

**MARINHA DO BRASIL**  
**DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA**  
**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM**  
**GUERRA ACÚSTICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PROCESSAMENTO DE SINAIS EM ARRAY: Tipos de Beamforming**



**1T JORGE MARTINS ESTEVES NETO**

Rio de Janeiro  
2023

1T JORGE MARTINS ESTEVES NETO

PROCESSAMENTO DE SINAIS EM ARRAY: Tipos de Beamforming

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Acústica.

Orientadores:

D.Sc Natanael Nunes de Moura Júnior

M.Sc CC Guilherme Ferreira Murrel Liali

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

IT JORGE MARTINS ESTEVES NETO

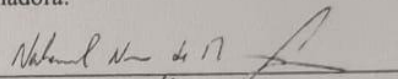
PROCESSAMENTO DE SINAIS EM ARRAY: Tipos de Beamforming

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Acústica.

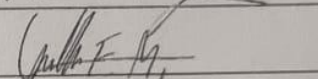
Aprovada em 05/DEZ/2023

Banca Examinadora:

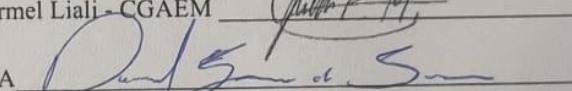
D.Sc Natanael Nunes de Moura Júnior - UFRJ



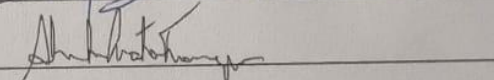
M.Sc CC Guilherme Ferreira Murrel Liali - CGAEM



CC Daniel Gama de Sousa - CIAA



CT Alan da Costa Franqueira - BSIM



CIAA  
Rio de Janeiro  
2023



Dedico esse trabalho àqueles que através de seu trabalho e esforço contribuem para o aprimoramento contínuo da Marinha do Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todas as pessoas que, de certa forma, ajudaram para que esse trabalho pudesse ser desenvolvido. Um agradecimento especial, primeiramente, a Deus pois sem ele nada seria possível, agradeço a minha esposa Letícia Cristina, pela compreensão nos momentos em que tive de abdicar de sua companhia para me dedicar aos estudos, e pelo constante apoio prestado nos momentos em que mais precisei. Também agradeço a minha família, meus pais Sergio e Elenice, minha irmã Priscila e minha Sobrinha Isabel pelo amor e por sempre me ajudar a alcançar meus sonhos e o que vivi até o presente momento. Aos meus sogros Ailton e Flávia pelo constante apoio prestado no decorrer da consecução deste trabalho.

Aos meus orientadores, Prof. D.Sc. Natanael Moura Júnior e CC. M.Sc. Murrel pelo incentivo e por todos os esclarecimentos em todas as etapas deste estudo, pela confiança e pelo exemplo que foram como professores que disseminam conhecimento. Aos Prof. D.Sc. José Seixas, João Batista, Carlos Zarro e CMG Parente muito obrigado pelos ensinamentos e exemplos de dedicação. Um grande agradecimento, enfim, a todos os professores que de certa forma contribuíram para tornar possível o desenvolvimento deste trabalho, em especial ao CC(RM1-EN) Carlos Martins coordenador Interino do curso e ao CC M.Sc Carlos Roberto.

Aos colegas do curso, com os quais sempre pude compartilhar ideias em períodos de estudo e durante as aulas. Enfim, agradeço a todos que influenciaram não somente neste trabalho, mas que também contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

"Nunca diga a um inimigo que algo é impossível. Ele pode estar fazendo isso nesse exato momento."

General George S. Patton

## Resumo

Com o avanço tecnológico a Marinha do Brasil, tem que se colocar num local de vanguarda do estudo do mar e de todas as possíveis vertentes de Guerra Naval, entre elas destaco a Guerra anti-submarina. Com o passar dos anos a MB vem se focando no monitoramento do mar através principalmente do SISGAAZ, sistema que até então não é sincronizado com possíveis sensores submarinos, mas com o avançar dos tempos e buscando sempre o aprimoramento contínuo pode ser que no futuro tal entrelaçamento de informações possa ocorrer. Focando na parte de controle e análise do ambiente submarino é necessário separar entre a parte molhada e a parte seca dessa operação. O intuito deste trabalho é explorar a parte seca mais precisamente sobre a parte de processamento de sinais, o qual com o esforço e recurso necessário será possível a adoção de outros métodos de Conformação de Feixes. Este trabalho tem por objetivo apresentar as mais diversas técnicas de *Beamforming* mostrando ao leitor as suas principais características.

**Palavras- chave:** Marinha do Brasil, Processamento de Sinais, *Beamforming*.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Retrata o SISGAAZ .....	02
Figura 1.2 Um sistema SONAR .....	03
Figura 2.1 O experimento de Daniel Colladon e Charles Sturm, 1826.....	06
Figura 2.2 Exemplo de um sinal de Áudio.....	10
Figura 2.3 Simulação de uma ULA.....	13
Figura 2.4 Exemplo de um DaS.....	14
Figura 2.5 Exemplo de um DaS e suas diferentes Somas e Atrasos a depender do DoA.....	15
Figura 4.1 Exemplo de uma ULA com 21 elementos espaçados em 0.3 metros.....	21
Figura 4.2 Diretividade apresentada pelo algoritmo.....	21
Figura 4.3 Presença influente dos lóbulos secundários.....	22
Figura 4.4 Algoritmo “acertou a direção” de chegada.....	22
Figura 4.5 Algoritmo “errou a direção” de chegada.....	23
Figura 4.6 Gráfico de correlação.....	23
Figura 4.7 Matriz de correlação de Pearson.....	24
Figura 4.8 Representação de um FIB.....	24

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>1.1 Apresentação do Problema</b> .....	04
<b>1.2 Motivação</b> .....	04
<b>1.3 Objetivos</b> .....	04
<b>1.4 Organização do Trabalho</b> .....	05
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	06
<b>2.1 Histórico do estudo do som na água</b> .....	06
<b>2.2 Aplicações em SONAR Passivo</b> .....	08
<b>2.3 Ruídos e Sinais</b> .....	09
<b>2.4 Processamento de Sinais</b> .....	10
<b>2.5 Arranjo de Sensores</b> .....	12
<b>2.5.1 Array em Linha Uniformemente espaçado (ULA)</b> .....	12
<b>2.6 Conformação de Feixes</b> .....	13
<b>2.6.1 Delay and Sum</b> .....	13
<b>2.6.2 MUSIC</b> .....	15
<b>2.6.3 ESPIRIT</b> .....	16
<b>2.6.4 Capon</b> .....	17
<b>2.6.5 Frequência Invariante</b> .....	17
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	19
<b>3.1 Beam pattern</b> .....	19
<b>3.2 Estimação do DOA</b> .....	19
<b>3.3 Coeficiente de Correlação de Pearson</b> .....	20
<b>4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	21
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	25
<b>5.1 Considerações Finais</b> .....	25
<b>5.2 Sugestões para futuros trabalhos</b> .....	25
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	26

<b>ANEXO .....</b>	<b>28</b>
--------------------	-----------

# 1 INTRODUÇÃO

No Livro Branco da Defesa Nacional, define que a Marinha do Brasil deve-se manter munida adequadamente no que se refere a software e hardware, para que possa preparar e empregar o Poder Naval. Para tal deve-se manter as ICT's (Instituições Científicas e Tecnológicas), tanto com pessoal capacitado quanto financeiramente.

A "Amazônia Azul" é uma vasta área marítima de grande importância, não apenas geográfica, mas também estratégica, econômica e ambiental, que exige esforços contínuos para seu desenvolvimento e preservação. abrange aproximadamente 5,7 milhões de quilômetros quadrados de áreas marítimas, rios e lagos sob jurisdição brasileira. É uma região rica em recursos com importância econômica, científica e ambiental. Para proteger e manter a soberania nessa área, é essencial a colaboração de diversos setores e segmentos da sociedade (MARINHA DO BRASIL,2023).

Atividades como pesca, turismo, transporte marítimo, exploração de petróleo, bioenergia e conservação ambiental são vitais para o desenvolvimento da região. Além disso, a "Amazônia Azul" representa um conceito político-estratégico que fortalece a posição do Brasil no Atlântico Sul. Este conceito envolve a busca por exploração sustentável e a proteção contra ameaças como pirataria, pesca ilegal, poluição da água e interesses de outros estados (MARINHA DO BRASIL,2023).

A Marinha do Brasil, lidera o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz), cuja missão é monitorar e proteger as áreas marítimas e águas interiores de interesse, bem como seus recursos e infraestruturas, contra várias ameaças. O SisGAAz utiliza uma ampla gama de equipamentos, incluindo radares em terra e embarcações, câmeras de alta resolução e sistemas colaborativos, como o Sistema de Monitoramento Marítimo de Apoio às Atividades de Petróleo (SIMMAP), o Sistema de Identificação e Acompanhamento de Navios a Longa Distância (LRIT), o Sistema de Informação Sobre o Tráfego Marítimo (SISTRAM) e o Programa Nacional de Rastreamento de Embarcações Pesqueiras por Satélite (PREPS), que se baseiam no rastreamento de posição via satélite. Os dados de localização captados por GPS são transmitidos por meio de comunicações via satélite para centros de monitoramento, com planos de incorporar sensores acústicos no futuro. O objetivo principal é contribuir para a segurança, defesa e desenvolvimento da Amazônia Azul e do Brasil (MARINHA DO BRASIL, 2023).

