



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Estimativa de Direção de Chegada de Sinais Utilizando Análise de Componentes Independentes

Luis Alves Correia Filho

Área de Concentração: Processamento da Informação

Orientadores:
Glauco Fontgalland
Paulo Ixtânio Leite Ferreira

Campina Grande, Dezembro de 2018



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Estimativa de Direção de Chegada de Sinais Utilizando Análise de Componentes Independentes

Luis Alves Correia Filho

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Orientadores:
Glauco Fontgalland
Paulo Ixtânio Leite Ferreira

Campina Grande, Dezembro de 2018

C824e Correia Filho, Luis Alves.
Estimativa de direção de chegada de sinais utilizando análise de componentes independentes / Luis Alves Correia Filho. – Campina Grande, 2018.
66 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Glauco Fontgalland, Prof. Dr. Paulo Ixtânio Leite Ferreira."
Referências.

1. Antenas inteligentes. 2. Localização de fontes. 3. Análise de componentes independentes. 4. Direção de chegada. I. Fontgalland, Glauco. II. Ferreira, Paulo Ixtânio Leite. III. Título.

CDU 621.396.67(043)

"ESTIMATIVA DE DIREÇÃO DE CHEGADA DE SINAIS UTILIZANDO ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES"

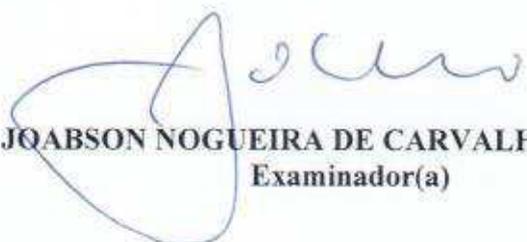
LUIS ALVES CORREIA FILHO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 10/12/2018


GLAUCIO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Orientador(a)


PAULO IXTÂNIO FERREIRA LEITE, D.Sc., IFPB
Orientador(a)


WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO, Dr., IFPB
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Dedico este trabalho aos meus pais: Luis Alves
Correia e Kátia Regina Soares Lima Correia.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade da realização deste trabalho.

Agradeço aos meus pais e a toda minha família pela força e pelo incentivo para que eu pudesse cursar a pós-graduação.

Agradeço aos professores Glauco Fontgalland e Paulo Ixtânio Leite Ferreira por todas as orientações ao longo do trabalho.

Agradeço a todos os amigos da pós-graduação: Raymundo, Tagleorge, Gustavo, João Rubens, Andrécia, Priscilla e muitos outros que proporcionaram grandes momentos de aprendizado e também de descontração.

Agradeço à UFCG e à COPELE (Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) pela oportunidade de cursar a pós-graduação.

Luis Alves Correia Filho

Resumo

Nesta dissertação é realizado o estudo de um algoritmo para estimar a direção de chegada (DoA) de sinais utilizando Análise de Componentes Independentes (ICA). A estimação da DoA é aplicada em vários problemas com fontes eletromagnéticas, como rede de sensores e processamento de arranjos de antenas inteligentes, sendo um tópico bastante investigado devido a possíveis aplicações em internet das coisas (IoT) e na quinta geração de telefonia celular (5G). Os métodos clássicos para obtenção da DoA como a Classificação de Múltiplos Sinais (MUSIC) e a Estimação de Parâmetros de Sinais via Técnicas de Invariância Rotacional (ESPRIT) apresentam algumas restrições de aplicação. A detecção de fontes sobrepostas (que tem a mesma DoA) é uma das limitações desses métodos, uma vez que os mesmos não conseguem estimar a presença de mais de uma fonte se elas irradiarem na mesma direção. Uma outra restrição é que esses métodos necessitam de mais sensores do que fontes eletromagnéticas para estimar com segurança a DoA. Na formulação clássica do ICA foi adicionado o termo relativo ao atraso de fase à matriz dos sinais originais. Parâmetro esse que posteriormente é usado para determinar a direção de chegada. Neste trabalho foram feitas simulações computacionais comparando o método ICA estudado com os métodos clássicos MUSIC e ESPRIT. Foi possível validar que o ICA consegue superar as restrições dos métodos clássicos com relação à estimação de fontes sobrepostas e trabalhar com um número menor de sensores, ou seja, mesmo número de sensores e fontes. Foram feitas medições com antenas para confirmar experimentalmente a eficácia da extensão do método ICA para detecção de fontes eletromagnéticas nessas situações. Embora a técnica apresente um erro superior com relação a algoritmos como o MUSIC, o algoritmo conseguiu detectar a DoA de todas as fontes em situações adversas, além de conseguir relacionar cada DoA à sua respectiva fonte eletromagnética.

Palavras-chave: Antenas Inteligentes, Localização de Fontes, Análise de Componentes Independentes, Direção de Chegada.

Abstract

This work constitutes with the study of an algorithm to estimate the direction of arrival (DoA) of signals using Independent Component Analysis (ICA). The DoA estimation is applied in several problems with electromagnetic sources, such as sensor networks and processing of smart antennas, being a topic investigated due to applications in Internet of Things (IoT) and in the fifth generation of cellphones (5G). The classical methods used to obtain DoA, as the Multiple Signal Classification (MUSIC) and the Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (ESPRIT) have some restrictions. The detection of overlapping sources (which has the same DoA) is one limitation of these methods, since they can not estimate the presence of more than one source if they radiate in the same direction. Another constraint is that these methods require more sensors than electromagnetic sources to safely estimate DoA. In the classical ICA formulation was added the term related to phase delay to the signal matrix. This parameter is subsequently used to determine the direction of arrival. In this work, simulations were performed comparing the ICA method studied with the classical methods MUSIC and ESPRIT. It was possible to validate that the ICA can overcome the restrictions of the classic methods in relation to the estimation of overlapping sources and to work with a smaller number of sensors, that is, the same number of sensors and sources. Measurements were made with antennas to experimentally confirm the effectiveness of the extension of the ICA method to detect electromagnetic sources in these situations. Although the technique presents a greater error compared to algorithms like MUSIC, the algorithm was able to detect the DoA of all the sources in adverse situations, besides being able to relate each DoA to its respective electromagnetic source.

Keywords: Smart Antennas, Source Location, Independent Component Analysis, Direction of Arrival.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	14
2. ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES (ICA)	16
2.1. Algoritmo - FastICA Complexo	18
3. ESTIMATIVA DE DIREÇÃO DE CHEGADA DE SINAIS PARA LOCALIZAÇÃO DE FONTES ELETROMAGNÉTICAS.....	24
3.1. <i>Modelo do Sinal</i>	25
3.2. <i>Métodos Clássicos de Estimação da DoA Usando Conformação de Feixe</i>	27
3.2.1. <i>Conformação de Feixe Clássico (CB)</i>	28
3.2.2. <i>Resposta sem Distorção de Variância Mínima (MVDR)</i>	30
3.3. <i>Métodos Clássicos de Estimação da DoA Usando Métodos de Subespaços</i>	32
3.3.1. <i>MUSIC</i>	32
3.3.2. <i>ESPRIT</i>	34
4. ESTIMATIVA DA DOA USANDO ICA.....	37
4.1. <i>Casos de Estudo para Estimação da DoA</i>	39
4.1.1. <i>Estimação da DoA com Mais Sensores do que Fontes</i>	39
4.1.2. <i>Estimação de DoA com o mesmo Número de Sensores e Fontes</i>	48
4.1.3. <i>Estimação de DoA com Fontes Sobrepostas</i>	52
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	56
6. CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS.....	65

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Diagrama Esquemático - FastICA Complexo	18
Figura 2. Espectro de Amplitude dos Sinais Utilizados na Simulação	20
Figura 3-Sinais Misturados (1,8 GHz e 2,45 GHz)	21
Figura 4. Sinais Separados pelo ICA.....	21
Figura 5. Sinais Gerados nas Frequências de 2,44 2,45 e 2,46 GHz	22
Figura 6. Sinais misturados (2,44 2,45 e 2,46 GHz).....	22
Figura 7. Sinais separados (2,44 2,45 e 2,46 GHz).....	23
Figura 8. Arranjo de antenas com feixe principal direcionado	24
Figura 9. Modelo Utilizado para Caracterizar DoA de uma fonte EM (adaptado de [1]).....	26
Figura 10. Pseudoespectro do CB para a situação simulada (ULA com 5, 10 e 15 elementos) .	29
Figura 11. Pseudoespectro do MVDR para a situação simulada (ULA de 5, 10 e 15 elementos)	31
Figura 12. Pseudoespectro do MVDR para a situação simulada (ULA de 5, 10 e 15 elementos)	33
Figura 13. Subarranjos de antenas considerados no ESPRIT (adaptado de [1])	35
Figura 14. Fluxograma do Método para Estimar DoA usando ICA	37
Figura 15. Diagrama ilustrando a simulação para 4 fontes eletromagnéticas	39
Figura 16. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 5 elementos).....	40
Figura 17. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 5 elementos).....	40
Figura 18. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (ULA de 5 elementos).....	41
Figura 19. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 5 elementos)	42
Figura 20. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 8 elementos).....	43
Figura 21. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 8 elementos).....	43
Figura 22. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (Arranjo de 8 elementos).....	44
Figura 23. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 8 elementos)	45
Figura 24. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 10 elementos).....	45
Figura 25. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 10 elementos).....	46
Figura 26. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (Arranjo de 10 elementos)	46

Figura 27. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 10 elementos).....	47
Figura 28. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 4 elementos).....	48
Figura 29. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 4 elementos).....	49
Figura 30. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (Arranjo de 4 elementos).....	49
Figura 31. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 4 elementos).....	51
Figura 32. DoAs Estimadas pelo Método ICA com relação ao número de elementos no ULA... 	51
Figura 33. Diagrama da Simulação - Fontes sobrepostas (2,44 GHz e 2,45 GHz a 40° e 2,46 GHz a 120°)	52
Figura 34. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 4 elementos).....	53
Figura 35. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 4 elementos).....	53
Figura 36. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (Arranjo de 4 elementos).....	54
Figura 37. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 4 elementos).....	55
Figura 38. Experimento de Medição.....	56
Figura 39. Posições Assumidas pela Antena para constituir o arranjo virtual (VULA)	56
Figura 40. Antenas Log-Periódicas e Geradores Utilizados como Fonte nos Experimentos	57
Figura 41. Esquema do Experimento 1 com a fonte na primeira e segunda posição.....	58
Figura 42. Erro absoluto conforme o número de medições para a Posição 1 da Fonte	59
Figura 43. Pseudoespectro do MUSIC para a medição na posição 1 (140°)	59
Figura 44. Erro absoluto conforme o número de medições para a Posição 2 da Fonte	60
Figura 45. Espectro do MUSIC para a segunda posição.....	61
Figura 46. Função Pseudoespectro do MUSIC para o caso de fontes sobrepostas.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. RMSE para a situação simulada no CB	30
Tabela 2. RMSE para a situação simulada no MVDR	32
Tabela 3. RMSE para a situação simulada no MUSIC	34
Tabela 4. RMSE para a situação simulada no ESPRIT	36
Tabela 5. DoAs obtidas pelo ICA e métodos clássicos – ULA de 5 elementos	42
Tabela 6. DoAs obtidas pelo ICA e métodos clássicos - ULA de 8 elementos	44
Tabela 7. DoAs obtidas pelo ICA e métodos clássicos - ULA de 10 elementos	47
Tabela 8: RMSE para a simulação realizada (ICA e métodos clássicos)	48
Tabela 9. DoAs obtidas - simulação 4 fontes e 4 elementos	50
Tabela 10. DoAs obtidas - simulação com fontes sobrepostas	54
Tabela 11. Direções Obtidas para o Experimento com a Fonte na posição de 140°	58
Tabela 12. Direções Obtidas para o Experimento com a Fonte na posição de 50°	60
Tabela 13. DoAs Obtidas pelos diferentes Métodos para a Situação Simulada.....	61
Tabela 14. Direções de Chegada Obtidas para o Experimento de Fontes Sobrepostas	62

LISTA DE SÍMBOLOS

\mathbf{a} – Vetor Diretor

A_{qp} - Atenuação

\mathbf{A} – Matriz de mistura dos sinais

\mathbf{B} – Matriz de Branqueamento

c – Velocidade de propagação

d – Distância entre os elementos do arranjo

d_q – Posição do sensor

f - Frequência

\mathbf{I} – Matriz Identidade

N_{wg} – Ruído Branco Gaussiano

\mathbf{R} – Matriz de Correlação de Sinais

\mathbf{s} – Sinais das Fontes Originais

\mathbf{w} – Vetor de Pesos

\mathbf{W} – Matriz de Separação de Sinais

\mathbf{x} – Matriz de sinais medidos

\mathbf{y} – Matriz de Componentes Independentes Separadas

λ – Comprimento de onda

λ_{val} – Matriz de autovalores

μ_i – Frequência espacial

Δ_{mi} – Variação da distância percorrida pelo feixe da onda plana em relação ao primeiro elemento do arranjo

θ_i – Ângulo de Chegada

LISTA DE ABREVIATURAS

BSS – *Blind Source Separation* (Separação Cega de Fontes)

CB – *Classical Beamforming* (Conformação de Feixe Clássico)

DoA – *Direction of Arrival* (Direção de Chegada)

ESPRIT – *Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique*
(Estimação de Parâmetros de Sinais via Técnicas de Invariância Rotacional)

ICA – *Independent Component Analysis* (Análise de Componentes Independentes)

MUSIC – *Multiple Signal Classification* (Classificação de Múltiplos Sinais)

MVDR – *Minimum Variance Distortionless Response* (Resposta sem Distorção de Variância Mínima)

RMSE – *Root Mean Square Error* (Erro Médio Quadrático)

SNR – *Signal to Noise Ratio* (Relação Sinal-Ruído)

VULA – *Virtual Uniform Linear Array* (Arranjo Virtual Linear Uniforme)

VNA – *Virtual Network Analyzer* (Analisador de Rede Vetorial)

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

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

A estimação da direção de chegada (*Direction of Arrival* – DoA) de sinais, é aplicada em vários problemas com fontes eletromagnéticas, como redes de sensores, monitoramento de ambiente e processamento de arranjos de antenas inteligentes [1]

Vários algoritmos foram desenvolvidos para estimar a direção de chegada, com a finalidade de reduzir o número de sensores utilizados, diminuir o tempo de processamento computacional e melhorar a exatidão das DoA obtidas [1].

Os algoritmos mais presentes na literatura são os baseados na técnica de Conformação de Feixe (*beamforming*), sendo estes a Conformação de Feixe Clássica (*Classical Beamformer* - CB) e a Resposta sem Distorção de Variância Mínima (*Minimum Variance Distortionless Response* - MVDR). Outra técnica muito utilizada na literatura é a de separação em subespaços, sendo mais destacados os métodos: Estimação de Parâmetros de Sinais via Técnicas de Invariância Rotacional (*Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques* - ESPRIT) e a Classificação de Múltiplos Sinais (*Multiple Signal Classification* - MUSIC).

Sawada et. al. (2003) utilizou a Análise de Componentes Independentes (*Independent Component Analysis* – ICA) para determinar a DoA de fontes sonoras e comparou o resultado com o MUSIC. Sua avaliação mostrou que o método conseguiu uma melhora no tempo de processamento computacional e utilizando menos sensores que o MUSIC [2].

Os métodos clássicos para detecção de DoA de fontes eletromagnéticas têm algumas restrições com relação à detecção de fontes sobrepostas e também com relação a detectar a DoA com o número de sensores igual ao número de fontes.

Alguns trabalhos anteriores com relação ao ICA [3] mostram que esse método é capaz de detectar e separar fontes eletromagnéticas em casos nos quais as fontes são sobrepostas ou quando há o mesmo número de sensores e fontes, sendo possível também utilizá-lo para estimar a DoA nesses casos específicos. Para este trabalho, foi estudado um método que utiliza a informação obtida por meio do ICA para detectar

a DoA de fontes eletromagnéticas, mostrando suas vantagens e desvantagens com relação aos métodos mais utilizados na literatura.

Esta dissertação está organizada em 7 capítulos. No capítulo 2, são explanadas as características e o funcionamento do método ICA. No capítulo 3 são descritos alguns conceitos sobre estimação da DoA, bem como os métodos clássicos utilizados. No capítulo 4 é explicado o algoritmo utilizando ICA para estimar a DoA e são feitas simulações computacionais para obter o seu comportamento em diferentes situações. No capítulo 5 algumas medições com antenas foram feitas para testar o método. No capítulo 6 as conclusões obtidas com o trabalho são explanadas e são feitas sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES (ICA)

A Análise de Componentes Independentes é um método utilizado para resolver problemas de separação cega de fontes (*Blind Source Separation* - BSS) [4], sendo uma técnica que utiliza processamento estatístico de sinais [5], [6].

Aplicando esse método para fontes eletromagnéticas, o ICA pode separar sinais emitidos tanto de forma guiada como irradiada. Uma das suas principais vantagens é que não há necessidade de conhecimento prévio do processo de mistura dos sinais ou das fontes originais. Os dados de entrada podem ser o espectro de frequência dos sinais medidos [7].

