

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

**Estudo e implementação de um arranjo de microfones para
a estimação de direção de chegada de um sinal de áudio de
banda estreita**

Autor:

Julia Simões de Moraes e Silva

Orientador:

Prof. Marcello L. R. de Campos, Ph. D.

Orientador:

Prof. José Antonio Apolinário Jr., D. Sc.

Examinador:

Prof. Mariane Rembold Petraglia, Ph. D.

Examinador:

Tadeu Nagashima Ferreira, D. Sc.

DEL

Agosto de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica - Departamento de Eletrônica e de Computação

Centro de Tecnologia, bloco H, sala H-217, Cidade Universitária

Rio de Janeiro - RJ CEP 21949-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e dos orientadores.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, meu pai e meu irmão.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer aos meus pais e meu irmão. Pessoas incríveis que me apoiaram sempre e me deram a educação e base necessárias para ter chegado onde cheguei. Além deles, tenho um família maravilhosa que também foi muito importante nesta minha jornada. Meus avôs e minhas avós que sempre acreditaram em mim e me mimaram e aos meus tios e primos que amo muito.

Amigos também são importantíssimos na nossa vida. Eles são a família que escolhemos. Gostaria de agradecer a todos os amigos que passaram por minha vida. A toda a minha turma de 2004/2 e aos agregados, em especial Ana Fernanda, Alberto, Amanda, Hugo, Isabel, Jorginho, Leticia, Pedro Brito e Priscilla. Vencemos juntos essa fase e tenho certeza que vamos ter muito sucesso. Gostaria de agradecer também a uma amiga especial, a Bia, minha irmã de coração. Sempre me ouviu, me animou nas crises e acreditou em mim.

Um agradecimento especial ao meu namorado, Paulo Fernando, que me ajudou muito neste projeto e sempre me faz a pessoa mais feliz. Obrigada por todos os momentos inesquecíveis e pela força. Ainda teremos muitas experiências juntos pela frente.

Não posso esquecer os professores que foram essenciais na minha formação. Todos de alguma forma contribuíram para a minha vida, mas alguns de forma especial, José Apolinário e Marcello Campos, meus coordenadores que me ajudaram neste projeto e estudo. Além deles, outros professores foram marcantes durante o período de faculdade, o professor Jomar Gozzi e o professor José Gabriel. Gostaria de agradecer ao povo brasileiro que contribuiu de forma significativa para minha formação e frequência nesta Universidade. Este projeto é uma pequena forma de retribuir o investimento e confiança em mim depositados.

RESUMO

O tema deste trabalho é a estimação da direção de chegada (*direction of arrival*, DOA, como é conhecido). Os algoritmos de estimação de direção de chegada são usados em arranjos de todo tipo de sensores, como antenas, microfones, hidrofones e geofones. Este projeto apresenta detalhes de implementação e resultados do emprego de algoritmos para estimar a direção de chegada (DOA) em um arranjo linear de microfones. Com um arranjo de 8 microfones e um conversor AD com pré-amplificadores embutidos, o sinal é adquirido por meio do *software Matlab*[®], onde é feito um processamento do sinal para sua adequação à condição de sinal analítico de banda estreita. Foram implementados dois conhecidos métodos para estimar a direção de chegada: o *Beamforming* e o *Capon*. O objetivo do trabalho é comparar os dois métodos, buscando apresentar uma plataforma de estudos de processamento de sinais em arranjos de sensores com a utilização de equipamentos e componentes de fácil aquisição no mercado nacional. O estudo foi desenvolvido conjuntamente nos Laboratórios de Processamento de Sinais do IME e da UFRJ.

Palavras-Chave: Arranjo de microfones, direção de chegada, processamento de sinais, arranjos de sensores, estimação de DOA.

ABSTRACT

This work deals with direction of arrival - also known as DOA - estimation. DOA estimation algorithms are used in arrays of any type of sensors, e.g., microphones, hydrophones, and geophones. This project presents implementation details and results of DOA estimation algorithms employed in a uniform linear array of microphones. Using an array of eight microphones and an eight-channel AD converter with built-in preamplifier, the signal is acquired by the software package *Matlab*[®] where pre-processing is carried out in order to obtain all the desired properties of a narrow band analytic signal. Two widely used methods of direction of arrival estimation were implemented: the delay and sum (DS, also known as Beamforming) and the Capon. The objectives of this project are comparing the performance of these methods in estimating DOA and obtaining a platform for the study of sensor array signal processing using equipments and components easily found in the national market. This work was jointly developed by the Signal Processing Laboratories of IME and UFRJ.

Key-words: microphone array, direction of arrival, sensor array, signal processing, DOA estimation.

SIGLAS

AD - Analógico-Digital

DOA - *Direction of Arrival* (Direção de Chegada)

FIR - *Finite Impulse Response* (Resposta ao Impulso Finita)

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

IME - Instituto Militar de Engenharia

ULA - *Uniform Linear Array* (Arranjo Linear Uniforme)

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Metodologia	5
1.4	Descrição do documento	5
2	Fundamentos Téóricos	6
2.1	Propagação de ondas	6
2.2	O modelo do arranjo	8
3	Arranjo Linear Uniforme	11
3.1	Sensores	11
3.2	O Arranjo Linear Uniforme	12
4	Aquisição dos sinais	15
4.1	Placa de aquisição <i>Firepod</i>	15
4.2	Gravação	16
5	Algoritmos utilizados	18
5.1	Tratamento dos sinais dos sensores	18
5.2	Algoritmos de DOA	19
5.2.1	Beamforming	23
5.2.2	Capon	24
6	Resultados	25
7	Conclusão	30

Bibliografia	33
Glossário	34
Glossário	35
A Código MATLAB	38

Lista de Figuras

1.1	Processamento de sinal com um arranjo de sensores.	3
1.2	Protótipo do sistema para estimar a direção de chegada de um sinal de banda estreita.	4
1.3	Interligações do protótipo do sistema do projeto.	4
2.1	Grandezas físicas de uma onda: (a) período T e (b) comprimento de onda λ	7
3.1	Arranjo linear de oito microfones.	12
3.2	Sinais incidentes em um arranjo linear.	13
4.1	Placa de aquisição <i>Firepod</i> de oito canais.	15
5.1	Resposta em frequência dos filtros.	20
5.2	Amostragem e filtragem temporal.	21
5.3	Amostragem e filtragem espacial usando uma ULA.	22
6.1	Resultado do algoritmo para um ângulo de chegada de 0°	26
6.2	Resultado do algoritmo para um ângulo de chegada de 15°	27
6.3	Resultado do algoritmo na forma polar para um ângulo de 0°	29

Lista de Tabelas

6.1	Resultados do algoritmo de DOA.	27
6.2	Resultados do algoritmo de DOA com tempo de gravação diferentes. .	28

Capítulo 1

Introdução

O tema do trabalho é estimação de direção de chegada (DOA) de sinais utilizando arranjo de sensores. O objetivo do trabalho foi estudar os algoritmos, *Capon* e *Beamforming*, simular o funcionamento dos mesmos, testar os algoritmos em um sistema formado por oito microfones, um conversor DA de oito canais e um computador pessoal. Os algoritmos para estimação de DOA e para aquisição e armazenamento dos sinais foram programados em *Matlab*[®]. Os dois algoritmos implementados foram o *Capon* e o *Beamforming* [1]. Foram feitos testes com dados sintéticos e reais para avaliar o desempenho de cada algoritmo. Suas aplicações vão além de projetos de áudio, uma vez que os mesmos princípios e algoritmos aqui utilizados servem para diferentes arranjos de diferentes tipos de sensores.

1.1 Motivação

A determinação da direção de chegada é um tema de pesquisa que vem de longa data, mas está aumentando suas áreas de aplicação para diversos tipos de arranjos de sensores, tanto no mundo das comunicações móveis quanto em aplicações de videoconferência. Pode-se dizer que a demanda por profissionais com conhecimentos neste assunto vem crescendo.

As técnicas de estimação, em princípio, são as mesmas para uma gama de sensores. O processamento de sinais em arranjos de sensores permite a filtragem espacial, o que torna possível receber energia de uma direção em particular e simultaneamente

atenuar a energia recebida de outra direção. Essa propriedade faz do arranjo de sensores uma ferramenta muito eficaz para, por exemplo, detectar e encontrar a direção de uma fonte de interesse. A Figura 1.1 ilustra o caso de um arranjo de sensores para sinais de banda estreita.

Um dos exemplos clássicos de aplicação da determinação da DOA é na área de antenas inteligentes. Além da determinação da direção de chegada, o processamento de sinais em arranjos de sensores tem outras aplicações como a conformação automática de feixe (*beamforming*) onde um sinal interferente, de uma mesma frequência que o desejado, mas de uma outra direção, pode ser fortemente atenuado pelo arranjo. Os sensores podem ser microfones, antenas, hidrofones ou geofones. Um exemplo de aplicação com os hidrofones seria a determinação de direção de um sinal subaquático (tal como num submarino) sem usar o sonar ativo. O arranjo de microfones pode ser usado em um sistema de videoconferência onde a câmera se movimentaria automaticamente apontando para o locutor atual. A capacidade do arranjo de direcionar a energia transmissora para uma direção desejada torna este estudo útil também para aplicações onde se necessita conformar o feixe na transmissão e não somente a recepção de sinais.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos deste projeto são:

1. Estudar os princípios da determinação de direção de chegada (DOA);
2. Implementar um sistema de determinação de DOA (usando duas técnicas de estimação) para um arranjo de 8 microfones dispostos linearmente;
3. Obter medidas de desempenho e avaliar os resultados obtidos com o arranjo para o caso de sinais de banda estreita .