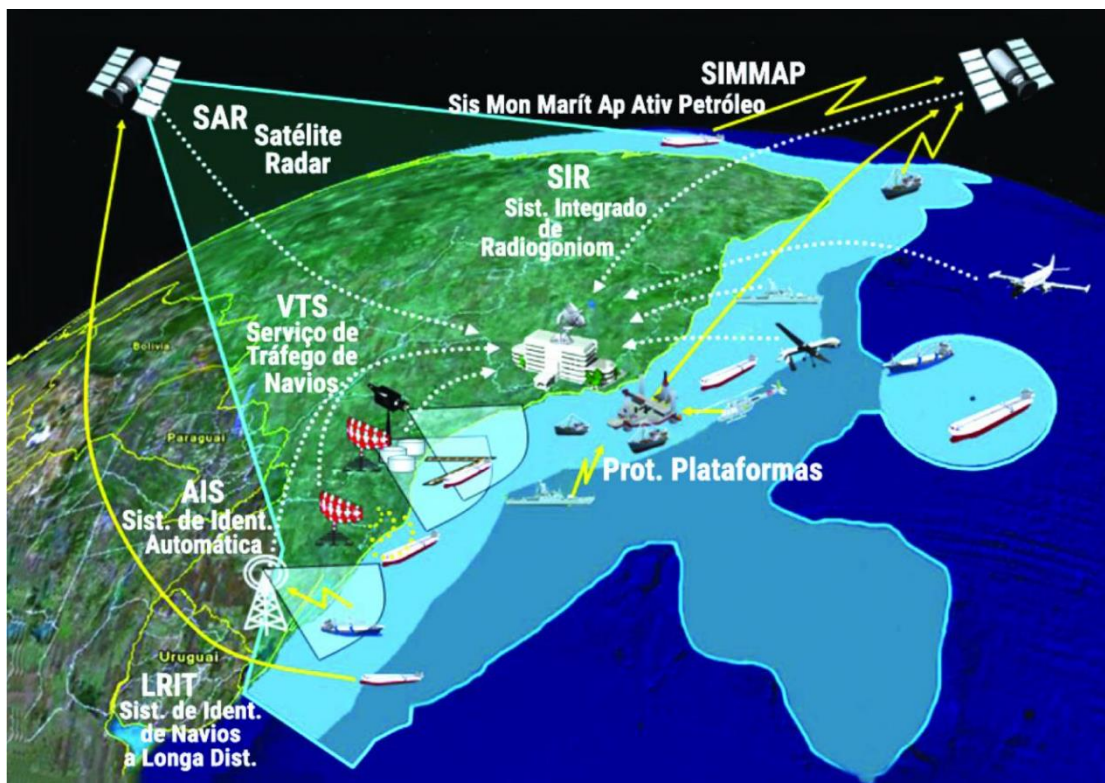


Figura 1.1 Retrata o SISGAAZ (MARINHA DO BRASIL,2023)

O SisGAAz é um Programa Estratégico de extrema importância para a Marinha do Brasil, desempenhando um papel indispensável na preservação da soberania sobre a "Amazônia Azul". Além disso, possui um vasto potencial para impulsionar o crescimento econômico e tecnológico do país, enquanto também serve como uma fonte significativa de criação de empregos. Esse projeto tem em um dos seus pilares o aprimoramento contínuo, focando nessa parte, a fiscalização e controle das atividades submarinas faz-se necessária, para que a Marinha do Brasil possa ter um controle das atividades realizadas abaixo d'água.

Para que esse monitoramento possa ocorrer é necessário o investimento em sistema SONAR(*Sound Navigation and Ranging*). Seja de pontos fixos ou de Sonobóias.

O SONAR é como conceito inicial um sensor para um submarino e tem que ser desenvolvido para apresentar informações para o operador, responsável pela observação do cenário acústico, de forma clara e precisa, sendo ainda o mais rápido possível, pois será isso que determinará o sucesso da missão (BOZZI, 2016).

A Marinha do Brasil (MB) deve investir no aprimoramento da tecnologia do SONAR. Para alcançar um elevado patamar de qualidade de material e pessoal em diversos campos científicos. Isso inclui o desenvolvimento de tecnologias nas áreas de elementos hidroacústicos, formação de feixes, detecção, rastreamento e classificação de sinais.

Um sistema sonar pode ser dividido essencialmente em duas partes distintas. A primeira é os elementos hidroacústicos, que compreendem hidrofones, transdutores e staves,

geralmente referidos como a "parte molhada" do sonar. A segunda é do processamento de sinais, que envolve a formação de feixes, o tratamento de dados, a apresentação e análise das informações, comumente chamada de "parte seca". A aquisição de sinais é vista como a conexão crucial entre a parte molhada e a parte seca. A Figura 1.2 ilustra a sequência de processos envolvidos em um sistema sonar passivo.

Pode-se considerar que toda a cadeia de processos de um sistema sonar passivo tem início quando uma onda mecânica acústica submarina incide sobre um hidrofone, que é um sensor passivo projetado para converter energia mecânica em energia elétrica. Isso excita o hidrofone e gera um sinal elétrico em seus terminais

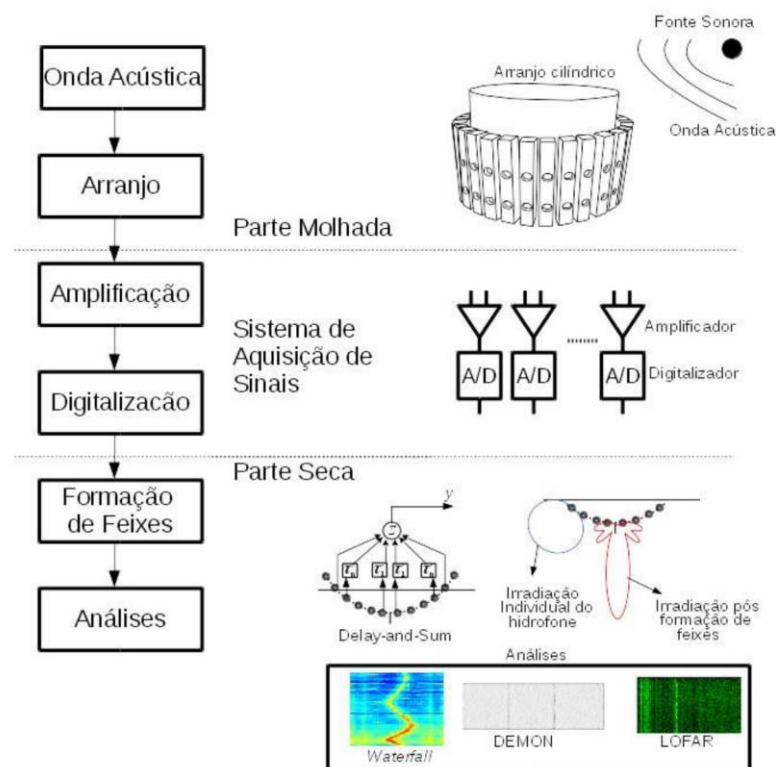


Figura 1.2 Um sistema SONAR (BOZZI, 2016)

Este trabalho terá como a foco a “parte seca” de um sistema SONAR, na parte de formação de feixes. Não é o escopo do trabalho a parte de análise, caracterização e classificação.

## 1.1 Apresentação do Problema

No ensejo sobre o aprimoramento do material e dos métodos de monitoramento ou acompanhamento. Faz-se necessário analisar eventuais novos métodos de processamento de sinais sendo de suma importância que se tenha uma independência tecnológica, mesmo em tempos de paz, resultando na constante evolução dos sistemas. No âmbito da acústica submarina, deve-se citar a elaboração de modelos matemáticos e de algoritmos de processamento de sinais visando o auxílio à detecção no mar.

Este trabalho visa a mostrar as técnicas de processamento de sinais mais comumente usadas nas diversas áreas de pesquisa do mar e ao final realizar uma comparação e analogia entre os tipos.

## 1.2 Motivação

O mundo é repleto de informações esperando para serem descobertas, decifradas e utilizadas para melhorar nosso entendimento. Em um cenário onde os dados são a moeda mais valiosa, o processamento de sinais se destaca como uma ferramenta poderosa que nos permite acessar, analisar e extrair informações valiosas a partir de sinais.

Pela capacidade de desvendar os padrões das informações, o processamento de sinais é uma ferramenta cada dia mais indispensável. Ao explorar esse campo multifacetado.

Ao escrever sobre processamento de sinais, existe uma ampla gama de técnicas e métodos projetados para analisar, filtrar, aprimorar e interpretar sinais em sua forma mais ampla. Descobrir como esses métodos podem ser aplicados para resolver problemas complexos em diversas disciplinas, contribuindo para o avanço do conhecimento e da tecnologia., é fundamental para uma Marinha e País cada vez mais forte e independente.

## 1.3 Objetivos

No âmbito do aprimoramento contínuo é fundamental a busca por um produto eficiente para a Marinha do Brasil, de modo que os meios operativos, linha de frente no combate, possam ter processos aprimorados para contrapor possíveis ameaças. Tendo isso como foco o objetivo deste trabalho é apresentar métodos de processamento de sinais, mais especificamente *beamforming*, que irão permitir ao usuário final uma vantagem tática frente ao inimigo.

Ademais, ao especificar esses métodos, espera-se que seja possível a limitação quanto as abordagens mais específicas para cada tipo de situação. Proporcionando

ferramentas necessárias de apoio a tomada de decisão contribuindo assim para o sucesso da missão e proteger a soberania nacional frente as mais diversas ameaças.

## **1.4 Organização do Trabalho**

O Capítulo 2 se destina a explicar o início dos fundamentos da propagação do sinal no meio em que estamos estudando e suas principais causas e efeitos bem como apresentar o que é um sinal, o tipo de processamento requerido para “direcionar o feixe” e as principais técnicas atuais de *Beamforming*. A terceira parte deste trabalho se destina a explicar os principais métodos utilizados para verificar os modelos gerados via algoritmo em *Python*. A penúltima seção visa a mostra os resultados obtidos e por fim o último capítulo visa a dar uma conclusão ao trabalho pontuando possíveis trabalhos futuros.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo versa sobre as referências utilizadas e os conceitos sobre as aplicações ou modelagens utilizadas sendo de base para a consecução do trabalho. A revisão de literatura. Envolvendo a busca por artigos acadêmicos, trabalhos anteriores e pesquisas relacionadas ao tópico de interesse. A revisão de literatura permite adquirir uma compreensão aprofundada do estado atual do conhecimento na área e identificar os desafios que essa pesquisa pretende abordar.

Este capítulo abordará o histórico do estudo do som na água, e irá adentrar nos conhecimentos técnicos que serão abordados no decorrer do trabalho. Focando como dito na introdução na “parte seca” de um SONAR, principalmente na parte das formações de feixes.