O modelo do ICA é baseado na combinação linear ou não-linear dos sinais das fontes originais (s) multiplicados pelos coeficientes da matriz de mistura (A) dos sinais. O modelo do ICA para n fontes é dado pelas Equações 1 e 2:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_1(t) = a_{11}s_1(t) + a_{12}s_2(t) + a_{13}s_3(t) + \dots + a_{1n}s_n(t) \\ x_2(t) = a_{21}s_1(t) + a_{22}s_2(t) + a_{23}s_3(t) + \dots + a_{2n}s_n(t) \\ \dots \\ x_n(t) = a_{n1}s_1(t) + a_{n2}s_2(t) + a_{n3}s_3(t) + \dots + a_{nn}s_n(t) \end{cases} \quad (2)$$

Para um conjunto de sinais observados $\mathbf{x} = [x_1, x_2 \dots x_m]^T$, o ICA tem por finalidade encontrar uma matriz de separação \mathbf{W} tal que $\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x}$. Sendo que $\mathbf{y} = [y_1, y_2 \dots y_m]^T$ corresponde à matriz com as componentes tão mutuamente independentes quanto possível, determinadas pela Equação 3.

$$\begin{cases} y_1(t) = w_{11}x_1(t) + w_{12}x_2(t) + w_{13}x_3(t) + \dots + w_{1n}x_n(t) \\ y_2(t) = w_{21}x_1(t) + w_{22}x_2(t) + w_{23}x_3(t) + \dots + w_{2n}x_n(t) \\ \dots \\ y_n(t) = w_{n1}x_1(t) + w_{n2}x_2(t) + w_{n3}x_3(t) + \dots + w_{nn}x_n(t) \end{cases} \quad (3)$$

Para encontrar os coeficientes w_{ij} da matriz de separação é utilizada a otimização de uma função que usa as propriedades estatísticas dos sinais. Essas funções aproximam o cálculo da negentropia e maximizam a não-gaussianidade dos sinais das fontes. A negentropia é obtida a partir do diferencial da entropia, sendo uma medida que é zero para uma variável gaussiana e é sempre não negativa [8].

Para que o ICA possa ser aplicado alguns requisitos devem ser atendidos no problema analisado.

Primeiramente, os sinais das fontes devem ser estatisticamente independentes entre si, ou seja, o sinal da fonte x não traz qualquer informação da fonte y , e vice-versa.

Outro requisito para o uso do ICA é que os sinais das fontes devem apresentar distribuições não-gaussianas ou no máximo uma delas seja gaussiana. Isso ocorre devido ao fato de que para variáveis gaussianas a função de probabilidade conjunta impede a estimação da matriz de mistura A .

Esse requisito é fundamentado pelo teorema da separabilidade do modelo ICA. No qual $x = As$ é separável, se e somente se, a matriz A possuir posto completo e no máximo um elemento do vetor fonte s for gaussiano [8].

Existem várias formas de se implementar o ICA [9], uma das formas mais populares é o FastICA, um algoritmo simples de ser implementado que utiliza as funções de (4) à (6) e suas derivadas, devido ao fato de que estas determinam a negentropia muito precisamente.

$$g_1(y) = \text{tgh}(a_1 y) \tag{4}$$

$$g_2(y) = ye^{-y/2} \tag{5}$$

$$g_3(y) = y^3. \tag{6}$$

Utilizando o FastICA, é possível separar fontes eletromagnéticas que possuem uma diferença de frequência de 0,07%, ou seja, consegue-se separar fontes que tenham praticamente a mesma frequência. Além de poder detectar fontes extremamente próximas umas das outras [10].

2.1. Algoritmo - FastICA Complexo

Quando se trabalha com sinais no domínio da frequência utilizando a transformada de Fourier é necessário trabalhar com valores complexos [9]. A detecção de direção de chegada de sinais envolve operações com a amplitude e a fase dos sinais, sendo então necessário, trabalhar com valores complexos. Bingham [11], adaptou o algoritmo - FastICA para valores complexos [12]. Na Figura 1 é mostrado um diagrama que ilustra os passos do método.



Figura 1. Diagrama Esquemático - FastICA Complexo

As funções de (7) à (12) são as funções custo que podem ser utilizadas no FastICA complexo, sendo as funções g_i , as derivadas das funções G_i .

$$G_1(y) = \sqrt{a_1 + y} \quad (7)$$

$$g_1(y) = \frac{1}{2\sqrt{a_1+y}} \quad (8)$$

$$G_2(y) = \log(a_2 + y) \quad (9)$$

$$g_2(y) = \frac{1}{a_2+y} \quad (10)$$

$$G_3(y) = \frac{1}{2}y^2 \quad (11)$$

$$g_3(y) = y. \quad (12)$$

O FastICA Complexo consiste em um algoritmo de ponto fixo no qual os dados precisam passar por um pré-processamento chamado de branqueamento para descorrelacionar os sinais medidos. Neste pré-processamento a variável observada x é transformada em uma variável com média zero, de forma que o valor esperado dessa variável multiplicado pela sua hermitiana resulte na matriz identidade na forma da Equação 13.

$$E\{xx^H\} = I. \quad (13)$$

A matriz de branqueamento B pode ser obtida utilizando a matriz de autovalores λ_{val} e autovetores U da matriz de covariância R [13], como mostrado nas Equações 14 e 15.

$$R = E\{xx^H\} = U\lambda_{val}U^T = U\lambda_{val}^{1/2}\lambda_{val}^{1/2}U^T \quad (14)$$

$$B = \lambda_{val}^{-1/2}U^T. \quad (15)$$

O algoritmo do ponto fixo é dado pelas Equações 16 e 17, este utiliza uma função custo g e as suas respectivas derivadas g' .

$$w^+ \leftarrow E\{x(w^H x) * (g|w^H x|^2)\} - E\{g(|w^H x|^2) + |w^H x|^2 g'(|w^H x|^2)\}w \quad (16)$$

$$w_{p+1} \leftarrow \frac{w^+}{\|w^+\|}. \quad (17)$$

No qual a matriz w^H é a hermitiana (matriz conjugada transposta) da matriz w .

Para critério de parada do algoritmo de ponto fixo podem ser definidos um número máximo de iterações ou uma diferença entre a matriz w gerada a cada iteração.

Para prevenir que todas as linhas da matriz não venham a convergir para o mesmo máximo, as saídas devem ser descorrelacionadas após cada iteração. Para isso, o algoritmo oferece duas opções de descorrelação: por deflação ou ortogonalização simétrica [11].

Uma forma de descorrelação por deflação é chamada de descorrelação de Gram-Schmidt, na qual a matriz de separação w_{p+1} , gerada a cada iteração, é subtraída das projeções dos vetores da matriz gerada anteriormente e então renormalizada. Os passos principais desse processo são descritos nas Equações 18 e 19.

$$w_{p+1} = w_{p+1} - \sum_{j=1}^p w_j w_j^H w_{p+1} \quad (18)$$

$$w_{p+1} = \frac{w_{p+1}}{|w_{p+1}|}. \quad (19)$$

Dependendo da quantidade de fontes é preferível utilizar a decorrelação simétrica, estimando todas as componentes independentes simultaneamente. Esse processo é feito de acordo com a Equação 20.

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}(\mathbf{w}^H \mathbf{w})^{-1/2}. \quad (20)$$

Os sinais recuperados (componentes independentes) são obtidos resolvendo a Equação 21.

$$\mathbf{y} = \mathbf{w}^H \mathbf{x}. \quad (21)$$

Foi realizada uma simulação para verificar a capacidade do ICA Complexo de separar sinais de frequências distintas, sendo um sinal centrado na frequência de 1,8 GHz (padrão 4G) e outro centrado em 2,45 GHz (redes *wireless* do padrão IEEE 802.11g).

As fontes foram geradas e misturadas com ruído branco gaussiano para uma relação sinal ruído de 5 dB. Os espectros de amplitude dos dois sinais gerados para a simulação estão representados na Figura 2.

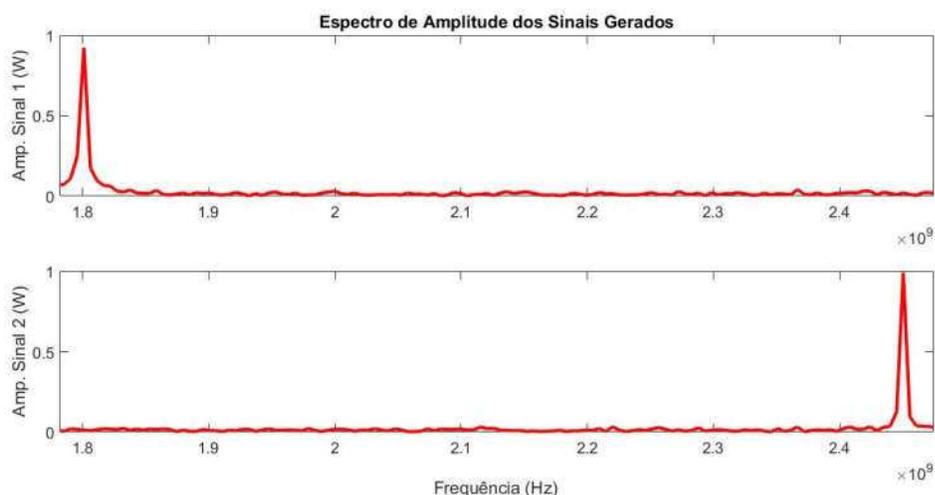


Figura 2. Espectro de Amplitude dos Sinais Utilizados na Simulação

Após gerados, os sinais foram misturados de forma aleatória e observados por dois sensores, conforme o modelo do ICA retratado em (1). O resultado está indicado na Figura 3.

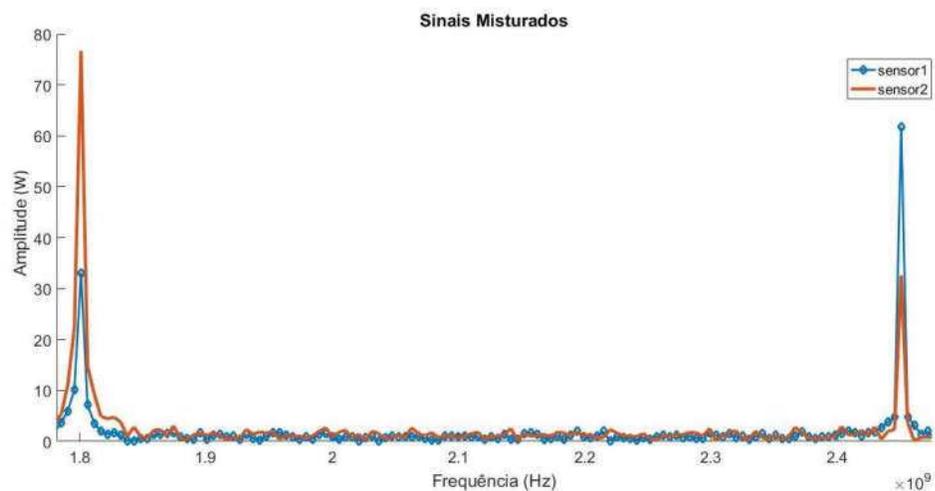


Figura 3-Sinais Misturados (1,8 GHz e 2,45 GHz)

Após aplicar o ICA complexo nas misturas, obtém-se as componentes independentes separadas mostradas na Figura 4. Pode-se observar a eficácia do ICA Complexo para separar fontes de frequências distantes (1,8 GHz e 2,45 GHz) e com uma relação sinal ruído de 5 dB.

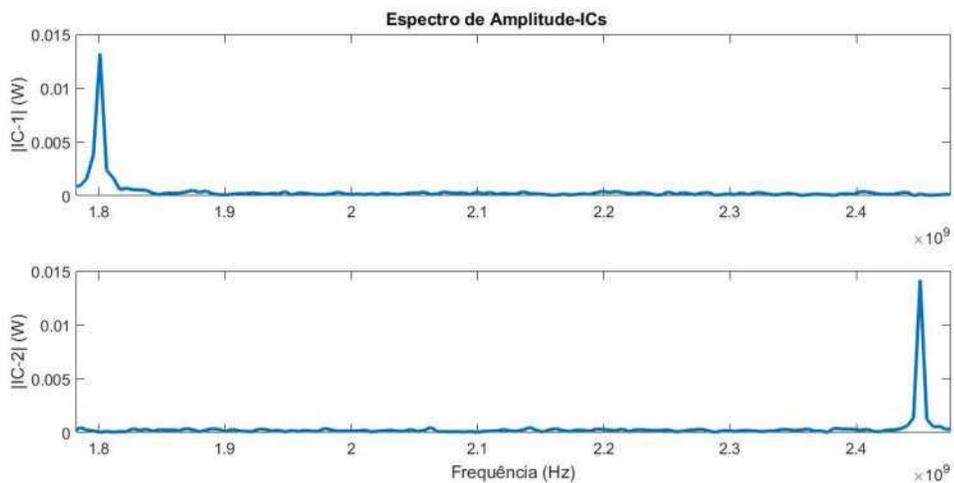


Figura 4. Sinais Separados pelo ICA

Para verificar a propriedade do ICA Complexo de separar frequências próximas, foram gerados três sinais de frequências próximas, na faixa de 2,45 GHz. Tais sinais fontes são apresentados na Figura 5.

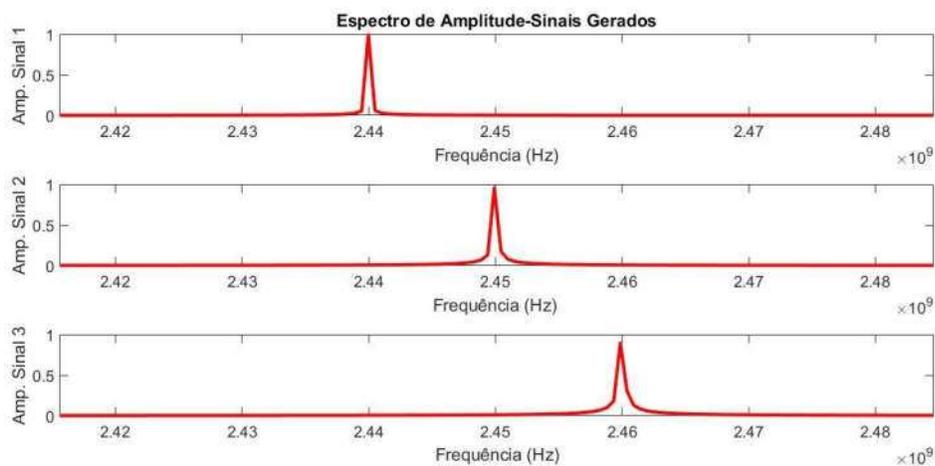


Figura 5. Sinais Gerados nas Frequências de 2,44 2,45 e 2,46 GHz

As fontes originais foram multiplicadas por uma matriz de coeficientes aleatórios, gerando três misturas observadas por três sensores, formando o conjunto de dados observados (x), ilustrados na Figura 6.

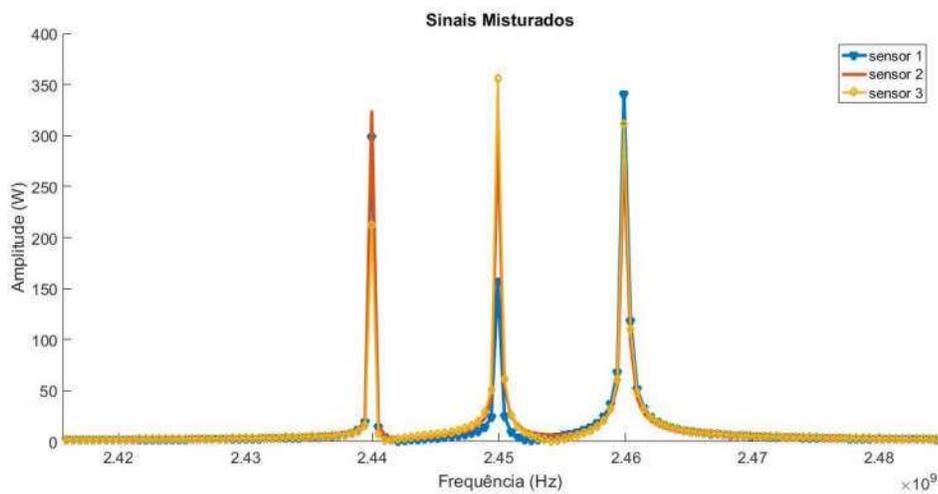


Figura 6. Sinais misturados (2,44 2,45 e 2,46 GHz)

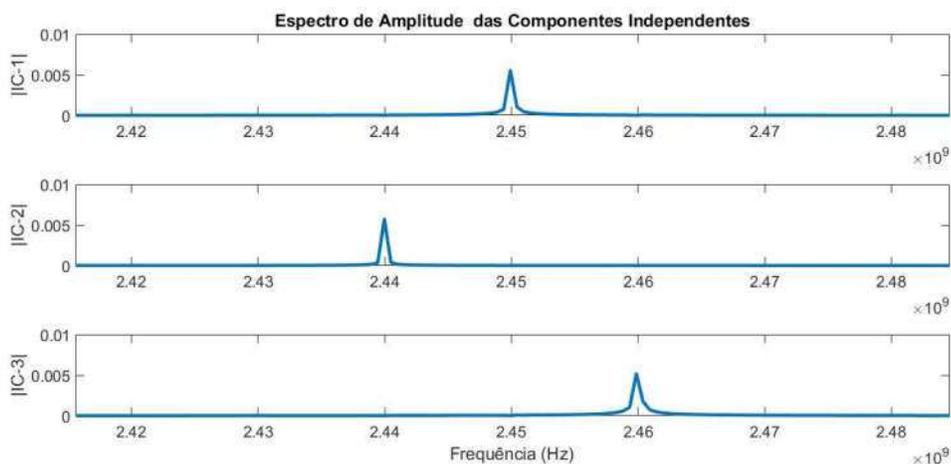


Figura 7. Sinais separados (2,44 2,45 e 2,46 GHz)

É possível observar, na Figura 7, que o FastICA Complexo consegue separar fontes com frequências muito próximas, conseguindo recuperar os sinais desejados. Porém, a amplitude das fontes não foi preservada, sendo esta uma característica do ICA.

