

8

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre a tese, discussões sobre os resultados obtidos, os novos métodos e suas aplicações, e propostos alguns tópicos para trabalhos futuros. As características e a aplicabilidade das estruturas e algoritmos desenvolvidos ao longo da pesquisa são discutidas e as contribuições do trabalho são destacadas.

8.1

Resumo dos Resultados e Discussão

No Capítulo 3 foram propostos receptores multiusuário adaptativos para sistemas DS-CDMA baseados em redes neurais recorrentes. Novas estruturas para detecção multiusuário com e sem o emprego de decisão realimentada foram investigadas com redes neurais recorrentes e uma análise comparativa destes esquemas e de detectores multiusuário com filtros FIR lineares foi realizada. Receptores multiusuário adaptativos que usam o critério de desempenho MMSE foram examinados com o algoritmo LMS e comparados com o detectores neurais que operam com os algoritmos RTRL. Além disso, MUDs com decisão realimentada usando redes neurais recorrentes na seção direta e filtros FIR lineares na seção realimentada foram comparados aos receptores multiusuário com decisão realimentada. Um algoritmo baseado no gradiente estocástico foi desenvolvido para a estrutura proposta e os desempenhos foram avaliados através de simulações. Os experimentos por simulação em computador foram realizados para diferentes canais de comunicação, diferentes valores de N , K e cenários. Os resultados em termos de BER para algoritmos baseados no gradiente estocástico mostram que os receptores multiusuário propostos apresentaram desempenho superior aos MUDs com filtros lineares FIR e os resultados foram apresentados em [49, 50, 51]. Embora complexas, estas abordagens neurais são promissoras para usuários com altas taxas de transmissão, uma

vez que para atendê-los o sistema reduz o ganho de processamento, tornando viável o uso desta estrutura de recepção neural.

No Capítulo 4 foram propostas técnicas baseadas nas técnicas AMBER e LBER para receptores multiusuário adaptativos com decisão realimentada para sistemas DS-CDMA e que são capazes de acelerar a convergência dos métodos AMBER e LBER, existentes na literatura. Os experimentos por simulação em computador foram realizados para diferentes canais de comunicação, diferentes valores de N , K e cenários. Os resultados em termos de BER para algoritmos propostos mostraram a superioridade da abordagem que minimiza a BER sobre a estimação MMSE. Uma extensão dos algoritmos AMBER e LBER baseados no gradiente estocástico foi desenvolvida para o caso de estruturas com decisão realimentada e apresentado em [71] com versões para equalização [72, 73], para sistemas de comunicações com múltiplas portadoras [74], e com redes neurais recorrentes [75]. Algoritmos com convergência mais rápida que aproximam o método de Newton e aqui denominados gradiente-Newton foram propostos para os métodos AMBER e LBER e os resultados mostram que esses algoritmos podem trabalhar com seqüências de treinamento mais curtas [76]. O uso do conceito de *averaging* com técnicas que minimizam a taxa de erro do sistema foi apresentado e os resultados indicam uma aceleração da taxa de convergência [77]. Finalmente, o uso combinado das técnicas gradiente-Newton e das estruturas com decisão realimentada em canais seletivos em frequência com desvanecimento de Rayleigh foi publicado em [78].

No Capítulo 5 foram tratadas técnicas de estimação adaptativas dos parâmetros do receptor e do canal de forma autodidata, ou seja, às cegas. A primeira proposta do capítulo consiste em dois mecanismos de baixa complexidade para atualização do passo em algoritmos do tipo SG, em receptores lineares às cegas que implementam a solução CMV, para os parâmetros do receptor e do canal. Uma análise de convergência dos novos mecanismos foi desenvolvida e expressões analíticas para estimação do erro médio quadrático (MSE) em excesso no estado estacionário foram obtidas. Os resultados analíticos foram comparados com simulações e foi verificada a eficácia das aproximações realizadas para prever o MSE em excesso. O desempenho em convergência e BER desses mecanismos foi investigado em cenários não estacionários onde os usuários entram e saem do sistema, o que torna muito difícil o cálculo prévio de um valor para o passo. Os resultados mostram que os mecanismos propostos BVSS e BRVSS são superiores às técnicas existentes na literatura, e quando usados também na estimação do canal obtém resultados ainda melhores. Uma parte deste trabalho foi

publicada em [120] e um artigo longo com vistas a uma revista internacional está em preparação.