### 2.1 Histórico do estudo do som na água

No começo do século XIX, Daniel Colladon e Charles Sturm realizaram a primeira medição da velocidade do som na água, nesse caso no Lago Genebra na Suíça, nesse estudo de campo a época não se existia o transdutor eletroacústico para gerar u som na água, logo utilizou-se um mecânico, nesse caso um sino (CLAY, 1977). O experimento deles foi basicamente o toque de sino em baixo d’água enquanto um flash de luz foi disparado, simultaneamente. Eles sabiam a distância entre os barcos e a partir do tempo obtido conseguiram calcular a velocidade do Som na água. O valor obtido de 1438 m/s, medido a uma temperatura da água de 8 C. O valor moderno para água doce a 8°C é 1439 m/s. Este experimento teve uma elevada precisão para uma primeira medição.

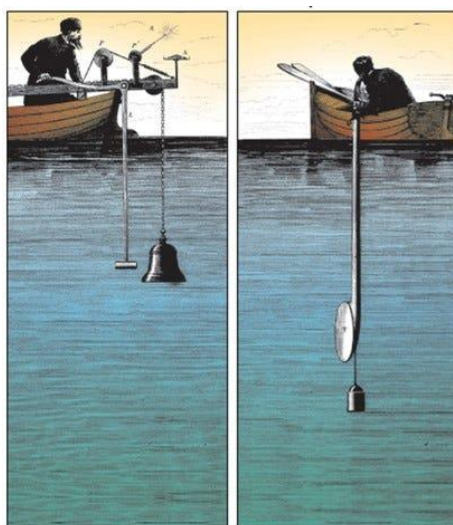


Figura 2.1 Retrata o experimento de Daniel Colladon e Charles Sturm, 1826, no Lago Genebra na Suíça (CLAY, 1977).

Entre o experimento anterior e o começo do século XX, não foram observadas mais experimentações relevantes, se tratando das propriedades. Entretanto, em 1880, a piezoelectricidade foi descoberta em alguns materiais, entre eles o quartzo. Essa característica é de uma elevada importância para a som na água, tendo em vista que esses materiais são utilizados nos transdutores (CLAY, 1977).

Com a evolução dos transdutores no começo dos anos 1900, começou-se a perceber a utilidade desse sistema para a navegação segura fato evidenciado com o naufrágio do Titanic, em 1912. A primeira utilização de transdutores em navio de guerra, nesse caso submarinos, foram na Primeira Guerra Mundial onde esses equipamentos foram usados em submarinos Norte Americanos (CLAY, 1977).

Voltando ao Continente Europeu, mais precisamente a França, Paul Langevin e outros estudiosos, começaram a estudar e a realizar experimentos em 1915, com hidrofones. Em um primeiro momento com equipamentos feitos de carbono e a posteriori de quartzo.

Com o começo da Segunda Guerra Mundial esses avanços com os transdutores em conjunto com outros avanços, na parte de eletrônica e a melhor compreensão da propagação do som no oceano, foram a base para a consecução de sistemas de sonar com a alguma capacidade. Com as grandes perdas de navio mercantes que realizavam o traslado de material da América do Norte para a Europa, fez-se necessário um estudo mais aprofundado, gerando muitos navios de guerra americanos com sistemas de escuta passiva e de alcance de eco (CLAY, 1977).

No período posterior à guerra, os desenvolvimentos de sonar e do estudo sobre a propagação do som no oceano continuaram destacando as pesquisas, principalmente, sobre *arrays* e técnicas de processamento de sinais.

Ainda no campo de estudo do som na água chegou-se a conclusão que o parâmetro mais relevante a ser considerado na propagação sonora é a velocidade e do som, dependente das características de elasticidade e densidade do meio. Logo, a velocidade varia em cada ponto da extensão marítima, em um instante de tempo, em virtude das características do ambiente marinho. Sua expressão é obtida em função da temperatura, densidade e pressão. Para água do mar, existem várias expressões dadas em função da temperatura, da salinidade e da pressão ou profundidade (CLAY, 1977).

Uma das fórmulas mais aplicadas atualmente é a desenvolvida por CLAY (1967):

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,010T)(S - 35) + 0,016Z$$

## 2.2 Aplicações em SONAR Passivo

A acústica submarina é um campo altamente adequado para a utilização de arranjos de sensores, juntamente com técnicas de conformação de feixes. Nesse contexto, a aplicação específica que será abordada é o sistema sonar passivo.

O sonar, que é uma abreviação para "*Sound Navigation and Ranging*" (navegação e localização por som), aproveita as propriedades de propagação de ondas acústicas no ambiente subaquático para transmitir e/ou captar sinais acústicos. Esses sinais são usados para diversos fins, como navegação, estimativa de direção de chegada, medição de distância, velocidade de contatos, detecção, acompanhamento e classificação de objetos subaquáticos, entre outros (ENGEL, 2018).

Geralmente, os sistemas sonar podem ser divididos em ativos e passivos. No sonar ativo, pulsos acústicos são transmitidos no ambiente subaquático e os ecos desses pulsos são captados, permitindo a medição de distâncias e velocidades. No entanto, a emissão de sinais torna esse sistema detectável por inimigos, o que pode ser desvantajoso em cenários de guerra.

Por outro lado, o sistema sonar passivo é silencioso, ou seja, não emite sinais no ambiente. Isso o torna mais adequado para fins como a estimativa de direção de chegada, embora também possa ser usado para medir distâncias sob certas condições. No entanto, o sistema passivo enfrenta o desafio de lidar com o ruído ambiente, que é geralmente intenso.

Um sistema sonar passivo é geralmente dividido em duas partes: a "parte molhada", que inclui os componentes em contato com a água (como hidrofones e transdutores), e a "parte seca", que compreende os algoritmos de processamento de sinais, incluindo a formação de feixes, o tratamento de dados e análises.

Os sinais capturados pelo sistema sonar passivo são, por natureza, de banda larga. Eles incluem ruído hidrodinâmico, ruído de hélice, ruído de máquinas e outros. Cada tipo de sinal tem características distintas, conhecidas como assinaturas, e muitas vezes emite em faixas de frequência específicas (MOURA, 2013).

A identificação precisa desses sinais é fundamental, especialmente em cenários estratégicos. A escolha de um conformador de feixes apropriado, que forneça respostas precisas, é crucial em aplicações críticas, como sistemas sonar passivos instalados em submarinos de guerra.

Embora técnicas de conformação de feixes fixas, como o *DaS*, ainda sejam comuns nos sistemas SONAR passivos, avanços tecnológicos recentes têm possibilitado o uso de técnicas mais sofisticadas de processamento espacial de sinais. Essas técnicas, embora exijam mais poder de processamento, oferecem resultados mais precisos e consistentes (ENGEL, 2018).

## 2.3 Ruídos e Sinais

A distinção entre um sinal e ruído muitas vezes depende dos seguintes fatores:

1. Contexto de Aplicação: Um sinal pode ser útil em um contexto e ruído em outro. Por exemplo, um sinal de áudio é útil quando você está ouvindo música, mas pode ser considerado ruído indesejado quando tenta fazer uma ligação telefônica em um ambiente barulhento.
2. Critérios de Qualidade: A qualidade de um sinal pode variar, e um sinal de alta qualidade é desejado, enquanto um sinal de baixa qualidade pode ser considerado ruído. Por exemplo, em processamento de imagens, um sinal de imagem nítida é valioso, mas uma imagem borrada de baixa qualidade pode ser vista como ruído.
3. Expectativas do Usuário: O que é considerado um sinal útil ou ruído muitas vezes depende das expectativas do usuário. Por exemplo, em reconhecimento de fala, um sinal de fala clara é um sinal útil, mas ruído de fundo indesejado pode ser considerado ruído.
4. Características do Sinal: As características do sinal, como frequência, amplitude, padrões temporais, podem influenciar se ele é considerado um sinal ou ruído em um determinado contexto.

Em resumo, a interpretação de um sinal como "ruído" ou "útil" é altamente contextual e depende das necessidades e objetivos da aplicação. O que é considerado ruído em um contexto pode ser um sinal valioso em outro (HIGUTI, 2003)..

Isto posto um sinal é uma representação de um fenômeno ou evento e pode ser de natureza acústica, elétrica, estatística, entre outras. Exemplos incluem a voz transmitida por um telefone, leituras de um eletrocardiograma (ECG) ou dados de temperatura global (HIGUTI, 2003).

A análise de sinais desempenha um papel importante em várias disciplinas, e a natureza dessa análise depende do tipo de sinal. Pode envolver a detecção de tendências em dados climáticos, a identificação de padrões em leituras de ECG ou o reconhecimento automático de voz em sinais de áudio (HIGUTI, 2003).

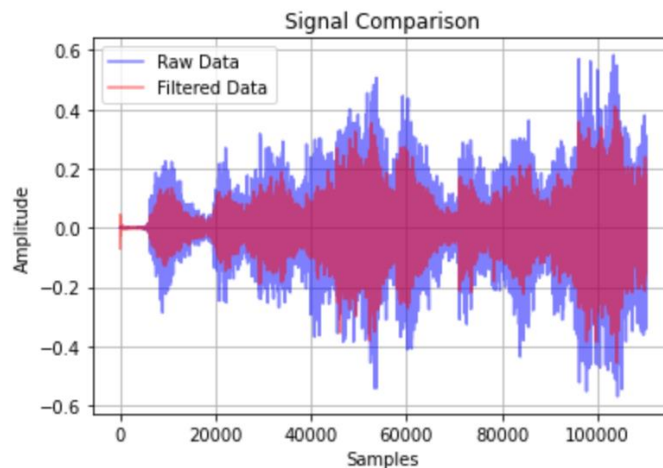


Figura 2.2 Exemplo de um sinal de Áudio

## 2.4 Processamento de Sinais

O processamento de sinais em arranjos de sensores, *array*, tem seu estudo iniciado no período da Segunda Guerra Mundial. O estudo teve grande avanço, falando, mais especificamente, sobre a detecção de submarinos, ou seja, no avanço tecnológico dos sonares. Cujo resultado foi o desenvolvimento de técnicas, sendo válido destacar o *beamforming*, que permitia que o “foco” dos sensores fossem orientados para alguma direção, o que dava aos usuários do sistema sonar a possibilidade de localizar a posição do inimigo com maior precisão (NALON, 2017).