Neste projeto, o sistema é composto por um computador portátil conectado a uma placa de aquisição *Firepod* que está ligada aos 8 microfones do arranjo linear, como na Figura 1.2. O *software Matlab*[®] é utilizado para a gravação e o processamento

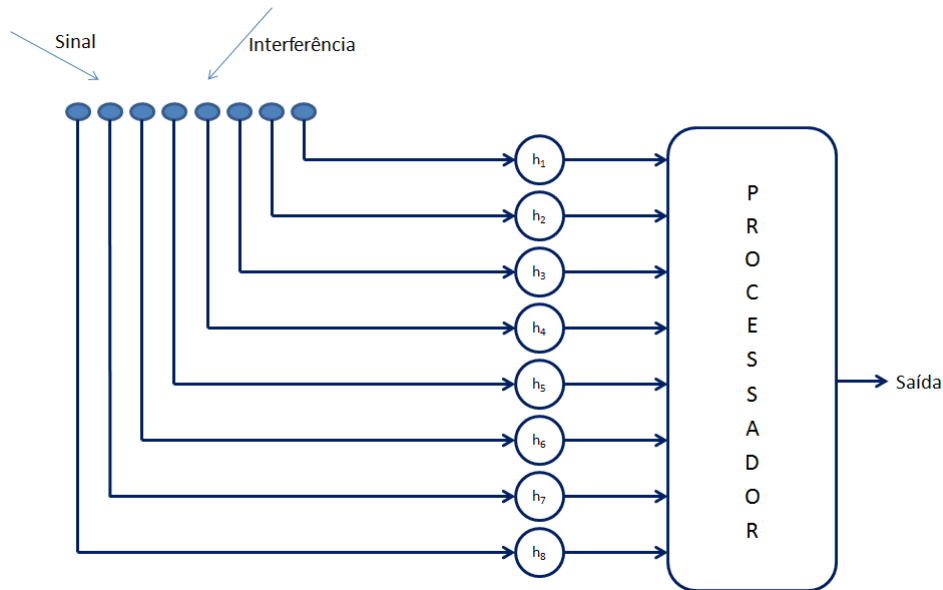


Figura 1.1: Processamento de sinal com um arranjo de sensores.

dos sinais. O sistema pode ser dividido em três partes: a aquisição dos sinais pelo arranjo linear, a digitalização dos mesmos pelo *Firepod* e o processamento para a estimação de direção de chegada pelo computador. A Figura 1.3 ilustra a interligação dos equipamentos utilizados no protótipo do sistema do projeto.

O arranjo linear é composto pelos sensores, que neste caso são os microfones, e pelo suporte para organização dos mesmos de forma linear. Os sinais são captados pelos sensores e entregues para a gravação, que é feita através da placa de aquisição *Firepod* e do computador portátil. Os oito sinais do arranjo passam pelos pré-amplificadores do *Firepod* sendo simultaneamente digitalizados por este e armazenados na memória do computador pelo *Matlab*[©]. O processamento dos sinais também é realizado pelo *Matlab*[©]. Uma vez gravados na memória, o algoritmo para estimar a direção de chegada lê os sinais dos oito sensores e faz o tratamento e cálculo necessários para encontrar a direção da fonte geradora. O resultado é exibido em gráficos gerados pelo algoritmo no *Matlab*[©] de forma *online*.



Figura 1.2: Protótipo do sistema para estimar a direção de chegada de um sinal de banda estreita.

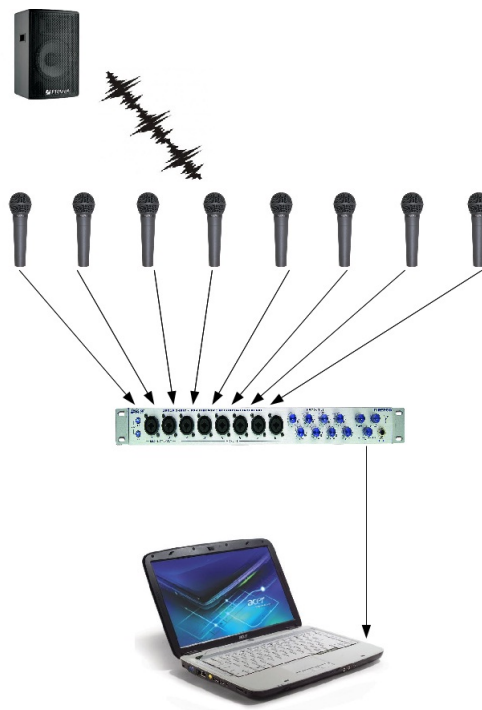


Figura 1.3: Interligações do protótipo do sistema do projeto.

1.3 Metodologia

As seguintes atividades fizeram parte do desenvolvimento deste projeto:

1. Estudo bibliográfico e das principais ferramentas usadas para a implementação de algoritmos de direção de chegada (DOA) e aquisição dos dados com o arranjo de microfones;
2. Implementação dos algoritmos em *scripts* do *Matlab*[®];
3. Simulações e gravações em ambiente controlado. Estas gravações foram realizadas no estúdio do Laboratório de Processamento de Voz do IME;
4. Experimentos em ambiente com ruído;
5. A avaliação deste projeto foi efetuada em reuniões com os orientadores e em alguns seminários onde foram discutidas as atividades desenvolvidas e os resultados obtidos, tais como a Jornada Científica da UFRJ e do IME e no Simpósio Brasileiro de Telecomunicações em Setembro de 2008 com um artigo de iniciação científica [2].

1.4 Descrição do documento

O Capítulo 2 aborda os fundamentos teóricos relacionados ao problema de estimação de direção de chegada, com a teoria matemática e os fundamentos necessários para a resolução e entendimento do problema. O Capítulo 3 descreve o arranjo linear uniforme (ULA). No Capítulo 4 são explicitados os equipamentos utilizados para a gravação dos sinais do arranjo. No Capítulo 5 são discutidos os algoritmos desenvolvidos para a estimação de DOA. Os resultados dos testes e do experimento são apresentados no Capítulo 6. No Capítulo 7 são discutidos os resultados e objetivos do projeto, além de apresentada a conclusão.

Capítulo 2

Fundamentos Téóricos

2.1 Propagação de ondas

Uma onda é uma perturbação periódica no tempo de alguma grandeza física no espaço. São impulsos energéticos que se propagam através de um meio, porém o meio não acompanha essa propagação [3].

As ondas são classificadas de acordo com sua natureza como ondas mecânicas e eletromagnéticas. As ondas mecânicas nunca se propagam no vácuo. As eletromagnéticas se propagam no vácuo com velocidade de 300.000 km/s, sendo que em outros meios a velocidade é menor. As ondas caracterizam-se também quanto à direção de propagação: longitudinal, transversal e mista. Quando as vibrações ocorrem na mesma direção de propagação têm-se ondas longitudinais. Já nas ondas transversais as vibrações ocorrem perpendicularmente à direção de propagação. Por último as ondas mistas constituem-se de vibrações simultaneamente transversais e longitudinais.

A fronteira entre a região já atingida pela onda e a região ainda não atingida é chamada *frente de onda*, podendo ser descrita também como o conjunto de pontos do meio que são alcançados no mesmo instante pela mesma fase de uma onda. Em ondas sonoras, percebe-se o som quando as partículas do ar entram em movimento. No momento em que estas partículas vibram (uma frente de onda empurrando e gerando uma nova frente de onda) é que haverá a propagação do som. *Raio de onda* é uma linha orientada que tem origem na fonte de ondas e é perpendicular às frentes

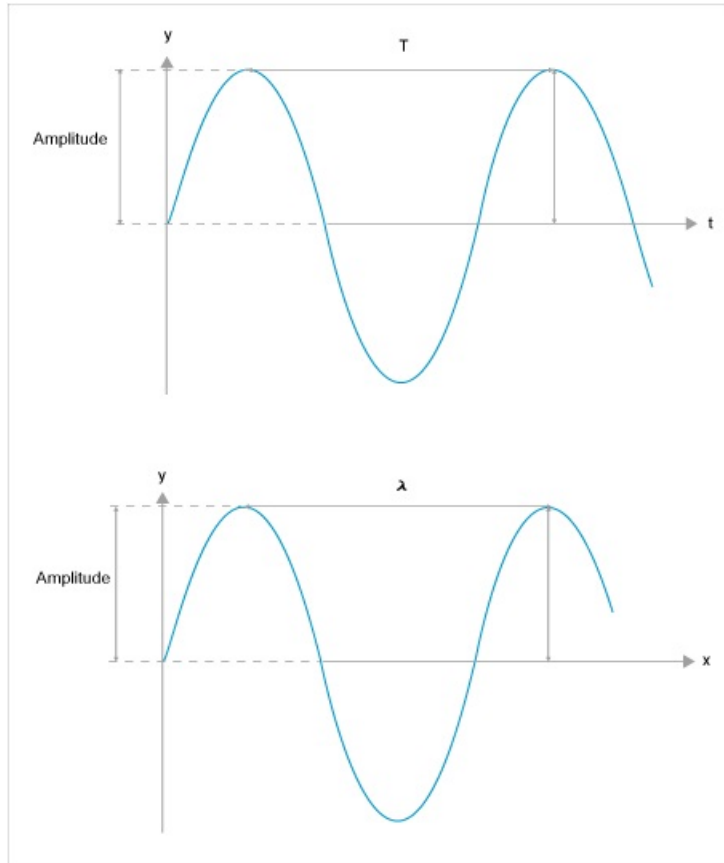


Figura 2.1: Grandezas físicas de uma onda: (a) período T e (b) comprimento de onda λ .

de onda. Os raios de onda indicam a direção e o sentido de propagação das ondas num meio.