Na segunda parte do Capítulo 5 foi apresentada uma solução iterativa de projeto às cegas para o receptor linear baseada na função custo CM com restrições que combina os sinais de diferentes percursos usando múltiplas restrições que são tratadas como variáveis e otimizadas conjuntamente a fim de estimar os parâmetros do receptor e do canal. Para implementar de forma adaptativa essa solução foram propostos os algoritmos computacionalmente eficientes CCM-SG e CCM-RLS, que estimam conjuntamente o canal e os parâmetros do receptor, e que foram comparados às outras técnicas existentes na área. Uma análise das propriedades de convergência do método, que estende resultados da literatura para sinais complexos e em multi-percurso, e leva em consideração as estimativas de canal é desenvolvida no Apêndice B. Além disso, os resultados de simulações para diversas situações mostraram que, para o receptor multiusuário linear, a técnica CCM-RLS proposta é superior aos outros algoritmos às cegas analisados, ao receptor RAKE, e o seu desempenho coincide com a solução iterativa CCM, que realiza inversões de matriz. Os resultados deste capítulo foram publicados em [121, 122].

No capítulo 6 foram desenvolvidas soluções iterativas para receptores com estruturas com decisão realimentada operando de modo não supervisionado para canais com múltiplos percursos. Este trabalho equivale a uma generalização dos receptores lineares de Xu e Tsatsanis [86] e CCM, proposto no Capítulo 5, para o caso de receptores DF. Para implementar as soluções dos receptores de forma adaptativa foram desenvolvidos algoritmos computacionalmente eficientes do tipo SG e RLS com base nos critérios de desempenho CCM e CMV. Esses receptores foram examinados em cenários com o enlace reverso e com realizações de cancelamento sucessivo (S-DF) e paralelo (P-DF). Um novo esquema de recepção DF usando cancelamento sucessivo com arbitragem paralela (SPA-DF) foi apresentado e combinado com técnicas iterativas que empregam detecção iterativa com estágios de recepção DF em cascata, resultando nos novos detectores ISPAS-DF e ISPAP-DF, para mitigar os efeitos da propagação de erros. Devido à grande dificuldade de analisar teoricamente estes esquemas, a avaliação foi baseada em simulações. Os experimentos avaliaram os algoritmos, as diferentes estruturas de detecção DF e a linear, e examinaram os efeitos da propagação de erros dos novos esquemas. Os resultados das comparações indicam que as novos detectores SPA-DF, ISPAS-DF e ISPAP-DF são capazes de melhorar significativamente o desempenho de estruturas DF convencionais (S-DF

e P-DF) e as lineares, combatendo a propagação de erros. Além disso, a análise comparativa entre os algoritmos adaptativos mostrou que as técnicas baseadas no critério CCM são superiores à abordagem CMV. Alguns resultados deste capítulo foram publicados em [127, 128] e um artigo longo com vistas a uma revista internacional está em preparação.

De um modo geral, as técnicas e estruturas às cegas desenvolvidas são de grande interesse nas modernas redes de comunicações baseadas em sistemas DS-CDMA, porque aumentam a eficiência de transmissão uma vez que não necessitam de seqüências de treinamento. Elas podem ser usadas em sistemas DS-CDMA com códigos longos, tanto no enlace reverso quanto no direto, desde que algumas modificações sejam feitas para evitar a perda da cicloestacionariedade dos sinais e/ou estimar o canal [30, 31].