Entre as décadas de 50 e 70 do século XX, ocorreu um grande desenvolvimento no campo de processamento de sinais. O surgimento de computadores possibilitou processar sinais de formas mais rápida e precisa. Ao longo do tempo o processamento de sinais em *arrays*, se tornou uma área de pesquisa interdisciplinar, envolvendo a engenharia elétrica, a matemática e a física. As técnicas de processamento de sinais em *arrays* continuam a ser aprimoradas e são amplamente utilizadas em muitas aplicações, incluindo processamento de imagem, monitoramento de terremotos, sistemas de detecção de falhas e muitos outros (NALON, 2017).

Sinal é um dado que varia em função do tempo. A partir do processamento adequado desse dado é possível obter diversas informações.

Há três grandes áreas onde o processamento de sinais podem ser empregados nos sistemas de comunicações, controle e análise. Em um sistema de análise, como o próprio nome deixa explícito, o processamento visa a obter características de um produto ou em um processo, ou seja, analisar um sinal, mais precisamente, nesse caso, um sinal acústico. Levando-se em conta um espaço amostral restrito, que seria um sinal que chegaria a um arranjo de sensores, é possível realizar três tipos de ações com o sinal inicial: melhorar, caracterizar ou rastrear um sinal. Uma das técnicas mais famosas em uso atualmente é o *beamforming*, que é, primordialmente, um modo de controlar a diretividade ou a sensibilidade de um conjunto de sensores visando “focar” o sensor em um alvo e/ou direção de interesse (NALON, 2017).

Após estimar a direção de chegada de um contato, é necessário processar os sinais para caracterizá-lo em um sistema de sonar passivo. Esse sistema realiza detecção, classificação e, em algumas situações, acompanhamento do contato. Para a detecção dos sinais após a conformação de feixes, duas análises principais são conduzidas: a análise LOFAR (*LOW Frequency Analysis and Recording*) e a análise DEMON (*Demodulation of Envelope Modulation On Noise*). A análise LOFAR também é empregada na classificação do contato, uma vez que fornece informações sobre as características do equipamento do contato (MOURA, 2013).

Há uma diferenciação entre sinais de banda larga e estreita quanto ao tipo de processamento. (ENGEL, 2018) O processamento espacial em banda larga difere do processamento em banda estreita, uma vez que apenas considerar o desvio de fase não é suficiente para descrever completamente a propagação de um sinal pelos elementos do arranjo. Isso ocorre porque esses desvios de fase são dependentes da frequência. Portanto, para cada sensor, é necessário aplicar um conjunto de desvios de fase, comumente chamados de atrasos (*delays*), que sejam proporcionais, idealmente, a todas as componentes de frequência do sinal incidente. Na prática, o processamento em banda larga pode ser realizado tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

## **2.5 Arranjo de Sensores (*Array*)**

Um dos sistemas de maior aprimoramento nas últimas décadas. Consiste, basicamente, em vários sensores alocados e devidamente espaçados. Para determinadas fontes de sinal a sensibilidade pode ser alterada, visando permitir uma melhor descrição do sinal (VAN TRESS, 2002). As variações de tempo na chegada do som no equipamento permitem definir uma localização estimada do alvo.

Existem diferentes tipos de arranjos de sensores (*Array*), sejam lineares, esféricos e cilíndricos, e que são divididos, de acordo com suas funções e características. Essas matrizes de sensores podem ser instaladas em navios, sejam de superfície ou submarinos, e até mesmo rebocados, no caso dos *Towed Array*. Citando, especificamente, as características desse último, vale ressaltar a discriminação espacial contra ruídos e determinação de direção de chegada dos sinais. Pois como ele opera longe dos ruídos próprios, permite uma melhor relação sinal/ruído, aumentando assim o alcance.

A primeira utilização de um arranjo de sensores, que tem relatos, na identificação de um sinal sonoro foi na Primeira Guerra Mundial para localizar aeronaves inimigas.

Existem várias formas de se dispor os *arrays* cada uma com as suas principais características específicas. Neste trabalho será utilizado a ULA.

### **2.5.1 *Array* em linha Uniformemente Espaçado (ULA)**

O arranjo em linha uniforme (ULA) é uma das configurações geométricas mais amplamente estudadas e comumente usadas para iniciar estudos sobre arranjos de sensores. No caso do ULA, seu modelo e as expressões analíticas relacionadas à potência e à diretividade são problemas já extensivamente pesquisados e bem estabelecidos na literatura (BOZZI, 2016).

(FELSKY, 2007) conceitua como sendo um arranjo onde os sensores estão dispostos sobre uma mesma linha reta e igualmente espaçada a uma distância já previamente definida.

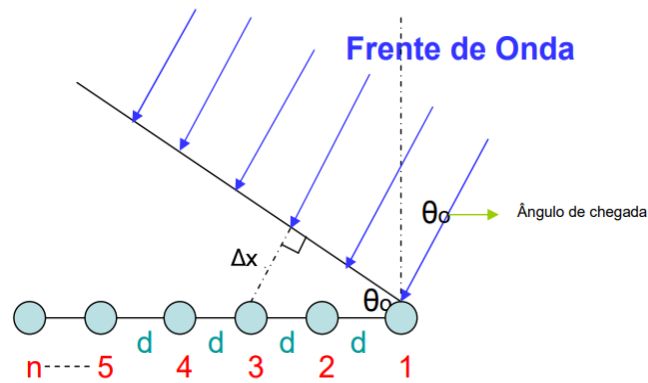


Figura 2.3 Simulação de uma ULA (FELSKY, 2007)

## 2.6 Conformação de Feixes (*Beamforming*)

A conformação de feixes é uma das técnicas proeminentes no processamento de sinais em arranjos de sensores. Essa técnica envolve a aplicação de pesos complexos (atrasos ponderados) à saída de cada sensor para maximizar a energia recebida em uma direção específica, denominada direção de interesse, e atenuar a energia em outras direções, conhecidas como direções interferentes (BOZZI, 2016). Ou seja, uma capacidade de voltar a sua recepção para uma direção específica, podendo ser considerado como um filtro espacial.

### 2.6.1 *Delay and Sum*

O método de Atraso e Soma, também conhecido como Conformação Clássica, Conformação Convencional ou Método de Bartlett, é uma técnica que pode ser aplicada tanto ao processamento de sinais de banda larga quanto de banda estreita. Este método é notável por ser uma das primeiras técnicas desenvolvidas na história dos métodos de conformação de feixes (SÁ, 2016).

A base do algoritmo do método de Atraso e Soma envolve o processamento do sinal recebido para eliminar o atraso em fase associado à direção de chegada do sinal no arranjo de sensores. Em seguida, os sinais "em fase" são somados e ajustados para maximizar a energia do feixe na direção de interesse, enquanto atenuam a energia em outras direções (ENGEL, 2018).

O método de Atraso e Soma é, de fato, uma extensão da análise espectral baseada na Transformada Discreta de Fourier, que permite direcionar o feixe para a direção desejada. A técnica é particularmente eficaz para situações em que é possível estimar os atrasos de chegada do sinal com precisão (SÁ, 2016).



Em resumo, o Método de Atraso e Soma é uma técnica fundamental no processamento de sinais em arranjos de sensores, que se concentra em alinhar os sinais recebidos para realçar a direção de interesse, representando uma abordagem inicial e importante na conformação de feixes.

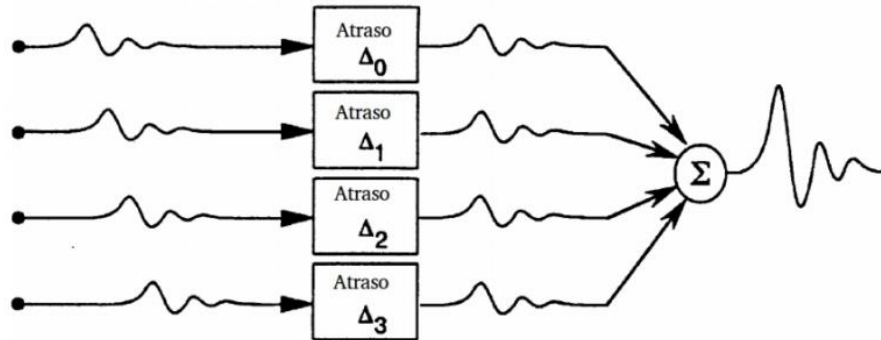


Figura 2.4 Exemplo de um DaS (ENGEL, 2018)

Esse processo pode ser decomposto em três etapas distintas (ENGEL, 2018):

1. **Aplicação dos Desvios de Fase:** Inicialmente, são aplicados desvios de fase correspondentes a uma direção de chegada específica nos sensores do arranjo. Cada sensor recebe um peso complexo que representa essa fase desviada em relação à direção de interesse.
2. **Soma dos Sinais dos Sensores:** Em seguida, os sinais resultantes de todos os sensores do arranjo são somados. Essa soma cria um sinal composto, no qual a fase desviada de cada sensor contribui para a formação do feixe direcionado para a direção de interesse.
3. **Aplicação de Fator de Normalização:** Para garantir que o ganho na direção de interesse seja unitário (ou seja, 0 dB), é aplicado um fator de normalização ao sinal composto resultante da soma. Isso ajusta a amplitude do sinal para que ele atinja o nível desejado na direção alvo.

O objetivo principal de qualquer algoritmo de conformação de feixes é determinar, ao final do processo que consolide os valores dos pesos a serem aplicados a cada sensor do arranjo. Esse vetor é crucial para direcionar eficazmente o feixe na direção de interesse e atenuar as demais direções.