Outra característica do ICA é que as fontes não vêm na mesma ordem que os dados de entrada, ou seja, deve-se contar com essa possibilidade de permutação na saída.

Capítulo 3

3. ESTIMATIVA DE DIREÇÃO DE CHEGADA DE SINAIS PARA LOCALIZAÇÃO DE FONTES ELETROMAGNÉTICAS

Para o controle de arranjos de antenas inteligentes [14], a informação da DoA é um dado essencial no direcionamento do feixe principal para as fontes eletromagnéticas desejadas, melhorando a recuperação do sinal desejado e suprimindo sinais interferentes, sendo muito importante em aplicações para telefonia celular [15], [16], [17] comunicação marinha [18], melhorias em redes de sensores [19], [20], dentre outras.

Um exemplo de duas fontes interferentes e uma fonte desejada é ilustrado na Figura 8.

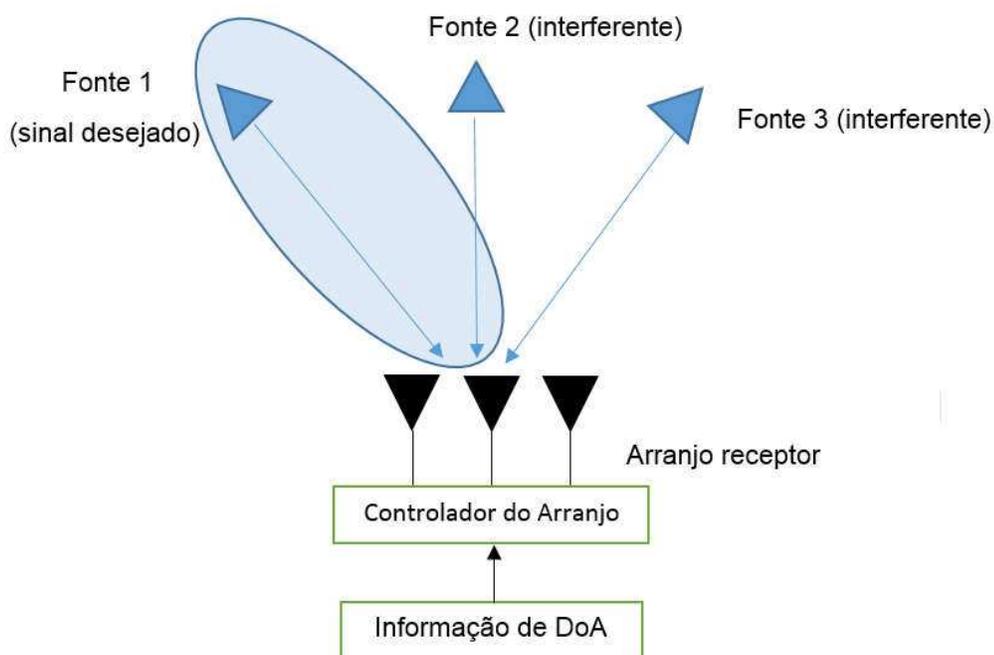


Figura 8. Arranjo de antenas com feixe principal direcionado

Para esse exemplo, com o direcionamento do feixe principal, é melhorada a relação sinal ruído (SNR) para a Fonte 1 (desejada) e minimizada a SNR para as Fontes 2 e 3 (interferentes), melhorando assim a capacidade de comunicação.

Um bom indicador da exatidão do estimador da DoA é o erro médio quadrático (*Root Mean Square Error – RMSE*). Esse indicador envolve principalmente a diferença entre os valores observados $\hat{\theta}_i$ e os valores reais θ_i para um número de fontes N . Ele é definido matematicamente pela Equação (22).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\theta_n - \hat{\theta}_n)^2} \quad (22)$$

3.1. Modelo do Sinal

Para definir o modelo de sinal utilizado nessa dissertação com a finalidade de estimar a DoA, algumas condições são assumidas. Estas são:

1. Região de Campo Distante: todas as fontes eletromagnéticas estão a uma distância r do arranjo receptor de dimensão D , de tal forma que a frente de onda chegue com a mesma direção em todos os elementos do arranjo (frente de onda planar), para um comprimento de onda λ ($r > 2D^2/\lambda$).
2. Canal: o ruído assumido é o AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), e tem a mesma variância em todos os elementos do arranjo.
3. Meio isotrópico e linear: o meio de propagação tem as mesmas propriedades físicas em todas as direções e os sinais incidentes no arranjo são a superposição linear dos sinais provenientes das fontes eletromagnéticas presentes.

Para as simulações e experimentos realizados, foi considerado um arranjo linear uniforme (*ULA – Uniform Linear Array*). Um ULA é constituído de M elementos idênticos e omnidirecionais que estão alinhados e espaçados igualmente com uma distância d em uma linha reta, como representado na Figura 9.

Outro ponto importante a ser mencionado é que o espaçamento entre os elementos do arranjo deve ser menor ou igual a meio comprimento de onda ($d \leq \frac{\lambda}{2}$), para evitar o fenômeno do *aliasing* espacial, que prejudica a estimação da DoA [21], [22].

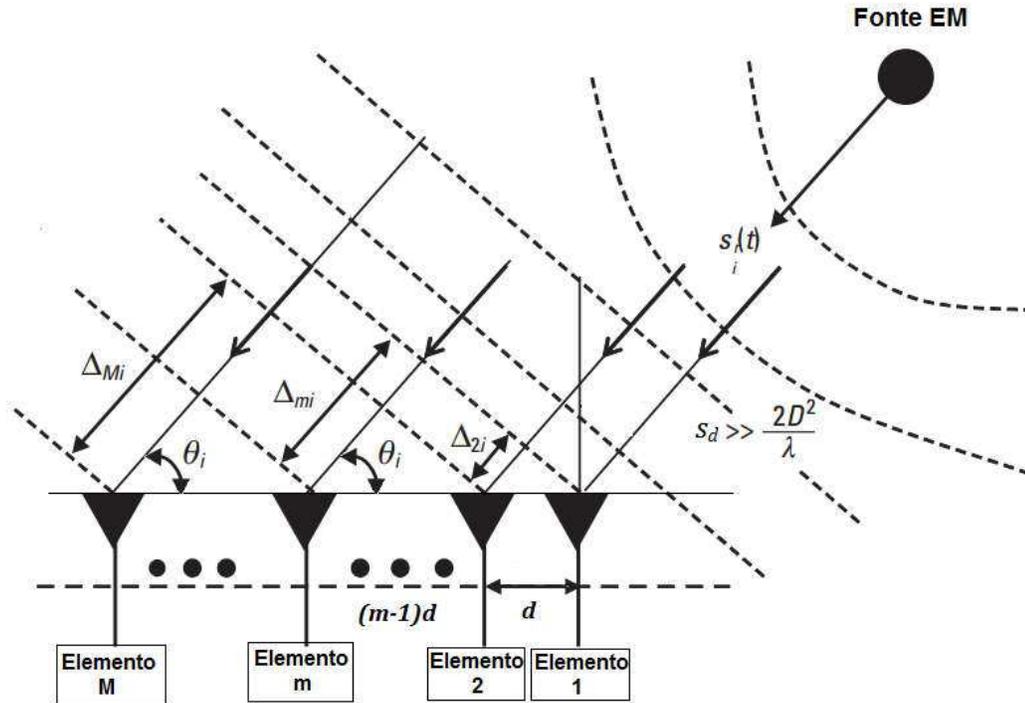


Figura 9. Modelo Utilizado para Caracterizar DoA de uma fonte EM (adaptado de [1])

O valor do cosseno do ângulo de chegada relativo à fonte i , é dado pela Equação 23:

$$\cos(\theta_i) = \frac{\Delta_{mi}}{(m-1)d} \quad (23)$$

O sinal eletromagnético percorre o espaço Δ_{mi} com velocidade c , chega em cada elemento do arranjo com um atraso de tempo τ em relação ao que chega no elemento anterior, esse atraso de tempo é expresso na Equação (24).

$$\tau = \frac{d \cos(\theta_i)}{c} \quad (24)$$

O sinal recebido pelo elemento m é a versão atrasada do sinal recebido pelo elemento 1. Na forma fasorial complexa, é dado pela Equação (25).

$$s_{im}(t) = \alpha_i(t - \tau) e^{j(\omega(t-\tau) + \beta_i(t))} e^{j(m-1)\mu_i} = s_i(t) e^{j(m-1)\mu_i} \quad (25)$$

Em que α_i é a amplitude do sinal recebida no elemento i e β_i a fase do sinal.

Na qual a frequência espacial μ_i é definida como,

$$\mu_i = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos(\theta_i). \quad (26)$$

A frequência espacial é o elemento principal da matriz A que contém os denominados vetores diretores $\mathbf{a}(\theta, \lambda)$. Cada elemento da matriz A é modelado como função do comprimento de onda, a distância entre os elementos do arranjo e o ângulo de chegada, como mostrado na Equação (27)

$$\mathbf{a}(\theta, \lambda) = e^{j(m-1)\mu_i} = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \cos(\theta)}. \quad (27)$$

O modelo final do sinal modelado em presença de ruído é representado matematicamente pela Equação (28), em que x representa a observação de cada elemento do arranjo, A é a matriz que contém os vetores diretores, s é a matriz do sinal e N_{wg} o ruído branco gaussiano:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} + N_{wg}. \quad (28)$$

Expressando em notação matricial,

$$\mathbf{x} = [\mathbf{a}(\mu_1) \ \mathbf{a}(\mu_2) \ \dots \ \mathbf{a}(\mu_d)] \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_d \end{bmatrix} + N_{wg}. \quad (29)$$

3.2. Métodos Clássicos de Estimação da DoA Usando Conformação de Feixe

As técnicas que usam Conformação de Feixe para estimar a DoA direcionam o feixe principal do arranjo de antenas em uma direção por vez e medem a potência de saída. Quando a direção coincide com a DoA de um sinal, a potência máxima de saída será observada.

O desenvolvimento de uma técnica de estimação da DoA que usa Conformação de Feixe consiste basicamente em encontrar uma forma apropriada de obter a potência que seja fortemente relacionada à direção de chegada dos sinais.

Um arranjo de antenas pode alterar a forma do seu feixe principal conforme os seus elementos são alimentados eletronicamente. Para combinar os dados recebidos pelos elementos do arranjo $x(t)$ de forma a mostrar um único sinal de saída $y(t)$, um vetor de pesos w^H é utilizado, como mostrado na Equação 30

$$y(t) = w^H x(t). \quad (30)$$

A potência média total de saída de um arranjo de antenas a partir de N amostras pode ser expressa na forma da Equação 31

$$P(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y(t_n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w^H x(t_n) x^H(t_n) w. \quad (31)$$

A matriz de covariância R_{xx} é definida na forma da Equação 32

$$R_{xx} = E\{x(t)x^H(t)\}. \quad (32)$$

Considerando a matriz de covariância representada na Equação 32, pode-se expressar a Equação 31 como:

$$P(w) = w^H R_{xx} w. \quad (33)$$

3.2.1. Conformação de Feixe Clássico (CB)

A ideia básica do método de Conformação de Feixe Clássico, também chamado de método de Bartlett [23], é o de medir a potência do sinal em todos os ângulos de chegada possíveis e selecionar os pontos de maior potência como as direções de chegada dos sinais.

Para cada direção θ observada, a potência média de saída $P(\theta)$ é obtida a partir da Equação (30), ou seja, é obtida a curva de potência em função do ângulo θ .

Quando o ângulo θ corresponder a uma fonte, a potência de saída irá atingir um pico ou um ponto máximo.

O vetor de pesos, dado por $\mathbf{w} = \mathbf{a}(\theta)$, é então normalizado, ficando na forma mostrada na Equação (34)

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{a}(\theta)}{\sqrt{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)}} \quad (34)$$

Inserindo a função peso \mathbf{w} na Equação (33), tem-se que a potência em função do ângulo será dada pela função que representa o pseudoespectro obtido pelo método, $P_{CB}(\theta)$, mostrada na Equação (35)

$$P_{CB}(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{R}_{xx}\mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{a}(\theta)}. \quad (35)$$

Para demonstrar o método, foi realizada uma simulação utilizando um arranjo ULA de 5, 10 e 15 elementos separados por meio comprimento de onda. Quatro fontes de sinais eletromagnéticos que chegam ao arranjo com direções de 30° , 50° , 100° e 110° com SNR de 5 dB. O gráfico da função pseudoespectro para esse caso pode ser observada na Figura 10.

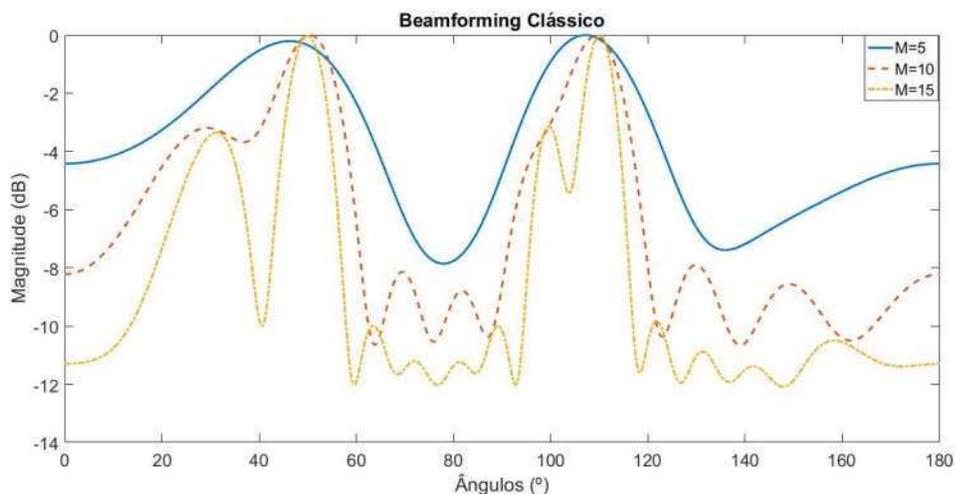


Figura 10. Pseudoespectro do CB para a situação simulada (ULA com 5, 10 e 15 elementos)

Usando 5 elementos no arranjo de antenas, o método conseguiu determinar duas DoA, sendo estas nas direções de $46,3^\circ$ e $107,2^\circ$. Ao utilizar 10 elementos no

arranjo, foram obtidas três DoA (29,2°, 50,5° e 109,3°). Por fim, utilizando 15 elementos no arranjo, todas as DoA foram obtidas (31,2°, 49,9°, 99,6° e 110,1°).

Esse resultado mostra a deficiência de resolução do método de CB, uma vez que é necessário um número maior de elementos no arranjo para obter todas as direções de chegada. Na Tabela 1 é mostrado o RMSE para os três casos, sendo que, nos dois primeiros não foi possível calcular o erro devido ao fato de que nem todas as fontes foram encontradas.

Tabela 1. RMSE para a situação simulada no CB

Número de elementos	RMSE
5	-
10	-
15	0,636

3.2.2. Resposta sem Distorção de Variância Mínima (MVDR)

O método de Conformação de Feixe Clássico funciona bem quando se tem apenas um sinal presente, porém, quando há mais de um sinal, a potência medida contém contribuições tanto dos sinais que vêm do ângulo desejado, como dos sinais que vêm de outras direções.

Esse problema pode ser resolvido utilizando o MVDR, também conhecido como *Capon Beamformer* [24]. Este método é similar ao método de Conformação de Feixe Clássico e mede a potência do sinal recebido em todas as direções possíveis, porém este objetiva formar um feixe somente na direção desejada e nulos nas outras direções não desejadas para rejeitar as contribuições de potências dos outros sinais.

A potência do sinal é medida considerando o ganho do feixe da antena como sendo unitário na direção apontada e criando nulos nas outras direções. O objetivo do método então é minimizar $P(\theta)$ de forma que $\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta) = 1$.

O vetor de pesos minimiza a variância (potência média) da saída do arranjo enquanto a potência na região observada é mantida sem distorção (já que o ganho é unitário naquela direção), esse vetor muitas vezes é referido como Resposta sem Distorção de Variância Mínima (MVDR), e é representado matematicamente na Equação (36)

$$\mathbf{w}_{MVDR} = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}. \quad (36)$$

Substituindo o vetor de pesos na Equação (31), obtém-se a função pseudoespectro $P_{MVDR}(\theta)$ relativa ao método. Esta função é representada na Equação (37)

$$P_{MVDR}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}. \quad (37)$$

A simulação feita na seção 3.2.1 para o CB foi reproduzida com as mesmas condições para o método MVDR. As funções pseudoespectro estão ilustradas graficamente na Figura 11.