O período é definido pelo tempo que um ciclo do sinal demora a ser percorrido e a sua unidade é o segundo (s), como ilustrado na Figura 2.1a. O comprimento de onda é a distância que dois ciclo consecutivos apresentam no espaço, como ilustrado na Figura 2.1b. O período e o comprimento de onda estão relacionados pela velocidade de propagação da onda no meio (v) como descrito na Equação 2.1. A frequência (f) corresponde ao número de vezes que um ciclo é percorrido por unidade de tempo, sendo o inverso do seu período T , como mostrado na Equação 2.2.

$$v = \lambda f \tag{2.1}$$

$$f = 1/T \tag{2.2}$$

De uma forma geral, o som é uma sensação que resulta da percepção de distúrbios das moléculas de um meio num certo intervalo de tempo. O som percebido resulta de rápidas variações da pressão atmosférica que se propagam sob a forma de ondas até os ouvidos. Estas ondas provocam variações de pressão na membrana auricular, as quais são transmitidas ao cérebro através de impulsos elétricos que provocam a percepção sonora.

A velocidade de propagação das ondas sonoras é dependente do meio em que se propagam, sendo maior na água que na atmosfera. Na atmosfera, a velocidade de propagação é independente da pressão atmosférica, variando somente em função da temperatura, sendo diretamente proporcional à raiz quadrada da temperatura em Kelvin. A uma temperatura de 21° C, a velocidade do som corresponde a cerca de 344 m/s na atmosfera, 1520 m/s no mar e 1558 m/s no corpo humano.

O ouvido humano percebe ondas sonoras com frequências compreendidas aproximadamente entre os 20 Hz (graves) e os 20 kHz (agudos). Contudo, as frequências abaixo dos 20 Hz (infrassons) e acima dos 20 kHz (ultrassons) são captadas pelo nosso corpo podendo provocar reações no cérebro. A frequência de uma onda é a grandeza que determina a altura tonal com que o som é percebido.

2.2 O modelo do arranjo

Pode-se resumir o problema de estimação de DOA basicamente em determinar como a energia é distribuída no espaço, onde a fonte é um ponto com alta concentração de energia. Por isso, os métodos usados nesse projeto são chamados métodos de estimação espectral espacial [1].

Primeiro deve-se desenvolver um modelo para os sinais recebidos pelo arranjo de sensores. Este desenvolvimento é feito baseado em considerações simples: as fontes são consideradas suficientemente distantes do arranjo de sensores para que as

frentes de onda possam ser consideradas planas, assume-se que tanto a fonte como o arranjo encontram-se no mesmo plano, que a fonte é pontual e que o meio permite propagação homogênea. Tendo em vista os critérios anteriormente citados, o único parâmetro que caracteriza a fonte é o ângulo θ , que define a direção de chegada do sinal da fonte.

Outra consideração relevante é o conhecimento do número de fontes. No caso deste número não ser conhecido, a sua estimação caracteriza um problema conhecido como problema de detecção [4]. Neste projeto, é considerado o caso de uma única fonte, no entanto, uma generalização é possível através do princípio da superposição.

Seja $x(t)$ o sinal recebido em um ponto de referência, que pode ser um dos sensores do arranjo, e seja τ_k o tempo necessário para a onda percorrer a distância entre o ponto de referência e o sensor k , tem-se o sinal de saída $y_k(t)$ no sensor k descrito como:

$$y_k(t) = h_k(t) * x(t - \tau_k) + e_k(t) \quad (2.3)$$

onde $h_k(t)$ é a resposta ao impulso no k -ésimo sensor e $e_k(t)$ é o ruído. A resposta ao impulso $h_k(t)$ é conhecida e $x(t)$ assim como τ_k são desconhecidos. A resposta ao impulso no k -ésimo sensor $h_k(t)$ considera a resposta do meio de propagação e do sensor.

O modelo da Equação 2.3 pode ser simplificado ao assumirmos os sinais de banda estreita. Alguns requisitos são necessários para esta simplificação, que serão demonstrados a seguir. Em 2.4 define-se $X(\omega)$, a transformada de Fourier do sinal $x(t)$.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.4)$$

Do mesmo modo, são definidas $H_k(\omega)$, $Y_k(\omega)$ e $E_k(\omega)$ como sendo as transformadas de Fourier da resposta ao impulso no k -ésimo sensor $h_k(t)$, do sinal $y_k(t)$ e do ruído $e_k(t)$ respectivamente. A partir das definições e das propriedades da transformada de Fourier [5], pode-se obter a Equação 2.5.

$$Y_k(\omega) = H_k(\omega)X(\omega)e^{-j\omega\tau_k} + E_k(\omega) \quad (2.5)$$

Visto que $H_k(\omega)$ deve ser diferente de zero e considerando como plana a resposta do meio para um sinal de banda estreita, a função de transferência no sensor deve passar frequências próximas a $\omega = \omega_c$, que é a frequência central do sinal recebido. Além disso tem-se $H_k(\omega) = 1$

A partir da Equação 2.5, pode-se definir a Equação 2.6, a qual descreve o *steering vector*. Este é o vetor que relaciona as características e posições dos sensores ao ângulo de direção de chegada da fonte. Note que a Equação 2.6 é função somente de θ , uma vez que as posições e características dos sensores são conhecidas.

$$\mathbf{a}(\theta) = [e^{-j\omega\tau_1} \quad \dots \quad e^{-j\omega\tau_M}]^T \quad (2.6)$$

onde θ é o ângulo de direção de chegada da fonte e M o número de sensores.

O *steering vector* é utilizado como modelo para qualquer arranjo de sensores. A relação entre τ e o ângulo de interesse θ é definida pela geometria do arranjo. Os algoritmos implementados neste projeto assumem o *steering vector* conhecido e utilizam-no como base para seus cálculos.

Capítulo 3

Arranjo Linear Uniforme

O arranjo de sensores é a primeira parte do protótipo do sistema de estimação de direção de chegada. Ele é responsável pela captação do sinal da fonte geradora em diferentes pontos através dos sensores. Neste projeto é utilizado o arranjo linear e uniforme, que possui esta denominação porque os sensores estão dispostos sobre uma mesma reta e uniformemente espaçados. O arranjo utilizado no projeto é constituído de uma base de acrílico com suporte para oito microfones, conforme ilustrado na Figura 3.1.

3.1 Sensores

Neste projeto os sensores são microfones e para os experimentos realizados a fonte geradora foi uma caixa acústica emitindo um tom. Foram utilizados microfones da marca Behringer modelo XM8500 Ultravoice, que foram escolhidos porque atualmente estão baratos e possuem resposta em frequência e qualidade suficientes para a aplicação no projeto. Os microfones são do tipo cardióide, que captam com maior eficácia os sons emitidos na sua frente, e possuem dois estágios de filtragem para diminuir o ruído de fundo, além de serem robustos para a mobilidade do sistema. A implementação de um arranjo genérico deve considerar o tipo e a disposição dos microfones utilizados. Aconselha-se o uso de microfones omnidirecionais ou cardióides, pois a diretividade excessiva pode comprometer a aquisição do sinal.

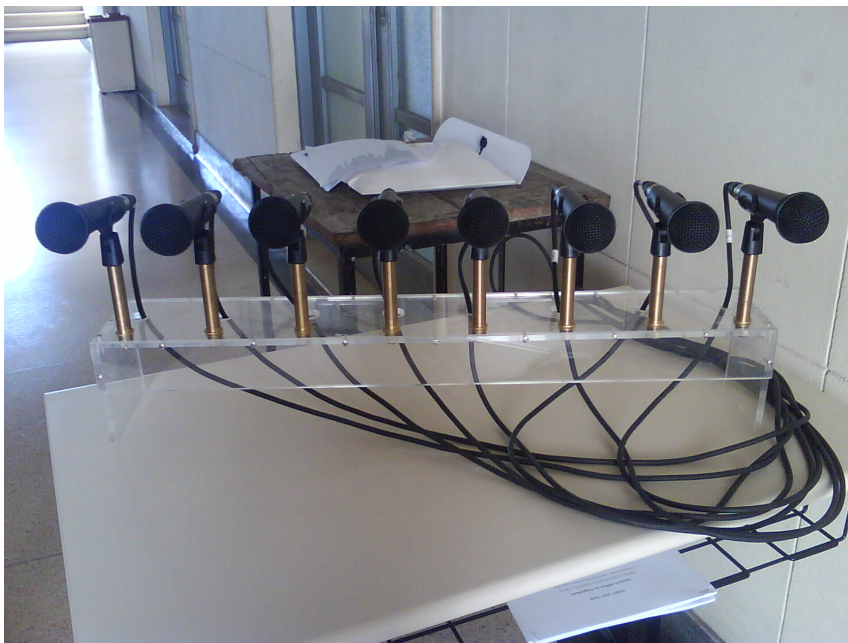


Figura 3.1: Arranjo linear de oito microfones.

3.2 O Arranjo Linear Uniforme

Buscando relacionar os sinais na saída do arranjo de sensores com a direção da chegada do sinal, elaborou-se uma modelagem do arranjo linear uniforme. As saídas dos sensores são as informações disponibilizadas pelo sistema, precisando estimar a direção de chegada a partir das amostras recebidas em cada sensor [6].

Define-se como direção de chegada o ângulo que a direção de propagação do sinal forma com o eixo perpendicular ao arranjo, como representado na Figura 3.2. Pela geometria do arranjo, verifica-se que o sinal incidirá primeiramente no sensor 0, em seguida no sensor 1, até que alcance o sensor $M-1$, onde M é o número de sensores. Assim, observa-se que há um atraso de tempo Δt entre os sensores e que é dado pelo quociente entre a distância Δs percorrida pelo sinal e a velocidade de propagação do sinal v , mostrado na Equação 3.1:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} \quad (3.1)$$



Figura 3.2: Sinais incidentes em um arranjo linear.