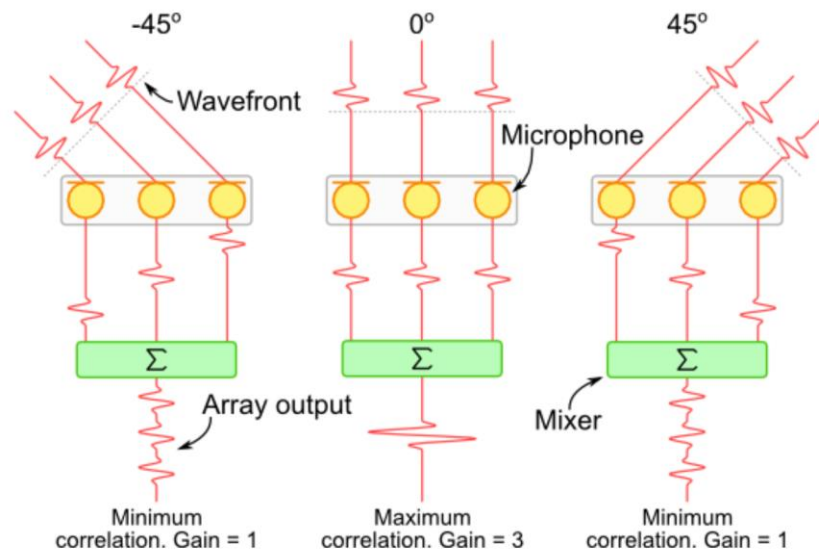


Figura 2.5 Exemplo de um DaS e suas diferentes Somas e Atrasos a depender do DoA

## 2.6.2 MUSIC

O método MUSIC, *MULTiple Signal Classification*, é amplamente reconhecido como um dos métodos paramétricos mais populares no processamento de sinais. Ele é conhecido por proporcionar alta precisão e resolução quando as propriedades do sinal recebido estão próximas das que foram assumidas a priori. No entanto, esse método paramétrico apresenta uma desvantagem significativa: ele requer o conhecimento prévio do número de fontes, denotado como "n". Identificar o número de fontes é, na realidade, um desafio adicional de estimação (SCHMIDT, 1986).

O método MUSIC é uma abordagem relativamente simples e eficaz para estimar o Ângulo de Chegada (AOA) de sinais. Ele se baseia na decomposição do espaço de sinal em subespaços lineares usando informações dos autovalores. Basicamente, o espaço linear é decomposto em dois espaços ortogonais: um está associado ao ruído e o outro está relacionado ao sinal original (SCHMIDT, 1986).

A decomposição da matriz de autocorrelação pode ser realizada por meio de autovalores ou por valores singulares. Uma vez que o subespaço de ruído tenha sido estimado, o método busca identificar os vetores de direção que sejam o mais "ortogonais" possível ao subespaço de ruído. Isso é essencial para distinguir o sinal de interesse das interferências.

Em resumo, o método MUSIC é uma poderosa técnica de estimação de Ângulo de Chegada (AOA) que utiliza a decomposição do espaço em subespaços lineares por meio de autovalores ou valores singulares. Ele é eficaz quando as premissas do sinal são satisfeitas,

mas requer o conhecimento prévio do número de fontes, o que pode ser um desafio na prática (SCHMIDT, 1986).

### 2.6.3 ESPIRIT

Os algoritmos ESPIRIT (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique*) baseiam-se na propriedade de invariância rotacional do espaço de sinais para obter uma estimativa direta da Direção de Chegada (DOA) e obter os ângulos de chegada sem o cálculo de um pseudoespectro em todo o espaço, nem mesmo a busca por raízes de um polinômio. O ESPIRIT é semelhante ao algoritmo MUSIC, com pequenas modificações (V KRISHNAVENI, 2013). A principal vantagem desse método é que ele evita a pesquisa intensiva de máximos de um pseudoespectro ou de uma função de custo (e, portanto, um cálculo de ganho) e é de implementação relativamente simples. Além disso, essa técnica é menos sensível ao ruído do que o MUSIC e o Root-MUSIC (R ROY, 1989). Foi demonstrado em (R ROY, 1987; X L XU, 1992) que os algoritmos MUSIC e ESPIRIT alcançam desempenho quase idêntico no caso de senoides não moduladas, mas que o ESPIRIT é ligeiramente superior ao MUSIC. Em última análise, o ESPIRIT parece ser menos sensível ao ruído do que o MUSIC (R ROY, 1987).

Esses algoritmos amplamente conhecidos adquirem os sinais de origem à taxa de *Nyquist* e requerem um grande número de amostras para estimar um parâmetro que é esparsamente representado em algum outro domínio. Portanto, é aconselhável explorar essa propriedade de esparsidade para estimar a DOA do sinal desejado. A propriedade de esparsidade de sinais tem sido utilizada em uma variedade de aplicações, incluindo reconstrução de imagens, imagens médicas, imagens de radar, separação cega de fontes e detecção de formas. Na literatura, informações de esparsidade também foram usadas anteriormente em formação de feixes e localização de fontes (D MALIOUTOV, 2005).

O conceito de esparsidade espacial de fontes pode ser explorado para realizar a localização de fontes em arranjos de sensores arbitrariamente configurados, tanto para sinais de banda estreita quanto de banda larga, usando um número muito pequeno de medições, melhorando assim a eficiência de comunicação de redes de sensores (D MALIOUTOV, 2005). Embora pesquisas anteriores tenham validado os benefícios da exploração da esparsidade espacial na localização de fontes, como a melhoria da resolução, os métodos também exigem uma alta taxa de amostragem dos sinais de origem, o que aumenta a carga de comunicação entre sensores. Isso é uma consideração importante para redes de sensores sem

fio eficientes em termos de energia. Além disso, em algumas aplicações, a aquisição de dados pode ser muito cara.

#### **2.6.4 Capon**

É bem conhecido que o *beamformer* de Capon padrão (SCB) sofre de cancelamento de sinal severo quando o conhecimento do vetor de direção do sinal de interesse (SOI) é impreciso, o número de instantâneos é pequeno (o que também pode ser visto como um problema de erro do vetor de direção) ou a interferência está correlacionada com o SOI. Portanto, o SCB tem desempenho deficiente em algumas aplicações, como em um sistema de posicionamento global (GPS), onde existem erros no vetor de direção do SOI e interferências coerentes de multipercurso. Neste artigo, propomos um beamformer de Capon que é robusto tanto contra erros no vetor de direção do SOI quanto contra interferências coerentes, desde que as direções de chegada (DOAs) dos multipercursos coerentes sejam aproximadamente conhecidas em relação à DOA do SOI. Exemplos numéricos são apresentados para demonstrar a eficácia do beamformer de Capon robusto coerente proposto, que designaremos com a sigla CRCB (J. LI, P. STOICA e Z. WANG, 2003).

É uma técnica de resposta de mínima variância e sem distorção. Isso significa que ele otimiza a relação sinal-ruído do feixe, sem afetar o ganho ou a fase do sinal. (M HAWKES, 1998)

A aplicação do *Beamforming* pode ser dividida em uma ideia relativamente simples: essencialmente, uma série de filtros que maximizaram o ganho do nosso sinal em vários ângulos de azimute e elevação. Usando esses filtros, pode-se percorrer a superfície de uma esfera para determinar os diferentes níveis de energia provenientes de diferentes direções. Em seguida, é apenas uma questão simples de encontrar a energia máxima para localizar a direção de chegada de uma fonte sonora (M HAWKES, 1998).

#### **2.6.5 Frequência Invariante**

O método de conformação de feixes de frequência invariante (FIB - *Frequency Invariant Beamforming*) é projetado para o processamento de sinais de banda larga. Sua característica fundamental é a capacidade de manter a largura do feixe constante em toda a banda de frequência. Devido a essa característica, o método é frequentemente referido como conformação de feixes de largura de feixe constante. A distância entre os nulos na largura do

feixe permanece inalterada em toda a banda de frequência, o que resulta na preservação da diretividade da resposta do arranjo (SÁ, 2016).

Em algumas aplicações de conformação de feixes, especialmente na área de acústica, é desejável manter uma resolução espacial uniforme em todo o espectro de operação. Arranjos lineares dependentes de frequência não conseguem manter a resolução espacial quando processam sinais de banda larga, nos quais a largura do feixe varia. Além disso, é possível estabelecer uma relação entre a resolução espacial e o tamanho do arranjo de sensores. Ao manter o tamanho do arranjo constante, a resolução espacial diminui à medida que a frequência, diminui na banda (SÁ, 2016).

### 3 METODOLOGIA

A comparação de modelos de algoritmos distintos é crucial nessa pesquisa. Uma vez que será capaz de se chegar a uma resposta a diferentes tipos de abordagem. A comparação de modelos envolve a implementação de cada abordagem e a análise de como elas se comportam em cenários específicos. Essa análise incluirá métricas objetivas para avaliar o desempenho, neste caso a diretividade e a estimação do DoA.

#### 3.1 Padrão de Feixes (*Beam pattern*)

O padrão de feixes é talvez a métrica mais importante para avaliar o desempenho e as características dos conformadores de feixes. O gráfico do padrão de feixes, conhecido como "*beam pattern*," permite analisar como o conformador responde a diferentes direções quando o feixe é direcionado para uma determinada direção de chegada. No caso de banda larga, o padrão de feixes deve ser apresentado não apenas para uma única frequência, mas para toda a banda de interesse, uma vez que a resposta do arranjo varia para cada frequência dentro dessa banda. Pois oferece uma melhor visualização do padrão de feixes nos casos de banda larga (ENGEL, 2018).

É importante ressaltar que o cálculo do padrão de feixes na prática é realizado dentro de uma janela de tempo que deve ser definida com base nas características do ambiente em que o arranjo está localizado e onde o processamento de *beamforming* será executado. Para este trabalho, as janelas temporais a serem utilizadas serão definidas para cada cenário tratado no capítulo subsequente (ENGEL, 2018).

#### 3.2 Estimação de Direção de Chegada(DoA)

Um procedimento amplamente utilizado no processamento de sinais em arranjos de sensores é a estimativa da Direção de Chegada (DoA - *Direction of Arrival*). A estimativa de DoA é realizada para mapear o ambiente no qual o arranjo está localizado, a fim de identificar as direções de onde os sinais estão chegando (SCHMIDT, 1986).

Com essa informação, é possível, por exemplo, aplicar um conformador de feixes em uma das direções de chegada previamente identificadas pelo algoritmo de DoA, que se tornará a direção de interesse. Isso tem o propósito de melhorar a Relação Sinal-Ruído (SNR) do sinal proveniente dessa direção, minimizando o efeito dos demais sinais considerados como interferências. Isso facilita a implementação de métodos que dependem das informações do sinal de interesse, como classificação e acompanhamento, bem como análises conhecidas

como LOFAR (Análise de Baixa Frequência) e DEMON (Demodulação de Sinais sobre Ruído) (ENGEL, 2018).

