

1

Introdução

Nos últimos anos o crescimento dos sistemas de comunicações sem fio e a favorável demanda por transmissões de dados em altas taxas vêm incentivando novas pesquisas na busca de sistemas robustos em conjunto com alta eficiência espectral. A técnica DS CDMA (*Direct Sequence Code Division Multiple Access*) [89] vem recebendo grande atenção devido ao seu bom desempenho em canais seletivos em frequência, e a possibilidade de compartilhamento da banda por todos os usuários do sistema sem deterioração pronunciada do desempenho [43]. Nessa técnica os usuários são separados pela designação de códigos (assinaturas) de espalhamento, o que permite transmissões simultâneas e em toda a banda disponível. Entretanto, quando as taxas de transmissão aumentam, os efeitos adversos do multipercurso do canal tornam-se mais hostis, provocando a destruição da ortogonalidade dos códigos e a Interferência de Múltiplo Acesso (IMA) aparece como o principal limitador da capacidade dos sistemas CDMA.

A modulação em múltiplas portadoras ortogonais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [68, 80, 83] é uma técnica engenhosa capaz de mitigar a Interferência Entre Blocos (IEB) [59] através da inserção de um período de guarda e por permitir a conversão do canal seletivo em frequência em um conjunto de subcanais planos e paralelos, cada subcanal correspondendo a uma suportadora distinta o que facilita a etapa de equalização do sinal no receptor.

Recentemente, transmissões em blocos em única portadora e sinalização OFDM têm sido amplamente investigados no contexto de esquemas com múltiplos usuários [34, 40, 44, 81]. A combinação da técnica DS CDMA e modulação em múltiplas portadoras foi proposta em 1993 [27, 35, 48, 87]. Uma dessas combinações resultou no sistema MC CDMA, no qual os símbolos de dados de cada usuário são espalhados na frequência e os *chips* da assinatura são, simultaneamente, transmitidos cada um sobre um subcanal em banda básica, através de modulação em múltiplas portadoras. Outra possibilidade, é o sistema MC DS CDMA no qual os símbolos são convertidos de serial para paralelo e, a seguir, são multiplicados pela mesma sequência de assinatura e enviados por sinalização em múltiplas portadoras. Esses sistemas são foco deste estudo, ambos incorporando intervalo de guarda do tipo prefixo cíclico (CP) *Cyclical Prefix* e sufixo de zeros (ZP) *Zero-Padding* [59]; e

foram escolhidos por serem considerados, na literatura, propostas promissoras para integrar as futuras gerações das comunicações móveis [45].

1.1

Trabalhos Relacionados

Nos sistemas de transmissão digital dois tipos de enlaces são possíveis, o enlace direto (*downlink*) e o enlace reverso (*uplink*). No enlace direto as transmissões ocorrem da Estação Rádio Base (ERB) em direção as diversas estações móveis ativas no sistema e vice-versa para as transmissões no enlace reverso. No caso de detecção coerente dos dados transmitidos faz-se necessário estimar, na estação receptora, a informação do estado do canal de comunicações CSI *Channel State Information* (usualmente, sua resposta ao impulso) [53, 55, 73, 77]. Um dos modos de realizar a estimação do canal é por meio do envio de símbolos piloto [34, 72], dita estimação assistida; outro modo é a estimação cega na qual é necessário um conhecimento mínimo acerca, por exemplo, das estatísticas do sinal transmitido [1, 29, 30, 31, 33, 75, 85].

Um ponto importante é que a tarefa da estimação de canal no enlace reverso (onde múltiplos usuários estão associados a diferentes canais) é mais complexa do que a estimação do único canal existente no enlace direto. Além disso, em canais seletivos em frequência o desempenho do sistema com detecção de dados baseada em métodos de usuário único [86] degrada fortemente devido a perda da ortogonalidade dos códigos associados aos diversos usuários e, assim, detectores de múltiplos usuários com apurada estimação de canal são necessários para garantir o desempenho satisfatório das comunicações no enlace reverso.