A partir da Figura 3.2, é imediato verificar que: $\Delta s = d \sin \theta$. Logo, ao substituir Δs na Equação 3.1, obtém-se a Equação 3.2:

$$\Delta t = \frac{d \sin \theta}{v} \quad (3.2)$$

Este atraso no tempo implica em uma defasagem entre os sinais recebidos por dois sensores consecutivos, que é denominado o atraso de fase (Φ). Na Equação 3.3, tem-se uma definição de frequência angular (ω) em função da frequência (f), bem como em função da velocidade (v) e do comprimento de onda (λ). Descreve-se a definição de Φ em função de ω e do intervalo de tempo (Δt) na Equação 3.4.

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad (3.3)$$

$$\Phi = \omega \Delta t \quad (3.4)$$

Ao substituir as Equações 3.2 e 3.3 em 3.4, obtém-se:

$$\Phi = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (3.5)$$

Portanto, observa-se na Equação 3.5 que a partir do atraso de fase Φ é possível encontrar o valor da direção de chegada θ . Pelas características descritas acima,

sendo o primeiro sensor o ponto de referência e tendo o *steering vector* para um arranjo genérico definido na Equação 2.6, o *steering vector* para ULA é escrito como na Equação 3.6 [7].

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[1 \quad e^{\frac{-j\omega d \sin \theta}{v}} \quad \dots \quad e^{\frac{-(M-1)j\omega d \sin \theta}{v}} \right]^T \quad (3.6)$$

Pela versão espacial do teorema da amostragem, tem-se que a condição $d \leq \lambda/2$ deve ser obedecida para evitar *aliasing* [8]. Este efeito é similar ao que ocorre caso se trabalhe com frequência de amostragem (no tempo) abaixo da mínima. Ao fazer a amostragem no tempo contínuo de uma sinal com frequência f_c , a frequência de amostragem f_0 deve respeitar o teorema da amostragem de Shannon para evitar *aliasing*, conforme a Equação 3.7.

$$f_0 \geq 2f_c \quad (3.7)$$

Considerando o caso do ULA, o vetor $\mathbf{a}(\theta)$ é unicamente definido se e somente se $|\omega_c| \leq \pi$, isto é não existe *aliasing* espacial. Isto é equivalente a $|f_c| \leq \frac{1}{2}$, que também pode ser escrito como $d|\sin\theta| \leq \frac{\lambda}{2}$, o que é satisfeito se $d \leq \frac{\lambda}{2}$. Em fins práticos, a distância entre os microfones limita as frequências dos sinais de entrada. A distância entre os microfones foi fixada em 10 cm. Sendo assim, o sinal de entrada está limitado à frequência mínima de 1,7 kHz, que foi escolhida para os testes neste projeto, devido a existência de pouco ruído no ambiente de testes e respeitando o teorema da amostragem espacial. No entanto, os microfones são capazes de captar sinais de diversas frequências, de acordo com a sua resposta em frequência, sendo necessário um processamento nos sinais dos sensores anteriormente à estimação de direção de chegada, que será apresentado nos próximos capítulos.

Capítulo 4

Aquisição dos sinais

A segunda parte do sistema é a gravação dos sinais do arranjo linear, composta pela placa de aquisição *Firepod* e pelo computador portátil para gravação dos sinais obtidos com os sensores do ULA. Esta é a interligação do arranjo com o algoritmo de estimação de DOA. A placa de aquisição recebe os sinais dos sensores e os digitaliza para o computador gravar. A aquisição do sinal deve ser feita por uma interface e um *software* que permitam gravação simultânea dos sinais dos oitos sensores. A gravação no computador é feita através do *software Matlab*[®].

4.1 Placa de aquisição *Firepod*

A digitalização do sinal e a conexão do arranjo são feitas através da placa de aquisição de áudio *Firepod* da *PreSonus* mostrada na Figura 4.1.



Figura 4.1: Placa de aquisição *Firepod* de oito canais.

O *Firepod* é uma interface de gravação equipada com oito pré-amplificadores para microfones de qualidade 24 bit/96 kHz. O *Firepod* foi projetado para oferecer baixo nível de ruído e alto *headroom* nos pré-amplificadores de microfone, sendo perfeito para gravação das mais variadas fontes sonoras. Oito potenciômetros no painel frontal possibilitam ajustar facilmente o nível de cada pré-amplificador, na faixa de +14 dB até +55 dB. O *phantom power* (+48 V), alimentação contínua do circuito ativo dos microfones via cabo, está disponível em grupo de quatro canais. O *Firepod* possui oito saídas de linha balanceadas, assim como duas saídas principais balanceadas. Ele permite a gravação simultânea dos oito canais e tem conexão *firewire* (padrão IEEE1394), encontrada na maioria dos computadores atuais, o que tornou o arranjo mais portátil. A faixa da resposta em frequência dos pré-amplificadores ($\pm 0,5$ dB) vai de 20 Hz a 50 kHz.

4.2 Gravação

No projeto foi usado o programa *Matlab*[©] para fazer o processamento dos sinais assim como a aquisição dos mesmos, sendo assim só houve a necessidade de um programa para todo o processo [9]. O *Matlab*[©] reconhece automaticamente o *Firepod*, facilitando então a comunicação entre eles. A aquisição de dados é feita através do pacote *pa_wavplay* para o *Matlab*[©] que grava e reproduz multicanais, pacote disponível no site [10].

Para fazer as gravações deve-se fazer o *download* do pacote *pa_wavplay* e salvá-lo no diretório principal do *Matlab*[©]. É necessário também adicionar seu endereço no arquivo de *path* do *Matlab*[©] em *File-SeePath*. Este pacote inclui três arquivos para gravar e reproduzir sinais de áudio. Para gravar é usado o comando *pa_wavrecord*, que retorna uma matriz com o número de colunas de acordo com o número de canais desejados e o número de linhas com o número de amostras escolhido.

Um dos fatores de maior relevância é o estágio de pré-amplificação presente no *Firepod* [11]. Necessita-se manter as características de fase do sinal, a fim de se determinar a direção de chegada. Portanto, os pré-amplificadores não devem introduzir atrasos de fase e seus ganhos devem ser iguais para todos os microfones.

Existem alguns cuidados que devem ser tomados durante a gravação, segundo as restrições do modelo matemático desenvolvido:

- Todos os microfones precisam estar alinhados e com a mesma distância entre si [12].
- O tom a ser observado deve ser bem reproduzido, ou seja, deve-se evitar a introdução de chiados ou zumbidos pela caixa de som.
- O gerador de sinal e os microfones devem estar suficientemente afastados para que as frentes de onda que chegam nos microfones possam ser consideradas planas.

Capítulo 5

Algoritmos utilizados

O processamento para a estimação de direção de chegada é o último estágio do sistema. Foi implementado um algoritmo na linguagem do *Matlab*[©] responsável por ler e tratar os sinais digitalizados $\mathbf{x}(n)$ e estimar a direção de chegada do sinal com dois métodos conhecidos: *Capon* e *Beamforming*¹. O resultado é mostrado por gráficos no *Matlab*[©], os quais são apresentados no Capítulo 6.

5.1 Tratamento dos sinais dos sensores

O sinal usado para testes é um tom de 1,7 kHz, o qual foi escolhido respeitando o teorema da amostragem para a distância entre os sensores de 10 cm, conforme descrito no Capítulo 3. Assume-se um sinal de banda estreita da forma $\mathbf{x}(n) = \mathbf{s}(n)e^{j\omega n}$, onde $\mathbf{s}(n)$ denota o sinal de banda base associado a $\mathbf{x}(n)$. Pelo fato de o sinal utilizado não ter a característica de banda-base, fez-se necessário um tratamento no sinal para permitir o atraso por meio da multiplicação de uma exponencial complexa. Como o sinal real é uma cossenóide, sabe-se que $\cos(\omega n) = \frac{e^{j\omega n} + e^{-j\omega n}}{2}$, ou seja, tem-se um espectro negativo simétrico em relação à origem que poderá ser eliminado, tornando o espectro do sinal resultante próximo ao que é desejado (sinal analítico) por meio do seguinte procedimento:

¹*Beamforming* neste contexto é uma técnica de estimação de DOA; não confundir com o outro emprego clássico de arranjos de sensores que leva o mesmo nome e é conhecido em português como conformação de feixe.

1. É projetado um filtro $H(e^{j\omega})$ que irá filtrar o sinal em torno de 1,7 kHz (somente a frequência positiva). Tal projeto foi feito por meio de dois filtros: um passa-banda centrado em 1,7 kHz (possuindo um espectro simétrico) e de banda estreita, e um segundo filtro, um passa-baixas deslocado para a direita (pela multiplicação pela exponencial complexa $e^{j0.5\pi n}$) de modo a, quando convoluído com o primeiro, eliminar o espectro negativo do passa-banda, gerando um filtro como indicado na Figura 5.1.

2. Filtramos o sinal pelo filtro projetado no item anterior de modo a termos um sinal analítico possuindo somente as frequências (positivas) em torno de 1,7 kHz.

Este filtro evita também possível *aliasing* devido a frequências interferidoras que não respeitarem o teorema da amostragem espacial. O experimento pode então usar o sinal assim tratado para fazer a estimação da direção de chegada utilizando as equações apresentadas.

5.2 Algoritmos de DOA

No projeto são usados dois métodos conhecidos de estimação de direção de chegada: *Capon* e *Beamforming*. Ambos têm como características básicas: assumir conhecido o *steering vector* ($\mathbf{a}(\theta)$), não supor propriedades estatísticas do sinal (são considerados não paramétricos) e baseiam-se no princípio de que um filtro espacial pode ajustar seus coeficientes para ressaltar o sinal proveniente de uma determinada direção [1].