Existem várias técnicas estabelecidas na literatura para realizar a estimativa de DoA de maneira eficaz, como os métodos MUSIC, ESPRIT, entre outros. Uma abordagem alternativa amplamente utilizada é aproveitar os benefícios da própria técnica de conformação de feixes para alcançar esse objetivo (SCHMIDT, 1986).

Para isso, é necessário realizar uma varredura em todas as direções consideradas relevantes para a aplicação, com um passo pré-definido, e executar o processo de conformação de feixes em cada uma dessas direções individualmente. Calculando a energia do sinal de saída conformado nessas direções, é possível determinar em quais direções a potência do sinal é maior e, portanto, de onde os sinais de maior intensidade estão vindo (SÁ, 2016).

### **3.3 Coeficiente de Correlação de Pearson**

Este coeficiente é um método para medir de modo linear a relação entre duas variáveis. Também é conhecida como  $r$  de Pearson e Correlação Produto-Momento de Pearson. A relação linear entre duas variáveis implica que o aumento em uma delas está diretamente ligado a um aumento na outra, de forma consistente e proporcional. O Coeficiente quantifica a relação linear entre variáveis e é expresso, normalizado, como um número que varia de  $-1$  a  $+1$ . Quanto mais próximo de  $-1$  ou  $+1$  esse valor se encontra, mais forte é a correlação. Valores próximos de zero, por sua vez, indicam uma correlação fraca (USP, 2023).

A direção da relação entre as variáveis é indicada pelo sinal do coeficiente. Se for positivo, significa que um aumento em uma variável está associado a um aumento na outra variável. Por outro lado, valores negativos sugerem que um aumento em uma variável está relacionado a uma diminuição na outra variável (USP, 2023).

Ao analisar correlações, é essencial não negligenciar os valores de significância dos testes, uma vez que, como em qualquer abordagem estatística. Para uma análise ainda mais rigorosa, é possível empregar técnicas de amostragem, que permitem calcular intervalos de confiança (IC) para o coeficiente de correlação ( $r$ ). Nesse cenário, consideraríamos os valores de  $r$  como confiáveis quando os intervalos de confiança não abrangerem zero ou quando os intervalos tiverem sinais consistentes com a direção da correlação observada (USP, 2023).

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo versa sobre os modelos utilizados no algoritmo, tanto de *Delay and Sum* quanto no de MUISC, ESPIRIT e FIB. Falando sobre a quantidade sensores selecionados e suas principais aplicações. Foi proposto um algoritmo para descrever os quatro modelos acima citados, o método Capon, não foi possível gerar o algoritmo em Python e, portanto, não está incluso neste capítulo.

Foi utilizado um *array* do tipo ULA, com 21 sensores simulando um *Flank Array* de um submarino.

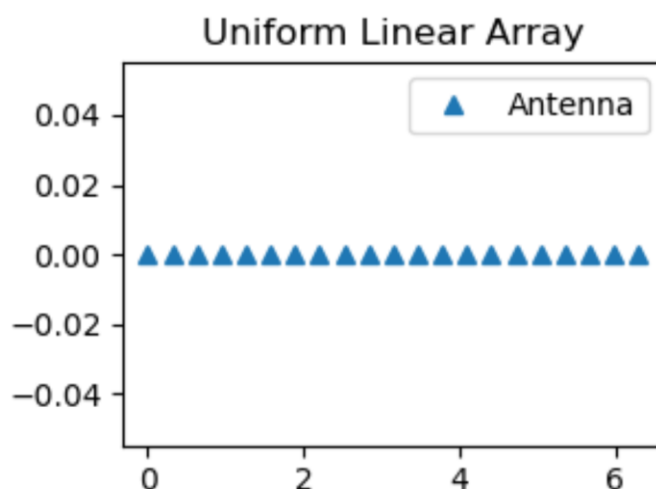


Figura 4.1 Exemplo de uma ULA com 21 elementos espaçados em 0.3 metros.

O algoritmo do DaS é funcional, porém apresenta lóbulos secundários, relativamente elevados, 5DB de intensidade. Ao se plotar sua diretividade é possível perceber uma elevada diretividade em um ângulo de chegada perpendicular ao arranjo. O *Beampattern* é muito diretivo pela quantidade de sensores, quanto maior a quantidade de sensores, mais estreito será o feixe do lóbulo primário, melhorando a diretividade

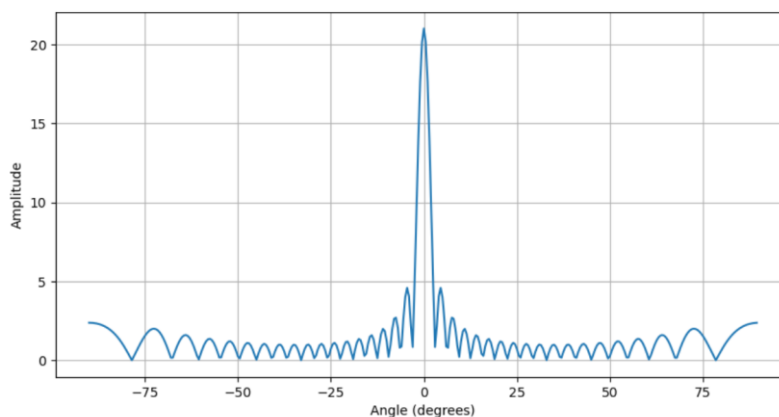


Figura 4.2 Diretividade apresentada pelo algoritmo.



Trocando o diagrama de radiação é possível perceber a elevada presença de lóbulos secundários e a influência na resolução do sinal, assim como visto na figura 4.2.

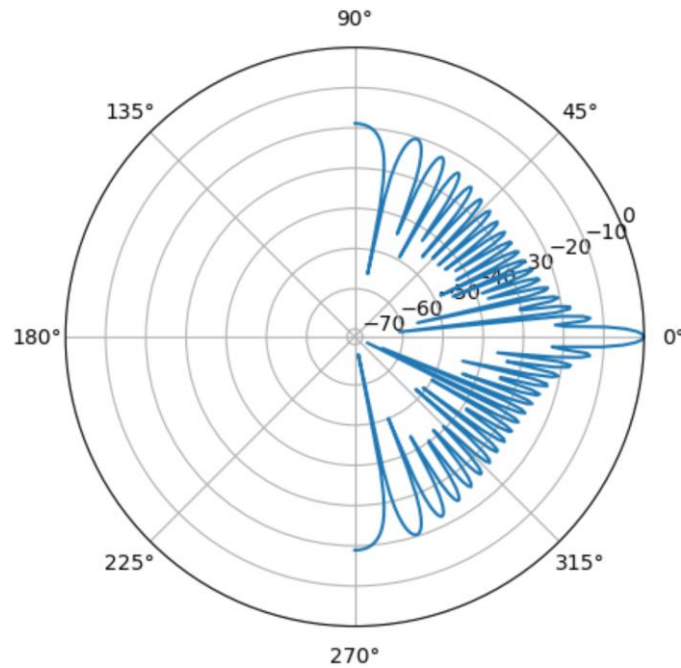


Figura 4.3 Presença influente dos lóbulos secundários.

Logo após foi proposto um algoritmo do MUSIC, no qual foi possível realizar um acerto entre os picos estimados de DoA e o espectro obtido.

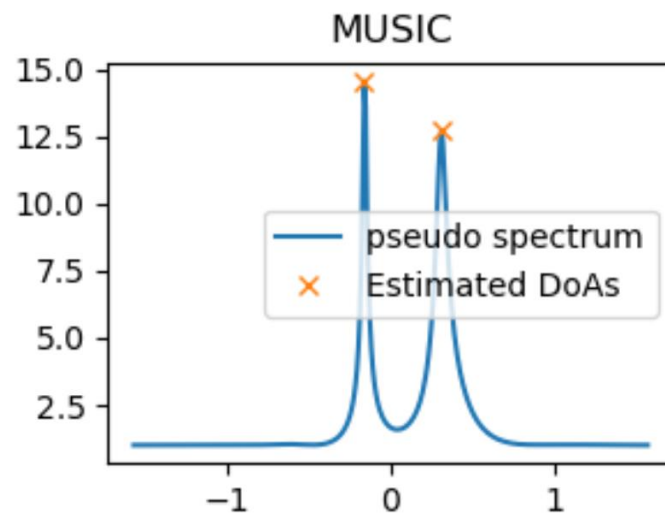


Figura 4.4 Algoritmo “acertou a direção” de chegada.

Já, no algoritmo do ESPRIT proposto, não foi possível “acertar” em virtude de uma alta correlação, que impossibilitou a execução perfeita do algoritmo, fato que pode ser visto nas Figuras

4.6 e 4.7, onde apesar de o Coeficiente de Pearson indicar uma correlação relativamente boa, não houve o “acerto” no sinal simulado.

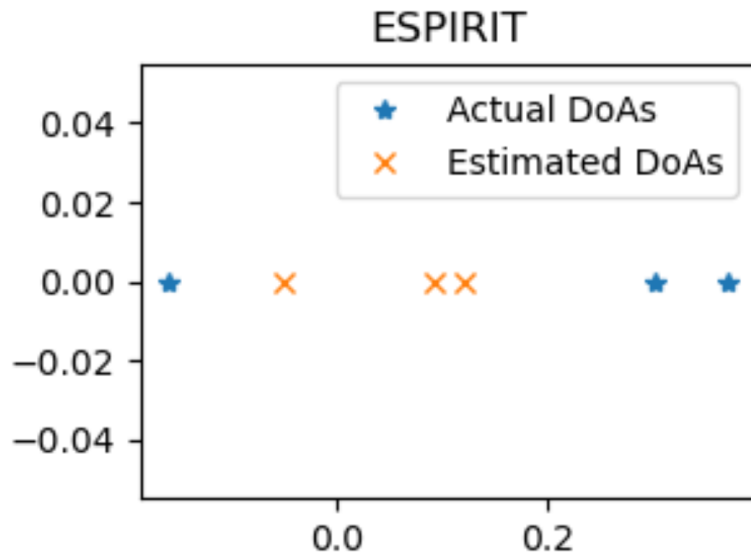


Figura 4.5 Algoritmo “errou a direção” de chegada.