Com respeito a estimação de canal assistida por símbolos piloto para o enlace reverso do sistema MC CDMA CP em [55] é apresentado um algoritmo de estimação de canal de duas iterações. A idéia principal é, recursivamente, explorar a informação detectada afim de refinar a qualidade da primeira estimativa de canal obtida com símbolos piloto e baseada no critério LS (*least square*). Entretanto, é necessária uma etapa de cancelamento da IMA antes da detecção dos dados e, assim, é aplicado um cancelador de interferência paralelo PIC (*Parallel Interference Canceller*) que acarreta o aumento da complexidade do algoritmo. Outro ponto observado é que para satisfazer ao teorema da amostragem e obter estimativas aceitáveis o número máximo de usuários ativos no sistemas é limitado.

Em [73] o desempenho de um detector de múltiplos usuários baseado no critério de Mínimo Erro Médio Quadrático MMSE (*Minimum Mean Square Errors*) é avaliado usando três diferentes técnicas de estimação de canal assistida: a MMSE; a Máxima Verossimilhança MLE (*Maximum Likelihood Estimator*) e a Transformada Inversa de Fourier IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*). O algoritmo

inicia com a alocação de um grupo de diferentes subportadoras para cada usuário transmitir os seus símbolos piloto. Nas subportadoras fora do grupo o sinal é nulo. Usando o critério LS são obtidas as primeiras estimativas nas subportadoras piloto e através de interpolação na frequência são obtidas as estimativas nas subportadoras restantes. A cada usuário é disponibilizado um determinado número de símbolos piloto e, assim, o comprimento do canal não pode exceder esse número de pilotos. Um problema observado no algoritmo é que o critério LS é muito sensível ao ruído gaussiano e a interferência entre as subportadoras. Outra desvantagem é devida a resposta ao impulso do canal ser obtida por interpolação e, por isso, o desempenho do estimador é fortemente dependente da qualidade da estimativa obtida nas subportadoras piloto. Para superar os problemas os autores avaliam a técnica de estimação de canal IDFT cuja a principal desvantagem é que para manter a qualidade das estimativas o número de subportadoras deve ser um múltiplo inteiro do número de pilotos. Condição essa difícil de satisfazer devido ao limitado número de símbolos piloto que são disponibilizados para cada usuário estimar o respectivo canal associado. Com a técnica de estimação MLE as principais vantagens são: não existir a necessidade de informações *a priori* a cerca das estatísticas do canal e a possibilidade dos canais associados a diferentes usuários poderem ter diferentes comprimentos. Entretanto, para garantir a inversão de matrizes presentes no algoritmo existe a necessidade do número de símbolos piloto ser maior ou igual ao comprimento do canal, caso contrário o estimador MLE não pode ser aplicado. O estimador MMSE supera esse problema e na avaliação das três técnicas os autores relatam que o desempenho do estimador MMSE é superior ao dos estimadores IDFT e MLE.

Em [82] é proposto um algoritmo recursivo no qual uma estimativa de canal é obtida enviando-se somente um símbolo piloto no início de cada bloco transmitido pelo usuário. O símbolo de dados é detectado usando essa estimativa inicial e a parcela da IMA é reconstituída e minimizada através de um cancelador PIC e uma nova estimativa de canal refinada pode ser recursivamente obtida. O maior problema do algoritmo é a possível propagação de erros devido a estimação inicial inexata e, assim, a severa perda de desempenho do sistema. Para prevenir o problema é necessário incorporar no algoritmo uma etapa para inibir a propagação de erros o que aumenta ainda mais a complexidade do algoritmo.

