

3

Métodos de Processamento de Sinais

Através de campanhas de medidas, em diferentes situações e ambientes, é possível obter um vasto banco de dados. Porém, é necessário algum tipo de pós-processamento para conseguir extrair informações úteis do sinal recebido [7], que permitam uma estimação correta de parâmetros do canal como os ângulos de chegada dos sinais.

O processamento de sinais provenientes de arranjos de sensores (os quais serão denominados *arrays*) é uma área em franco desenvolvimento [23]. As principais aplicações para processamento de *arrays* estão em comunicações militares, radares, sonares, geofísica e astronomia, e mais recentemente, em sistemas de comunicações móveis [27].

Os *arrays* podem apresentar diferentes geometrias, dependendo da aplicação de interesse [7]. Podem ser lineares, onde os elementos são distribuídos, uniformemente espaçados, ao longo de uma reta; podem ser planares, com os elementos formando uma grade retangular ou linhas concêntricas, ou ainda, podem ser circulares.

Neste capítulo, a primeira seção discute o uso do *array* como dispositivo para realizar a varredura espacial do sinal. Em seguida, são abordadas algumas técnicas para a estimação de ângulo de chegada, enfatizando o método no qual se baseia a ferramenta de análise implementada neste trabalho (capítulo 5), que é o *beamforming*. A classificação dos métodos segue a proposta de [35].

3.1

Amostragem Espacial

Segundo [11], a implementação de um filtro espacial requer processamento de dados coletados dentro de uma “abertura espacial”, assim como a implementação de um filtro temporal requer dados coletados em uma “abertura temporal”.

Esta afirmação é importante no entendimento da necessidade do uso de um *array*, ou abertura sintética, para análise espacial do sinal. A estimação de ângulo de chegada só é possível porque os dados são tomados em pontos distintos do espaço (amostragem espacial do sinal), fazendo com que o sinal que chega em cada sensor seja recebido com uma fase diferente. Essa informação, junto com o conhecimento da geometria do *array*, torna possível a estimação do parâmetro de direção de chegada do sinal.

Na figura 3.1 é mostrado um *array* linear uniformemente espaçado (*ULA*) e a frente de onda plana que chega até ele. É possível perceber que o raio que atinge a antena 2 percorre um caminho maior que o raio que atinge a antena 1, e que a diferença de percurso pode ser definida como $\Delta_s = d \text{sen} \phi$, onde ϕ é o ângulo de incidência da onda em relação à linha normal ao *array*.

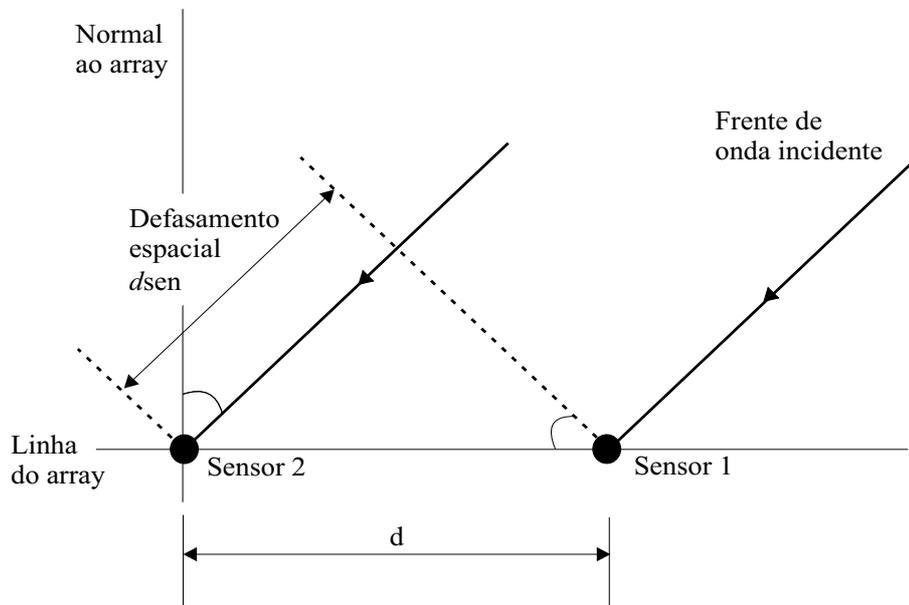


Figura 3.1: Defasamento Espacial para uma Frente de Onda que Atinge um *Array* Linear

O incremento de fase, θ , do sinal na antena 2 em relação ao sinal na antena 1, se relaciona com o ângulo ϕ pela equação:

$$\theta = \frac{2\pi d}{\lambda} \text{sen} \phi \quad (3-1)$$

onde d é o espaçamento entre elementos do *array*, figura 3.1, e λ é o comprimento de onda do sinal.

