

# 1

## Introdução

Processamento de sinais recebidos em um *array* de sensores lida com o problema de extrair informações de uma coleção de medidas obtidas de sensores distribuídos no espaço. Assume-se que o número de sinais é finito, assim como o número de parâmetros necessários para caracterizar cada um destes sinais. Baseando-se nas amostras coletadas na saída do *array*, o objetivo se resume em estimar os sinais e os seus parâmetros. A pesquisa na área de estimação de parâmetros com *array* vem crescendo consideravelmente ao longo dos anos. Um amplo número de modelos de sinais aparece na literatura, demandando algoritmos para estimação paramétrica específicos que tendem a apresentar desempenho superior aos algoritmos propostos em publicações anteriores.

As pesquisas em *arrays* de sensores iniciaram com propósitos militares durante a Segunda Guerra Mundial, tendo suas primeiras publicações abertas à comunidade na década de 50. As principais aplicações, até então, eram em sistemas de radar e sonar. Mais tarde, o conhecimento da localização espacial popularizou-se em outras áreas, surgindo o interesse de sistemas de acesso múltiplo por divisão no espaço (*space division multiple access*—SDMA) em comunicações móveis. Atualmente, em sistemas de acesso múltiplo por divisão no tempo (*time division multiple access*—TDMA), *arrays* de sensores podem aumentar a capacidade do sistema (número de usuários) e reduzir a interferência total através de melhores estratégias de reuso de frequência, pois o diagrama de irradiação diretivo do *array* permite a cobertura de apenas um dentre vários usuários que estiverem compartilhando um mesmo canal, o que não é possível nos sistemas atuais, uma vez que suas antenas possuem um padrão omnidirecional de irradiação.

A cobertura dos usuários em sistemas SDMA é realizada através de uma formação de feixe adequada, isto é, o diagrama de irradiação do *array* de antenas deve apontar simultaneamente para todos os usuários. O controle do diagrama de irradiação é feito com o ajuste contínuo do filtro espacial

do *array*, que é um conjunto de ganhos e atrasos de fase com estrutura equivalente a de um filtro digital utilizado em processamento temporal de sinais.

A direção de chegada (*direction of arrival*—DOA) dos sinais consiste no principal parâmetro a ser estimado na maioria dos problemas de processamento em *arrays*. Isto se deve ao fato de que o conhecimento da DOA é essencial para uma grande variedade de algoritmos de formação de feixe.

Dos diversos estimadores de parâmetros utilizados na literatura, o estimador de máxima verossimilhança (*maximum likelihood*—ML) apresenta desempenho superior na análise dos momentos do erro de estimação. Em contrapartida, este estimador possui complexidade computacional elevada, tornando-o mais lento na implementação de simulações. Mesmo assim, ele se projeta como um dos métodos mais populares encontrados na literatura. Diversos estimadores ML já foram propostos para diferentes modelos, além de versões subótimas que recorrem a aproximações destes estimadores, simplificando suas expressões em detrimento do seu desempenho.

Esta tese considera o problema de estimação ML da DOA de sinais caracterizados como portadoras digitais com modulação *phase shift keying* (PSK). Esta estimação é feita com base na observação das portadoras moduladas que atingem os diversos elementos do *array*, sem a necessidade de utilizar seqüências piloto (de símbolos conhecidos pelo receptor). Existe na literatura um número razoável de estimadores ML que resolvem o problema do conhecimento da DOA de sinais assumindo diferentes modelagens, entretanto nenhum deles trata os sinais-fonte como portadoras moduladas. Modulação PSK é muito popular em sistemas de comunicações móveis (IS-136, GSM, etc.) [8], o que motivou o desenvolvimento deste trabalho. Como as fases das portadoras transmitidas em um determinado instante pertencem a um conjunto finito de valores, é possível um conhecimento estatístico completo dos símbolos das diversas portadoras. O estimador proposto explora esta estatística e fornece resultados melhores que os de estimadores desenvolvidos para modelos mais genéricos.

Um dos primeiros métodos desenvolvidos para resolver o problema de estimação da DOA foi proposto por Stoica e Nehorai em [21]. Este estimador, chamado ao longo desta tese de ML clássico, utiliza um modelo global onde as amostras dos sinais-fonte são, em sua essência, parâmetros complexos desconhecidos. Na literatura, esta abordagem é conhecida como **ML determinística**, e será descrita no Capítulo 2 com mais detalhes.