Para o enlace direto do sistema MC CDMA CP é apresentado em [54] um algoritmo baseado no critério MMSE, no qual é necessário usar a matriz de autocorrelação que, usualmente, é desconhecida *a priori*. Inicialmente, símbolos pilotos são enviados em algumas subportadoras e através do critério LS é obtida uma estimativa de canal inicial e nas outras subportadoras usa-se interpolação. A estimativa inicial permite obter a matriz de autocorrelação que será usada no critério MMSE, afim de obter uma estimativa de canal melhorada. Considerando que o

algoritmo é para o enlace direto onde existe, somente, um único canal observa-se que a principal desvantagem é a sua complexidade.

Estimadores cegos de canal para sistemas CDMA foram considerados em [62, 79]. Ambos os algoritmos propõem recuperar a resposta ao impulso do canal em um procedimento de dois passos. O primeiro passo consiste em aplicar uma decomposição em valor singular com o objetivo de obter a base do subespaço do ruído do sinal recebido. No segundo passo aplica-se uma nova operação de decomposição em valor singular [79] em uma matriz com dimensões da ordem do canal para obter a resposta ao impulso do canal desejada. O principal problema do algoritmo é a elevada complexidade computacional presente no primeiro passo devido as dimensões da matriz autocorrelação do sinal recebido. Outra dificuldade é a alta sensibilidade do algoritmo em determinar o valor correto do posto do subespaço do ruído, uma vez que esse parâmetro altera de acordo com o número de usuários ativos acendendo o canal CDMA. Em [29] foi descrito um algoritmo capaz de superar esses problemas. A idéia é ao invés de estimar a base do subespaço do ruído usar a inversa da matriz de autocorrelação do sinal recebido elevada a uma potência finita para obter uma aproximação eficaz dessa base. Tal procedimento apresentou resultados bastantes satisfatórios inclusive esclarecendo aspectos matemáticos dos métodos baseados em subespaço. Recentemente, em [1] o procedimento foi aplicado em modulações OFDM mostrando que o procedimento de aproximação em potência é uma poderosa ferramenta para amenizar a complexidade dos estimadores cegos mesmo quando o posto do subespaço do ruído é constante e conhecido *a priori*.

Os trabalho de Xu [91, 92] abordam a estimação cega de canal baseada em casamento de correlação de dados para sistemas CDMA. No algoritmo a matriz de autocorrelação do sinal recebido (parametrizada pelas variáveis desconhecidas dos canais multipercurso dos usuários) é comparada com a sua estimativa baseada nas observações recebidas. A estimativa do canal, contendo uma ambiguidade escalar complexa, pode ser obtida como a solução de um problema de minimização. Para sistemas OFDM o trabalho de Backx [2] apresentou um algoritmo de estimação cega por correlação de dados comparando-o com um método tradicional de estimação cega baseado em decomposição por valor singular [59] incluindo análises da consistência do estimador.

1.2

Objetivo

O objetivo desta Tese é propôr e investigar distintas técnicas para melhorar a estimação de canal, assistida e cega para os sistemas CDMA com múltiplas portadoras. Inicialmente, é investigada a estimação de canal assistida, por símbolos piloto, no enlace direto (transmissão da Estação Rádio Base para as Estações Móveis) e no

enlace reverso (transmissão da Estação Móvel para a Estação Rádio Base) dos sistemas. A modelagem matemática é baseada na função custo de mínimo erro médio quadrático MMSE [70] e são obtidas três estimativas de canal assistidas: uma estimativa convencional MMSE (estimativa padrão) e duas estimativas melhoradas. As melhorias na estimação de canal consistem em tentar reduzir o ruído da estimativa convencional. A idéia da redução de ruído na estimativa de resposta em frequência do canal foi, inicialmente, abordada na literatura para OFDM [3]. Ainda para a modulação OFDM, em [28] o autor reformulou o método sob o ponto de vista de projeção em subespaço e acrescentou a possibilidade de aplicar uma restrição inicial na minimização da função custo. Nesta tese, os trabalhos são estendidos para os sistemas MC CDMA e MC DS CDMA, incorporando os dois tipos de intervalo de guarda mencionados. A principal vantagem do emprego do intervalo de guarda ZP, em comparação ao CP, é a possibilidade de total detectabilidade dos símbolos transmitidos independente da existência de nulos na resposta de frequência do canal.