O valor de ϕ pode variar entre $[-\pi/2, \pi/2]$ e θ , entre $[-\pi, \pi]$. Para que exista correspondência entre os sinais de ϕ e θ , sem ambiguidade, é

encontrado a partir da equação 3-1, que $d < \lambda/2$. Esta inequação pode ser vista como a analogia espacial para o Teorema da Amostragem.

3.2

Métodos Convencionais

Os métodos convencionais para a estimação de ângulo de chegada são baseados na resposta do conjunto de antenas. O início de processamento de sinais proveniente de medidas com uso de *arrays* se deu com o chamado *beamforming*, ou filtragem espacial. Estes são métodos de baixa complexidade computacional, mas, por outro lado, de baixa resolução.

3.2.1

Beamforming

Os primeiros métodos de estimação da direção do sinal tinham como base as técnicas de *beamforming*. Este termo vem do fato de que os primeiros filtros espaciais eram construídos para formar feixes na direção do sinal, ou seja, a idéia principal era direcionar o diagrama para o sinal de interesse.

A primeira utilização do *beamforming* data de antes da 2ª Guerra Mundial (desenvolvido por Bartlett [1]), e é uma aplicação das técnicas de análise com Transformada de Fourier para dados amostrados espacialmente. Este método é conhecido como *beamforming* clássico, ou “*delay-and-sum*”, pois seu princípio é o de acrescentar um *delay*, ou pesos, aos sinais recebidos e depois somá-los de forma a priorizar o sinal desejado, figura 3.2. Para este diagrama, a saída do sinal y pode ser escrita como $w^H x(t)$ e a potência total de saída é $P(w) = \mathbb{E}[|y|^2] = w^H R_x w$, onde w é o vetor de pesos, $x(t)$ é o sinal que atinge as antenas, R_x é a matriz de autocorrelação do sinal de entrada e H denota matriz hermitiana (transposição combinada com conjugação complexa). Este método provê baixa resolução pois a resposta é obtida considerando-se que apenas é percebido o sinal desejado, e não sinais interferentes.

Capon [2], em 1969, introduziu algumas mudanças no *beamforming* clássico de maneira a melhorar a performance do sistema. Para tanto, percebeu que o fraco desempenho do “*delay-and-sum*” estava relacionado ao fato de que este direciona o seu feixe para uma dada região, sem considerar que, além do sinal desejado, também existem contribuições recebidas de fontes interferentes. Para solucionar este problema, Capon propôs um novo método no qual o vetor de pesos w é escolhido para diminuir a contribuição

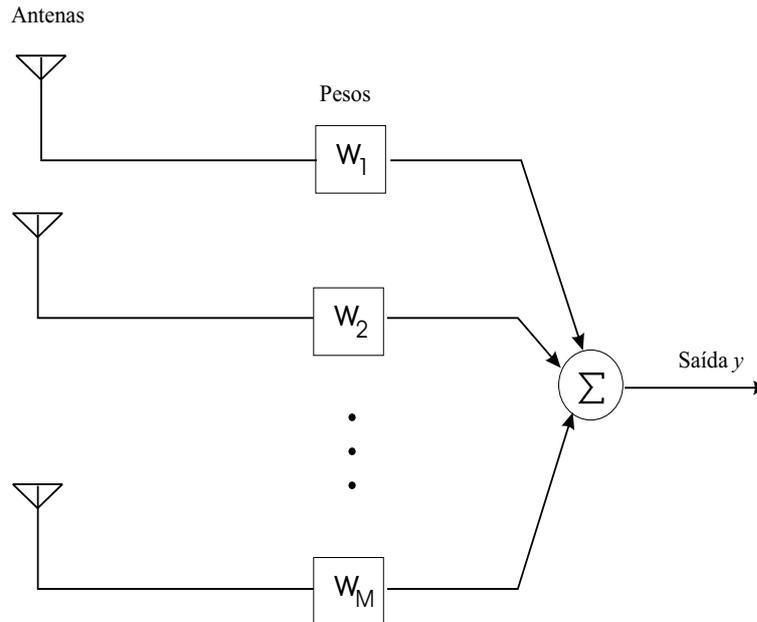


Figura 3.2: Diagrama de Blocos do *Beamforming* Clássico

de sinais indesejados, através da minimização da potência de saída dos sistemas, enquanto garante que o ganho do sinal na direção desejada seja constante. Este método é conhecido como *MVDR* (*Minimum-Variance Distortionless Response*).