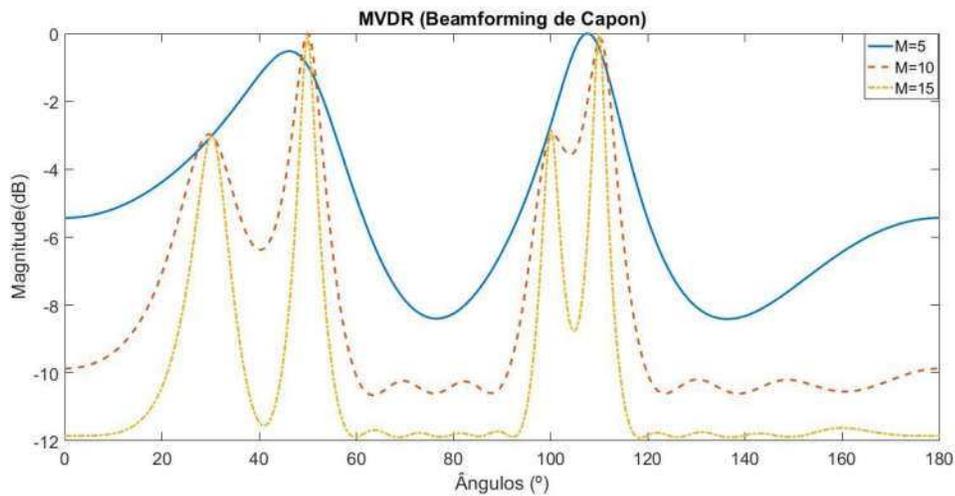


Figura 11. Pseudoespectro do MVDR para a situação simulada (ULA de 5, 10 e 15 elementos)

Usando 5 elementos no arranjo de antenas, o método conseguiu determinar apenas duas DoA, sendo estas nas direções de 46,2° e 107,5°. Ao utilizar 10 elementos no arranjo, foram obtidas todas as DoA (29,7°, 50°, 100,4° e 110,2°). Por fim, utilizando 15 elementos no arranjo, mais uma vez todas as DoA foram obtidas (30,2°, 49,9°, 100° e 109,9°) com um RMSE menor do que com 10 elementos.

Esse resultado mostra uma melhora na resolução em relação ao método CB, embora que com poucos elementos não foi possível encontrar a direção de chegada de todas as fontes. Na Tabela 2 é mostrado o RMSE para os três casos, sendo que, no primeiro não foi possível calcular o erro por falta de informação da direção de duas fontes.

Tabela 2. RMSE para a situação simulada no MVDR

Número de elementos	RMSE
5	-
10	0,269
15	0,122

3.3. Métodos Clássicos de Estimação da DoA Usando Métodos de Subespaços

As técnicas de estimação da DoA que utilizam métodos de subespaços são baseadas em algumas propriedades da matriz de covariância (R_{xx}).

O espaço, abrangido por seus autovetores, pode ser particionado em dois subespaços ortogonais, sendo estes o subespaço dos sinais e o subespaço do ruído.

O subespaço do sinal é medido pelos autovetores associados com os maiores autovalores, os vetores de direção correspondem a esse subespaço. O subespaço do ruído será medido pelos autovetores associados com os menores autovalores da matriz de correlação.

3.3.1. MUSIC

O MUSIC é um algoritmo proposto por Schmidt [25] para obtenção da DoA de sinais utilizando diferentes formatos de arranjos de sensores, sendo muito utilizado na literatura [26].

Para um conjunto de dados medidos, é necessário obter a matriz de covariância R , a partir do valor esperado do produto da matriz com os dados medidos e sua respectiva hermitiana (x^H), conforme a Equação 38

$$R = E\{xx^H\}. \quad (38)$$

Substituindo a Equação 28, que caracteriza os dados medidos, na Equação 38, obtém-se a Equação 39.

$$\mathbf{R} = E \left\{ (\mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N}_{wg})(\mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N}_{wg})^H \right\} = \mathbf{A}E\{\mathbf{S}\mathbf{S}^H\}\mathbf{A}^H + E\{\mathbf{N}_{wg}\mathbf{N}_{wg}^H\} = \mathbf{A}\mathbf{R}_S\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_N. \quad (39)$$

Na qual \mathbf{R}_S indica a matriz de covariância do sinal relativo à fonte \mathbf{S} e \mathbf{R}_N é a matriz de covariância do ruído.

A matriz de covariância pode ser decomposta em termos de subespaços relativos a sinal (Q_S) e a ruído (Q_N), de acordo com a Equação 40

$$\mathbf{R} = Q_S \Sigma Q_S^H + Q_N \Sigma Q_N^H. \quad (40)$$

O MUSIC explora a ortogonalidade entre esses dois subespaços, de forma que a DoA pode ser encontrada nos máximos do pseudoespectro do MUSIC ($P_{MUSIC}(\theta)$), dada pela Equação 41

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)Q_N Q_N^H \mathbf{a}(\theta)}. \quad (41)$$

O fato de necessitar de mais sensores do que fontes para detectar com segurança as DoAs é uma limitação desse método. Com n sensores pode-se detectar $n-1$ fontes.

A simulação feita na seção 3.2 para os métodos que utilizam as técnicas de conformação de feixe foi reproduzida com as mesmas condições para o MUSIC. As funções pseudoespectro $P_{MUSIC}(\theta)$ para 5, 10 e 15 elementos no arranjo de antenas estão ilustradas graficamente na Figura 12.

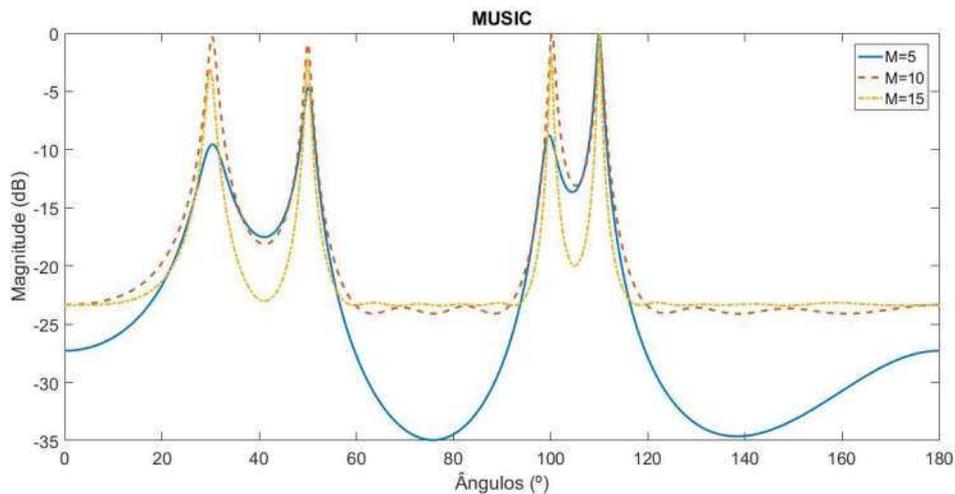


Figura 12. Pseudoespectro do MVDR para a situação simulada (ULA de 5, 10 e 15 elementos)

Usando apenas 5 elementos no arranjo de antenas, o método conseguiu determinar todas as DoA (30,4°, 50,1°, 99,7° e 110°). Ao utilizar 10 elementos no arranjo, foram também obtidas todas as DoA (30,3°, 50° e 100,3° e 110,1°) com um RMSE menor. Por fim, utilizando 15 elementos no arranjo, todas as DoAs foram obtidas (30,0°, 50,0°, 100,1° e 110°) com um RMSE menor do que com 10 elementos.

Esse resultado mostra a superioridade da resolução do MUSIC em relação aos métodos de conformação de feixe para detectar a direção de chegada mesmo com poucos elementos no arranjo. Na Tabela 3 é mostrado o RMSE para os três casos.

Tabela 3. RMSE para a situação simulada no MUSIC

Número de elementos	RMSE
5	0,255
10	0,218
15	0,05

3.3.2. ESPRIT

O método ESPRIT, introduzido por Roy e Kailath [27], é um método que se tornou muito utilizado para encontrar a DoA de sinais devido à sua simplicidade, tendo a vantagem de utilizar menos processamento computacional do que o MUSIC [28], porém, necessita de mais sensores para funcionar.

O algoritmo do ESPRIT trabalha com a utilização de dois subarranjos idênticos em um arranjo com M sensores e assume que existem N fontes. Um exemplo do modelo de subarranjos está ilustrado na Figura 13.

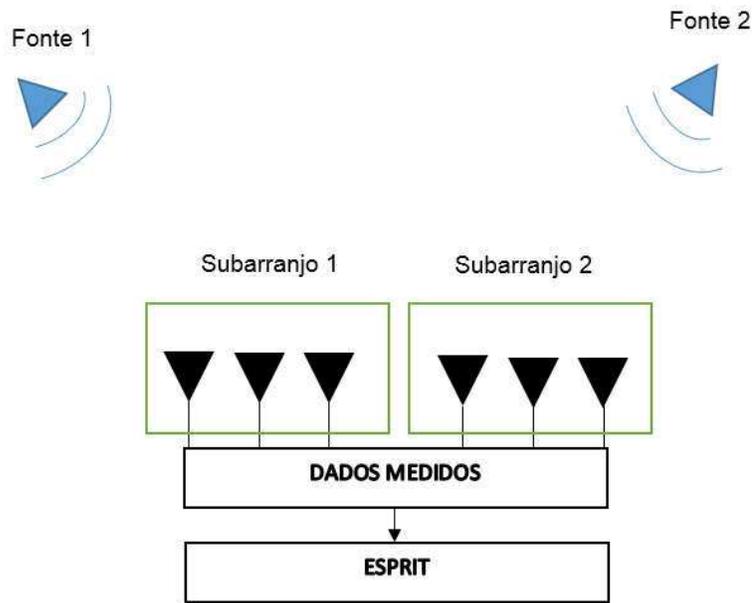


Figura 13. Subarranjos de antenas considerados no ESPRIT (adaptado de [1])

Os dados de entrada para cada subarranjo ($x_1(t)$ e $x_2(t)$) são dados pelas Equações 42 e 43:

$$x_1(t) = [a(\mu_1), \dots, a(\mu_n)]s(t) + n_1(t) = \mathbf{A}s(t) + \mathbf{n}_1(t) \quad (42)$$

$$x_2(t) = [a(\mu_1)e^{j\mu_1}, \dots, a(\mu_n)e^{j\mu_n}]s(t) + n_2(t) = \mathbf{A}\Phi\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_2(t). \quad (43)$$

Reunindo as Equações 42 e 43 em forma matricial, têm-se a Equação 44, que indica a forma geral dos dados de entrada:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}\Phi \end{bmatrix} s(t) + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t). \quad (44)$$

Sendo $\Phi = [e^{j\mu_1}, \dots, e^{j\mu_n}]$, a matriz diagonal de tamanho que relaciona os sinais recebidos pelos dois arranjos e chamado de operador rotacional. Ele é causado devido à diferença Δ entre os dois subarranjos, sendo os valores de μ_i dados pela Equação 45:

$$\mu_i = -\frac{2\pi f_c}{c} \Delta \text{sen}(\theta_i). \quad (45)$$

O ESPRIT estima a DoA determinando o ângulo θ_i presente em μ_i .

A simulação feita na seção 3.2 para os métodos que utilizam as técnicas de conformação de feixe foi reproduzida com as mesmas condições para o ESPRIT. Diferentemente dos outros métodos, o ESPRIT não se resume em uma função pseudoespectro.

Usando 5 elementos no arranjo de antenas, o método conseguiu determinar todas as DoA (30,687°, 49,594°, 101,128° e 109,352°). Ao utilizar 10 elementos no arranjo também foram obtidas todas as DoA (30,095°, 50,334°, 99,950° e 110,289°) com um RMSE menor. Por fim, utilizando 15 elementos no arranjo, todas as DoA foram obtidas (30,200°, 49,665°, 99,980° e 110,066°) com um RMSE menor do que com 10 elementos.

Esse resultado mostra uma melhora na resolução em relação aos métodos de conformação de feixe, tendo a vantagem de ser computacionalmente mais leve que o MUSIC. Na Tabela 4 é mostrado o RMSE para os três casos.

Tabela 4. RMSE para a situação simulada no ESPRIT

Número de elementos	RMSE
5	0,763
10	0,227
15	0,198

Capítulo 4

4. ESTIMATIVA DA DOA USANDO ICA

Hiroshi Sawada [2] propôs um método para estimar DoA usando ICA para localizar fontes acústicas. Esse método é baseado na matriz de mistura dos sinais estimada por meio da matriz de separação W obtida após a aplicação do ICA.

A principal diferença desse método para o método de Sawada [2] é a inversão do pré-processamento (branqueamento) para obtenção da direção de chegada, que permite obter a matriz H , representada matematicamente pela Equação 46.

$$H = Q^{-1}W \quad (46)$$

Um fluxograma do método para estimar a DoA usando essa técnica está ilustrado na Figura 14.

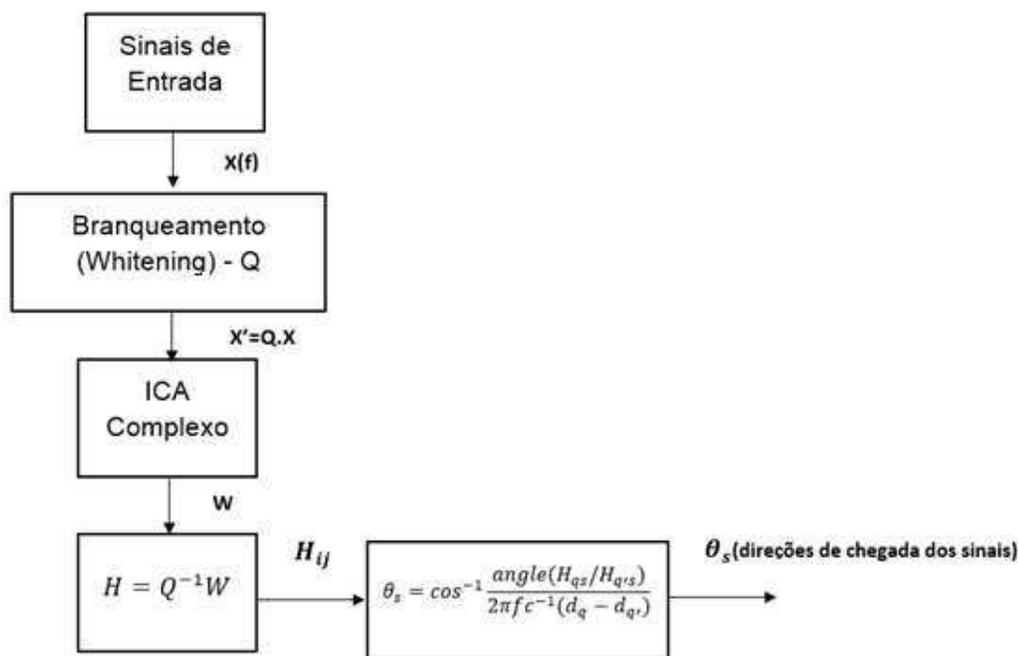


Figura 14. Fluxograma do Método para Estimar DoA usando ICA

Primeiramente um pré-processamento (*whitening*) é feito nos sinais de entrada. Os dados pré-processados são inseridos no algoritmo do ICA Complexo, que

irá retornar a matriz W , sendo esta necessária para obter a matriz H a partir da Equação 46.

Um elemento H_{qs} da matriz H relacionado à fonte s é modelado com atenuação A_{qp} (fase real) e modulação em fase $e^{j\varphi_p}$ na origem, conforme Equação 47.

$$H_{qp} = A_{qp} e^{j\varphi_p} e^{j2\pi f c^{-1} d_q \cos\theta_p}. \quad (47)$$

Em que f a frequência da portadora do sinal, c , a velocidade de propagação do sinal, e d_q a posição do sensor q .

A ambiguidade de escala do ICA poderá ser cancelada calculando a razão entre dois elementos da matriz correspondentes à mesma fonte, dado pela Equação 48.

$$\frac{H_{qs}}{H_{q's}} = \frac{A_{qs}}{A_{q's}} e^{j2\pi f c^{-1} (d_q - d_{q'}) \cos\theta_s}. \quad (48)$$

Esse método trabalha com o número de sensores igual ao número de fontes e pode ser aplicado a qualquer número de sinais. Com o uso da Equação 49 é possível estimar a direção de chegada dos sinais.

$$\theta_s = \cos^{-1} \frac{\text{angle}(H_{qs}/H_{q's})}{2\pi f c^{-1} (d_q - d_{q'})} \quad (49)$$

Em que θ_s é a DoA estimada da fonte s obtida pela razão entre os elementos H_{qs} e $H_{q's}$.

Na bibliografia estudada, o ICA foi indicado como um método capaz de determinar a direção de chegada θ_s dos sinais para fontes sonoras [29], ou seja, a frequência do sinal é da ordem de grandeza de kHz e a velocidade de propagação é a do som ($\cong 350$ m/s).

Os métodos clássicos de estimação da DoA possuem algumas limitações em situações específicas, como no caso em que é necessário utilizar um número de sensores igual ao número de fontes e também no caso de detectar fontes com a mesma DoA.

A utilização do ICA na determinação da DoA de fontes eletromagnéticas provém da possibilidade de atuar nessas situações específicas, em particular quando fontes estão localizadas uma atrás da outra [3].

O ICA também consegue identificar as fontes para casos em que se há menos sensores do que fontes [30], [31], mostrando-se uma técnica promissora para essa aplicação, visto que, técnicas como MUSIC e ESPRIT necessitam de mais sensores do que fontes para obter a DoA.

4.1. Casos de Estudo para Estimação da DoA

4.1.1. Estimação da DoA com Mais Sensores do que Fontes

Para demonstrar o método para a situação na qual é necessário estimar a DoA com mais elementos no arranjo do que fontes, foi realizada uma simulação utilizando as mesmas características do ULA de 5, 8 e 10 elementos separados por meio comprimento de onda.

Quatro fontes de sinais eletromagnéticos na faixa de 2,45 GHz, chegam ao arranjo com direções de 30° (2,44 GHz), 70° (2,45 GHz), 120° (2,46 GHz) e 140° (2,43 GHz) com SNR de 5 dB. Foram utilizadas 50.000 amostras (*snapshots*) na simulação para verificar o comportamento do método para estimar a DoA usando ICA.

Na Figura 15 é apresentado um diagrama ilustrativo da situação simulada para 5 elementos.

