

## 6

### Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Nesta tese, um estimador de máxima verossimilhança da direção de chegada (DOA) de portadoras com modulação PSK foi proposto. Seu desempenho foi analisado através de simulações em diversos cenários. O valor RMS (raiz quadrada da média dos quadrados) do erro de estimação da DOA foi considerado como critério de desempenho. O estimador foi implementado para modelos de sinais onde o relógio de cada portadora poderia estar alinhado ou não com o do receptor. Para o modelo com portadoras alinhadas no tempo (*modelo síncrono*), os estimadores para as constelações BPSK e QPSK foram implementados. Para o modelo com portadoras desalinhadas no tempo (*modelo assíncrono*), apenas os estimadores para a constelação BPSK foram implementados, devido à alta demanda computacional requerida pelo estimador ML-QPSK. Em todos os cenários simulados, observa-se que o estimador proposto tem desempenho superior ao estimador determinístico clássico proposto por Stoica e Nehorai em [21]. Nota-se que o desempenho dos estimadores desenvolvidos para o modelo de sinais assíncrono apresenta uma degradação de 2 a 3 dB com relação ao desempenho dos estimadores baseados no modelo síncrono. Nota-se ainda que os estimadores para constelações BPSK e QPSK, quando formulados dentro de um mesmo modelo de sinais, possuem desempenho semelhante, com variações que são consequência apenas da imprecisão das simulações realizadas.

Foi também calculado o limitante de Cramér-Rao para todos os modelos de portadora única simulados (BPSK: modelo síncrono, QPSK: modelo síncrono e BPSK: modelo assíncrono). Dificuldades matemáticas impediram o cálculo dos limitantes de Cramér-Rao para os modelos de duas portadoras. No entanto, como o desempenho dos estimadores para duas portadoras não pode ser superior ao dos estimadores para portadora única, os limitantes inferiores obtidos nos Apêndices B a D também servem como limitantes inferiores para os modelos respectivos com duas portadoras. A degradação observada no desempenho dos estimadores de modelo assíncrono com relação

aos de modelo síncrono permanece coerente com a diferença apresentada entre os limitantes calculados para os modelos síncrono e assíncrono com uma portadora BPSK (aproximadamente 2 dB). Além disto, a expressão calculada no modelo síncrono para o limitante de Cramér-Rao com uma portadora QPSK é idêntica à obtida para uma portadora BPSK, corroborando a semelhança obtida entre os desempenhos dos estimadores simulados para estes cenários. Como o estimador proposto neste trabalho supera o estimador ML clássico em todos os cenários simulados e seu desempenho permanece praticamente constante na presença de outra portadora interferente, acredita-se que o método apresentado nesta tese constitui-se em um passo importante no desenvolvimento de um sistema híbrido de acesso múltiplo por divisão no espaço-tempo (*space-time division multiple access—S/TDMA*) mais confiável e estável, sendo também bastante útil na redução da distância mínima para reuso de frequência ou *slots*.

A seguir, algumas linhas de trabalho serão relacionadas para o desenvolvimento de trabalhos futuros. Inicialmente, o cálculo de um limitante inferior para a variância do erro de estimação nos cenários com duas portadoras deve ser considerado. O cálculo do limitante de Cramér-Rao para estes cenários envolve um conjunto maior de derivações e uma inversão matricial de maior ordem, além da obtenção de aproximações adequadas para o desenvolvimento analítico das integrais de valor esperado. Porém, algumas simetrias podem ser exploradas para facilitar este processo, principalmente ao se considerar que os estimadores apresentados em (4-20)–(4-22), (4-30)–(4-32) e (4-56)–(4-59) são derivados em função de parâmetros com índice  $\gamma$ , onde  $\gamma$  pode representar qualquer uma das duas portadoras.

Sugere-se também a análise de um modelo de sinais que considere o multipercurso de uma portadora. Desta forma, versões atenuadas em amplitude e atrasadas no tempo do sinal principal constituiriam os sinais interferentes adicionais. Mais ainda, a seqüência de símbolos seria idêntica para todos estes sinais, já que todos os percursos são produzidos por uma única fonte. Este fato pode colaborar com o aumento do número  $n$  de percursos na análise realizada, uma vez que os símbolos dos percursos interferentes não incrementariam o número de combinações possíveis de símbolos a cada amostra observada, mantendo a fdp condicional do vetor de observações dada em (4-35) como um produtório de  $M^2$  gaussianas. O único contratempo deste modelo seria o aumento expressivo do número de parâmetros desconhecidos, pois a cada novo percurso interferente adicionado, quatro novos parâmetros precisariam ser estimados conjuntamente aos demais. Vale salientar que, para um modelo de dois percursos (visada direta e raio refletido), tem-se

um caso particular do modelo simulado nesta tese com uma única portadora interferente, onde esta portadora apresentaria agora a mesma seqüência de símbolos da portadora principal.

Uma grande variedade de trabalhos pode também ser realizada através da obtenção de estimadores subótimos desenvolvidos a partir de aproximações do estimador ML proposto neste texto. Métodos alternativos, como os baseados em subespaços, ou algoritmos como o *Expectation Maximization* (EM) [13] poderiam ser considerados. Na maioria das vezes, estes métodos apresentam maior velocidade em termos computacionais, com desempenho comparável ao método de máxima verossimilhança. No Apêndice E desta tese, exemplos de estimadores aproximados são apresentados. Eles são obtidos ao se utilizar, nas expressões dos estimadores ML, as mesmas aproximações consideradas no cálculo dos limitantes de Cramér-Rao. Assim, alguns parâmetros podem ser expressos através de expressões menos complexas, ou até mesmo formas fechadas, reduzindo o número total de parâmetros a serem estimados conjuntamente. Alguns algoritmos podem ser desenvolvidos utilizando outros artifícios além das aproximações descritas no Apêndice E. Enfim, uma variedade de ramificações pode surgir do estimador proposto neste trabalho ao se considerar estimadores subótimos. A avaliação de métodos aproximados com relação ao método ótimo deve incluir, portanto, tanto a possível perda de desempenho nos resultados simulados quanto o ganho obtido na redução do tempo de processamento. É justamente o compromisso entre estes dois critérios de avaliação que dimensiona a qualidade dos algoritmos de estimação.