O mesmo diagrama da figura 3.2 pode ser aplicado ao método de Capon. Nele, os sinais recebidos em cada uma das antenas recebem pesos individuais, e ao final, são somados para produzir a saída do *beamforming*, que deve satisfazer a dois requisitos:

1. capacidade de apontamento para o sinal desejado;
2. capacidade de cancelar interferências.

Uma maneira de atender esses requisitos é minimizar a variância (potência média) da saída do *beamforming* submetida a uma restrição, equação 3-2, que garante que a resposta do *array*, para um dado defasamento θ , é mantida constante (igual a 1).

$$w^H s(\theta) = 1 \quad (3-2)$$

onde $s(\theta)$ é o vetor apontamento, ou *steering vector* e H denota matriz hermitiana.

O vetor apontamento descreve a fase do sinal em cada antena, relativa à fase do sinal no elemento de referência, que no caso é o elemento 1, da

figura 3.1, logo é dependente da direção do sinal, e pode ser definido como:

$$s(\theta) = [1, e^{-j\theta}, \dots, e^{-j(M-1)\theta}]^T \quad (3-3)$$

A relação entre o defasamento θ e o ângulo de incidência da onda, ϕ , mostrado na figura 3.1 é dado pela equação 3-1.

Como será visto no capítulo 5, para este trabalho foi utilizada uma análise que é baseada nos mesmos princípios do *MVDR*.

3.3 Métodos Subespaciais

Além das técnicas de *beamforming*, existem métodos de estimação de ângulo de chegada mais elaborados, tais como os métodos subespaciais, que exploram a estrutura do sinal de entrada do sistema, ou seja, a ortogonalidade entre os subespaços gerados pelos autovetores associados ao ruído e ao sinal.

O *MUSIC* (*Multiple Signal Classification*) é um algoritmo de alta resolução, proposto em 1979 por Schmidt [5], baseado na exploração das propriedades dos autovetores e autovalores da matriz covariância espacial. Este algoritmo de estimação dos parâmetros do sinal provê informações sobre o número de sinais incidentes e a correlação existente entre eles, o ângulo de chegada de cada sinal, a potência do ruído etc.

A matriz covariância espacial (R_x) é de suma importância no *MUSIC*, e pode ser vista como uma matriz de estatísticas do vetor de sinais percebido pelo *array*, $R_x = \mathbb{E}[x(t)x^H(t)]$ [31]. No processo implementado por esta técnica, a matriz R_x é decomposta, utilizando-se *SVD* (*Single Value Decomposition*), em vetores e valores singulares que, como R_x é quadrada, confundem-se com autovetores e autovalores.

O *MUSIC* pode ser resumido a partir da seguinte premissa: tomando-se o conjunto dos autovetores de R_x , o espaço vetorial dos autovetores associados ao ruído é ortogonal ao espaço vetorial dos autovetores associados ao sinal, daí a classificação de método como subespacial. Conhecendo-se o espaço gerado pelo ruído da amostra é possível identificar o ângulo associado aos sinais assumindo-se a citada ortogonalidade.

Destaca-se que, diferentemente dos outros métodos de análise, o *MUSIC* foi concebido com o propósito de aplicação em estimação de ângulo de chegada [23].

Outros algoritmos subespaciais foram desenvolvidos a partir do *MUSIC* com o objetivo de melhorar sua performance, diminuindo a complexidade computacional. Um deles é o *Root – MUSIC* [6] que provê maior resolução, mas somente é aplicável a *arrays* lineares uniformemente espaçados. Outro algoritmo que é baseado em técnicas subespaciais e tem um custo computacional menor, se comparado com o *MUSIC* é o *ESPRIT* [8, 14] (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*).

3.4

Métodos Paramétricos

Os métodos apresentados acima, apesar de terem baixa complexidade computacional, sofrem limitações em cenários que envolvam sinais altamente correlatados. A introdução de métodos paramétricos tenta mitigar esse efeito. Estes métodos apresentam ótima performance para sinais correlatados, mas o preço da maior eficiência e robustez é o elevado custo computacional.

Um exemplo de método paramétrico é a *Máxima Verossimilhança* (*ML – Maximum Likelihood*). Essa técnica apesar de exigir um processamento computacional intenso, suporta dados de entrada que tenham baixa relação sinal-ruído, número pequeno de amostras e alto nível de correlação. Em uma abordagem simplificada, a estimação de máxima verossimilhança é obtida através de uma exaustiva busca. Em termos geométricos, procura-se o subespaço de sinal, gerado artificialmente pela composição de N possíveis vetores apontamento $s(\theta)$, que mais se assemelham aos vetores de medida $x(t)$, cujo módulo da projeção desse vetor no subespaço gerado é a medida de similaridade.