O *steering vector* é definido pela geometria do arranjo de sensores especificada no Capítulo 3. Para o ULA de 8 sensores, ele é definido na Equação 5.1.

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[1 \quad e^{-\frac{j\omega d \sin \theta}{v}} \quad e^{-\frac{2j\omega d \sin \theta}{v}} \quad \dots \quad e^{-\frac{7j\omega d \sin \theta}{v}} \right]^T \quad (5.1)$$

A amostragem espacial da frente de onda realizada pelo arranjo de sensores é análoga à amostragem temporal feita pelo linha de atraso, em inglês *delay line*, de um filtro FIR. As Figuras 5.2 e 5.3 mostram sistemas típicos de filtro temporal FIR

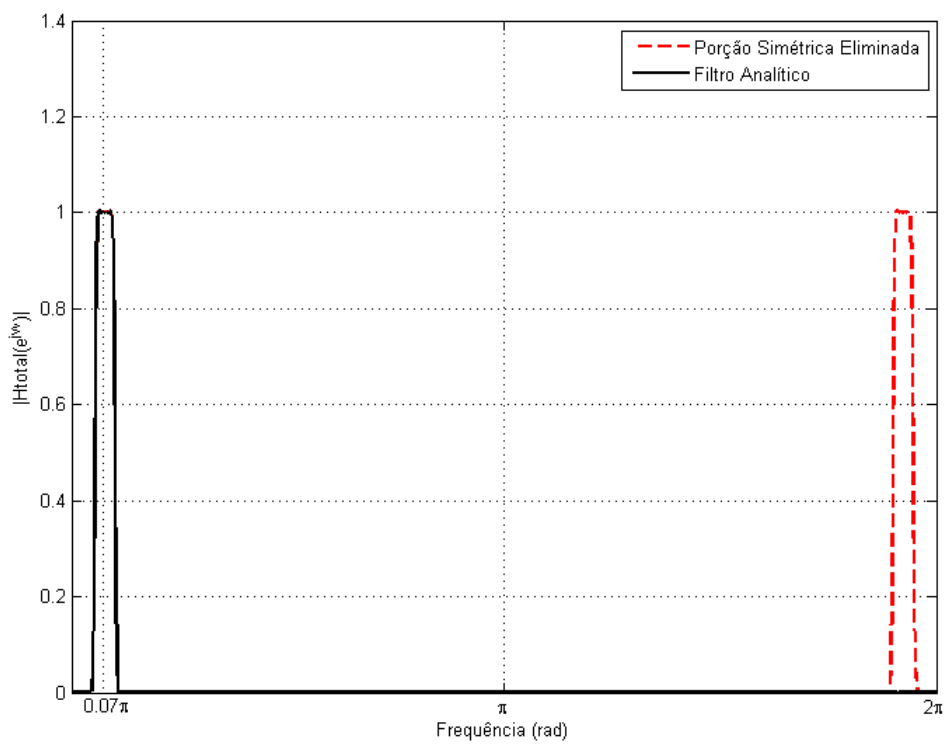


Figura 5.1: Resposta em frequência dos filtros.

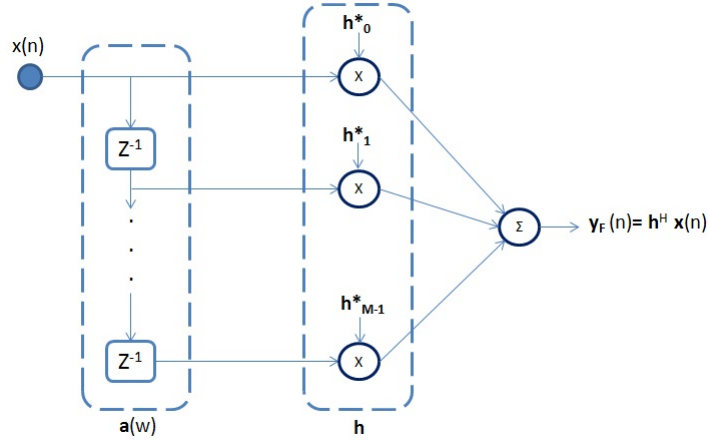


Figura 5.2: Amostragem e filtragem temporal.

e filtro espacial usando ULA, respectivamente. Na Equação 5.2 define-se o sinal de saída para o caso de filtro FIR.

$$\mathbf{y}_F(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h_k x(n-k) \equiv \mathbf{h}(n) * \mathbf{x}(n) \equiv \mathbf{h}^H \mathbf{x}(n) \quad (5.2)$$

onde $\mathbf{h} = [h_0 \ \cdots \ h_{M-1}]$ é um vetor com os pesos dos filtros e $\mathbf{x}(n) = [x(n) \ \cdots \ x(n-M+1)]^T$ o vetor sinal de entrada. Define-se \mathbf{h}^H , o hermitiano de \mathbf{h} , como sendo $\mathbf{h}^H = [\mathbf{h}^*]^T$.

Um filtro temporal pode atenuar ou amplificar determinadas frequências, dependendo de escolhas apropriadas do vetor \mathbf{h} . Desse modo, sendo $\mathbf{y}_F(n)$ a saída do filtro para uma entrada senoidal discreta $\mathbf{x}(n)$, obtém-se:

$$\mathbf{y}_F(n) = \mathbf{h}^H \mathbf{a}(\omega) \mathbf{x}(n) \quad (5.3)$$

onde $\mathbf{a}(\omega)$ é o equivalente ao *steering vector* para o filtro temporal, como ilustrado na Figura 5.2.

Selecionando \mathbf{h} de forma a minimizar $\mathbf{h}^H \mathbf{a}(\omega)$, tem-se a atenuação da energia de $\mathbf{y}_F(n)$ na frequência ω . Sendo $\mathbf{x}(n)$ o vetor das amostras dos sensores e substituindo na Equação 5.3, considerando a direção de chegada θ para o arranjo linear, chega-se à Equação 5.4 para descrição da saída do filtro espacial.

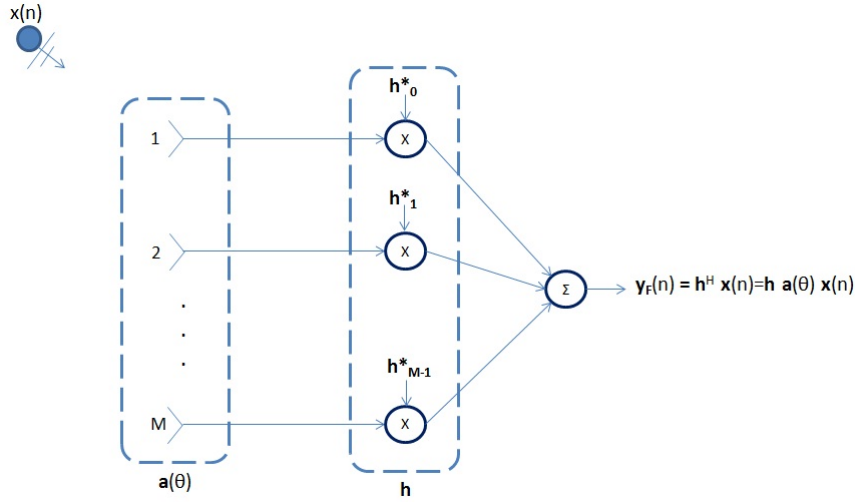


Figura 5.3: Amostragem e filtragem espacial usando uma ULA.

$$\mathbf{y}_F(n) = [\mathbf{h}^H \mathbf{a}(\theta)]x(n) \quad (5.4)$$

A Equação 5.4 demonstra que um filtro espacial pode ser selecionado de forma a atenuar o sinal vindo de uma determinada direção θ , fazendo $\mathbf{h}^H \mathbf{a}(\theta)$ mínimo. Essa é a consideração base dos algoritmos de DOA descritos nesta seção.

Tem-se então a energia do sinal de saída do filtro espacial definida na Equação 5.5, sendo \mathbf{R} a matriz de correlação dos sinais definida na Equação 5.6.

$$E[\mathbf{y}_F^*(n)\mathbf{y}_F(n)] = E[\mathbf{h}^H \mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)\mathbf{h}] = \mathbf{h}^H \mathbf{R} \mathbf{h} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)] \quad (5.6)$$

onde $\mathbf{x}(n) = [x_0 \ x_1 \ \dots \ x_{(M-1)}]^T$ sendo M o número de microfones do arranjo.

Obtém-se assim uma descrição da energia do sinal vindo da direção θ , na qual $\mathbf{h}^H \mathbf{R} \mathbf{h}$ terá um pico na direção de chegada do sinal da fonte quando examinada no ângulo de interesse. Dependendo da forma como as condições anteriores são formuladas, pode-se deduzir diferentes métodos de estimação da direção de chegada.