A primeira técnica de melhoria da estimativa convencional MMSE consiste em derivar um procedimento no qual utiliza-se uma matriz de projeção com o objetivo de eliminar componentes ruidosas presentes na estimativa convencional. Essas componentes, denominadas não-significativas, são aquelas excedentes ao intervalo de guarda inserido e para eliminá-las aplica-se a matriz de projeção com o objetivo de projetar a estimativa convencional no subespaço \mathbb{S} onde a verdadeira resposta em frequência do equivalente discreto do canal tem que estar contida. Na segunda técnica é feita uma restrição no problema de minimização da função custo MMSE de forma a restringir o espaço total de busca ao subespaço \mathbb{S} . É importante ressaltar que em ambos os sistemas estudados, incorporando intervalo de guarda CP, as duas estimativas melhoradas obtidas são idênticas. No caso de adição de intervalo de guarda ZP foi possível obter duas estimativas melhoradas distintas.

Na segunda parte deste estudo, são investigadas duas técnicas de estimação cega de canal e desenvolvidos métodos alternativos para o enlace reverso do sistema MC DS CDMA ZP. A primeira técnica, explora a ortogonalidade dos subespaços do sinal e do ruído e expressa o problema da estimação cega numa decomposição em autovalores e autovetores, adotando simplificações que permitem obter o principal autovetor com custo computacional inferior ao dos tradicionais métodos de subespaço propostos na literatura. Assim, em um primeiro momento, uma estimativa da resposta ao impulso do canal é obtida através de uma operação de decomposição por valor singular (SVD padrão). Essa estimativa é comparada com outras estimativas obtidas pelo método proposto (SVD alternativo) baseado em 3 passos no qual utilizou-se uma operação de produto ponto-a-ponto; uma matriz de potência para aproximar um produto de matrizes contendo unicamente vetores

que formam uma base do subespaço do ruído; e uma suposição conservadora de que o intervalo de guarda inserido é no mínimo igual ao comprimento do canal. Finalmente, um estimador da resposta ao impulso do canal é obtido, pelo método alternativo proposto, com complexidade computacional mais amena que a dos tradicionais métodos de estimação cega por identificação de subespaço.

Na segunda técnica, as estimativas do canal são baseadas na técnica de casamento de correlação dos dados recebidos e são obtidas por minimização de uma função custo. Essa função é definida como o quadrado da norma de Frobenius da matriz de erro resultante da comparação entre a matriz autocorrelação com a sua estimativa obtida por amostragem média. Os resultados numéricos obtidos demonstraram que os métodos de estimação assistida e cega propostos permitem obter ganho no desempenho dos sistemas investigados.

A figura 1.1 ilustra o diagrama em árvore dos estimadores de canal assistidos e cegos para os sistemas MC CDMA e MC DS CDMA. Os estimadores assistidos são investigados em ambos os enlaces, direto e reverso e incorporando intervalo de guarda CP e ZP. Nas análises observou-se que a estimação assistida proposta tem um grande impacto no desempenho do sistema MC CDMA e, assim, foi dada maior ênfase a este sistema. As análises para o sistema MC DS CDMA, também, são apresentadas porém maior destaque lhe será dado nas análises da estimação cega.

Com respeito aos estimadores cegos estes são baseados no método de casamento de correlação de dados e no método de identificação de subespaço (SVD) em conjunto com a técnica de potência. Devido a maior complexidade dos algoritmos cegos estes são propostos para o enlace reverso e incorporando o intervalo de guarda ZP, por este tipo de intervalo apresentar vantagens sobre o tipo CP. A abordagem cega é dedicada, apenas, ao sistema MC DS CDMA e optou-se por não apresentá-la para o sistema MC CDMA para evitar a repetitividade dos métodos deixando-a, assim, para algum trabalho futuro.