No Capítulo 7 foi proposta uma nova estrutura de recepção linear com um número reduzido de elementos para estimação usando filtros FIR interpolados e interpoladores variantes no tempo para supressão de interferência em presença de canais seletivos em frequência. Para estimar os parâmetros do novo receptor com posto reduzido foram descritas soluções iterativas com base nos critérios MMSE e CMV. Em seguida foram desenvolvidos algoritmos adaptativos do tipo SG e RLS para estimar os parâmetros da nova estrutura de recepção adaptativa onde o interpolador é feito adaptativo, nos modos de operação supervisionado e às cegas. Uma análise de convergência dos algoritmos desenvolvidos foi realizada e uma discussão das propriedades de convergência do novo método é apresentada no Apêndice F, para os modos com treinamento e autoidata. Na análise de convergência, são obtidas expressões analíticas para estimação do MSE em excesso dos algoritmos SG nos modos às cegas e supervisionado. Através de simulações, os novos esquemas de recepção e seus algoritmos foram avaliados em vários cenários e comparados a outras técnicas existentes. Os resultados das simulações mostram que a análise teórica e as expressões obtidas são eficazes na previsão do MSE em excesso, em ambiente estacionário, já que as curvas teóricas coincidem com as curvas simuladas após a convergência. Experimentos de simulação em ambientes dinâmicos indicam que os receptores interpolados, ou INT, têm desempenho em convergência e BER superior às abordagens de posto reduzido existentes na literatura em uma variedade de situações. Os primeiros resultados dos receptores com filtros FIR interpolados foram publicados em [162], para o caso de receptores que realizam inversão de matrizes e interpoladores fixos. A versão iterativa deste esquema de recepção, que realiza inversões de matrizes, foi aceita para publicação em [163] e um trabalho sobre filtros adaptativos interpolados com interpo-

ladores adaptativos com aplicações em cancelamento de eco e equalização foi aceita para publicação em [164]. Além disso, os receptores interpolados adaptativos foram apresentados em [165, 166] e um artigo longo sobre receptores interpolados adaptativos está em preparação.

Com relação à aplicabilidade da nova estrutura de recepção com filtros FIR interpolados, esta abordagem pode ser usada em uma grande variedade de problemas. Em função dos requisitos de baixa complexidade, os INTs são de especial interesse para projeto de receptores de comunicações no terminal móvel e uso no enlace direto. Neste contexto, uma adaptação dos receptores interpolados para o enlace direto com códigos longos pode usar o esquema de [140, 141], onde emprega-se um tipo de equalização seguida de desespalhamento com a seqüência de assinatura. Para o enlace reverso, uma modificação na estimação das matrizes e do canal, de modo similar aos trabalhos em [27, 28, 29, 30, 115], permite a operação destes receptores em sistemas DS-CDMA com códigos longos. Além disso, uma generalização destes esquemas para detecção DF, SICs e PICs também nos parece interessante e promissora.

8.2

Direções Futuras

Levando em consideração as conclusões sobre os capítulos desta tese de doutorado, apresentamos as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- ▷ Analisar a convergência dos algoritmos propostos para os receptores neurais no caso linear.
- ▷ Propor algoritmos com baixa complexidade que empregam seleção de dados e passos variáveis para estruturas neurais (trabalho em andamento).
- ▷ Desenvolver algoritmos do tipo projeções afins (*Affine Projection*) [45, 46] com passo variável e operando nos modos supervisionado e às cegas (funções custo MV e CM), podendo aplicá-los em sistemas com códigos curtos e longos.
- ▷ Investigar expressões analíticas para obtenção do MSE em excesso usando algoritmos às cegas em ambiente dinâmico, de modo semelhante ao trabalho em [169].
- ▷ Elaborar um mecanismo de passo variável para o algoritmo CCM-SG

- ▷ Realizar uma análise de convergência para o algoritmo CCM-SG, com passo fixo e variável, e estudá-lo em sistemas DS-CDMA com múltiplas taxas.
- ▷ Formular uma estrutura de estimação de parâmetros do tipo MWF para a solução CCM.
- ▷ Estender as estruturas iterativas com decisão realimentada às cegas para o critério MMSE e sistemas MIMO [170, 173] e com codificação espaço-temporal [172, 171].
- ▷ Analisar a estrutura interpolada proposta e seus algoritmos de modo a obter uma expressão do MSE em excesso como função de ambos os passos e do vetor de observação $\mathbf{r}(i)$.
- ▷ Projetar os receptores interpolados para sistemas com arranjo de antenas [26], MIMO [170, 173] e com codificação espaço-temporal [172, 171].
- ▷ Propor um esquema de decimação não uniforme ou adaptativa para os receptores interpolados.
- ▷ Desenvolver um interpolador não linear, semelhante ao receptor DF.
- ▷ Combinar os receptores interpolados com o MWF e o AVF com AVs não ortogonais.
- ▷ Estender para os receptores interpolados os algoritmos com a função custo CM com restrições.
- ▷ Propor estruturas interpoladas com decisão realimentada, cancelamento sucessivo de interferência (SIC) e operando nos modos supervisionado e às cegas .