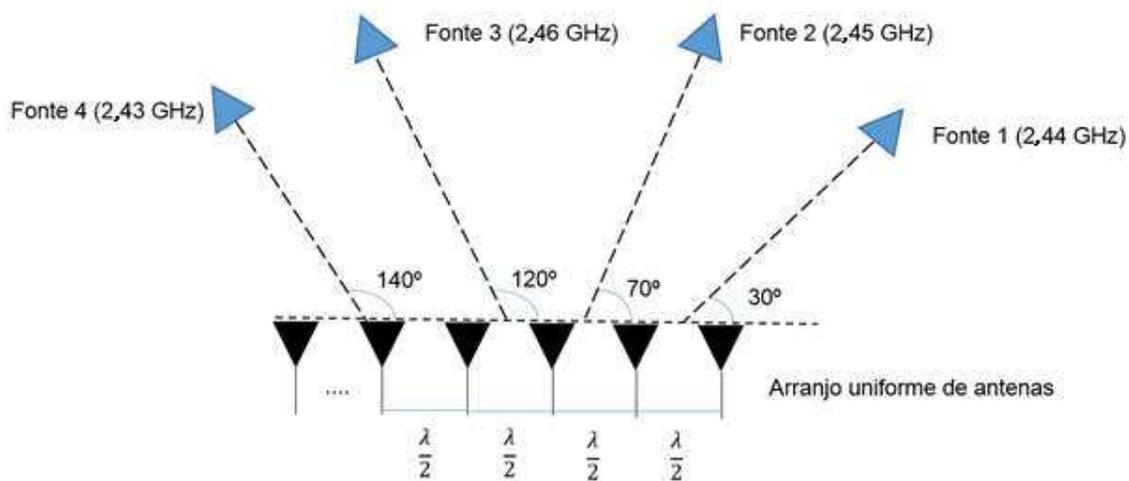


Figura 15. Diagrama ilustrando a simulação para 4 fontes eletromagnéticas

O espectro de amplitude das medições realizadas por cada elemento do arranjo podem ser observadas na Figura 16. É possível observar que cada uma das fontes está presente em todas as medições.

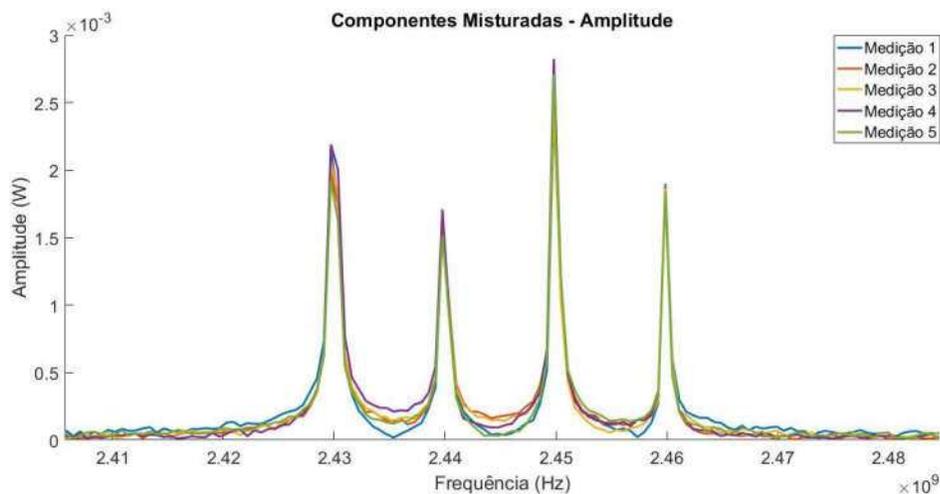


Figura 16. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 5 elementos)

Após aplicar os valores medidos no algoritmo do ICA Complexo, é possível obter a matriz de separação W e obter as componentes independentes, representadas graficamente na Figura 17.

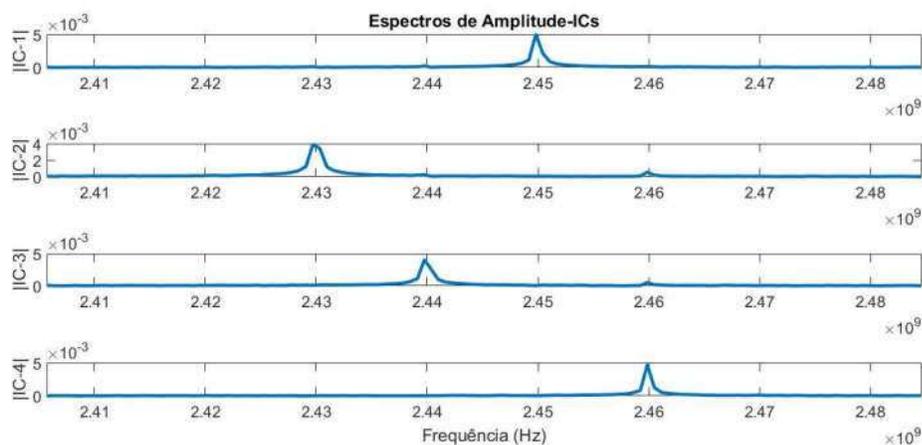


Figura 17. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 5 elementos)

Obtendo a matriz W é possível obter a matriz H e estimar as direções de chegada de todas as fontes aplicando as Equações 47-49 para cada combinação de colunas da matriz H . As direções obtidas para cada combinação de colunas estão

representadas na Figura 18. As cores representam as diferentes componentes independentes e a direção obtida para cada combinação de colunas.

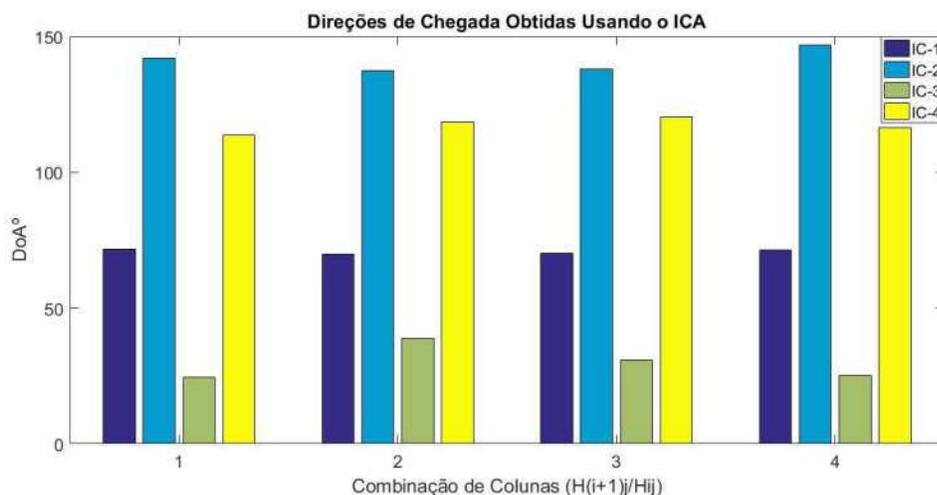


Figura 18. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (ULA de 5 elementos)

As direções de chegada para cada fonte podem ser obtidas pela estimação da média aritmética das DoAs obtidas para cada componente independente (IC). Para o caso de 5 elementos, foram obtidas as direções de chegada para todas as fontes, sendo estas $70,731^\circ$ (IC-1 a 2,45 GHz), $140,970^\circ$ (IC-2 a 2,43 GHz), $29,814^\circ$ (IC-3 a 2,44 GHz) e $117,299^\circ$ (IC-4 a 2,46 GHz).

Outro ponto positivo no método aplicando o ICA é a possibilidade de correlacionar a direção de chegada com sua respectiva fonte eletromagnética, algo que não é possível utilizando os outros métodos de obtenção da DoA, que estimam as direções, porém não fornecem a informação de qual fonte corresponde às direções obtidas, por exemplo, na situação anterior foram relacionadas as fontes de diferentes frequências com as diferentes direções de chegada.

Foram reproduzidas as mesmas condições da simulação para os outros métodos abordados na Seção 3 (CB, MVDR, MUSIC e ESPRIT). Os valores da DoA obtidos estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. DoAs obtidas pelo ICA e métodos clássicos – ULA de 5 elementos

Método	DoA 1	DoA 2	DoA 3	DoA 4
DoAs das fontes	30°	70°	120°	140°
ICA	29,814°	70,731°	117,299°	140,970°
CB	-	71,4°	-	136,6°
MVDR	-	70,2°	-	136,5°
MUSIC	29,9°	69,9°	120,6°	134,6°
ESPRIT	31,5°	69,4°	123,5°	140,7°

A função pseudoespectro do CB, MVDR e MUSIC para o caso simulado é representada na Figura 19.

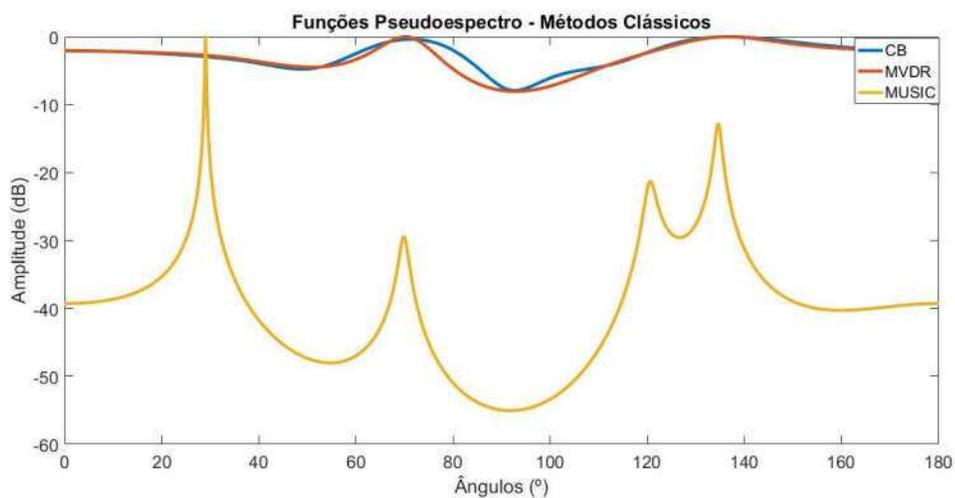


Figura 19. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 5 elementos)

A simulação anterior agora é feita para 8 elementos no ULA. O espectro de amplitude dos sinais de entrada estão ilustrados na Figura 20, e as componentes independentes obtidas após a aplicação do ICA complexo são representadas na Figura 21.

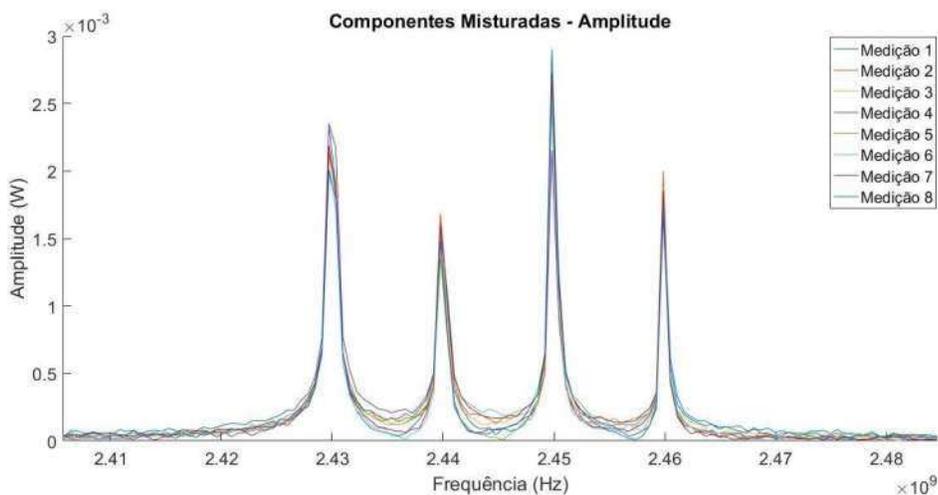


Figura 20. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 8 elementos)

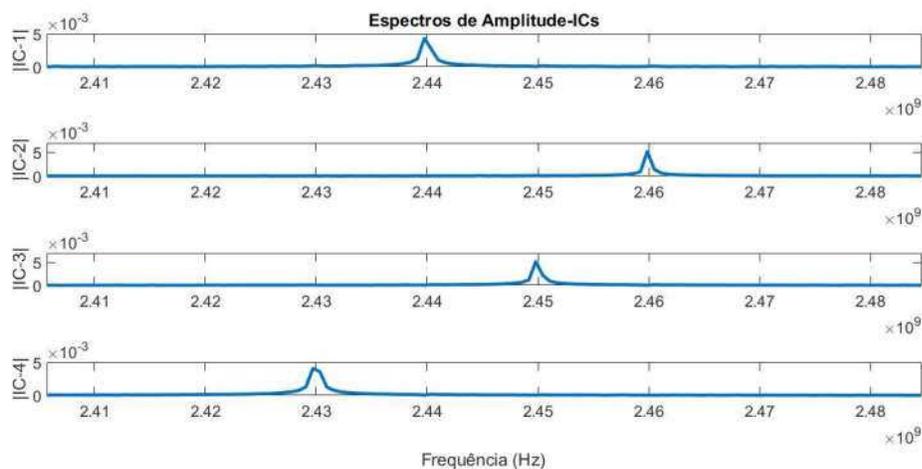


Figura 21. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 8 elementos)

Após a obtenção da matriz H , as direções de chegada são obtidas para cada combinação de colunas. Como o número de elementos no arranjo aumentou, o número de estimativas também aumenta, e com isso a média aritmética converge para um valor mais próximo do real. As direções obtidas para cada combinação de colunas são representadas na Figura 22.

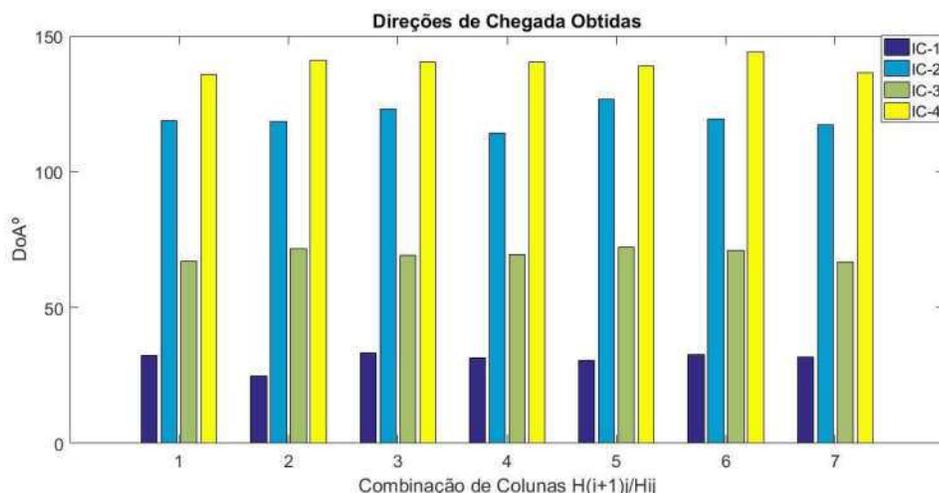


Figura 22. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (Arranjo de 8 elementos)

Aplicando a média aritmética nas direções obtidas para cada estimativa, foram estimadas as direções de chegada para todas as fontes, sendo estas dadas por $31,007^\circ$ (IC-1 a 2,44 GHz), $119,700^\circ$ (IC-2 a 2,46 GHz), $69,681^\circ$ (IC-3 a 2,45 GHz) e $139,609^\circ$ (IC-4 a 2,43 GHz).

Embora a ordem das fontes tenha sido invertida na estimação das componentes independentes, as direções estimadas continuam correspondendo às respectivas fontes.

Foram reproduzidas as mesmas condições da simulação para os outros métodos clássicos de estimação da DoA. Para esse caso utilizando um arranjo de 8 elementos, todos os métodos conseguiram detectar a direção de chegada das 4 fontes, conforme é possível observar nos resultados explicitados na Tabela 6.

Tabela 6. DoAs obtidas pelo ICA e métodos clássicos - ULA de 8 elementos

Método	DoA 1	DoA 2	DoA 3	DoA 4
DoAs das fontes	30°	70°	120°	140°
ICA	$29,814^\circ$	$70,731^\circ$	$117,299^\circ$	$140,970^\circ$
CB	$28,6^\circ$	$69,9^\circ$	$119,2^\circ$	$140,5^\circ$
MVDR	$30,1^\circ$	$69,8^\circ$	$120,4^\circ$	$140,4^\circ$
MUSIC	$29,8^\circ$	$69,9^\circ$	$119,9^\circ$	$139,7^\circ$
ESPRIT	$30,1^\circ$	$70,2^\circ$	$119,8^\circ$	$140,5^\circ$

A função pseudoespectro do CB, MVDR e MUSIC para o caso simulado de um ULA de 8 elementos é representada na Figura 23.