1.3

Contribuições da Pesquisa

A principal contribuição desta tese é propôr eficientes algoritmos de estimação de canal, assistida e cega, para integrar os promissores sistemas da nova geração das comunicações móveis. Especificamente, para os sistemas baseados em acesso ao meio por designação de códigos e com múltiplas portadoras ortogonais: MC CDMA e MC DS CDMA. A tarefa de estimação de canal, em ambientes com seletividade em frequência é de suma importância para garantir o desempenho dos sistemas, a segurança e a autenticidade das informações transmitidas. Nesse contexto, os algoritmos de estimação foram propostos através de uma metodologia focada na melhoria da sua qualidade. Alguns dos resultados obtidos nesta pesquisa

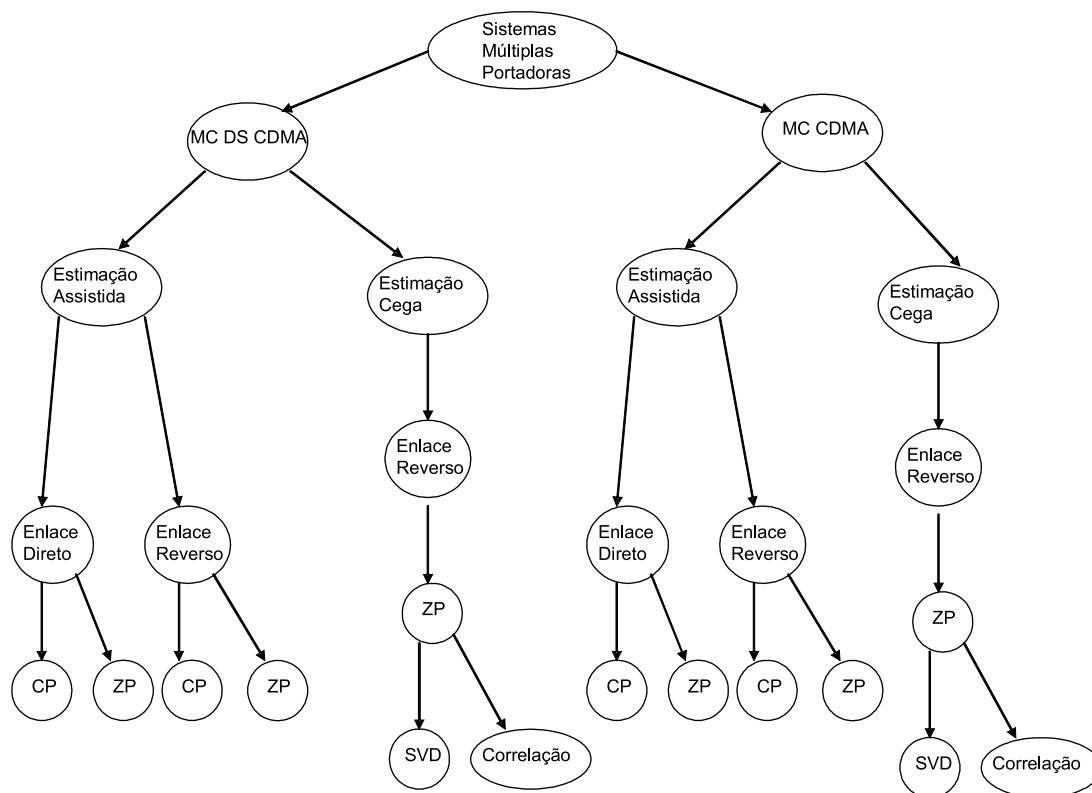


Figura 1.1: Diagrama em Árvore dos Estimadores de Canal Assistidos e Cegos

originaram os artigos descritos no final desta tese, destacando-se os abaixo listados:

