

## 6 Conclusão

Esta tese abordou o problema de estimação de canal e detecção cega de sinais em sistemas OFDM. Dois esquemas OFDM foram considerados, a saber: OFDM com intervalo de guarda CP, e OFDM com intervalo de guarda ZP.

Da semelhança entre os sinais CDMA e OFDM, surgiu a motivação de investigar a aplicabilidade de técnicas provenientes da literatura específica de CDMA, em sistemas OFDM. Uma vez que é possível fazer uma analogia entre os usuários em um sistema CDMA e as portadoras em um sistema OFDM, técnicas multiusuário podem ser aplicadas em sistemas OFDM.

Para cada um dos sistemas OFDM, foram propostos dois estimadores cegos de canal, provenientes de duas classes de algoritmos cegos: estimação por meio do subespaço de ruído, e estimação via casamento de correlação.

O problema de estimação cega de canal baseado no subespaço de ruído foi reformulado de modo a explicitar a presença do operador projeção no subespaço de ruído. No esquema original, estimativas de uma base para o subespaço de ruído são obtidas por meio da SVD da matriz correlação das observações. Graças à reformulação do problema, a SVD pode ser substituída por um produto de matrizes. Mais especificamente, com a reformulação do problema, estimativas do operador projeção são obtidas por meio de potências inteiras da inversa da matriz correlação das observações, dando origem ao que se convencionou chamar ao longo do texto de “método das potências”. Resultados de simulação indicam que para potências maiores ou iguais a 3 (isto é, 2 multiplicações de matrizes), já se consegue uma boa aproximação para o operador projeção.

Se no caso do OFDM-ZP, a dimensão do subespaço de ruído é invariavelmente  $D$ , este não é o caso para sistemas OFDM-CP. Decorre que se para o OFDM-ZP, a adoção do método das potências tem como único objetivo evitar uma SVD, no caso do OFDM-CP o método proposto garante a identificabilidade do canal, uma vez que a dimensão do subespaço de ruído em última análise depende do número de portadoras atingidas por nulos do canal. Outra diferença entre os estimadores baseados no método das potências para o OFDM-CP e o OFDM-ZP é a complexidade computacional envolvida, uma vez que para viabilizar a existência do subespaço de ruído, e assim, viabilizar a existência dos próprios estimadores, no caso do OFDM-

CP faz-se necessário processar mais de um vetor observação por vez.

Quanto aos estimadores baseados no casamento de correlação, conclui-se que estes oferecem uma excelente relação custo-benefício. De fato, a complexidade destes estimadores é bem inferior aos estimadores baseados no método do subespaço de ruído ou ainda baseado no método das potências, devido à natureza esparsa das matrizes envolvidas, bem como por operarem processando apenas um único vetor observação por vez. Por outro lado, resultados de simulação indicaram que receptores realizando a detecção com as estimativas obtidas por meio de casamento de correlação apresentam desempenho semelhante ao de receptores operando com estimativas obtidas via subespaço de ruído, para a faixa de  $\frac{E_B}{N_0}$  considerada.

Além disso, obteve-se também um estimador para a variância do ruído. Este parâmetro pode ser útil tanto para reconstruir as matrizes necessárias a um equalizador MMSE, quanto para servir de chave seletora com relação ao esquema de estimação de canal ou detecção de sinais a ser empregado. Para pequenos valores de  $\sigma^2$ , pode ser mais vantajoso empregar o esquema de estimação baseado no método das potências, com potência 2 por exemplo, e esquema de detecção ZF. Já para valores elevados de  $\sigma^2$ , o estimador de canal baseado no casamento de correlação poderá ser utilizado, junto com um esquema de detecção MMSE.

Como as estimativas cegas de canal obtidas por meio dos estimadores propostos são afetadas por uma ambigüidade inerente representada por um escalar complexo, foram investigados alguns esquemas capazes de resolvê-la. Para tal, a presença de símbolos pilotos foi explorada. De fato, todo padrão de comunicação comercial de que se tem notícia transmite intercalando dados e seqüências pré-definidas, seja para efeitos de sincronismo de relógio ou de portadora, seja para ajudar na estimação de canal. Resultados de simulação sugerem que os métodos propostos operaram de forma satisfatória explorando a presença dos pilotos para resolver a ambigüidade.

A extensão dos métodos propostos para o caso de sistemas OFDM com intervalo de guarda insuficiente é direta. Os estimadores baseados no método das potências operam processando possivelmente vários vetores observação por vez, de modo a garantir a existência do subespaço de ruído, e acarretando assim um aumento em sua complexidade. Por outro lado, um fato marcante é a capacidade dos estimadores baseados no casamento de correlação de estimarem o canal processando apenas um vetor observação por vez.

Como sugestões de trabalhos futuros pode-se mencionar os seguintes tópicos. O modelo de sinais pode ser estendido de forma a contemplar o caso de portadoras nulas; estas auxiliam na formatação do espectro, em aplicações práticas. Os estimadores podem ser testados em sistemas com desvio de frequência (*frequency offset*). O problema de estimação cega de canal para canais que variam ao longo de um

símbolo OFDM é desafiador, e também pode ser abordado; muito provavelmente os algoritmos propostos deverão ser repensados (os métodos propostos supõem que o canal permanece fixo ao longo de cada símbolo OFDM; o canal, contudo, pode variar de um símbolo para outro). A viabilidade de extensão dos métodos de estimação propostos também pode ser investigada para o caso de múltiplas antenas no receptor e/ou no transmissor. Vale mencionar também que a estreita relação entre os sinais OFDM e MC-DS-CDMA [20] já permitiu a extensão dos métodos de estimação propostos para esse sistema de múltiplo acesso, e resultados preliminares constam de [85, 86, 87].