

Universidade de Brasília - UnB Faculdade UnB Gama - FGA Engenharia Eletrônica

### Implementação de filtragem espacial adaptativa para sistemas de recepção com múltiplas antenas

Autor: Ítalo Alberto do Nascimento Sousa Orientador: Prof. Dr.: Leonardo Aguayo

Brasília, DF 2015



Ítalo Alberto do Nascimento Sousa

# Implementação de filtragem espacial adaptativa para sistemas de recepção com múltiplas antenas

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônicada da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr.: Leonardo Aguayo

Brasília, DF 2015

Ítalo Alberto do Nascimento Sousa

Implementação de filtragem espacial adaptativa para sistemas de recepção com múltiplas antenas / Ítalo Alberto do Nascimento Sousa. – Brasília, DF, 2015-

 $58~{\rm p.}$  : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr.: Leonardo Aguayo

Trabalho de Conclusão de Curso II – Universidade de Brasília - Un<br/>B Faculdade Un<br/>B Gama - FGA , 2015.

1. Antenas inteligentes. 2. Filtragem adaptativa. I. Prof. Dr.: Leonardo Aguayo. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Implementação de filtragem espacial adaptativa para sistemas de recepção com múltiplas antenas

Ítalo Alberto do Nascimento Sousa

## Implementação de filtragem espacial adaptativa para sistemas de recepção com múltiplas antenas

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônicada da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 11 de Dezembro de 2015:

Prof. Dr.: Leonardo Aguayo Orientador

Prof. Dr.: Luciano Emidio Neves da Fonseca Convidado 1

**Prof. Dr.: Cristiano Jacques Miosso** Convidado 2

> Brasília, DF 2015

Esse trabalho é dedicado às pessoas proativas que buscam lutar pelo que acreditam ao invés de simplesmente aceitarem as circunstâncias como elas são.

.

### Agradecimentos

Primeiramente, eu gostaria de agradecer a Deus e a minha mãe Maria Adélia, que são as peças mais importantes em minha vida. Depois vêm as outras também importantes, que acreditam em mim. Dentre eles o meu avô (painho) e a minha avó (mainha), que faleceram, mas contribuíram sempre para este processo; o meu avô painho que após cinco anos me acompanhando nessa jornada, infelizmente não pôde vê-la sendo concluída, o que é uma pena, mas faz parte da vida. Ao meu pai, que apesar de não estar muito presente, contribuiu com coisas simples que me ajudaram a continuar seguindo esse processo com determinação. A minha irmã Elis, que apesar de ainda ser nova, ainda tem muita coisa a aprender na vida. Aos meus irmãos Leticia e Thales, que apesar de ter tido mais contato recentemente já demonstraram apoio nessa etapa. Agradecer à minha avó Cristina que sempre almeja essa conquista e tenta me dar todo suporte necessário. Ao meu avô Jorge que está sempre lá com seu bom humor para dar e distribuir. Gostaria de agradecer à toda minha família pelo suporte e pela motivação necessários, aos meus amigos antes da faculdade, e aos que fiz depois que entrei nela. Em relação aos que fiz na faculdade, gostaria de oferecer meus agradecimentos, dentre outros, em especial aos meus companheiros de apartamento e de universidade Arthur e Áulus, ao cheff Zalisson, ao Lucas H., ao Luis Bonifácio, ao Gilvandson, ao José Alberto, ao PG, ao Rodolfo, ao João Zago, ao Berilli, ao Creiton, à Érica, ao Pablo, ao Canela, ao Crush, ao Cabrito, ao Brunolo, ao Jeann, ao Perna, ao chará, ao Igão, ao Filipe Duarte, ao Victor Hugo, ao Gabriel, ao Ilton, ao João Paulo, ao Judeu, ao Matheus, ao Duerno e ao Thiago. Em especial, ao professor Fragelli, que foi o meu primeiro orientador e deu o começo de um rumo em um momento de confusão, e que me fez escrever o primeiro Artigo científico, tendo sempre preocupação nos detalhes. Aos professores que contribuíram ao meu crescimento no curso, em especial, ao meu orientador Aguayo, ao professor mestre doutor Wellington, ao excelente professor Cristiano, à magnífica professora Suélia, ao querido professor Luciano, ao Diogo, ao Sandro, ao Batistuta, ao Gilmar, ao Marcelino, ao Muñoz, ao Lindomar e à Vanessa. Também, às pessoas que contribuiram à construção deste trabalho indiretamente, dentre eles o Matheus Assis, a Paula, ao CsF pelo ano de estudos no LIT. Aos professores e às pessoas que conheci lá. Ao HUB pela oportunidade de estágio e aos profissionais presentes lá. Também gostaria de agradecer à UnB, em especial à FGA, por essa oportunidade de graduação sem custos diretos e com um bom suporte. Ao curso de engenharia eletrônica pelo conhecimento adquirido. Agradecer também ao meu país, Brasil, que apesar de tantas falhas eu amo tanto. A Brasília que é a minha terra e a terra dos meus pais, cidade que tanto amo. Gostaria de agradecer ao suporte recebido por todos e com isso pretendo ajudar muitas outras pessoas a terem chance de crescer e alcançarem seu sucesso também.