5.2.1 Beamforming

No caso do *Beamforming*, pode-se atrasar os sinais dos sensores de forma que sua soma seja construtiva para uma dada direção. A partir da Equação 5.4, pode-se incluir uma restrição para que o sinal chegando da direção θ não sofra distorções, ou seja:

$$\mathbf{h}^H \mathbf{a}(\theta) = 1 \quad (5.7)$$

Se $\mathbf{y}_F(n)$ na Equação 5.5 for espacialmente branco (ou seja, sinais descorrelacionados), a energia do sinal de saída do filtro pode ser considerado proveniente de todas as direções:

$$E[|\mathbf{y}_F(n)|^2] = \mathbf{h}^H \mathbf{h} \quad (5.8)$$

Deseja-se que o sinal na saída do filtro espacial atenuie todos os sinais chegando no arranjo de sensores exceto na direção θ de interesse. Utilizando as informações acima, um problema de otimização pode ser formulado de forma que \mathbf{h} minimize a energia das direções não desejadas:

$$\min \mathbf{h}^H \mathbf{h} \quad \text{sujeito à condição} \quad \mathbf{h}^H \mathbf{a}(\theta) = 1 \quad (5.9)$$

Utilizando a solução para problemas de otimização com restrições, tem-se a solução para a Equação 5.9 [1]:

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)} \quad (5.10)$$

Pode-se substituir a Equação 5.10 na Equação 5.5 para calcular a energia do sinal de saída para o método *Beamforming*:

$$E[|\mathbf{y}_F(n)|^2] = \mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{R}\mathbf{a}(\theta) \quad (5.11)$$

O método do *Beamforming* consiste então em encontrar o pico mais alto da Equação 5.11.

5.2.2 Capon

O método de *Capon* [13] objetiva estimar a energia na direção de interesse, anulando ou minimizando a interferência nas demais direções. De forma similar ao *Beamforming*, o método *Capon* obedece às restrições das Equações 5.7 e 5.8, porém sua função objetiva minimizar a energia do sinal recebido pelo arranjo de sensores, ou seja,

$$\min \mathbf{h}^H \mathbf{R} \mathbf{h} \quad \text{sujeito à condição} \quad \mathbf{h}^H \mathbf{a}(\theta) = 1 \quad (5.12)$$

Desta forma, o objetivo do *Capon* é atenuar qualquer outro sinal que chegue no arranjo com a DOA diferente de θ , diferentemente do *Beamforming* que presta atenção a todas as direções. A solução do problema de otimização da Equação 5.12 é dada por:

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (5.13)$$

A energia do sinal de saída pelo método *Capon* pode ser obtida substituindo a Equação 5.13 na Equação 5.5:

$$E[|\mathbf{y}_F(n)|^2] = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (5.14)$$

Similar ao método *Beamforming*, o pico mais alto encontrado pela Equação 5.14 é o valor estimado da direção de chegada.

Capítulo 6

Resultados

Os algoritmos de estimação de direção de chegada foram implementados e testados no *Matlab*[®] com sinais sintéticos e os resultados demonstram a correção na implementação dos algoritmos.

Inicialmente, as gravações foram feitas com uma fonte geradora na frequência de 1,7 kHz dentro do estúdio do Laboratório de Voz do IME, por ser um ambiente com menos ruído. No entanto, os resultados não foram satisfatórios, pois apresentavam mais de uma fonte geradora, além de erros grandes. A hipótese levantada para explicar o problema foi o tamanho reduzido do estúdio, o que causa muita reverberação e não permite com que as frentes de ondas sejam aproximadas como planas. Por isso o algoritmo detectava mais de uma fonte. Com o objetivo de verificar a validade destas hipóteses, novos testes foram feitos em um ambiente maior e que no entanto apresentava ruído. Os resultados mostrados a seguir foram obtidos a partir de testes feitos na sala no Laboratório de Voz do IME.

O resultado do algoritmo é representado graficamente para os dois métodos implementados, *Capon* e *Beamforming*, conforme nas Figura 6.1 e 6.2, que mostram um gráfico para um sinal chegando ao arranjo com 0° e 15° respectivamente. O eixo das abcissas contém os ângulos entre $(-90^\circ; 90^\circ)$ e o eixo das ordenadas exibe os resultados dos algoritmos para cada ângulo. Para a melhor visualização, o resultado foi normalizado com o maior valor, isto é, todo o vetor de resultado foi dividido pelo seu valor máximo. Foram feitos testes com a fonte em ângulos no intervalo de $(-60^\circ; 60^\circ)$ com diferença de 15° , ou seja, 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , -15° , -30° , -45° ,

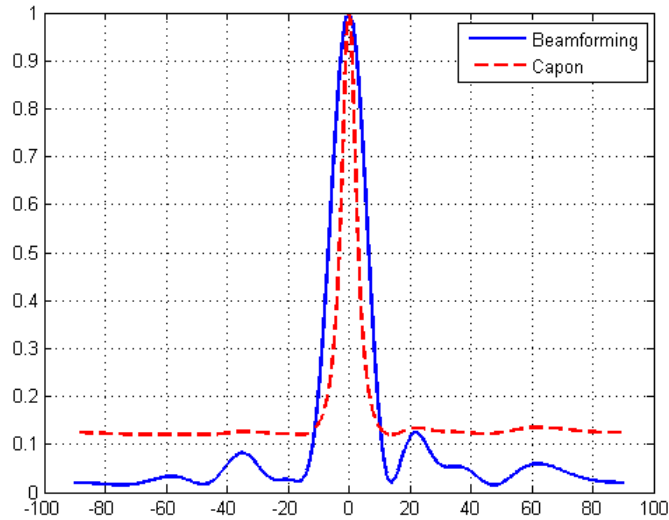


Figura 6.1: Resultado do algoritmo para um ângulo de chegada de 0° .

-60° . O ângulo real entre a frente de onda e o arranjo foi medido através de um transferidor. O transferidor foi colado na base do arranjo e a linha colocada na fonte, servindo como guia para verificar o ângulo no transferidor. Devido as incertezas nas medidas, tem-se uma faixa de erro de $\pm 5^\circ$. Esta incerteza decorre das limitações do equipamento utilizado, do método de medida escolhido e da habilidade e capacidade do experimentador.

Os dois algoritmos apresentaram resultados bem próximos do ângulo conhecido da fonte de sinal. Apesar do comportamento similar dos algoritmos, percebe-se como principal diferença a largura do pico, onde uma largura maior representa menor tolerância a interferências. Desse modo, o *Capon* é considerado mais preciso que o método *Beamforming*. As tabelas de resultados apresentadas neste capítulo possuem o resultado do pico comum dos dois métodos.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados de DOA para os ângulos testados. Os resultados estão mais de 80% dentro de uma margem de erro do projeto de $\pm 5^\circ$. Pode-se observar que os maiores erros ocorrem para ângulos maiores, devido ao microfone ser do tipo cardióide. Os erros observados nas medições são devidos, principalmente,

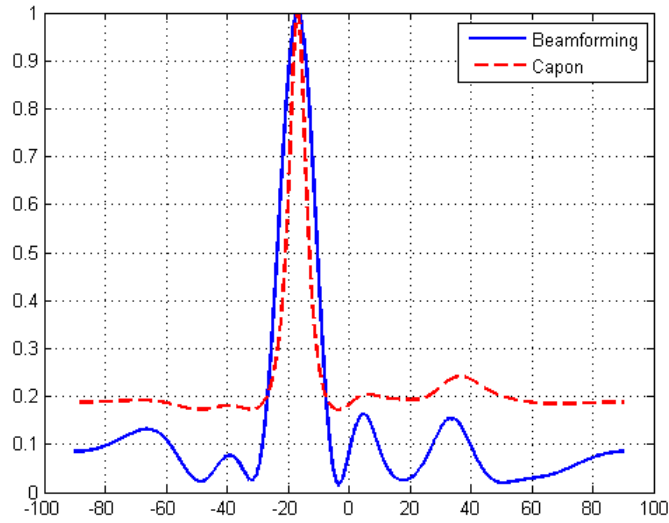


Figura 6.2: Resultado do algoritmo para um ângulo de chegada de 15° .

a problemas relacionados a coletas de dados: nas gravações feitas em laboratório, a distância entre fonte e microfones não é a ideal (em torno de 3m) para a aproximação de frentes de ondas planas, o alinhamento dos microfones e a medição do ângulo foram feitos visualmente com o auxílio de um transferidor. Mesmo assim, estes erros ficaram dentro da margem de erro esperada para este projeto.

Ângulo esperado (θ_d)	Ângulo estimado (θ_e)	Diferença ($\Delta\theta = \theta_d - \theta_e$)
0°	$0,3^\circ$	$0,3^\circ$
15°	$15,2^\circ$	$0,2^\circ$
30°	$27,6^\circ$	$2,4^\circ$
45°	$39,3^\circ$	$5,7^\circ$
60°	$53,4^\circ$	$6,6^\circ$
-15°	$-15,9^\circ$	$0,9^\circ$
-30°	-33°	3°
-45°	$-44,8^\circ$	$0,2^\circ$
-60°	$-59,1^\circ$	$0,8^\circ$

Tabela 6.1: Resultados do algoritmo de DOA.

Os resultados mostrados na Tabela 6.1 e Figura 6.1 foram obtidos a partir de uma janela de gravação de 4 segundos de sinal. A utilização de uma janela amostral menor acelera o processamento da estimação da direção da fonte, o que em algumas aplicações é importante, como em videoconferência. Deste modo, testes adicionais foram efetuados para quantificar o efeito da redução do tempo da janela de gravação no desempenho do algoritmo.

Ângulo esperado	$\Delta\theta$ (1seg)	$\Delta\theta$ (2seg)	$\Delta\theta$ (3seg)
0°	$1,1^\circ$	$0,2^\circ$	$0,1^\circ$
15°	$0,2^\circ$	$2,2^\circ$	$1,5^\circ$
30°	$2,6^\circ$	$0,5^\circ$	$1,5^\circ$
45°	$0,2^\circ$	$0,8^\circ$	$0,4^\circ$
60°	$0,1^\circ$	9°	$8,4^\circ$
-15°	$0,3^\circ$	$2,6^\circ$	$0,4^\circ$
-30°	1°	$0,8^\circ$	$2,4^\circ$
-45°	$1,7^\circ$	$0,4^\circ$	$1,1^\circ$
-60°	$8,5^\circ$	$4,8^\circ$	5°

Tabela 6.2: Resultados do algoritmo de DOA com tempo de gravação diferentes.