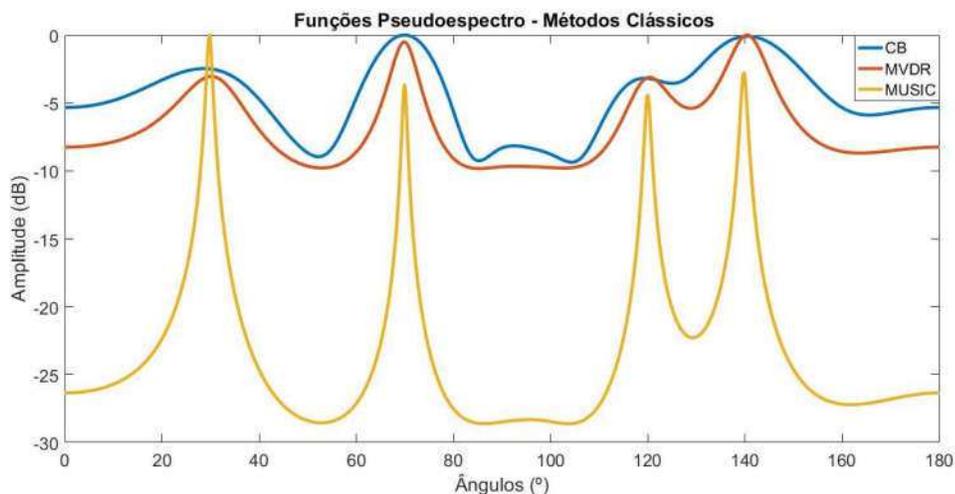


Figura 23. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 8 elementos)

A simulação anterior foi agora realizada para 10 elementos no ULA. O espectro de amplitude dos sinais de entrada estão ilustrados na Figura 24, e as componentes independentes obtidas após a aplicação do ICA complexo representadas na Figura 25.

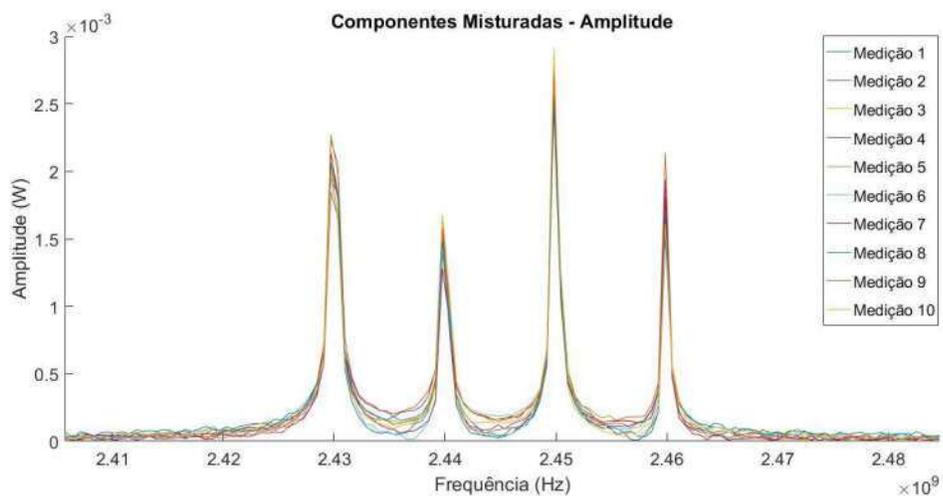


Figura 24. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 10 elementos)

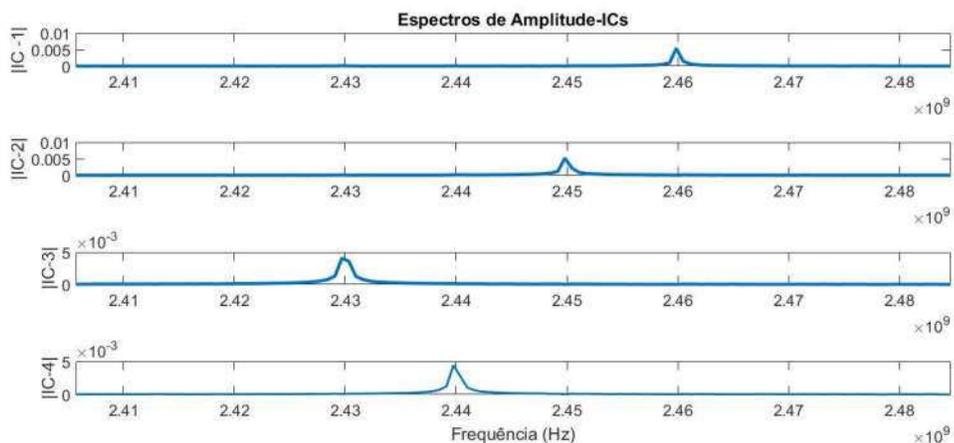


Figura 25. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 10 elementos)

Após a obtenção da matriz H , as direções de chegada são obtidas para cada combinação de colunas. As direções obtidas para cada combinação de colunas são representadas na Figura 26.

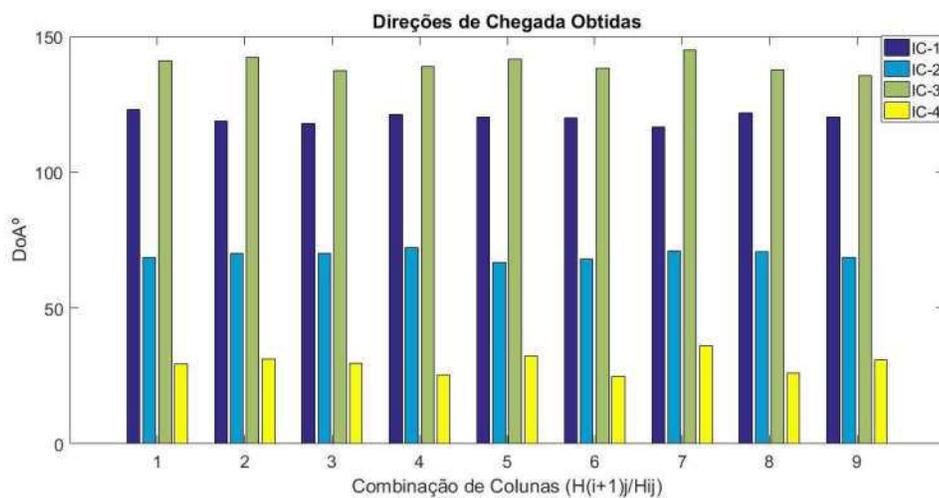


Figura 26. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (Arranjo de 10 elementos)

Aplicando a média aritmética nas direções obtidas para cada estimativa, foram estimadas as direções de chegada para todas as fontes, sendo estas dadas por $120,080^\circ$ (IC-1 a 2,46 GHz), $69,608^\circ$ (IC-2 a 2,45 GHz), $139,791^\circ$ (IC-3 a 2,43 GHz) e $29,551^\circ$ (IC-4 a 2,44 GHz).

Novamente, embora a ordem das fontes tenha sido invertida na estimação das componentes independentes, as direções estimadas continuam correspondendo

às respectivas fontes, mostrando a capacidade do método de continuar correlacionando a direção de chegada à sua respectiva fonte estimada pelo ICA.

Foram reproduzidas as mesmas condições de simulação para os outros métodos clássicos de estimação da DoA, agora utilizando um arranjo de 10 elementos. Todos os métodos conseguiram detectar a direção de chegada das 4 fontes. Os resultados obtidos nesse experimento estão contidos na Tabela 7.

Tabela 7. DoAs obtidas pelo ICA e métodos clássicos - ULA de 10 elementos

Método	DoA 1	DoA 2	DoA 3	DoA 4
DoAs das fontes	30°	70°	120°	140°
ICA	29,551°	69,608°	120,080°	139,791°
CB	28,4°	69,8°	120°	140,5°
MVDR	30,3°	70°	120°	140,2°
MUSIC	29,7°	70,1°	120°	140,1°
ESPRIT	29,2°	70,3°	120,3°	139,3°

A função pseudoespectro do CB, MVDR e MUSIC para o caso simulado de um ULA de 10 elementos é representada na Figura 27.

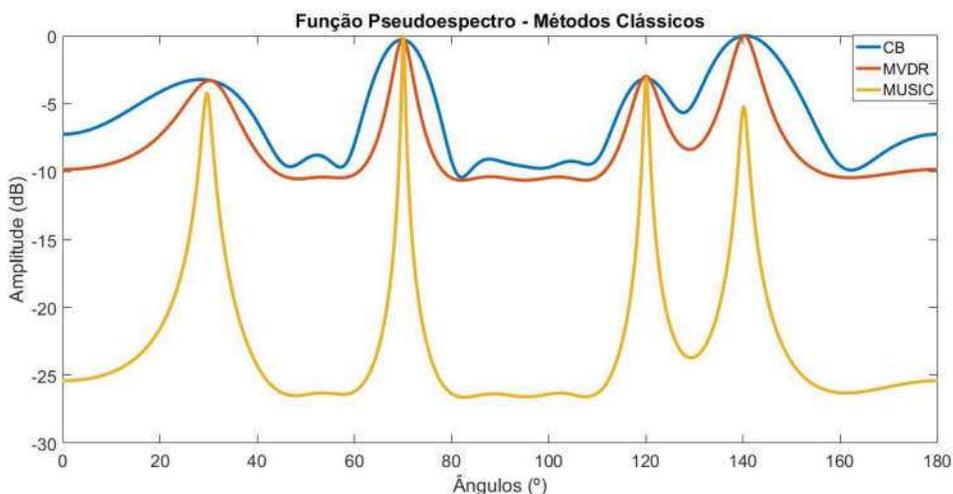


Figura 27. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 10 elementos)

Para caracterizar a exatidão dos métodos na situação simulada, o RMSE para cada um dos métodos foi calculado. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 8.

Tabela 8: RMSE para a simulação realizada (ICA e métodos clássicos)

Número de Elementos	ICA	CB	MVDR	MUSIC	ESPRIT
5	1,484	-	-	2,763	1,959
8	0,583	0,846	0,304	0,194	0,292
10	0,318	0,844	0,180	0,166	0,572

O ICA apresentou o melhor resultado na simulação obtida para o menor número de elementos no arranjo ($M=5$), para essa situação. O MVDR, MUSIC e o ESPRIT apresentaram uma melhor definição quando o número de elementos foi maior do que 8.

É importante ressaltar que dentre os métodos estudados, o ICA é o único que tem a possibilidade de correlacionar a DoA obtida com cada fonte eletromagnética.

É possível observar uma diminuição do RMSE com relação às direções de chegada obtidas, conforme o número de medições vai aumentando. Quanto mais medições são feitas, os valores obtidos são mais próximos das fontes reais.

4.1.2. Estimação de DoA com o mesmo Número de Sensores e Fontes

O mesmo experimento da Seção 4.1.1 foi realizado, dessa vez utilizando 4 elementos no ULA para detectar a DoA de 4 fontes eletromagnéticas. As medições realizadas por cada elemento do arranjo estão representadas na Figura 28.

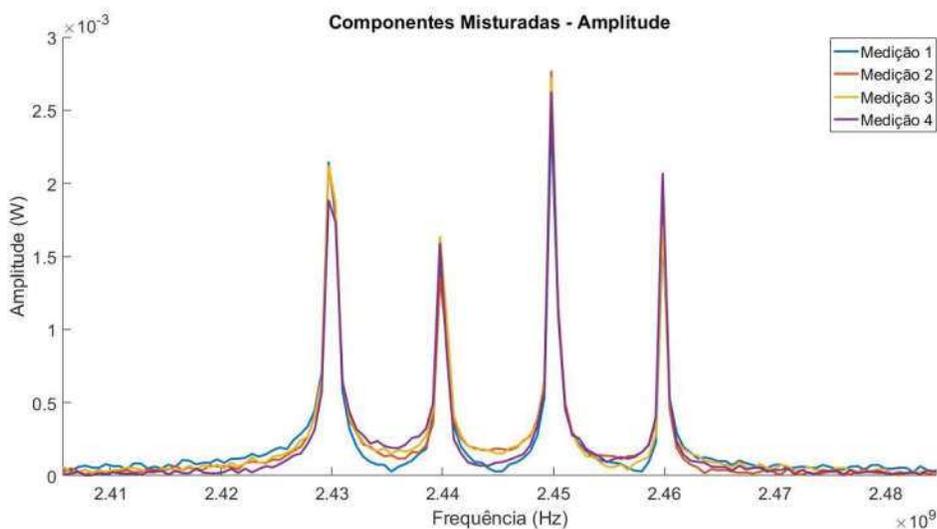


Figura 28. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 4 elementos)

Aplicando o ICA Complexo nas medições de cada arranjo, as componentes independentes são obtidas e estão ilustradas na Figura 29.

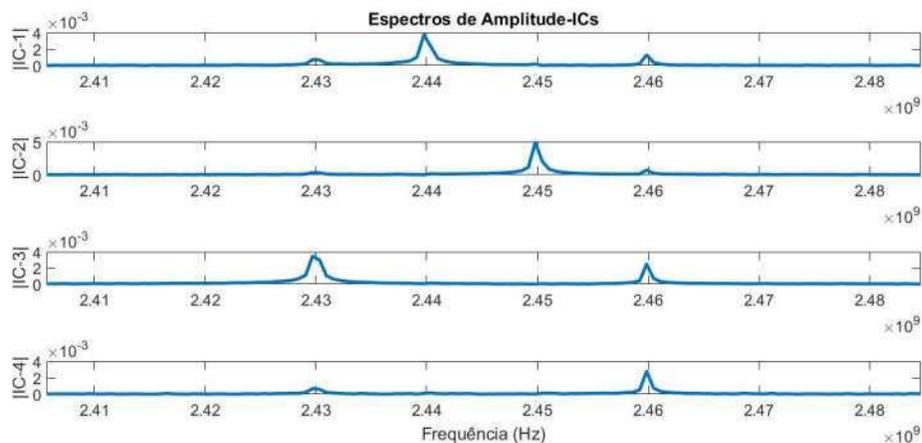


Figura 29. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 4 elementos)

Devido à diminuição da quantidade de medições, a qualidade de separação das fontes também se torna inferior, é possível observar que contribuições maiores de cada fonte estão presentes nas componentes independentes.

Obtendo a matriz H , as direções de chegada são estimadas para cada combinação de colunas da matriz, sendo essas representadas na Figura 30.

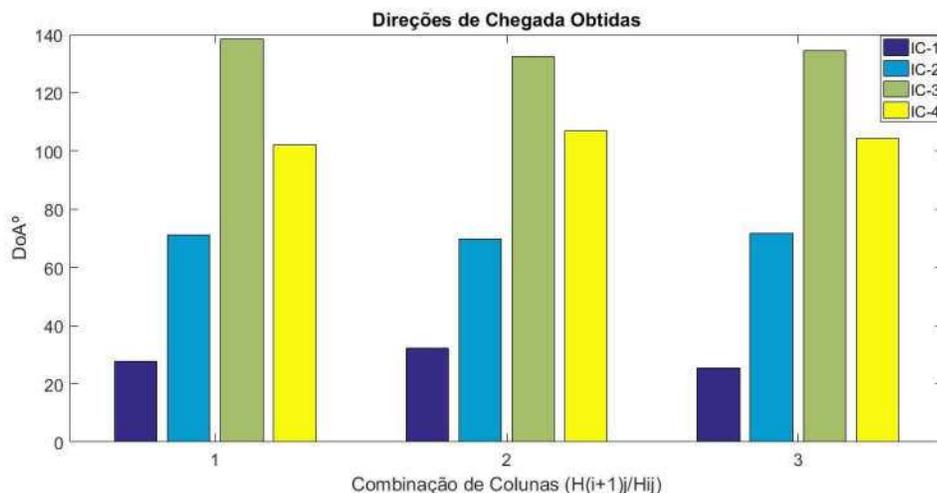


Figura 30. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (Arranjo de 4 elementos)

Aplicando a média aritmética nas direções obtidas para cada estimativa, foram estimadas as direções de chegada para todas as fontes, sendo estas dadas por

28,405° (IC-1 a 2,44 GHz), 70,895° (IC-2 a 2,45 GHz), 135,187° (IC-3 a 2,43 GHz) e 104,471° (IC-4 a 2,46 GHz).

Devido à diminuição da quantidade de estimativas, o RMSE atingiu o valor de máximo de 8,180.

Foram reproduzidas essas condições de simulação para os outros métodos clássicos de estimação de DoA, utilizando um arranjo de 4 elementos. As direções obtidas para esse caso estão contidas na Tabela 9.

Tabela 9. DoAs obtidas - simulação 4 fontes e 4 elementos

Método	DoA 1	DoA 2	DoA 3	DoA 4
DoAs das fontes	30°	70°	120°	140°
ICA	28,405°	70,895°	104,471°	135,187°
CB	-	67,5°	-	137°
MVDR	-	69,1°	-	134,2°
MUSIC	-	-	-	-
ESPRIT	-	71,271°	92,987°	137,970°

O CB e o MVDR estimaram apenas duas direções, o MUSIC não pôde plotar a função pseudoespectro para detectar as 4 fontes, devido ao fato de necessitar de mais medições do que fontes para funcionar e o ESPRIT detectou 3 direções de chegada.

A função pseudoespectro do CB e MVDR para o caso simulado de um ULA de 4 elementos é representada na Figura 31.

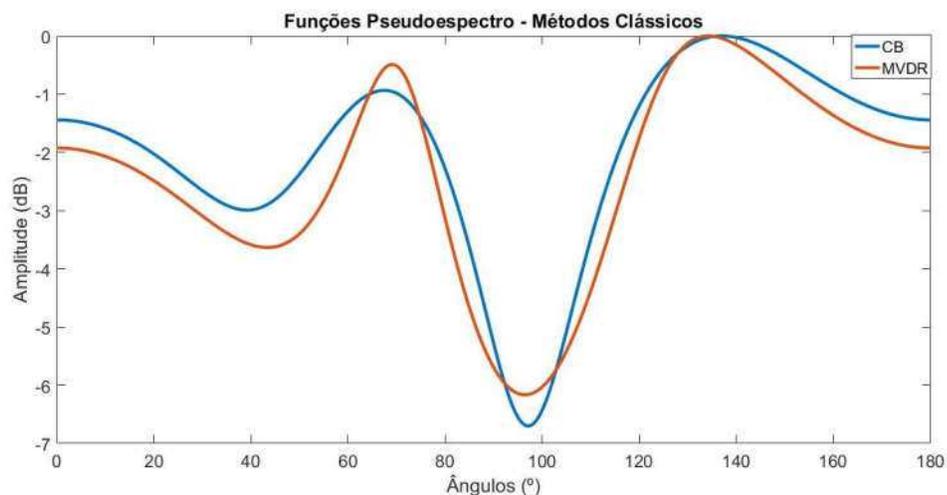


Figura 31. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 4 elementos)

A partir dos resultados apresentados é possível concluir com essa simulação que para uma detecção da DoA de fontes eletromagnéticas, utilizando o número de elementos do arranjo igual ao número de fontes, o ICA é o método mais adequado diante de todos os que foram abordados. O ICA foi o único método capaz de estimar todas as direções de chegada das fontes.