.

Nossa vida é como um vetor. Nós temos o poder de mudarmos a nossa vida através das escolhas que tomamos (direção) e da motivação que depositamos para realizar tal mudança (módulo).

.

## Resumo

Neste trabalho, foi investigado a utilização conjunta de técnicas de filtragem espacial adaptativa com arranjo de antenas para o cancelamento de interferência na recepção de sinais de um sistema de comunicação sem fio. A utilização de arranjo de antenas adaptativas torna estes sistemas mais robustos e confiáveis. Primeiro, é realizada uma filtragem na direção de chegada do sinal (DOA), a partir da conformação de feixes, por meio de ganhos do diagrama de irradiação em direções desejadas e supressões nas direções interferentes. Esse diagrama de radiação é desenvolvido a partir do fator de forma do arranjo e do vetor conformador, os quais executam o processo de filtragem espacial adaptativa. Para tanto, foi elaborado um experimento com o uso da ferramenta MATLAB para analisar o comportamento do algoritmo adaptativo LMS (Least Mean Square)do tipo FIR (Finity Impulse Response) de acordo com a variação dos parâmetros: ordem do filtro, passo de adaptação e vetor de coeficientes; o qual foi posteriormente validado de acordo com o experimento computacional referenciado. Os resultados analisados mostraram que: quanto menor é o passo de adaptação, menor tende a ser o erro quadrático médio; também que quanto menor for a ordem do filtro, menor tende a ser a flutuação do vetor de coeficientes; mantidas a quantidade de iterações especificada e as condições iniciais de projeto. Foi implementado o arranjo determinístico para apontar para a melhor localização baseado em informações conhecidas, o que é útil como forma de sinalização. Foi implementado o fator de forma de arranjo adaptativo e foram gerados alguns cenários para testar seu funcionamento e analisar seu comportamento: a direção dos sinais principal e interferente; a quantidade de ruído branco no sistema; a quantidade de antenas utilizadas; a quantidade de sinais interferentes; se o sinal do interferente é fixo ou móvel. A partir dos cenários elaborados e da análise de desempenho em relação ao nível de erro quadrático, conclui-se que: quanto menos ruído branco estiver no sistema, melhor seu resultado de adaptação; o número de antenas depende diretamente do projeto do filtro; quanto mais sinais interferentes, pior o desempenho da filtragem; quanto mais próximo do sinal principal o interferente estiver, pior é o processo de filtragem; sinais interferentes fixos necessitam de uma menor robustez para o seu cancelamento; e por fim, arranjos adaptativos podem cancelar sinais interferentes móveis com um bom desempenho, apesar de suas limitações.

**Palavras-chave**: Antenas Inteligentes. Conformação de Feixe. Filtragem Espacial. Sistemas Adaptativos. Fator de Arranjo de Antenas.

## Abstract

This work investigates the joint use of adaptive beamforming techniques with antenna array for canceling interference in the reception of signals from a wireless communication system. The use of adaptive antenna array makes these systems more robust and reliable. First, a filter in the signal direction of arrival (DOA) is performed from the forming beam by means of the radiation pattern gain in desired directions and deletions in interferents directions. This radiation pattern is designed from the arrangement shape factor and shaping vector, which performs the process of adaptive spatial filtering. For this, it was created an experiment using the MATLAB tool to analyze the adaptive algorithm behavior of LMS (Least Mean Square) which is the FIR type (Finity Impulse Response) according to the variation of parameters was developed: Filter order, step adaptation and coefficient vector; which was further validated according to the referenced computational experiment. The analyzed results showed that: the smaller the adjustment step, the lower tends to be the mean quadratic error; also that the lower order of the filter, the lower tends to be the fluctuation of the coefficient vector; kept the number of iterations specified and the initial conditions of the project. It was implemented deterministic arrangement to point to the best location based on known information, which is useful as a way of signaling. The form factor of adaptive arrangement was implemented and have generated some scenarios to test its operation and analyze their behavior: the direction of the primary and interfering signals; the amount of white noise in the system; the number of antennas used; the amount of interfering signals; if the interfering signal is fixed or mobile. From the elaborate sets and analysis of performance in relation to the level of squared error, we conclude that: the less white noise on the system, his best result of adaptation; the number of antennas depends directly on the filter design; the more interfering signals, the worse the performance of the filter; the closer to the main signal is the interferer, the worse the filtering process; fixed interfering signals require less strength to its cancellation; and finally, adaptive arrangements can cancel mobile interfering signals with a good performance, despite its limitations.