Alguns outros trabalhos que consideram a abordagem determinística foram desenvolvidos ao longo da última década utilizando modelagens

alternativas na tentativa de obter estimadores ML mais eficientes para a DOA dos sinais. Em [15], Pesavento e Gershman propõem um algoritmo iterativo para estimar as DOAs de múltiplas fontes na presença de um ruído branco não-uniforme, isto é, com matriz co-variância diagonal arbitrária. Os resultados obtidos representam uma extensão dos ilustrados em [21] para ruído branco uniforme.

Em [30], Ye e DeGroat utilizam uma modelagem de ruído mais abrangente, onde a matriz co-variância espacial do ruído colorido é desconhecida. Para viabilizar a solução do problema, esta matriz é decomposta em uma função de alguns parâmetros seguindo um modelo auto-regressivo. Estes parâmetros, em adição aos parâmetros dos sinais-fonte (como as DOAs), formam o conjunto de elementos a serem estimados.

Vários outros trabalhos desenvolvidos a partir da abordagem ML determinística podem ser encontrados na literatura [4],[5],[12],[23]. Por se tratar de uma abordagem de aplicação ampla, o trabalho desenvolvido nesta tese segue este enfoque estatístico.

A estimação de DOA em um *array* de sensores extenso é tratada em [18], onde Satish e Kashyap não consideram os sinais-fonte como formas de onda paramétricas, mas como funções-amostra de processos estocásticos. Esta abordagem, anteriormente apresentada em [9], é conhecida como **ML estocástica**. A título de informação, alguns detalhes desta abordagem são apresentados no Capítulo 2. Quando o número de sensores no *array* tende para infinito, a matriz co-variância das medidas coletadas no *array* pode ser aproximada através de uma expansão em série de Taylor, tornando o algoritmo de estimação de DOA computacionalmente eficiente.

Outros trabalhos, assumindo diferentes modelagens, apresentam estimadores alternativos para este problema baseados numa abordagem ML estocástica [1],[5]. Por se restringir a sinais modelados como processos estocásticos de média nula, esta abordagem é menos utilizada que a determinística. Nesta tese, os sinais-fonte são vistos como portadoras moduladas e esta característica é explorada no desenvolvimento de estimadores mais eficientes através da abordagem determinística.

A pesquisa em estimação de máxima verossimilhança da DOA de portadoras moduladas realizada neste trabalho gerou sua primeira publicação em [20], no qual é considerado um modelo simplificado de sinais, chamado **modelo síncrono**, onde os relógios de todas as portadoras estão alinhados no tempo com o relógio do receptor. Apesar deste modelo não representar a situação real, sua análise possibilita um maior conhecimento das raízes do problema em questão, uma vez que o desempenho deste estimador serve

como limite da capacidade de um estimador desenvolvido para um modelo de sinais onde os relógios de cada portadora estão desalinhados entre si e com o do receptor (**modelo assíncrono**). Nesta tese, além do modelo síncrono descrito em [20], também é analisado o modelo assíncrono onde as portadoras apresentam retardos relativos ao atingirem o receptor. No entanto, estes modelos ainda são bastante teóricos e nenhum deles considera efeitos degenerativos do canal, como multipercurso ou efeito Doppler. Como será descrito mais tarde, o canal adotado nos modelos apresenta somente desvanecimento em amplitude e fase, além de incluir a adição de ruído térmico no receptor.

O objetivo principal desta tese é o desenvolvimento das expressões que regem os estimadores de máxima verossimilhança dentro de cada um dos modelos considerados (modelo síncrono e modelo assíncrono). Esta tese também visa ao cálculo dos limitantes de Cramér-Rao (LCR) aplicáveis a estes modelos, que é um limite inferior teórico para a variância do erro de estimação. A qualidade do estimador proposto é determinada ao se comparar este limite inferior ao desempenho dos estimadores propostos, obtido através de simulações. Além disso, realiza-se também uma análise comparativa entre o desempenho do estimador proposto e o do estimador clássico de Stoica e Nehorai [21] em uma grande variedade de cenários, uma vez que estes dois estimadores são baseados no mesmo princípio (abordagem ML determinística). Deste modo, foi possível avaliar o ganho, em termos de desempenho, obtido na utilização de um estimador que considera a estrutura do sinal.

Este texto é organizado em seis capítulos. Os conceitos básicos envolvendo *arrays* de antenas e as abordagens clássicas de estimação ML serão descritos no Capítulo 2. Os dois modelos propostos (síncrono e assíncrono) serão apresentados no Capítulo 3. Os estimadores desenvolvidos para solucionar este problema serão detalhados no Capítulo 4, e uma análise do desempenho destes estimadores em uma variedade de cenários diferentes será realizada no Capítulo 5. No Capítulo 6, serão traçadas as últimas considerações sobre o trabalho realizado, além de algumas sugestões de linhas de pesquisa para o desenvolvimento posterior da tese.