram desenvolvidos algoritmos e estruturas para detecção multiusuário e supressão de interferência em sistemas DS-CDMA do tipo SISO e com códigos curtos, que são apresentados nesta tese. O objetivo das estruturas desenvolvidas é a supressão de modo eficiente da IMA e da IES, presentes nos sistemas estudados. Especificamente, os sistemas DS-CDMA apresentam características distintas para o enlace reverso ou *uplink*, onde o receptor na estação rádio-base processa os sinais de todos os usuários ativos no sistema, e o enlace direto ou *downlink*, onde o receptor móvel requer baixa complexidade computacional e se dedica somente à detecção de um único usuário. No Capítulo 2 são descritos os modelos de sinais dos sistemas DS-CDMA para o enlace direto e reverso, onde os sinais de interesse são supostos perfeitamente sincronizados no receptor e o canal é síncrono no nível do símbolo. Levando-se em consideração os aspectos particulares encontrados no *uplink* e no *downlink* destes sistemas, são investigados nos capítulos seguintes esquemas de recepção adequados para um conjunto de situações práticas. Além disso, são também desenvolvidos algoritmos adaptativos para estimação dos parâmetros dos receptores nos modos supervisionado (com o auxílio de uma seqüência de treinamento conhecida pelo receptor) e autodidata (com base em algumas informações do sinal).

Em particular, o enlace reverso é adequado para o emprego de estruturas com cancelamento de interferência, que usam alguma informação dos

usuários ativos no sistema (assinatura, fase da portadora, etc) e processam conjuntamente estes sinais com o objetivo de reduzir de forma significativa a interferência presente no sistema. Com este enfoque, o Capítulo 3 propõe estruturas e algoritmos utilizando redes neurais recorrentes para detecção multiusuário, onde são investigados cenários típicos de comunicações móveis e mostradas comparações dos detectores propostos com estruturas de recepção conhecidas na literatura. Estes esquemas de recepção são promissores para usuários com altas taxas de transmissão, que empregam ganhos de processamento menores e requerem um detector com alto desempenho para supressão da IMA e da IES.

Um outro aspecto examinado ao longo da pesquisa foi o projeto de receptores e o desenvolvimento de algoritmos adaptativos baseados no critério de desempenho mais adequado para sistemas de comunicações, que é a minimização da taxa de erro de símbolos. Neste contexto, o Capítulo 4 investiga receptores que utilizam o critério de mínima taxa de erro de bits. Os algoritmos de mínima taxa de erro de bits existentes na literatura são estendidos para estruturas com decisão realimentada, para o caso do enlace reverso, e são propostas novas técnicas adaptativas com convergência mais rápida para esquemas de recepção linear e com decisão realimentada para o *downlink* e o *uplink*, respectivamente.

Uma característica interessante dos receptores multiusuário adaptativos para sistemas DS-CDMA é que estes podem ser projetados de modo não supervisionado. Este fato é de grande importância no sentido de aumentar a eficiência na transmissão dos dados e permite a estimação dos parâmetros do receptor quando uma seqüência de treinamento não está disponível. O Capítulo 5 é dedicado às técnicas de recepção linear às cegas para o enlace direto ou *downlink*. São consideradas duas alternativas de projeto: minimização das funções custo mínima variância e módulo constante. Com base no critério de mínima variância com restrições são apresentados algoritmos adaptativos do tipo gradiente estocástico às cegas com mecanismos de ajuste automático do passo. Uma análise de convergência destes algoritmos e mecanismos às cegas é realizada. Além disso, é examinado um novo critério de projeto de receptores às cegas com base na função custo módulo constante com restrições lineares, que estima conjuntamente os parâmetros do canal. As propriedades de convergência do novo método são investigadas e algoritmos adaptativos computacionalmente eficientes são desenvolvidos para supressão da IMA, da IES e estimação conjunta dos parâmetros do canal de comunicações.

Em seguida, o uso de técnicas de estimação autodidatas combinado

com estruturas que empreendem cancelamento de interferência foi examinado para o enlace reverso dos sistemas DS-CDMA. De fato, o emprego de estruturas com cancelamento de interferência no *uplink* é capaz de oferecer ganhos significativos sobre esquemas de recepção linear, uma vez que estes esquemas não lineares processam conjuntamente os sinais de todos os usuários ativos no sistema e podem eliminar parte da interferência dos sinais associados. No Capítulo 6 são descritas técnicas às cegas para estruturas com decisão realimentada, que realizam cancelamento de interferência do tipo sucessivo e paralelo. Os critérios de projeto às cegas, considerados no Capítulo 5 para receptores lineares, são estendidos para esquemas com decisão realimentada. Desta maneira, são desenvolvidos algoritmos adaptativos autodidatas para estimar os parâmetros do receptor com decisão realimentada. Além disso, um novo esquema de cancelamento sucessivo de interferência baseado no conceito de arbitragem é proposto e incorporado a uma estrutura de recepção com decisão realimentada para o enlace reverso. O novo esquema de cancelamento de interferência é então combinado com uma estrutura iterativa que emprega múltiplos estágios, resultando em melhores estimativas do receptor e um desempenho uniforme para os usuários.

Um problema observado nos receptores adaptativos para sistemas DS-CDMA é que quando o ganho de processamento usado no sistema é grande o receptor tem que lidar com dificuldades, como uma significativa complexidade computacional e baixo desempenho em termos de convergência. Para combater estes efeitos é desejável o desenvolvimento de técnicas de baixa complexidade que reduzam o número de elementos para estimação e que apresentem convergência rápida. Neste contexto, o Capítulo 7 propõe receptores adaptativos com um número reduzido de elementos usando filtros FIR interpolados e onde os interpoladores também são filtros adaptativos. Em particular, são projetados receptores lineares utilizando a estrutura de filtros FIR interpolados e considerados critérios de projeto supervisionado e autodidata. Em seguida, são desenvolvidos algoritmos adaptativos supervisionados e às cegas para as novas estruturas, que mostram convergência rápida, bom desempenho e baixa complexidade computacional em cenários no enlace direto. Um estudo sobre as propriedades de convergência do método e uma análise de convergência dos algoritmos são também apresentados.

Uma discussão sobre os resultados da tese, a aplicabilidade das técnicas e estruturas propostas, sugestões de tópicos para trabalhos futuros e conclusões são apresentadas no Capítulo 8.