**Key-words**:Smart antennas. Beamforming. Spatial filtering. Adaptive Systems. Factor antenna array.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de radiação do direcionamento do sinal de chegada.	15
Figura 2 – Ilustração da técnica de filtragem espacial para direcionamento	o do sinal
desejado e cancelamento do sinal interferente.	16
Figura 3 – Exemplo de um diagrama de irradiação tridimensional (esq	uerda) e
bidimensional (direita) de uma antena	
Figura 4 – Exemplos de arranjos de antenas. Extraído de [26]	23
Figura 5 – (a) campo próximo (b) campo distante	23
Figura 6 – Arranjo de antenas com N elementos	25
Figura 7 – Diagrama esquemático de um filtro adaptativo.	
Figura 8 – Componentes básicos na estrutura do LMS	
Figura 9 – Separação de sinais da filtragem espacial	30
Figura 10 – Exemplo da ação de uma antena inteligente	32
Figura 11 – Sistema SIMO 2x2 de comunicação	33
Figura 12 – Direcionamento do feixe de máxima energia	34
Figura 13 – Sistema de comunicação MIMO 2x2.	
Figura 14 – Diagrama geral do sistema implementado.	
Figura 15 – Cenário $C_1$ do filtro LMS	40
Figura 16 – Cenário $C_2$ do filtro LMS	40
Figura 17 – Cenário $C_3$ do filtro LMS	41
Figura 18 – Cenário $C_4$ do filtro LMS	41
Figura 19 – Cenário $C_5$ do filtro LMS	42
Figura 20 – Cenário $C_6$ do filtro LMS	42
Figura 21 – Cenário $C_7$ do filtro LMS	43
Figura 22 – Cenário $C_8$ do filtro LMS	43
Figura 23 – Ilustração do diagrama proposto com um sinal interferente	45
Figura 24 – Ilustração do diagrama proposto com mais de um sinal interfe	erente 45
Figura 25 – Resultados obtidos do cenário $C_{1A}$	47
Figura 26 – Resultados obtidos do cenário $C_{1B}$	48
Figura 27 – Resultados obtidos do cenário $C_{2A}$	48
Figura 28 – Resultados obtidos do cenário $C_{2B}$	48
Figura 29 – Resultados obtidos do cenário $C_{3A}$	49
Figura 30 – Resultados obtidos do cenário $C_{3B}$	49
Figura 31 – Resultados obtidos do cenário $C_{4A}$	50
Figura 32 – Resultados obtidos do cenário $C_{10}$	50
Figura 33 – Resultados obtidos do cenário $C_5$	51
Figura 34 – Resultados obtidos do cenário $C_6$	52

Figura	35 -	- Resultados	obtidos	do	cenário	$C_7$ .	•			•	 •	•			 ,	52
Figura	36 -	- Resultados	obtidos	do	cenário	$C_8$ .				•	 •	•		•		53
Figura	37 -	- Resultados	obtidos	do	cenário	$C_9$ .				•	 •	•		•		53
Figura	38 -	- Resultados	obtidos	do	cenário	$C_{12}.$				•	 •	•		•		54
Figura	39 -	- Resultados	obtidos	do	cenário	$C_{13}.$				•	 •	•	 •	•		55

## Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1	ASPECTOS GERAIS	15
1.1	Objetivos	17
1.2	Metodologia de pesquisa	18
1.3	Composição e Estrutura do Trabalho	18
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
3	ANTENAS INTELIGENTES	20
3.1	Antenas	20
3.1.1	Densidade e Intensidade de Radiação	20
3.1.2	Diretividade, Eficiência e Ganho	20
3.1.3	Padrão de Irradiação	21
3.2	Arranjos de Antenas	22
3.2.1	Antena com dois elementos	23
3.2.2	Antena linear com N elementos	25
4	SISTEMAS ADAPTATIVOS COM ANTENAS	27
4.1	Filtros digitais adaptativos	27
4.1.1	Filtros Adaptativos	27
4.1.2	Filtros LMS	28
4.2	Antenas adaptativas	29
4.2.1	Filtragem espacial adaptativa	30
4.2.2	Antenas inteligentes	31
5	APLICAÇÕES DAS ANTENAS INTELIGENTES	33
5.1	<b>MIMO</b>	33
5.1.1	SISO, MISO e SIMO	33
5.1.2	Tecnologia MIMO	35
6	CONSTRUÇÃO E ANÁLISE	37
6.1	Diagrama geral do sistema	37
6.2	Metodologia de modelagem	38
6.3	Resultados e discussão	44
7	CONCLUSÕES	57
7.1	Conclusões da pesquisa	57

7.2 Conclusões gerais e perspectivas	
--------------------------------------	--

# Parte I INTRODUÇÃO

### 1 Aspectos Gerais

O uso de múltiplas antenas e antenas inteligentes em sistemas de comunicação têm se tornado um dos paradigmas mais importantes para o desenvolvimento dos sistemas emergentes de comunicação sem fio. Essas técnicas têm surgido como uma opção de tecnologia para solucionar os desafios contemporâneos, como a obtenção de elevada taxa de transmissão e o aumento da qualidade dos sistemas de comunicação. A partir disso, as indústrias têm desenvolvido cada vez mais produtos com essa tecnologia, como em redes Wi-Fi e em telefonia celular 4G[6][10][12][28][30].