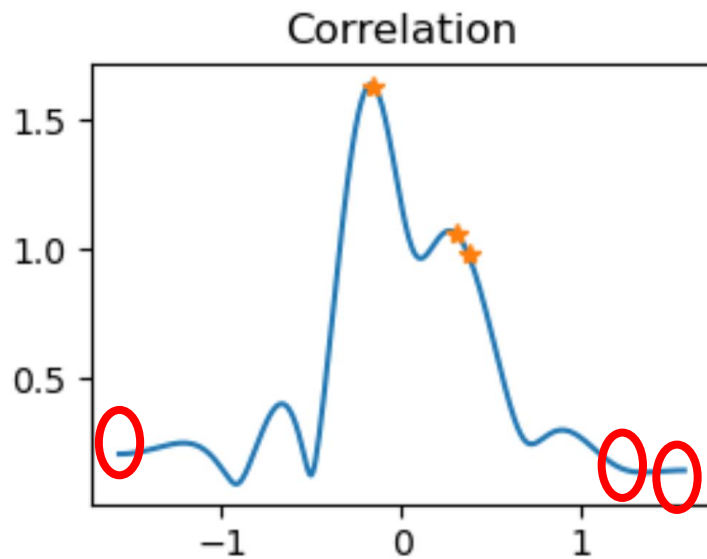


Figura 4.6 Gráfico de correlação.

Percebe-se que estão até com valores adequados sendo uma maior “dependência” na ortogonal, constatando também que nos sensores do meio há uma forte interação entre eles. O que possivelmente gerou o erro no algoritmo do ESPIRIT. Está marcado em vermelho os pontos reais do sinal.

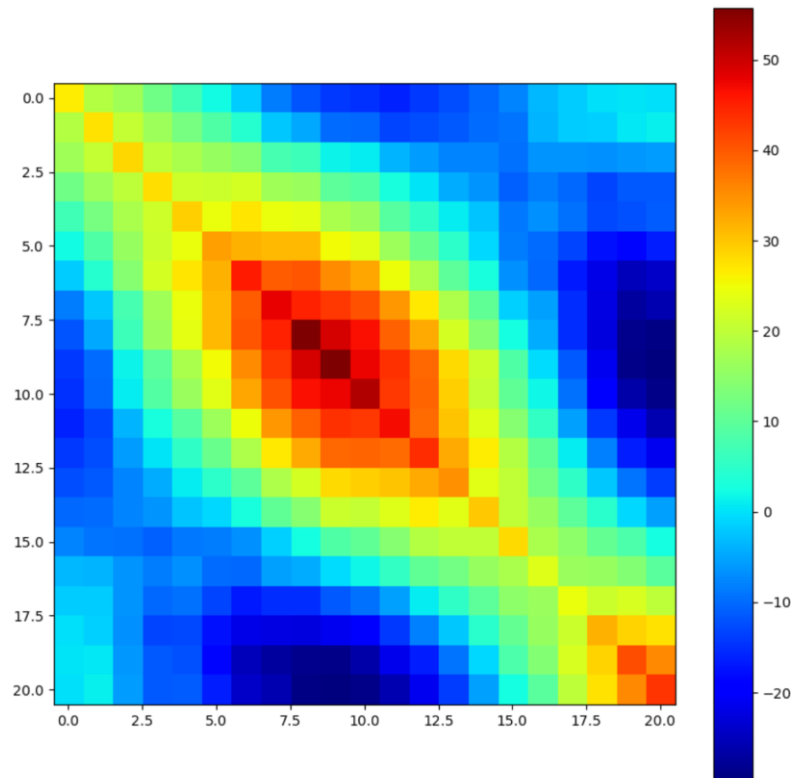


Figura 4.7 Matriz de correlação de Pearson.

Por fim propõe-se um algoritmo de FIB, travado numa faixa de frequência de 100Hz, apesar de não ser capaz de utilizar a parte de otimização convexa, para tornar o algoritmo mais robusto. O gráfico mostra uma boa relação, logo faz sentido colocar esse algoritmo como um pré-processamento para os outros algoritmos, seja MUSCI ou o ESPIRIT.

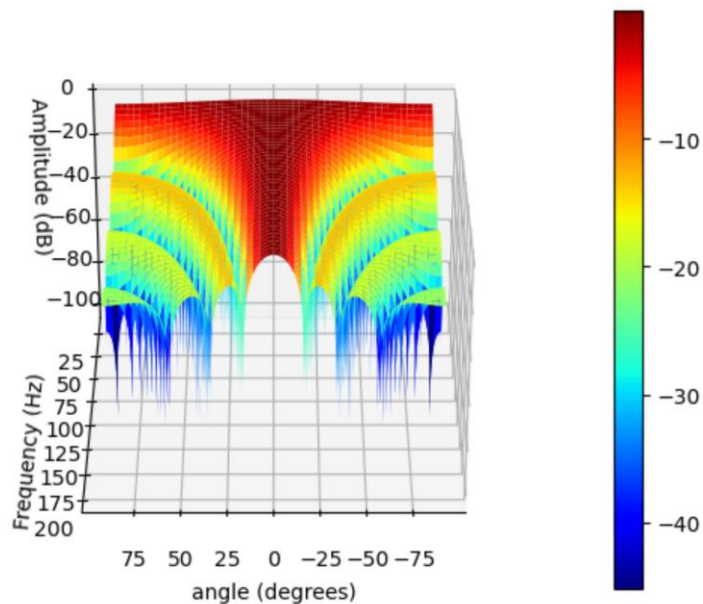


Figura 4.8 Representação de um FIB

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Considerações Finais

Neste capítulo será apresentado as conclusões decorrentes das análises realizadas nos tipos de *Beamforming* apresentados bem como o seu objetivo no que tange a diretividade, interferência de outros sinais e capacidade de resolução e bem como discriminação.

Foram propostos quatro algoritmos de conformação de feixes, DaS, MUSIC, ESPIRIT e FIB, com o intuito de se obter um melhor algoritmo a ser utilizado num *flank array* de um submarino. Verificou-se a diretividade e a capacidade de uso dos algoritmos para uma determinada situação. Notou-se também que o algoritmo do ESPIRIT não conseguiu dar a solução precisa, é necessária uma vista no código, ainda que tenha se acertado a correlação entre elementos não foi possível chegar a um bom resultado. O do FIB, ainda que não robusto pela otimização convexa, pode ser utilizado como um pré-processamento para os outros tipos de *Beamforming*.

Os resultados obtidos indicam que os determinados tipos de conformação de feixes podem ser aplicados em casos específicos com a finalidade de obter uma melhor relação sinal ruído e, portanto, ser capaz de especificar ou encontrar os alvos com uma certa eficiência. Sendo capaz de minimizar os “danos” causados pelos lóbulos secundários que interferem não só na detecção, mas também no processamento do sinal.

E por fim, esse estudo serviu para aumentar a compreensão a cerca dos diferentes tipos de conformação de feixes e suas possibilidades de aplicação. Ficando a cargo do decisor a opção de aumentar as áreas de pesquisas na parte de processamento de sinais.

### 5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Com a finalidade de expandir os horizontes já obtidos com esse trabalho segue alguns possíveis temas e possibilidades a serem exploradas nos cursos que se seguem:

- Conseguir explorar a otimização convexa no FIB nos próximos estudos;
- Acertar o algoritmo do ESPIRIT;
- Explorar a análise com o método Capon;
- Possibilidade de emular um sinal com um ruído não gaussiano e “passar nos sensores”;
- Exploração dessas técnicas em meios UUV e UAV; e
- Utilização dos métodos em Torpedos anti-torpedos;

## REFERÊNCIAS

- V KRISHNAVENI e T KESAVAMURTHY. **Beamforming for Direction-of-Arrival (DOA) Estimation-A Survey**. International Journal of Computer Applications, v.61, n.11, January. 2013.
- J. LI, P. STOICA e Z. WANG. **On robust capon beamforming and diagonal loading**. IEEE Trans. SignalProc., 51, July 2003.
- R. ROY, A. PAULRAJ e T. KAILATH, **ESPRIT-A subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise**, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process., vol. ASSP-34, pp. 1340-1342, October 1986.
- R. ROY e T. KAILATH, **ESPRIT: Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques**, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process, vol.ASSP-37, pp. 984-995, July 1989.
- R. ROY e T. KAILATH, **ESPRIT-Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques**, In E. F. Deprettere, editor, Singular Value Decomposition and Signal Processing North-Holland, Amsterdam, The Netherlands, September 1987.
- D MALIOUTOV, M CETIN e A. S. WILLSKY, **A Sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays**, IEEE Transactions on Signal processing, vol. 53, no 8, Aug 2005.
- X. L. XU e K. M. BUCKLEY, **Bias analysis of the MUSIC location estimator**, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process., vol. ASSP-40, pp. 2559-2569, October 1992.
- R. O. SCHMIDT, **Multiple emitter location and signal parameter estimation** IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-34, pp. 276-280, March 1986.
- BOZZI, F A. **Conformação de Feixe em Sonar Passivo para um Arranjo Cilíndrico de Hidrofones**, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2016.
- FELZKY, M. A. **Uma Contribuição às Técnicas de Localização de Fontes Sonoras Através de Sonar Passivo Utilizando Filtros Fracionários**, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2007.
- MOURA, N. N. **Detecção e Classificação de Sinais de Sonar Passivo usando métodos de Separação Cega de fontes**, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2013.
- ENGEL, M. S. P. **Estudo de técnicas de conformação de feixes fixa e ótima para arranjo circular uniforme com base em um sistema sonar passivo**. UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2018.
- SÁ, F. P. G. **Conformação de Feixes em Sonar Passivo Baseada em Invariância na Frequência**, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2016

M. HAWKES e A. NEHORAI, **Acoustic vector-sensor beamforming and capon direction estimation**, IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. SP-46, pp. 2291-2304, Sept. 1998.

HIGUTI, R. T. e KITANO, C. **Sinais e Sistemas**, Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP, São Paulo, 2003.