Com os resultados obtidos neste experimento e os da seção 4.1.1, é possível concluir que conforme o número de medições aumenta, as DoAs são estimadas com mais exatidão, se aproximando das direções originais, como mostrado na Figura 32 a seguir.

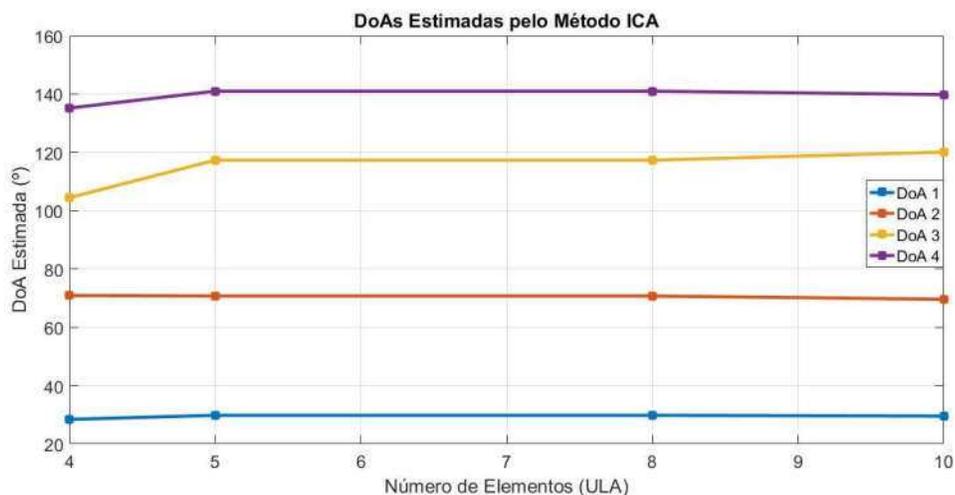


Figura 32. DoAs Estimadas pelo Método ICA com relação ao número de elementos no ULA

4.1.3. Estimação de DoA com Fontes Sobrepostas

Para demonstrar a potencialidade do método, foi realizada uma simulação utilizando uma ULA de 4 elementos separados por meio comprimento de onda para uma situação na qual duas ou mais fontes eletromagnéticas estão sobrepostas (mais de uma fonte com a mesma direção).

Consideremos o caso de três fontes de sinais eletromagnéticos na faixa de 2,45 GHz, chegam ao arranjo com direções de 40° (2,44 GHz), 40° (2,45 GHz) e 120° (2,46 GHz) tendo uma SNR de 20 dB. Foram utilizadas 50.000 amostras (*snapshots*) na simulação para verificar o comportamento do método para estimar a DoA usando o ICA. Na Figura 33 está representado um diagrama ilustrando a situação simulada.

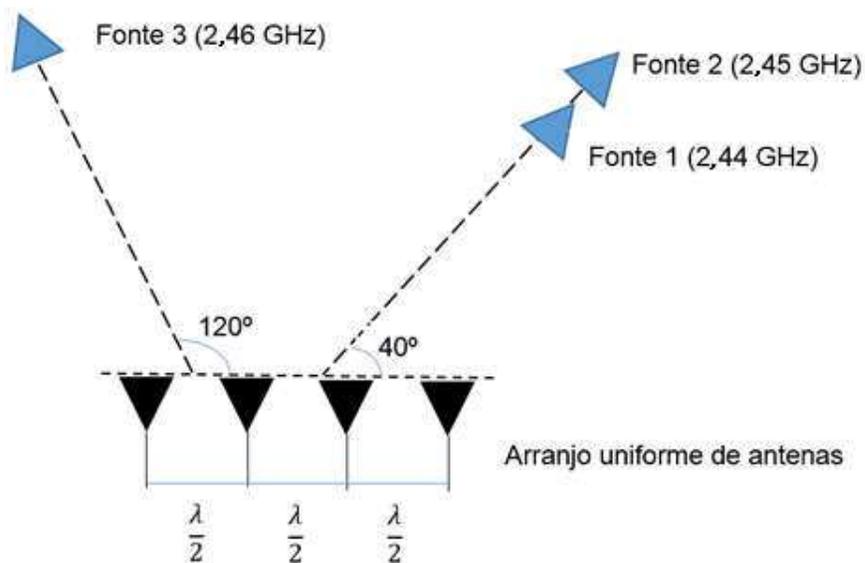


Figura 33. Diagrama da Simulação - Fontes sobrepostas (2,44 GHz e 2,45 GHz a 40° e 2,46 GHz a 120°)

O espectro de amplitude das medições realizadas por cada elemento do arranjo podem ser observadas na Figura 34.

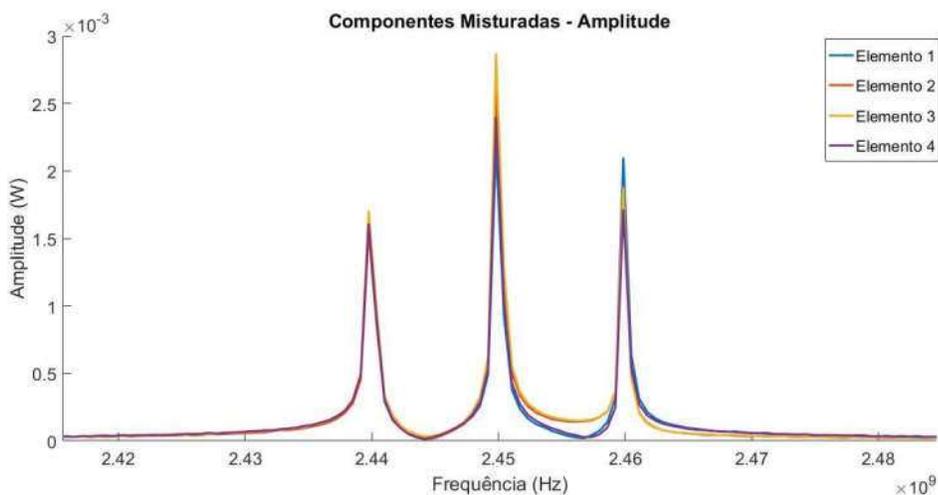


Figura 34. Valor simulado das medições realizadas por cada elemento do arranjo (ULA de 4 elementos)

Aplicando o ICA Complexo nos dados medidos, as componentes independentes são obtidas e estão representadas na Figura 35.

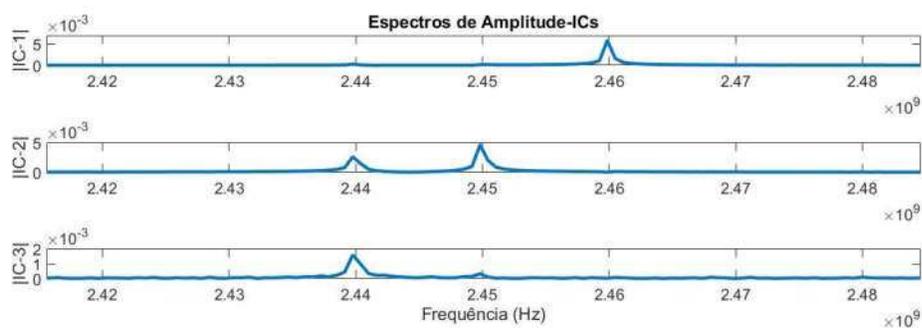


Figura 35. Componentes Independentes obtidas após a aplicação do ICA Complexo (ULA de 4 elementos)

Obtendo a matriz H , as direções de chegada são estimadas para cada combinação de colunas da matriz, sendo essas representadas na Figura 36.

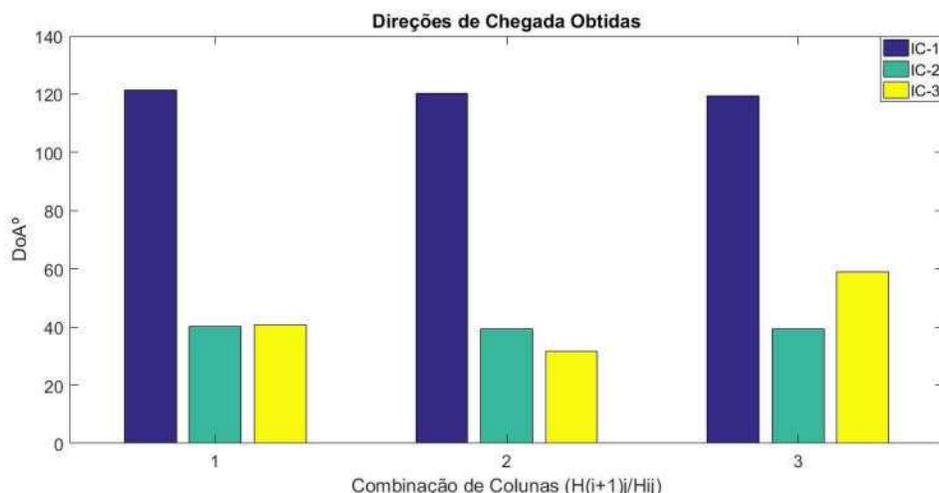


Figura 36. Direções de Chegada Obtidas para cada Combinação de Colunas da Matriz H (Arranjo de 4 elementos)

Aplicando a média aritmética nas direções obtidas para cada estimativa, foram estimadas as direções de chegada para todas as fontes, sendo estas dadas por $120,333^\circ$ (IC-1 a 2,46 GHz), $39,654^\circ$ (IC-2 a 2,45 GHz) e $40,661^\circ$ (IC-3 a 2,44 GHz). O RMSE obtido é de 0,409.

Foram reproduzidas essas condições de simulação para os outros métodos clássicos de estimação da DoA, utilizando um arranjo de 4 elementos. As direções de chegada obtidas por cada método estão contidas na Tabela 10.

Tabela 10. DoAs obtidas - simulação com fontes sobrepostas

Método	DoA 1	DoA 2	DoA 3
DoA das Fontes			
ICA	$39,654^\circ$	$40,661^\circ$	$120,333^\circ$
CB	$39,9^\circ$	-	$119,2^\circ$
MVDR	$39,2^\circ$	-	$119,3^\circ$
MUSIC	$40,2^\circ$	-	$119,9^\circ$
ESPRIT	$40,534^\circ$	$84,732^\circ$	$120,159^\circ$

O CB estimou apenas duas direções ($39,9^\circ$ e $119,2^\circ$), o MVDR também estimou apenas duas direções ($39,2^\circ$ e $119,3^\circ$), o MUSIC também detectou apenas duas direções ($40,2^\circ$ e $119,9^\circ$) enquanto que o ESPRIT detectou 3 direções, sendo essas dadas por $40,534^\circ$, $120,159^\circ$ e $84,7317^\circ$. No entanto, o método ESPRIT detectou erroneamente esta última direção.

A função pseudoespectro para os métodos do CB, MVDR e MUSIC são ilustradas na Figura 37.

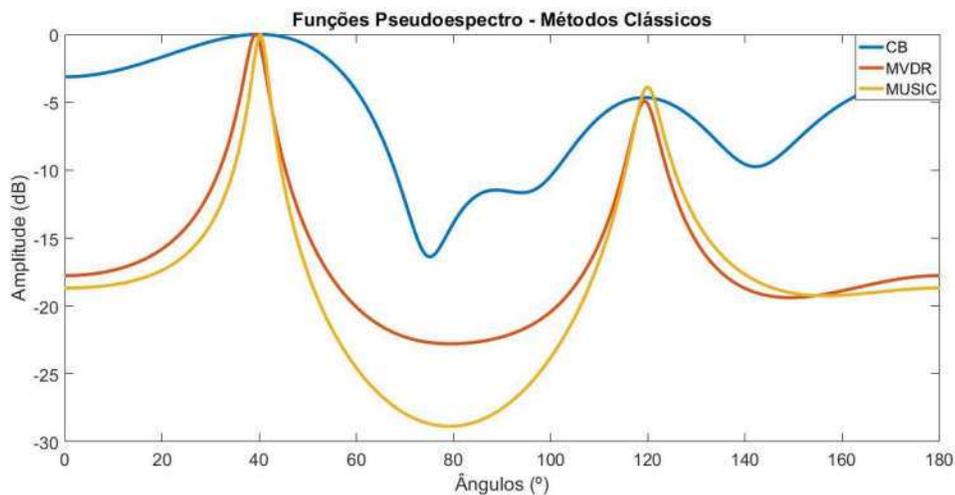


Figura 37. Pseudoespectro dos métodos clássicos para o caso simulado (ULA de 4 elementos)

Para esse caso, foi possível observar que os métodos clássicos não foram capazes de detectar as fontes sobrepostas, sendo esta uma vantagem do ICA. O ICA foi o único método capaz de detectar as DoAs de todas as fontes, e corretamente, nessa situação.

Capítulo 5

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um arranjo experimental com antenas foi montado para testar os métodos estudados, o experimento de medição utilizou duas fontes eletromagnéticas e um arranjo receptor, representado por um dipolo colocado em várias posições, ilustrados na Figura 38.



Figura 38. Experimento de Medição

Para constituir o arranjo receptor foi utilizada a técnica do arranjo linear virtual de antenas (*Virtual Uniform Linear Array – VULA*), no qual apenas uma antena física é utilizada, sendo esta movida para várias posições diferentes. Esse modelo simplifica a análise, já que não há acoplamento mútuo entre os elementos do arranjo. Esse arranjo é ilustrado na Figura 39. A antena está conectada a um analisador de rede vetorial (*VNA – Virtual Network Analyzer*), que registra os sinais recebidos pela antena em cada posição.



Figura 39. Posições Assumidas pela Antena para constituir o arranjo virtual (VULA)

As fontes eletromagnéticas são constituídas de duas antenas log-periódicas alimentadas por geradores de radiofrequência dos modelos R&S SM300 (9kHz-3 GHz) e o R&S SMBV100A (9kHz-6 GHz). Essas antenas e geradores estão ilustradas na Figura 40.



Figura 40. Antenas Log-Periódicas e Geradores Utilizados como Fonte nos Experimentos

Utilizando esses recursos, foram feitos três experimentos para verificar o funcionamento dos métodos. O primeiro experimento utiliza uma fonte eletromagnética em posições diferentes, o segundo experimento usa duas fontes eletromagnéticas de frequências diferentes e por último um experimento com duas fontes eletromagnéticas sobrepostas.

Os dados medidos foram inseridos no algoritmo para encontrar a DoA usando ICA. Para comparação, foram utilizados os métodos MUSIC e ESPRIT.

5.1. Experimento com uma Fonte Eletromagnética de 2,45 GHz

Foi realizado um experimento utilizando uma fonte eletromagnética colocada em duas posições aleatórias, conforme a Figura 41.

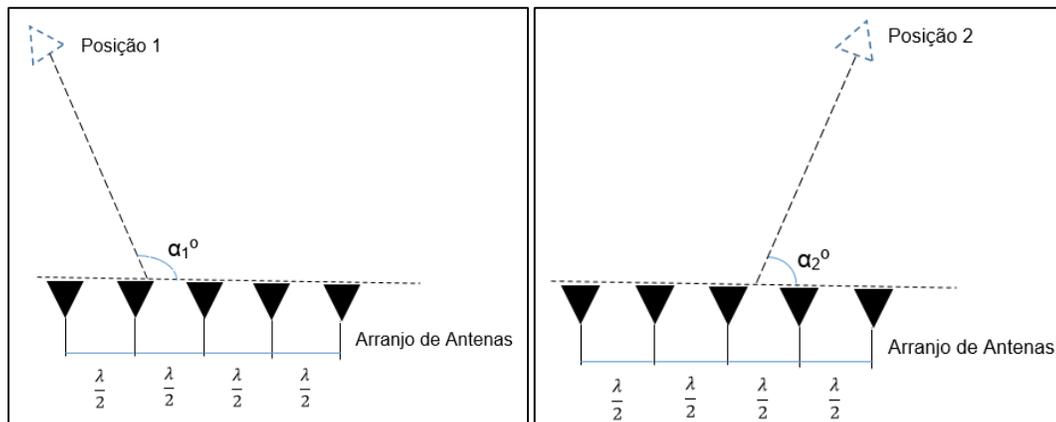


Figura 41. Esquema do Experimento 1 com a fonte na primeira e segunda posição

A fonte eletromagnética foi colocada em duas posições distintas, sendo que na primeira posição está a aproximadamente 140° e para a segunda posição aproximadamente 50° .

Os dados medidos foram inseridos nos algoritmos usando ICA, ESPRIT e MUSIC, e os resultados da DoA obtida para a primeira posição estão na Tabela 11.

Tabela 11. Direções Obtidas para o Experimento com a Fonte na posição de 140°

Método	2 medições	3 medições	4 medições
ICA	$133,0^\circ$	$137,7^\circ$	$137,7^\circ$
MUSIC	$133,2^\circ$	$139,3^\circ$	$139,9^\circ$
ESPRIT	$133,2^\circ$	$141,1^\circ$	$140,8^\circ$

A partir dos dados medidos, é possível observar que conforme o número de medições cresce, o valor da DoA obtida se aproxima mais da estimativa real. Para provar essa afirmação, o erro absoluto foi calculado conforme o número de medições e é ilustrado na Figura 42.