Sistemas de antenas inteligentes são a combinação de um arranjo de antenas com técnicas de processamento de sinais. Nas antenas inteligentes, a potência irradiada é direcionada para locais específicos por meio de estruturas de elementos irradiantes, que são os arranjos, de maneira otimizada. Vários elementos de antena podem ser arranjados no espaço e interconectados para produzir padrões de radiação direcional. Configurações com múltiplos elementos irradiantes são referidos como um arranjo de antenas. Os arranjos de antena fornecem capacidade única de direcionamento do feixe irradiado por meio do ajuste de fase da corrente de excitação em cada elemento. Esses arranjos são referidos como arranjos controlados por fase e encontram muitas aplicações. O diagrama de radiação de um arranjo é caracterizado pelos tipos de elementos individuais, por sua orientação, por seu posicionamento, pela fase e pela amplitude das correntes de excitação de cada elemento, como pode ser visto na figura 1. Através do controle dos parâmetros desses elementos é possível controlar a irradiação emitida por essas estruturas com um maior grau de liberdade[3][4][10][12[13].



Figura 1 – Diagrama de radiação do direcionamento do sinal de chegada.

A intereferência dos sinais em sistemas de comunicação têm sido uma das maio-

res preocupações dos projetistas nas aplicações civís e militares. Para tanto, técnicas de filtragem habituais não têm sido úteis para solucionar esse problema, pois o sinal de interferência e o sinal desejado são da mesma frequência. Vários métodos já foram adotados para evitar essa interferência, inclusive saltos de frequência, porém isso requer excessiva largura de banda . Então, a técnica de filtragem espacial vem como uma possível solução para esse problema, sem a necessidade de incrementar a largura de banda, pois o sinal é filtrado com base na direção de chegada *(direction of arrival, DOA)*, como pode ser visto na figura 2.[5][7][15][17]



Figura 2 – Ilustração da técnica de filtragem espacial para direcionamento do sinal desejado e cancelamento do sinal interferente.

Por intermédio da técnica de processamento de sinais da filtragem espacial adaptativa, antenas inteligentes são capazes de formar feixes de sinais nas direções desejadas e anular os sinais nas direções interferentes. O estudo dessas técnicas possuem um importante lugar na área das telecomunicações, tanto para análise de espectro, quanto para filtragem espacial e temporal. Essa técnica quando aplicada em um arranjo de microfones, são de particular interesse em aplicações como videoconferências. Aliado a um algoritmo de determinação de chegada, pode-se conformar eletronicamente a captação do arranjo de microfones para o falante, através da construção de padrões de interferência, eliminando consideravelmente o efeito de fontes de ruído do ambiente [2][5][8][10][11][21].

Para que o processo de filtragem adaptativa seja aplicado em antenas inteligentes, é necessário o uso de diversas técnicas de processamento adaptativo. Uma das técnicas de filtragem mais básica e ao mesmo tempo mais importante é o algoritmo LMS (*Least Mean Square*). Esta técnica é utilizada devido à sua simplicidade, pequenos cálculos e alta estabilidade. Outra técnica de filtragem também importante para a utilização em antenas inteligentes é o LSR (*Recursive Least Square*). Ele usualmente converge com uma magnitude mais rápida do que o algoritmo LMS, porém possui uma maior complexidade[2][5][21][24].

Um exemplo desse tipo de sistema *wireless* com múltiplas antenas que utiliza antenas inteligentes é o MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), o qual possui um arranjo de antenas no transmissor e outro arranjo também no receptor. Nele, o canal de transmissão transporta simultaneamente dados provenientes de várias antenas do transmissor. No receptor, as múltiplas antenas captam o sinal transmitido e, por intermédio de técnicas de processamento de sinais e da filtragem espacial adaptativa, é possível separar os dados provenientes de cada antena do transmissor. Assim, uma das possibilidades de se empregar sistemas MIMO é aumentar a taxa de transmissão. Isso é baseado na ideia de que usando múltiplas antenas, o sinal transmitido progride através de diferentes canais, dos transmissores para os receptores, criando ganho de capacidade[39][40][41][45].

O sistema analisado não é a solução mais eficiente para casos da vida real, pois esse necessitam de um sistema mais robusto e com uma complexidade que atenda às demandas desejadas. Porém, ele se destaca por sua simplicidade de implementação, e propicia o entendimento de um caminho viável para o aumento da eficiência espectral, a partir da utilização de antenas inteligentes para otimizar sistemas de comunicação. A boa compreensão do comportamento de sistemas que utilizam filtragem espacial adaptativa é essencial para projetos de sistemas de comunicação sem fio avançados. A partir disso, surge a necessidade de amplos estudos sobre essa técnica, com o intuito de tornar tais questões mais acessíveis para auxiliar nos estudos e implementações avançadas em sistemas de comunicação sem fio [2][4][5][7][20][21].

#### 1.1 Objetivos

Este trabalho de conclusão de curso (TCC) tem como objetivo a implementação da técnica de filtragem espacial adaptativa para análise de desempenho em ambientes controlados, para o cancelamento de interferência em um arranjo de antenas.

Os objetivos específicos são:

- Implementar por meio da ferramenta MATLAB um algoritmo adaptativo do tipo FIR, que utilize técnicas de filtragem espacial adaptativa em um arranjo de antenas;
- Aplicar um algoritmo de filtragem adaptativa para o cancelamento de sinais interferentes em sistemas ruidosos;
- Variar parâmetros específicos dos algoritmos adaptativos com o intuito da comparação entre os resultados obtidos;

• Comparar os resultados obtidos com os esperados teoricamente, ou com os encontrados na literatura.