Os testes foram feitos com 1, 2 e 3 segundos, apresentados na Tabela 6.2. Comparando os resultados, percebe-se que mesmo com uma janela de 1 segundo de gravação do sinal a diferença é pequena em relação a janela de 4 segundos e dentro da faixa de erro do projeto.

Além disso, um modo contínuo de execução foi implementado, onde são gravados os sinais do arranjo na janela de tempo definida e os dois métodos são calculados para em seguida repetir o processo. Deste modo, se a fonte mudar de localização, o algoritmo consegue detectar sua nova posição.

Outra forma implementada de exibir o resultado é o gráfico na forma polar, mostrado na Figura 6.3, que é usado para os diagramas de irradiação de antenas. Neste gráfico os ângulos estão no intervalo de $(0^\circ;180^\circ)$ e não mais no intervalo de $(-90^\circ;90^\circ)$. Com isso, o ângulo do sinal de interesse passa de 0° para 90° , como pode ser observado na figura.

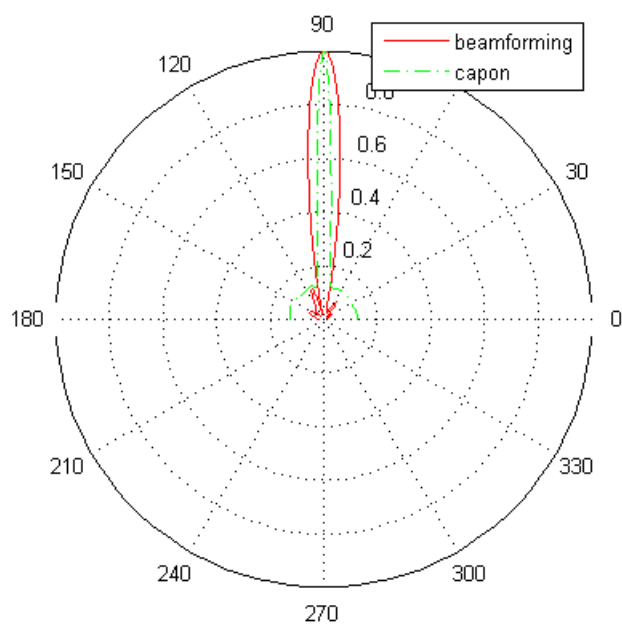


Figura 6.3: Resultado do algoritmo na forma polar para um ângulo de 0° .

Capítulo 7

Conclusão

O objetivo principal deste projeto é a implementação de um sistema para determinar a direção de chegada de sinais de áudio de banda estreita. O processamento dos sinais adquiridos de um arranjo de microfones foi feito por meio de dois algoritmos de estimação de direção de chegada, *Capon* e *Beamforming*, e seus desempenhos foram comparados. Os algoritmos são objetivos e simples, no entanto são limitados a algumas aplicações.

Foi desenvolvido um programa na linguagem *Matlab*[©] que grava e trata os sinais do arranjo de oito microfones e implementa os dois algoritmos de estimação de direção de chegada para um sinal de áudio de banda estreita. Construiu-se um protótipo para os testes com o arranjo linear uniforme composto de uma base de acrílico e oito microfones, com a interface de digitalização dos sinais (*Firepod*) e o computador portátil com o *software Matlab*[©]. Este protótipo foi montado no Laboratório de Voz do IME, onde foram feitos os testes.

Inicialmente o alinhamento dos microfones do ULA dificultou o funcionamento do projeto causando interferência nos resultados. A diferença de fase entre os sinais dos microfones é essencial para os métodos implementados de estimação, sendo diretamente relacionada à distância entre os microfones que deve ser uniforme para caracterizar o ULA, conforme descrito no Capítulo 3. Esse alinhamento foi feito visualmente no projeto e deve-se prestar bastante atenção a esta questão antes de iniciar a gravação.

A pré-amplificação é um item crítico e pode, pela inserção de erros de fase, interferir no desempenho do algoritmo. Inicialmente, foram usados pré-amplificadores não profissionais que causaram interferências nos resultados. Como solução, foi comprado um amplificador profissional, fácil de ser encontrado no mercado nacional, com entrada para oito canais, o *Firepod*. Com a nova placa de amplificação e digitalização com conexão *firewire* pôde-se usar computadores portáteis. Os microfones escolhidos possuem um padrão cardióide polar, que responde com mais eficiência a sons vindos da frente, e uma resposta em frequência de 50 Hz até 15 kHz. Além de serem facilmente adquiridos no mercado e com um custo acessível.

Uma das dificuldades enfrentadas foi a gravação de oito canais simultaneamente. Desejava-se usar somente um *software* para todo o processo, tanto para gravação como para o processamento dos sinais. Por isso, foi pesquisada a possibilidade de fazê-la com o *Matlab*[©] e conseguiu-se através de um pacote desenvolvido com este objetivo. Este pacote é simple e intuitivo, além de ser disponibilizado gratuitamente.

Outra dificuldade enfrentada foi inferir o ângulo real da fonte, visto que foi necessário definir o ângulo da fonte geradora para definir o erro de estimação do algoritmo. A medida do ângulo da fonte em relação ao ULA foi feita com o auxílio de um transferidor e uma linha de referência.

Mesmo com todos os itens críticos apresentados anteriormente, os erros dos algoritmos ficaram dentro da faixa de erro. O protótipo teve desempenho satisfatório, tanto utilizando apenas uma janela entre 1 e 4 segundos como também com medição sequencial. Técnicas de análise espectral foram usadas nos algoritmos resultando em uma complexidade menor do que das técnicas paramétricas. Entretanto, os algoritmos possuem algumas limitações. Esses métodos nem sempre possuem a precisão necessária à aplicação e para cenários envolvendo sinais altamente correlacionados ou fontes com ângulos de incidência muito próximos, o desempenho dos métodos espectrais pode ser insuficiente.

Existem aplicações que podem usar o projeto diretamente como na movimentação de uma câmera em uma videoconferência. A estimação de direção de chegada é uma

etapa inicial necessária em outros projetos, como um sonar em um submarino para a detecção de um navio, em tomografia ou em conformação de feixes para telefonia móvel. Neste caso, algumas alterações seriam necessárias para adaptar o protótipo e algoritmo deste projeto.

Como trabalho futuro, pode-se implementar outros algoritmos de estimação de direção de chegada para uma melhor comparação e avaliação do desempenho. Podem ser implementadas também as aplicações práticas citadas anteriormente, de forma a estudar e obter resultados para uma aplicação do projeto. O protótipo também pode ser melhorado, aumentando o número de sensores e tornando o alinhamento entre os microfones mais preciso.

Os imprevistos enfrentados foram de bom proveito para o aprendizado e o conhecimento da prática da pesquisa científica, motivando uma maior busca de conhecimento em outras áreas não contempladas no projeto original. Em todo este período muito foi aprendido, não só em termos teóricos e práticos de processamento de sinais, mas também sobre pesquisa acadêmica e como escrever artigos.

Referências Bibliográficas

- [1] STOICA, P., MOSES, R. L., *Introduction to Spectral Analysis*. Primeira ed. Prentice Hall, 1997.
- [2] SILVA, J. S. M., APOLINÁRIO Jr., J. A., CAMPOS, M. L. R., “Estudo e implementação de um arranjo de microfones para a estimação da direção de chegada”, *XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pp. 1–2, 2008.
- [3] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., *Fundamentals of Physics*, v. 2. Oitava ed. Wiley, 2007.
- [4] FUCHS, J.-J., “Estimation of the number of signals in the presence of unknown correlated sensor noise”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 40, n. 5, pp. 1053–1061, 1992.
- [5] LATHI, B. P., *Linear Systems and Signals*. Nueva York, EUA : Oxford University, 2002.
- [6] da COSTA, J. P. C. L., ZELENOVSKY, R., *Desenvolvimento de Modelos, Técnicas e Aplicações para Arranjos de Sensores*. Tese de mestrado, Universidade de Brasília, 2006.
- [7] COLARES, R. F., *Descrição Unificada dos Métodos Modernos para Estimação DOA em Arranjos de Sensores*. Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2000.
- [8] GODARA, L. C., *Smart Antennas*. CRC Press, 2004.
- [9] KAMEN, E. W., HECK, B. S., *Fundamentals of Signals and Systems Using MATLAB*. Prentice Hall, 1997.

- [10] FREAR, M., “Pa-wavplay”, www.matlabcentral.com, 2004 (Acesso em Julho de 2008), Arquivos disponíveis para download no Matlab Central.
- [11] Van Trees, H. L., *Optimum Array Processing*, v. 4, *Detection, estimation and modulation theory*. Wiley-Interscience, 2002.
- [12] MOSES, R. L., POTTER, L. C., “An Acoustic Array for Undergraduate Instruction”. In: *Proc. of First Signal Processing Education Workshop (SPE2000)*, pp. 1–5, Hunt, Texas, 15-18 de Outubro 2000.
- [13] CAPON, J., “High resolution frequency wavenumber spectrum analysis”, *Proceedings of the IEEE*, , 1969.

Glossário

Matlab[©] Programa de computador interativo, desenvolvido pela empresa norte-americana *MathWorks*, voltado para o cálculo numérico e que possui sua própria linguagem de programação.

Aliasing Efeito que acontece quando sinais contínuos e distintos se tornam indistinguíveis quando amostrados, de forma que o sinal original não pode ser reconstruído.

Firepod É um sistema de gravação combinado com oito pré-amplificadores de microfones e conversores analógico-digital fabricado pela *PreSonus*.

Firewire Interface serial definida pela norma IEEE1394 para computadores pessoais e aparelhos digitais de áudio e vídeo que oferece comunicações de alta velocidade e serviços de dados em tempo real.