NALON, J. A., **Introdução ao Processamento Digital de Sinais**, LTC, Rio de Janeiro, 2017

H. VAN TREES, **Optimum Array Processing**. New York: Wiley, 2002, sec. Part IV of “Detection, Estimation and Modulation Theory”.

C. S. CLAY E H. MEDWIN, **Acoustical Oceanography**, John Wiley e Sons, New York, 1977.

**Árvore de decisão (Glossário: Coeficiente de correlação de Pearson)**. Disponível em: <http://www5.eesc.usp.br/saate/index.php/saate/Indicar-a-T%C3%A9cnica/Associar/2.-%C3%81rvore-de-decis%C3%A3o/Gloss%C3%A1rio/Coeficiente-de-correla%C3%A7%C3%A3o-de-Pearson>. Acesso em: 19/10/2023

**SISGAaz - Proteção e Monitoramento das Águas Jurisdicionais Brasileiras**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/sisgaaz-protecao-e-monitoramento-das-aguas-jurisdicionais-brasileiras>. Acesso em: 02/07/2023.

## ANEXO

Seguem algoritmos utilizados para realização do trabalho em *Python*, cabe ressaltar que o algoritmo de DOA do MUSIC e ESPIRIT foram retirados do github do pesquisador Deng Junguan

### **Algoritmo do DaS adaptado do Prof. DSc Moura Júnior:**

```
#Primeiro deve-se importar as bibliotecas
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as patches
import cmath

# fazer a resposta para cada angulo
num_elements = 21
amplitude = 1.0
spacing = 0.3
freq = 1000.0
speed_sound = 343.0
angles = np.arange(-90, 90, 0.5)

ampl_per_angle = np.zeros_like(angles)

for idx, angle in enumerate(angles):
    signal_sum = None

    for ielement in np.arange(0,num_elements,1):
        position = ielement*spacing
        delay = position*(np.sin(np.pi*angle/180))/speed_sound
        #print('%i element - position: %f - delay: %f'%(ielement, position,
        delay))

        if signal_sum is None:
            signal_sum = np.exp(2.0j*np.pi*freq*delay)
```

```

else:
    signal_sum += np.exp(2.0j*np.pi*freq*delay)

output=np.sqrt(np.real(signal_sum)*np.real(signal_sum)+np.imag(signal_sum)*n
p.imag(signal_sum))
ampl_per_angle[idx] = output
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10,5),nrows=1, ncols=1)
ax.plot(angles, ampl_per_angle)
ax.grid()
ax.set_xlabel('Angle (degrees)')
ax.set_ylabel('Amplitude');

```

### **Algoritmo do FIB adaptado do Prof. DSc Moura Júnior:**

```

num_elements = 21
amplitude = 1.0
spacing = 0.3
angle = 0.0
freq = 1000.0
speed_sound = 343.0

freqs = np.arange(20, 200, 1)
angles = np.arange(-90, 90, 0.1)

ampl_per_freq_and_angle = np.zeros([len(freqs),len(angles)])

for idy, angle in enumerate(angles):
    for idx, freq in enumerate(freqs):
        signal_sum = None

        for ielement in np.arange(0,num_elements,1):
            position = ielement*spacing
            delay = position*np.sin(np.pi*angle/180)/speed_sound

```



```

        #print('%i element - position: %f - delay: %f'%(ielement,
        position, delay))
    if signal_sum is None:
        signal_sum = np.exp(2.0j*np.pi*freq*delay)

    else:
        signal_sum += np.exp(2.0j*np.pi*freq*delay)

    output=np.sqrt(np.real(signal_sum)*np.real(signal_sum)+np.imag(signal_sum)*n
    p.imag(signal_sum))
    ampl_per_freq_and_angle[idx,idy] = 20.*np.log10(output)
    ampl_per_freq_and_angle      =      ampl_per_freq_and_angle      -
    np.max(ampl_per_freq_and_angle) # normalização

fig = plt.figure(figsize=(20,5))
ax = fig.add_subplot(131, projection='3d')

freq_xv, angle_xv = np.meshgrid(freqs,angles)

m_3d_plot      =      ax.plot_surface(angle_xv,      freq_xv,      ampl_per_freq_and_angle.T,
cmap=plt.get_cmap('jet'))
fig.colorbar(m_3d_plot,ax=ax, extend='both')
ax.grid()
ax.set_xlabel('angle (degrees)')
ax.set_ylabel('Frequency (Hz)')
ax.set_zlabel('Amplitude (dB)');

ax = fig.add_subplot(132, projection='3d')

m_3d_plot      =      ax.plot_surface(angle_xv,      freq_xv,      ampl_per_freq_and_angle.T,
cmap=plt.get_cmap('jet'))
fig.colorbar(m_3d_plot,ax=ax)
ax.grid()
ax.set_xlabel('angle (degrees)')

```

```

ax.set_ylabel('Frequency (Hz)')
ax.set_zlabel('Amplitude (dB)');

ax.view_init(30, 90)

ax = fig.add_subplot(133, projection='3d')

m_3d_plot = ax.plot_surface(angle_xv, freq_xv, ampl_per_freq_and_angle.T,
cmap=plt.get_cmap('jet'))
fig.colorbar(m_3d_plot,ax=ax)
ax.grid()
ax.set_xlabel('angle (degrees)')
ax.set_ylabel('Frequency (Hz)')
ax.set_zlabel('Amplitude (dB)');

ax.view_init(30, 135)

```

**Algoritmo do MUSIC e ESPRIT adaptado do Pesquisador Deng Junguan, da National University of Defence Technology de Najing :**

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.linalg as LA
import scipy.signal as ss
import operator

# Functions
def array_response_vector(array,theta):
    N = array.shape
    v = np.exp(1j*2*np.pi*array*np.sin(theta))
    return v/np.sqrt(N)

def music(CovMat,L,N,array,Angles):

```

```

# CovMat is the signal covariance matrix, L is the number of sources, N is the
number of antennas
# array holds the positions of antenna elements
# Angles are the grid of directions in the azimuth angular domain
_,V = LA.eig(CovMat)
Qn = V[:,L:N]
numAngles = Angles.size
pspectrum = np.zeros(numAngles)
for i in range(numAngles):
    av = array_response_vector(array,Angles[i])
    pspectrum[i] = 1/LA.norm((Qn.conj().transpose()@av))
psindB = np.log10(10*pspectrum/pspectrum.min())
DoAsMUSIC,_ = ss.find_peaks(psindB,height=1.35,distance=1.5)
return DoAsMUSIC,pspectrum

```

```
def esprit(CovMat,L,N):
```

```

    # CovMat is the signal covariance matrix, L is the number of sources, N is the
    number of antennas
    _,U = LA.eig(CovMat)
    S = U[:,0:L]
    Phi = LA.pinv(S[0:N-1]) @ S[1:N] # the original array is divided into two
    subarrays [0,1,...,N-2] and [1,2,...,N-1]
    eigs,_ = LA.eig(Phi)
    DoAsESPRIT = np.arcsin(np.angle(eigs)/np.pi)
    return DoAsESPRIT

```

```
np.random.seed(6)
```

```

lamda = 1 # wavelength
kappa = np.pi/lamda # wave number
L = 3 # number of sources
spacing = 0.3
N = 21 # number of ULA elements
snr = 15 # signal to noise ratio

```

```
array=[]
```

```
array = np.linspace(0,(N)*spacing, N)
```

```
plt.figure()
```

```
plt.subplot(221)
```

```
plt.plot(array,np.zeros(N),'^')
```

```
plt.title('Uniform Linear Array')
```

```
plt.legend(['Antenna'])
```

```
Thetas = np.pi*(np.random.rand(L)-1/2) # random source directions
```

```
Alphas = np.random.randn(L) + np.random.randn(L)*1j # random source powers
```

```
Alphas = np.sqrt(1/2)*Alphas
```

```
#print(Thetas)
```

```
#print(Alphas)
```

```
h = np.zeros(N)
```

```
for i in range(L):
```

```
    h = h + Alphas[i]*array_response_vector(array,Thetas[i])
```

```
Angles = np.linspace(-np.pi/2,np.pi/2,360)
```

```
numAngles = Angles.size
```

```
hv = np.zeros(numAngles)
```

```
for j in range(numAngles):
```

```
    av = array_response_vector(array,Angles[j])
```

```
    hv[j] = np.abs(np.inner(h,av.conj()))
```

```
powers = np.zeros(L)
```

```
for j in range(L):
```

```
    av = array_response_vector(array,Thetas[j])
```

```
    powers[j] = np.abs(np.inner(h,av.conj()))
```

```

plt.subplot(222)
plt.plot(Angles,hv)
plt.plot(Thetas,powers,'*')
plt.title('Correlation')
plt.legend(['Correlation power','Actual DoAs'])
numrealization = 100
H = np.zeros((N,numrealization)) + 1j*np.zeros((N,numrealization))

for iter in range(numrealization):
    htmp = np.zeros(N)
    for i in range(L):
        pha = np.exp(1j*2*np.pi*np.random.rand(1))
        htmp = htmp + pha*Alphas[i]*array_response_vector(array,Thetas[i])
    H[:,iter] = htmp + np.sqrt(0.5/snr)*(np.random.randn(N)+np.random.randn(N)*1j)
CovMat = H@H.conj().transpose()

# MUSIC algorithm
DoAsMUSIC, psindB = music(CovMat,L,N,array,Angles)

plt.subplot(223)
plt.plot(Angles,psindB)
plt.plot(Angles[DoAsMUSIC],psindB[DoAsMUSIC],'x')
plt.title('MUSIC')
plt.legend(['pseudo spectrum','Estimated DoAs'])

# ESPRIT algorithm
DoAsESPRIT = esprit(CovMat,L,N)
plt.subplot(224)
plt.plot(Thetas,np.zeros(L),'*')
plt.plot(DoAsESPRIT,np.zeros(L),'x')
plt.title('ESPRIT')
plt.legend(['Actual DoAs','Estimated DoAs'])

```

```
print('Actual DoAs:',np.sort(Thetas),'\n')
print('MUSIC DoAs:',np.sort(Angles[DoAsMUSIC]),'\n')
print('ESPRIT DoAs:',np.sort(DoAsESPRIT),'\n')

plt.show()
```