#### 1.2 Metodologia de pesquisa

Para atingir o objetivo proposto, é utilizada a metodologia de pesquisa exploratória no âmbito de realizar o levantamento da teoria acerca do arranjo de antenas e das técnicas de filtragem adaptativa. Também é utilizada a pesquisa descritiva com o intuito de descrever por meio da simulação e análise, o comportamento do algoritmo adaptativo para equalização de um sinal com interferência. Por fim, é utilizada a pesquisa explicativa para o registro e análise dos resultados, cuminando na identificação do comportamento adaptativo de cancelamento de um ou mais sinais interferentes.

#### 1.3 Composição e Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho de conclusão de curso considera três partes principais em sua elaboração:

- Fundamentos teóricos. Esta parte é composta por dois capítulos principais que abordam os conhecimentos necessários para o desenvolvimento e compreensão do sistema, e um capítulo que aborda possíveis aplicações do desenvolvimento do sistema proposto;
- Construção e análise. Nesta parte é discutida a metodologia de validação do sistema proposto, do seu mecanismo de construção, e também da obtenção e análise dos resultados;
- Conclusões gerais. Nesta parte é abordada tanto a conclusão das análises discutidas durante o texto, como também de possíveis trabalhos que podem ser executados a partir da análise elaborada desse conhecimento construído.

# Parte II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## 2 Antenas Inteligentes

#### 2.1 Antenas

Nos sistemas de comunicação sem fio, as antenas desempenham um papel fundamental no processo da transmissão de ondas eletromagnéticas de um meio guiado para a interface aérea. Ela consiste em condutores elétricos que criam campos elétricos e magnéticos ao seu redor. As ondas eletromagnéticas excitam a corrente de seus condutores, e então ela captura uma parte da energia das ondas recebidas, convertendo-a em energia elétrica no cabo. Para analisar o desempenho de uma antena, é necessário definir vários parâmetros, descritos a seguir[1][15][45].

#### 2.1.1 Densidade e Intensidade de Radiação

Para a análise de um arranjo de antenas, define-se primeiramente algumas de suas principais propriedades, dentre elas a densidade de radiação, a potência irradiada e a intensidade de radiação.

A densidade de radiação é dada pela magnitude do vetor de Poynting

$$W_{rad}(r,\theta,\varphi) = \left|\vec{S}\right| = \left|\vec{E} \times \vec{H}\right| \quad \left(\frac{W}{m^2}\right),\tag{2.1}$$

e a potência irradiada por uma antena pode ser calculada, usando coordenadas esféricas  $(r, \theta, \varphi)$ , por

$$P_{rad} = \oint W_{rad}(r,\theta,\varphi) \, dA = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} W_{rad}(r,\theta,\varphi) \, r^2 sen\theta d\theta d\varphi \quad (W).$$
(2.2)

A intensidade de radiação é definida por

$$U_{rad}(r,\theta,\varphi) = r^2 W_{rad}(r,\theta,\varphi) \quad (\frac{W}{sr}), \qquad (2.3)$$

e, portanto,

$$P_{rad} = \int_{\Omega=0}^{4\pi} U_{rad} d\Omega, \qquad (2.4)$$

onde  $\Omega$  é o ângulo sólido. Como no espaço livre  $|\vec{S}|$  é proporcional a  $\frac{1}{r^2}$ ,  $U_{rad}$  é função apenas dos ângulos  $(\theta, \varphi)$  [1][15].

#### 2.1.2 Diretividade, Eficiência e Ganho

Uma antena é considerada isotrópica quando a energia é irradiada uniformemente em todas as direções. Neste caso, seu diagrama de irradiação seria uma esfera com raio unitário. Mesmo não sendo possível construir essa antena, ela serve como referência para analisar algumas propriedades de antenas reais, como as propriedades de ganho e diretividade [1].

Uma antena direcional é projetada para ter um maior ganho em um dada direção e atenuação nas outras. Isso é feito através do incremento de seu tamanho nessa dada direção. Com isso, a irradiação dos condutores da antena se espalha em maiores distâncias, permitindo um melhor controle desse sinal[1][15].

Como as antenas reais nunca são perfeitamente isotrópicas, a diretividade da antena é expressa como a amplitude da intensidade de radiação de energia em um dado ponto, com o ângulo e a distância dessa antena comparados com o que seria irradiado nesse ponto considerando uma antena isotrópica, sendo a última tomada como antena de referência. A partir disso, pode-se assumir que a diretividade é expressa como o ganho de diretividade na direção do seu valor máximo. Ela é expressa por

$$D_g(\theta,\varphi) = \frac{4\pi U_{rad}(\theta,\varphi)}{P_{rad}},$$
(2.5)

com isso, a diretividade pode ser usada para medir como a estrutura da antena irradia densidade de potência em determinadas direções. Nem toda a potência aplicada aos terminais de uma antena é irradiada. Um exemplo são as perdas por efeito *Joule* no material condutor. Ou seja, a antena tem uma eficiência pré-definida, que pode ser expressa por

$$\eta_{ant} = \frac{P_I(TRP)}{P_s},\tag{2.6}$$

onde  $P_s$  é a potência aplicada aos terminais da antena. O ganho de uma antena aborda a eficiência da antena bem como suas capacidades direcionais. E pode ser expresso por

$$G\left(\theta,\varphi\right) = \eta_{ant} D_g\left(\theta,\varphi\right),\tag{2.7}$$

sendo usualmente expresso em dBi[1].