Headroom Diferença entre o valor nominal do sinal e seu máximo valor não distorcido.

Phanton power
Método de transmissão de energia elétrica contínua através de cabos para microfones que contém circuitos eletrônicos ativos.

Steering vector
Vetor que relaciona as características e posições dos sensores ao ângulo de direção de chegada da fonte.

Antenas inteligentes
Antenas em arranjo com algoritmos inteligentes de processamento de sinal, utilizadas para detectar mudanças no ambiente dinamicamente, podendo reagir a estas.

Banda estreita

Sinal cuja banda de frequência não excede a frequência de coerência do canal, ou seja, todas suas componentes sofrem as mesmas interferências.

Digitalização

Processo na qual um sinal analógico é transformado em digital, sendo então representado por um número discreto de seus pontos ou amostras.

FIR (filtro de resposta ao impulso finita)

Tipo de filtro digital que se caracteriza por ter sua resposta nula a um impulso após o transcorrer de um tempo finito, em inglês *finite impulse response*.

Frente de onda

Conjunto de pontos do meio que são alcançados no mesmo instante pela mesma fase de uma onda.

Geofone Transdutor que converte movimento terrestre em voltagem; sua principal aplicação é na aquisição de sinais sísmicos.

Hidrofone Microfone especialmente desenvolvido para ser utilizado em água, podendo então escutar ou gravar sons submarinos.

Microfone Transdutor que converte sinais sonoros em sinais elétricos.

Onda eletromagnética

Combinação dos campos elétrico e magnético, que se propaga simultaneamente no espaço transportando energia.

Onda mecânica

Perturbação oscilante de alguma grandeza física em um material elástico, capaz de transportar energia.

Pré-amplificador

Estágio de um amplificador de áudio que recebe o sinal da fonte sonora e o corrige, entregando-o ao amplificador de potência.

Raio de onda

Linha orientada que tem origem na fonte de ondas, sendo perpendicular às frentes de onda.

Videoconferência

Comunicação entre pessoas que estão em locais de diferentes, através de aparelhos que transmitem tanto as imagens como o som dos participantes do debate.

Apêndice A

Código MATLAB

A seguir é apresentado o código desenvolvido para determinar a DOA. As partes que estão comentadas foram usadas durante o desenvolvimento para maior observação dos resultados.

```
function [capon,beamforming,x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8] = DOA(f,x)
% estimação do ângulo de chegada através dos métodos capon e beamforming
% temos que passar
% x é o índice a ser adicionado a diagonal da matriz R
% f é a frequência do sinal
% gravando os sinais do firepod:
loop
while 1> 0
fs = 44100; % frequência de amostragem
tempo=4; % tempo de gravação
t=fs tempo; % número de amostras a serem gravadas
% _____
% função de gravação de oito canais simultâneos. A matriz inputbuffer tem
% cada canal em uma coluna.
% _____
inputbuffer = pawavrecord(1; 8; t; fs; 2;'asio'); % grava os oito canais ao mesmo
tempo
% _____
```

```

% separando os canais da matriz
x11=inputbuffer(:,1);
x12=inputbuffer(:,2);
x13=inputbuffer(:,3);
x14=inputbuffer(:,4);
x15=inputbuffer(:,5);
x16=inputbuffer(:,6);
x17=inputbuffer(:,7);
x18=inputbuffer(:,8);
% -----
% gravação dos sinais ou leitura dos sinais gravados:
% [x1,fs,b]=wavread('x1-10k-0dg.wav');
% [x2,fs,b]=wavread('x2-10k-0dg.wav');
% [x3,fs,b]=wavread('x3-10k-0dg.wav');
% [x4,fs,b]=wavread('x4-10k-0dg.wav');
% [x5,fs,b]=wavread('x5-10k-0dg.wav');
% [x6,fs,b]=wavread('x6-10k-0dg.wav');
% [x7,fs,b]=wavread('x7-10k-0dg.wav');
% [x8,fs,b]=wavread('x8-10k-0dg.wav');
% -----
% renomeando os canais para poder retornar a gravação sem processamento
x1=x11;x2=x12;x3=x13;x4=x14;x5=x15;x6=x16;x7=x17;x8=x18;
% -----
% Dando uma olhada nos atrasos entre os sinais dos diversos mics:
figure;
plot((6000+1:6000+100),real(x11(6000+1:6000+100)))
hold;grid;
plot((6000+1:6000+100),real(x12(6000+1:6000+100)),'k')
plot((6000+1:6000+100),real(x13(6000+1:6000+100)),'g')
plot((6000+1:6000+100),real(x14(6000+1:6000+100)),'m')
plot((6000+1:6000+100),real(x15(6000+1:6000+100)),'y')
plot((6000+1:6000+100),real(x16(6000+1:6000+100)),'r')

```

```

plot((6000+1:6000+100),real(x17(6000+1:6000+10)), 'c')
plot((6000+1:6000+100),real(x18(6000+1:6000+100)), '+y')
legend('x1', 'x2', 'x3', 'x4', 'x5', 'x6', 'x7', 'x8')
% -----
% plotando as respostas em freqüência dos sinais
% figure
% [X1,W]=freqz(x1,1,10000);
% plot(W/pi,abs(X1))
% [X2,W]=freqz(x2,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X2))
% [X3,W]=freqz(x3,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X3))
% [X4,W]=freqz(x4,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X4))
% [X5,W]=freqz(x5,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X5))
% [X6,W]=freqz(x6,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X6))
% [X7,W]=freqz(x7,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X7))
% [X8,W]=freqz(x8,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X8))
% -----
% filtro na freqüência do sinal e com BW f2-f1 (analítico)
% -----

```

```

N=500; fc=f;
f1=f-500; f2=f+500;
w1=2*pi*f1/fs; w2=2*pi*f2/fs;
h=fir1(N,[w1 w2]/pi,'bandpass');
[H; W] = freqz(h; 1; 1000;'whole');
% figure;
% plot(W/pi,abs(H),'b');
% hold;
% grid;
% filtro com banda de 0.5pi a ser deslocado para ser convoluido com o outro e termos
% como resultado um filtro só na freqüência positiva do sinal
filtro=fr1(100,0.5);
filtro=filtro.';
[F; W] = freqz(filtro; 1; 1000;'whole');
% plot(W/pi,abs(F),'fr')
nn=(0:(length(filtro)-1)).';
filtrolinha=filtro.*exp(j*0.5*pi*nn);
[Flinha; W] = freqz(filtrolinha; 1; 1000;'whole');
% plot(W/pi,abs(Flinha),'fig')
htotal=conv(h,filtrolinha);
[Htotal; W] = freqz(htotal; 1; 1000);
% plot(W/pi,abs(Htotal),'-k')
% legend('H','F','Flinha','Htotal')
% _____
% filtrando os sinais (eliminando ruídos fora banda/tornando-os analíticos)
x11=filter(htotal,1,x1); x12=filter(htotal,1,x2);
x13=filter(htotal,1,x3); x14=filter(htotal,1,x4);
x15=filter(htotal,1,x5); x16=filter(htotal,1,x6);
x17=filter(htotal,1,x7); x18=filter(htotal,1,x8);
% _____
% plotando as respostas em freqüência dos sinais
% figure

```

```

% [X1,W]=freqz(x1,1,10000);
% plot(W/pi,abs(X1))
% [X2,W]=freqz(x2,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X2))
% [X3,W]=freqz(x3,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X3))
% [X4,W]=freqz(x4,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X4))
% [X5,W]=freqz(x5,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X5))
% [X6,W]=freqz(x6,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X6))
% [X7,W]=freqz(x7,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X7))
% [X8,W]=freqz(x8,1,10000);
% figure
% plot(W/pi,abs(X8))
% _____

lambda = vsom/f; % comprimento de onda
d = lambda/2; % espaçamento entre sensores
% _____

% eliminando nível DC e garantindo variância unitária
x11=x11-mean(x11); x12=x12-mean(x12);
x13=x13-mean(x13); x14=x14-mean(x14);
x15=x15-mean(x15); x16=x16-mean(x16);
x17=x17-mean(x17); x18=x18-mean(x18);

```

```

x11=x11/std(x11); x12=x12/std(x12);
x13=x13/std(x13); x14=x14/std(x14);
x15=x15/std(x15); x16=x16/std(x16);
x17=x17/std(x17); x18=x18/std(x18);
% -----
% Estimando a matriz de autocorrelação:
% -----
X=[x11 x12 x13 x14 x15 x16 x17 x18];
I=eye(8);
R=cov(X)+ x*I;
Rinv=inv(R);
% -----
% Estimando o DOA:
% -----
tetagrau=-90:0.1:90;
total=length(tetagrau);
beamforming=zeros(total,1);
capon=zeros(total,1);
for cont=1:total
teta=tetagrau(cont)*pi/180;
ws=2*pi*f*d*sin(teta)/vsom;
a= [1 exp(-j*ws) exp(-j*ws*2) exp(-j*ws*3) exp(-j*ws*4) exp(-j*ws*5) exp(-j*ws*6)
exp(-j*ws*7)].';
% Método de "Beamforming"
beamforming(cont)=a'*R*a;
% Método de Capon
capon(cont)=inv(a'*Rinv*a);
end
figure
beamforming=real(beamforming)/max(abs(beamforming));
plot(tetagrau,beamforming)
hold

```

```

capon=real(capon)/max(abs(capon));
plot(tetagrau,capon,'r')
legend('Beamforming','Capon')
grid
% _____
% plotando gráfico polar % _____
tetagraup=(0:0.1:180)*pi/180.';
figure
polar(tetagraup,beamforming,'-r');
hold
polar(tetagraup,capon,'-b');
legend('beamforming','capon');

```