1. Alternative Subspace Method for Improved Blind Channel Estimation in Uplink Zero Padded MC-DS/CDMA Systems [14].
2. On Correlation Matching Approaches to Multipath Parameter Estimation in MC DS CDMA ZP Systems [20].
3. Performance of Multicarrier CDMA Systems with Improved Pilot-Aided Channel Estimation [21]
4. Improved Pilot-Aided Channel Estimation in Zero Padded MC-CDMA Systems [22]

1.4

Organização do Texto

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

1. No Capítulo 2 são descritos os modelos matemáticos dos sistemas de transmissão com múltiplas portadoras e do canal de propagação considerados.
2. O capítulo 3 apresenta para ambos os enlaces do sistema MC CDMA CP as análises matemáticas dos estimadores assistidos com símbolos piloto, os equalizadores utilizados e os resultados de simulação obtidos.

3. No Capítulos 4 estão descritas para o sistema MC CDMA ZP a estimação de canal assistida por símbolos piloto, os equalizadores e os resultados de simulação. Da mesma forma que o capítulo anterior, ambos os enlaces direto e reverso são considerados nas análises.
4. O Capítulo 5 é dedicado a apresentar as análises de estimação assistida por símbolos piloto para ambos os enlaces do sistema MC DS CDMA, incorporando os intervalos de guarda CP e ZP. Os equalizadores e os resultados de desempenho, obtidos por simulação, também, são apresentados.
5. No capítulo 6 estão descritas as análises de estimação cega de canal para o enlace reverso do sistema MC DS CDMA ZP. As técnicas são baseadas no método de identificação de subespaço e na técnica de potência. No final do capítulo são apresentados os equalizadores e os resultados de simulação do desempenho.
6. O capítulo 7 descreve outra técnica de estimação cega de canal baseada em casamento de correlação de dados para o enlace reverso do sistema MC DS CDMA ZP; descreve os equalizadores utilizados; e apresenta os resultados obtidos por simulação.
7. No capítulo 8 são descritas as conclusões e os trabalhos futuros propostos.

1.5

Notação Adotada

Caracteres minúsculos em negrito denotam vetores: \mathbf{h} , \mathbf{c}_k . Caracteres maiúsculos em negrito denotam matrizes: \mathbf{H} , \mathbf{V} ; Os operadores $(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$, $(\cdot)^*$ e $(\cdot)^{-1}$ indicam transposto de um vetor, hermitiano de um vetor, conjugado de um escalar complexo e pseudo inversa de uma matriz. No caso de matrizes quadradas $(\cdot)^{-1} = (\cdot)^+$. A matriz $\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{q})$ representa uma matriz diagonal, com os componentes do vetor \mathbf{q} na diagonal principal, \odot representa o produto de Hadamard, \otimes representa o produto de Kronecker. O operador $\text{vec}(\mathbf{A})$ representa um vetor longo obtido pelo empilhamento de todas as colunas da matriz \mathbf{A} ; e $\|\mathbf{A}\|_F$ representa a norma de Frobenius, que também pode ser escrita como $[\text{vec}^H(\mathbf{A})\text{vec}(\mathbf{A})]^{1/2}$. O valor médio ou esperança é representado por $\mathbf{E}[\cdot]$ e \mathbf{I}_P denota uma matriz identidade de dimensões $P \times P$.

1.6**Lista de Abreviações**

1. **OFDM** - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
2. **DS CDMA** - *Direct Sequence Code Division Multiple Access*
3. **MC CDMA** - *Multi Carrier Code Division Multiple Access*
4. **MC DS CDMA** - *Multi Carrier Direct Sequence Code Division Multiple Access*
5. **IES** - *Interferência entre Símbolos*
6. **IEB** - *Interferência entre Blocos*
7. **ERB** - *Estação Rádio Base*
8. **ES** - *Estação Móvel*
9. **FIR** - *Finite Impulse Response*
10. **CSI** - *Channel State Information*
11. **disc** - *Operador Discreto*
12. **sgn** - *Operador Função Sinal*
13. **Re** - *Operador que retira a Parte Real*