#### 2.1.3 Padrão de Irradiação

Uma antena de transmissão gera ondas eletromagnéticas maiores em uma dada direção do que nas outras. O padrão (ou diagrama) de irradiação de uma antena é a representação gráfica do ganho da antena. Essencialmente, indica a intensidade de energia irradiada pela antena em uma determinada direção, tendo como referência a amplitude do diagrama de irradiação de outra antena (comumente, adota-se uma antena isotrópica como referência). Para uma antena receptora, indica a intensidade de energia captada pela antena em uma determinada direção [1][4][15].

O diagrama pode ser tridimensional ou bidimensional. Neste caso, apresentam-se cortes nos planos horizontal e vertical da antena. Um exemplo destas representações está apresentado na figura 3, obtida a partir do *software 4nec2*.



Figura 3 – Exemplo de um diagrama de irradiação tridimensional (esquerda) e bidimensional (direita) de uma antena.

Uma onda eletromagnética medida em um determinado ponto fora da antena é a soma da irradiação de todas as partes da antena. Cada parcela de uma antena irradia ondas com diferentes amplitudes e fases, e cada uma dessas ondas percorre uma distância diferente para o ponto onde o receptor está localizado. Em algumas direções, elas se somam construtivamente gerando um ganho, já em outras elas se interferem causando perdas [1][4][15].

#### 2.2 Arranjos de Antenas

Em diversas aplicações, é necessário projetar antenas com alta diretividade, ou seja, com ganhos muito elevados para poder estabelecer uma comunicação a longa distância. Para isso, é necessário aumentar o tamanho elétrico da antena ou formar um conjunto de elementos de irradiação com uma configuração elétrica e geométrica. Essa configuração chama-se arranjo de elementos de antena, e comumente seus elementos são idênticos. Exemplos de arranjos estão mostrado na figura 4 [1][3][4][15].



Figura 4 – Exemplos de arranjos de antenas. Extraído de [26]

Uma combinação adequada dos sinais recebidos em cada antena permite controlar, em um arranjo de antenas operando na recepção, o formato do diagrama de irradiação, em especial a direção de máximo ganho. Para isso, definem-se alguns conceitos fundamentais na análise de um arranjo de antenas.

#### 2.2.1 Antena com dois elementos

A configuração mais usual de um arranjo de antenas é a disposição linear de seus elementos. Para começar a descrição, considera-se dois dipolos horizontais infinitesimais posicionados ao longo do eixo z, conforme a figura 5 [1][4].



Figura 5 – (a) campo próximo (b) campo distante.

Dessa maneira, o campo total resultante  $E_r$  irradiado pelos dois elementos infi-

nitesimais, admitindo acoplamento eletromagnético nulo entre eles, pode ser escrito no plano y-z como

$$E_r = E_1 + E_2 = \hat{a_{\Theta}} \frac{J\eta_0 K I_0 I_d}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j(kr_1 - \frac{\beta}{2})} \cos(\theta_1)}{r_1} + \frac{e^{-j(kr_2 + \frac{\beta}{2})} \cos(\theta_2)}{r_2} \right\}$$
(2.8)

onde  $\beta$  é a diferença na fase de excitação dos elementos,  $\eta_0$  é a impedância intrínseca do espaço livre e vale aproximadamente  $120\pi\Omega$ ,  $I_0$  é uma intensidade de corrente elétrica constante,  $I_d$  é o comprimento dos elementos e k é o número de onda.

A partir de uma observação do campo elétrico  $E_r$  em um ponto distante do arranjo, considera-se  $\theta \approx \theta_1 \approx \theta_2$  e as seguintes aproximações para as variações de fase de  $E_r$ 

$$r \approx \frac{d}{2}\cos(\theta) + r_1 \tag{2.9}$$

$$r_2 \approx \frac{d}{2}\cos(\theta) + r \tag{2.10}$$

também para as variações de amplitude

$$r \approx r_1 \approx r_2. \tag{2.11}$$

Dessa maneira, tem-se que

$$E_r = \hat{a_{\Theta}} \frac{J\eta_0 K I_0 I_d}{4\pi} 2\cos(\theta) \cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos(\theta) + \beta)\right]$$
(2.12)

e pode-se visto pela equação 2.13 que o campo resultante  $E_r$  é o campo do dipolo,

$$E_r = \hat{a}_\theta j\eta_0 \frac{kI_0 I_d e^{-j\beta r}}{4\pi r} \cos(\theta)$$
(2.13)

multiplicado pelo termo

$$AF(\theta) = 2\cos\left[\frac{1}{2}(kd\cos(\theta) + \beta)\right]$$
(2.14)

que é chamado de fator de forma ou fator de arranjo, e é uma função da geometria do arranjo e da fase da corrente de excitação dos elementos  $\beta$ , nesse caso, para dois elementos. Tem-se então que

$$E(resultante) = E(elemento \acute{u}nico) \cdot E(fator doarranjo)$$
(2.15)

e então, pode ser gerada essa regra, a qual é válida para um número qualquer de elementos idênticos e é conhecida como a regra de multiplicação de padrões. Ela foi expressa para um arranjo de dois elementos, porém ela também é válida para arranjos com um número qualquer de elementos idênticos que não tenham necessariamente magnitude e fase de excitação ou espaçamento idênticos [1][3][4].