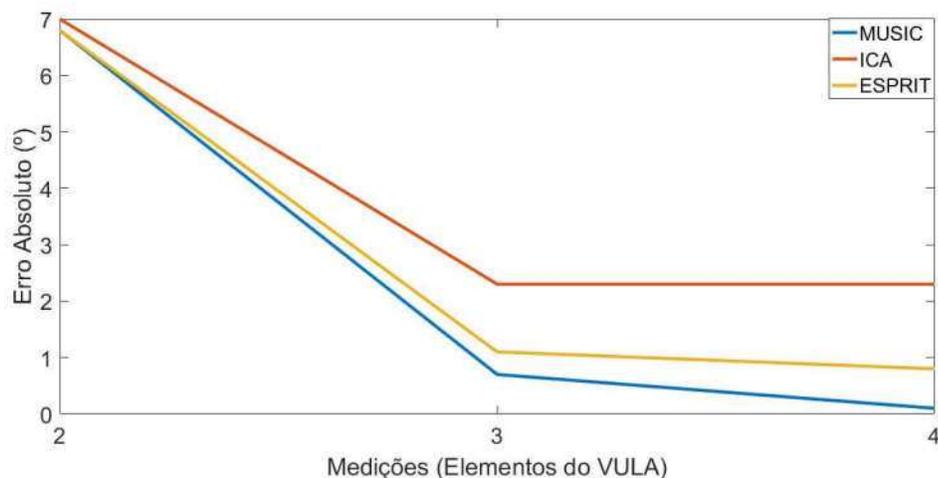


Figura 42. Erro absoluto conforme o número de medições para a Posição 1 da Fonte

A função pseudoespectro do MUSIC estima com mais exatidão a posição real da fonte conforme o número de medições cresce, como é possível observar na Figura 43.

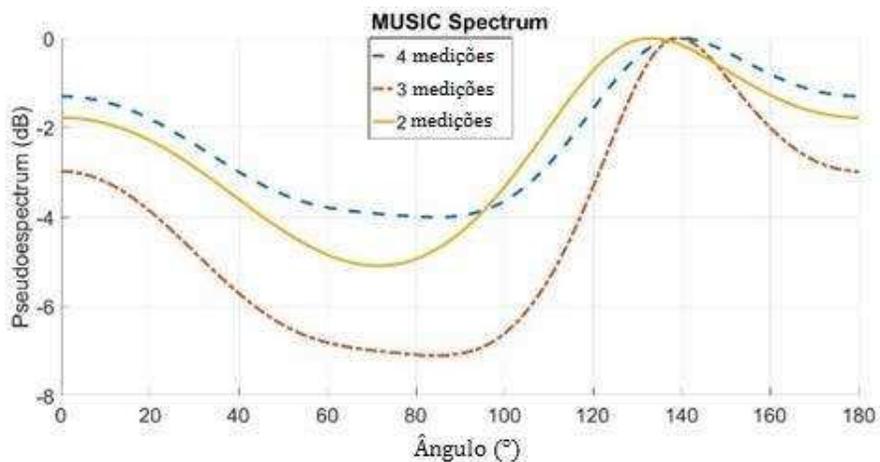


Figura 43. Pseudoespectro do MUSIC para a medição na posição 1 (140°)

A fonte foi então movida para a segunda posição (aproximadamente 50°), os dados obtidos pelo arranjo virtual foram inseridos nos algoritmos, sendo possível observar os resultados na Tabela 12.

Tabela 12. Direções Obtidas para o Experimento com a Fonte na posição de 50°

Método	2 medições	3 medições	4 medições
ICA	38,9°	37,5°	47,9°
MUSIC	35,8°	37,7°	52,7°
ESPRIT	35,8°	38,2°	58,6°

Assim como no caso anterior, a partir dos dados medidos, é possível observar que conforme o número de medições cresce, o valor da DoA obtida se aproxima mais da estimativa real. Os resultados para o erro absoluto obtido estão ilustrados na Figura 44.

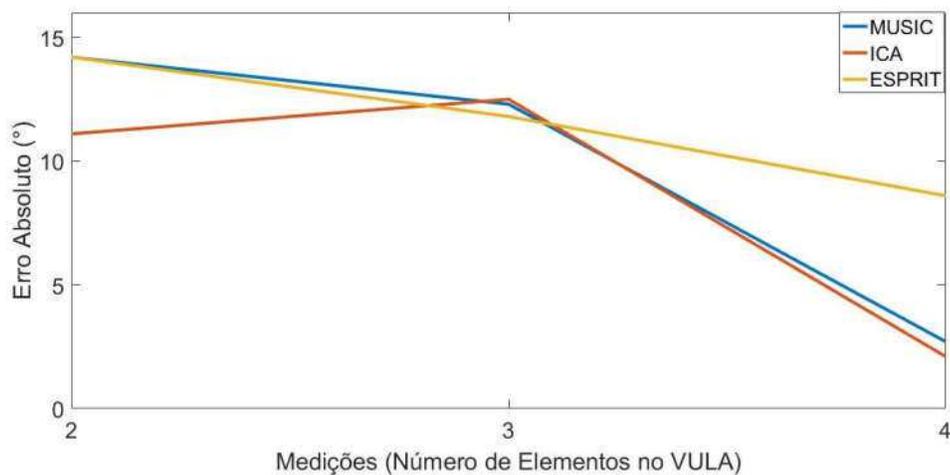


Figura 44. Erro absoluto conforme o número de medições para a Posição 2 da Fonte

A função pseudoespectro do MUSIC novamente tende para a posição real conforme o número de medições cresce, ver Figura 45.

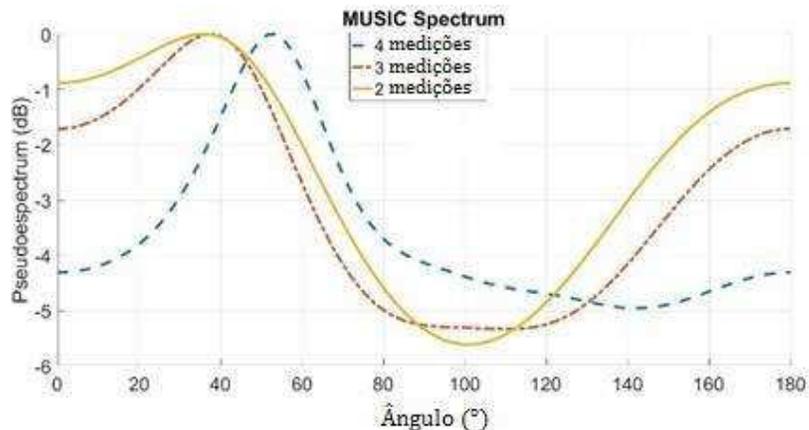


Figura 45. Espectro do MUSIC para a segunda posição

É possível verificar que os métodos ICA, MUSIC e ESPRIT apresentam os resultados experimentais próximos para o experimento realizado. A diferença máxima obtida do método ICA com relação aos outros métodos analisados foi de $10,7^\circ$, mostrando que o método estudado possui a aptidão de detectar apenas uma fonte eletromagnética assim como os métodos clássicos analisados.

5.2. Duas Fontes Eletromagnéticas de Frequências Diferentes

Foram posicionadas duas fontes eletromagnéticas de frequência 2,44 GHz e 2,45 GHz, respectivamente, em posições de aproximadamente 70° e 115° . Para a recepção dos sinais foi utilizada a antena dipolo em 5 posições diferentes formando o VULA.

Os dados obtidos foram inseridos nos algoritmos para obtenção de DoA das fontes e foi calculado o erro médio quadrático (RMSE). Os resultados obtidos estão ilustrados na Tabela 13.

Tabela 13. DoAs Obtidas pelos diferentes Métodos para a Situação Simulada

Método	DoA 1	DoA 2	RMSE
ICA	$86,43^\circ$	$116,56^\circ$	8,252
MUSIC	$83,5^\circ$	$113,1^\circ$	6,817
ESPRIT	$60,24^\circ$	$147,78^\circ$	17,101

A partir dos dados obtidos, é possível verificar que o método MUSIC apresenta o melhor desempenho nessa situação, e todos os métodos conseguiram detectar as duas fontes.

5.3. Duas Fontes Eletromagnéticas Sobrepostas

Foram posicionadas duas fontes eletromagnéticas sobrepostas em uma posição de aproximadamente 110° em relação ao arranjo composto por 5 medições. As frequências das fontes são de 2,44 GHz e de 2,45 GHz. As direções de chegada obtidas para essa situação estão contidas na Tabela 14.

Tabela 14. Direções de Chegada Obtidas para o Experimento de Fontes Sobrepostas

Método	DoA 1	DoA 2	Erro Absoluto (máximo)
ICA	121,01° (2,44 GHz)	126,06° (2,45 GHz)	16,06°
MUSIC	123,3°	-	13,3°
ESPRIT	122,99°	-	12,99°

A função pseudoespectro do MUSIC revela apenas uma fonte na direção das fontes sobrepostas, conforme ilustrado na Figura 46.

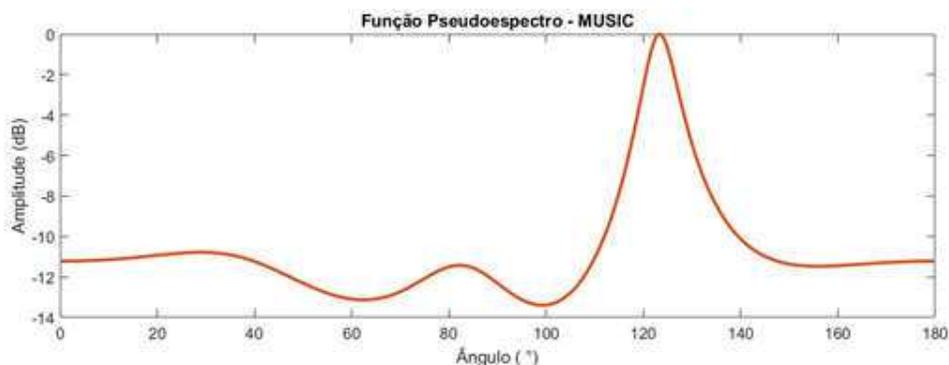


Figura 46. Função Pseudoespectro do MUSIC para o caso de fontes sobrepostas

É possível observar a partir dos dados obtidos que para esses casos, os métodos MUSIC e ESPRIT conseguem detectar a DoA das fontes eletromagnéticas com menos erro que o ICA, porém não conseguiram detectar as fontes sobrepostas, com isso, é possível concluir que o método usando ICA foi o único dentre os estudados

que foi capaz de detectar as direções das duas fontes sobrepostas, sendo o mais indicado para essa situação específica.

Capítulo 6

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado um método para detecção de direção de chegada (DoA) de sinais usando Análise de Componentes Independentes (ICA). As técnicas clássicas possuem algumas limitações no que diz respeito à detecção de fontes que estão sobrepostas (possuem a mesma DoA) e para casos quando há o mesmo número de sensores/medições do que fontes.

O algoritmo estudado foi baseado em uma técnica utilizada para detectar fontes sonoras, foi feita a sua adaptação para a detecção de fontes eletromagnéticas.

Nos experimentos realizados, foi observado que, embora a técnica ICA apresente um erro superior com relação a algoritmos como o MUSIC, o algoritmo conseguiu detectar a direção de chegada de todas as fontes em situações adversas, inclusive o caso de fontes sobrepostas, superando nesse ponto, os métodos clássicos utilizados para comparação nos experimentos.

Outro ponto importante a ser levado em consideração é que o método utilizando o ICA consegue relacionar cada DoA à sua respectiva fonte eletromagnética, funcionalidade esta que não está presente em nenhum outro método clássico estudado nessa dissertação.

Ao longo desse trabalho, é possível observar outros campos que podem ser explorados, como:

- Aperfeiçoamento da modelagem do sinal e adaptação do método para trabalharem com a eliminação do efeito de acoplamento mútuo entre elementos do arranjo receptor;
- Avaliar a estimativa de DoA do método em diferentes formatos de arranjo de antenas (circular, planar, etc.) e verificar a correlação espacial entre as fontes e as antenas;
- Aprimoramento do algoritmo para detectar a DoA em situações com ruídos diferentes do ruído branco gaussiano;
- Construção de hardware para detecção de DoA usando a técnica ICA sem a necessidade de um analisador de redes vetorial (VNA).

REFERÊNCIAS

- [1] Z. Chen, G. Gokeda, Y. Yu, Introduction to Direction-of-Arrival Estimation, Boston: Artech House, 2010.
- [2] H. Sawada, R. Mukai, S. Makino, “Direction of arrival estimation for multiple source signals using independent component analysis,” em *7th IEEE International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, Paris, 2003.
- [3] P.I.L. Ferreira, G. Fontgalland, B. B. Albert, “Spread-Out Overlapping Sources by Independent Component Analysis for Location Positioning,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, pp. 1805-1808, 2013.
- [4] S. Choi, A. Cichocki, H.-M. Park e S.-Y. Lee, “Blind Source Separation and Independent Component Analysis:,” *Neural Information Processing - Letters and Reviews*, pp. 1-57, January 2005.
- [5] D. P. A. a. G. Panda, “A Review of Independent Component Analysis Techniques and their Applications,” *IETE Technical Review*, pp. 320-332, September 2018.
- [6] G. R. N. a. D. K. Kumar, “An Overview of Independent Component Analysis and Its Applications,” *Informatica*, pp. 63-81, March 2011.
- [7] P. I. L. Ferreira, *Separação e Identificação de Múltiplas Fontes Eletromagnéticas Usando o Método de Análise em Componentes Independentes e o Coeficiente de Correlação*, Campina Grande: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, 2014.
- [8] P. Comon, “Independent Component Analysis, a new concept?,” *Signal Processing, Elsevier*, vol. 36, pp. 287-314, 1994.
- [9] A. Hyvärinen, J. Karkunen, E. Oja, Independent Component Analysis, New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [10] P. I. L. Ferreira, G. Fontgalland, G. F. Aragão, S. E. Barbin, “Separation of Electromagnetic Sources by the Method of Independent Component Analysis,” em *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Minneapolis, 2013.
- [11] E. Bingham, A. Hyvärinen, “A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis of Complex Valued Signals,” *International Journal of Neural Systems*, vol. 10, pp. 1-8, 2000.
- [12] A. Hyvarinen, “Publications by Aapo Hyvarinen: FastICA,” [Online]. Available: <https://www.cs.helsinki.fi/u/ahyvarin/papers/fastica.shtml>. [Acesso em 29 Novembro 2018].
- [13] J. Ding, J. Xu, L. Zhao, L. Li, “A Novel DoA Estimation Method in the Presence of Multipath Interference,” em *Proceedings of the IEEE International Conference of Information and Automation*, Ningbo, 2016.
- [14] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [15] T. Kaiser, A. Bourdoux, H. Boche, J. R. Fonollosa, J. B. Andersen e W. Utschick, Smart Antennas — State of the Art, New York: Hindawi Publishing Corporation, 2005.
- [16] A. Gupta e R. K. Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,” *Topic: Recent Advances in Software Defined Networking for 5G Networks*, pp. 1206-1232, July 2015.

- [17] M. C. Horewicz, Estimação da Direção de Chegada (DOA) de Sinais Eletromagnéticos em Canais Reversos CDMA Utilizando Antenas Inteligentes, Brasília: Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2006.
- [18] D. M. Vijayan e S. K. Menon, "Direction of arrival estimation in smart antenna for marine communication," em *2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, 2016.
- [19] A. Kavak e K. Kucuk, "On connectivity analysis of smart antenna capable wireless sensor networks," em *2009 6th International Symposium on Wireless Communication Systems*, Tuscany, 2009.
- [20] M. Hanaoui e M. Rifi, "Directional communications with smart antenna system to improve energy efficiency in wireless sensor networks," em *2016 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, Tangiers, 2016.
- [21] Petre Stoica and Randolph Moses, *Spectral Analysis of Signals*, New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [22] A. S. M. K. B. Jeffrey Foutz, *Narrowband Direction of Arrival for Antenna Arrays*, Arizona State: Morgan & Claypool, 2008.
- [23] H. Krim e M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: the parametric approach," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 67-94, July 1996.
- [24] P. Stoica, Z. Wang e J. Li, "Robust Capon beamforming," *IEEE Signal Processing Letters*, pp. 172-175, May 2003.
- [25] R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, pp. 276-280, 1986.
- [26] P. Gupta, S. P. Kar, "MUSIC and Improved MUSIC Algorithm to Estimate Direction of Arrival," em *IEEE ICCSP*, Melmaruvathur, 2017.
- [27] R. Roy, T. Kailath, "ESPRIT "estimation of signal parameters via rotational invariance techniques"," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 37, 1989.
- [28] O. A. Oumar, M. F. Siyau, T. P. Sattar, "Comparison between MUSIC and ESPRIT Direction of Arrival Estimation Algorithms for Wireless Communication Systems," em *International Conference on Future Generation Communication Technology*, London, 2012.
- [29] W. Jiao, Y. Chang, "Wholly Estimating Direction of Arrival of Convolutively Mixed Sources Using Independent Component Analysis," em *9th. International Conference on Electronic Measurements & Instruments*, Beijing, 2009.
- [30] G. Fontgalland, P. I. L. Ferreira, "Combining Antenna Array Elements by Using ICA Method for Remote Sensing of Sources," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 234-237, 2017.
- [31] P. I. L. Ferreira e G. Fontgalland, "Separation of overlapped sources using subarray technique and independent component analysis," em *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, 2017.