#### 2.2.2 Antena linear com N elementos

Baseado nos fundamentos de um arranjo com dois elementos, pode-se generalizar o método para N elementos. Considerando N elementos igualmente espaçados e dispostos ao longo do eixo z, ilustrado na figura 6, assume-se que esses elementos possuem a mesma amplitude de excitação e que possuem uma diferença de fase  $\beta$  entre eles. Esse tipo de arranjo é conhecido como arranjo linear uniforme e o fator de arranjo pode ser obtido considerando os elementos como fontes isotrópicas. O fator de arranjo pode ser expresso pelas equações 2.16 ou 2.17, no plano y - z [1][3][4].

$$AF(\theta) = 1 + e^{j(kd\cos(\theta) + \beta)} + e^{j2(kd\cos(\theta) + \beta)} + \dots + e^{j(N-1))(kd\cos(\theta) + \beta)} = \sum_{n=1}^{N} e^{j(n-1))(kd\cos(\theta) + \beta)}$$
(2.16)

$$AF(\theta) = e^{j\left[\frac{(N-1)}{2}\right]\left[(kd\cos(\theta)+\beta)\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\left(kd\cos(\theta)+\beta\right)\right)\right)}{sen\left(\frac{kd\cos(\theta)+\beta}{2}\right)\right)}}.$$
(2.17)

De acordo com a figura 6, tem-se que o ângulo  $\gamma$  entre um vetor  $a_z$  na direção do eixo do arranjo e um vetor radial indo da origem até o ponto de observação  $a_r$ , pode ser expresso por

$$\cos(\gamma) = a_z \cdot a_r = a_z \cdot (a_x sen(\theta) cos(\phi) + a_y sen(\theta) sen(\phi) + a_z cos(\theta)) = cos(\theta) \to \gamma = \theta.$$
(2.18)



Figura 6 – Arranjo de antenas com N elementos.

Desse modo, a equação para o fator de arranjo pode ser escrita em termos de  $\gamma$  como

$$AF(\theta) = 1 + e^{j(kd\cos(\gamma) + \beta)} + e^{j2(kd\cos(\gamma) + \beta)} + \dots + e^{j(N-1))(kd\cos(\gamma) + \beta)},$$
(2.19)

o que resulta em

$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^{N} e^{j(n-1))(kd\cos(\gamma) + \beta)},$$
(2.20)

quando os elementos do arranjo estão dispostos ao longo do eixo x ou y,

$$\cos(\gamma) = a_x \cdot a_r = a_x \cdot (a_x \operatorname{sen}(\theta) \cos(\phi) + a_y \operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\phi) + a_z \cos(\theta)) = \operatorname{sen}(\theta) \cos(\phi).$$
(2.21)

Dessa maneira,  $\gamma = \cos^{-1}(sen(\theta)\cos(\phi))$  e o fator de arranjo, podem ser escritos como

$$AF(\theta,\phi) = e^{j[\frac{(N-1)}{2}](kdsen(\theta))cos(\gamma)+\beta)} \frac{sen(\frac{N}{2})(kdsen(\theta))cos(\phi)+\beta}{sen(\frac{1}{2})(kdsen(\theta))cos(\phi)+\beta}.$$
 (2.22)

Para obter-se a irradiação máxima em uma direção normal ao eixo do arranjo, toma-se o valor absoluto de  $AF(\theta)$  e faz-se

$$kd\cos(\theta) + \beta = 0. \tag{2.23}$$

Como o intuito é obter o máximo direcionado para  $\theta = 90^{\circ}$ , então

$$kdcos(\theta) + \beta|_{\theta=90^0} = 0 \Rightarrow \beta = 0.$$
(2.24)

Dessa maneira, para obter-se o valor máximo do fator de arranjo de um arranjo linear uniforme normal ao eixo do arranjo, é necessário que a fase de excitação de todos os seus elementos seja a mesma. Para que o máximo do fator de arranjo seja orientado ao longo do arranjo, é necessário que

$$kd\cos(\theta) + \beta|_{\theta=0^0} = 0 \Rightarrow \beta = -kd \tag{2.25}$$

ou que

$$kd\cos(\theta) + \beta|_{\theta=180^0} = 0 \Rightarrow \beta = kd.$$
(2.26)

Quando é desejável obter-se o valor máximo irradiado orientado na direção  $\theta_0(0^\circ \le \theta_0 \le 180^\circ)$ , tem-se que

$$kdcos(\theta) + \beta|_{\theta=\theta_0} = 0 \Rightarrow \beta = -kdcos(\theta_0).$$
(2.27)

O desempenho de um arranjo de elementos de antenas é determinado por vários fatores. O tamanho do arranjo, que é o espaçamento entre os elementos, determina o ganho máximo que pode ser obtido no diagrama. Por outro lado, o número de elementos determina os graus de liberdade disponíveis no projeto desses diagramas. Em geral, essas duas grandezas estão relacionadas e de acordo com os valores que assumirem, podem aumentar ou diminuir a interferência em outros usuários [1][4].

## 3 Sistemas Adaptativos com Antenas

Configurações de arranjos com processadores numéricos associados aos elementos de arranjo são chamados sistemas adaptativos com antenas. Esses processadores controlam de maneira recursiva, por meio de um treinamento, a amplitude e a fase da corrente elétrica nos elementos do arranjo, com o intuito de maximizar a qualidade do sinal de saída. Para analisar de maneira progressiva o funcionamento desses sistemas, faz-se uma construção sucessiva de complexidade da formação desse sistema [1][2][4].

#### 3.1 Filtros digitais adaptativos

O objetivo do uso de algoritmos adaptativos é treinar filtros que possam lidar com sinais ruidosos, produzindo na saída sinais mais próximos do desejado.

A operação de um algoritmo de filtragem adaptativa envolve dois princípios básicos: (1) o processo de filtragem, designado para produzir uma saída em resposta a uma sequência de dados de entrada, e (2) um processo adaptativo, o qual tem como proposta providenciar um mecanismo para controle adaptativo de parâmetros ajustáveis usados em um processo de filtragem. Esses dois processos trabalham em conjunto, e a escolha da estrutura do processo de filtragem tem um efeito direto na operação do algoritmo [2].

#### 3.1.1 Filtros Adaptativos

Um filtro adaptativo pode ser implementado em diferentes estruturas, e a escolha dessa estrutura implica na complexidade computacional do processo, ou seja, na quantidade de operações aritméticas por iteração, e também no número necessário de iterações para atingir o desempenho almejado.[2]

Filtros digitais podem ser classificados pelas propriedades de sua resposta ao impulso (FIR, IIR). No caso de filtros FIR, há apenas zeros em H(z) e a ordem do filtro é dada por  $N_z$ . No âmbito do trabalho, serão utilizados filtros do tipo FIR para a implementação do sistema de detecção [2].

Na Figura 7, apresenta-se um esquemático dos sinais presentes em um filtro adaptativo [2][4]. O algoritmo que determina a atualização dos coeficientes requer uma informação adicional, que assume a forma de um sinal de referência, ou sinal desejado [2]. No instante k, x(k) é o sinal de entrada, y(k) é o sinal de saída da filtragem adaptativa, d(k) é o sinal desejado, e e(k) é o sinal de erro, podendo ser calculado a partir de



$$e(k) = d(k) - y(k)$$
 (3.1)

Figura 7 – Diagrama esquemático de um filtro adaptativo.

Esse sinal de erro e(k) é usado pelo algoritmo adaptativo para realizar a atualização apropriada dos coeficientes do filtro. Se  $e(k) \rightarrow 0$ , então  $y(k) \rightarrow d(k)$  e, neste caso a saída do filtro é similar ao sinal desejado.

#### 3.1.2 Filtros LMS

A operação do algoritmo LMS é descrita por um sistema de controle de retroalimentação, através da combinação de um processo de filtragem e de um processo adaptativo. Uma característica significativa do algoritmo LMS é sua simplicidade. Dois componentes básicos na estrutura desse algoritmo podem ser visto na figura 8. Primeiramente, tem-se um filtro transversal, onde o algoritmo LMS é construído, esse componente é responsável pelo desempenho do processo de filtragem. De forma secundária, tem-se um mecanismo de controle do processo adaptativo que age nos coeficientes de iteração do filtro transversal. [2].



Figura 8 – Componentes básicos na estrutura do LMS.

O LMS calcula seu vetor de coeficientes em cada iteração, o qual é atualizado na direção oposta ao vetor gradiente obtido do erro quadrático instantâneo. A constante que determina o incremento dado aos coeficientes é referida como o tamanho do passo de ajuste, e, dependendo do seu valor, o processo converge para um conjunto de valores ótimos, referidos também como pesos ótimos. As relações básicas do algoritmo LMS convencional são dadas por

1. Saída do filtro

$$y(n) = w^H(n)u(n) \tag{3.2}$$

2. Erro de estimação

$$e(n) = d(n) - y(n)$$
 (3.3)

3. Equação de ajuste recursivo dos coeficientes

$$w(n+1) = w(n) + \mu u(n)e * (n)$$
(3.4)

O termo d(n) é chamado sinal desejado, o qual representa uma amostra de treinamento no instante n e o parâmetro  $\mu$  controla a convergência dos coeficientes para um valor próximo ao fornecido pela equação, sendo o passo do algoritmo. Se o sinal de entrada não é estacionário, o algoritmo perde desempenho, pois acompanha a variação das características da entrada. A amplitude do ruído normalmente costuma tornar-se menor na proporção em que o  $\mu$  é reduzido [2].

No projeto de um filtro LMS, deve ser selecionado a ordem do filtro M e o tamanho do passo  $\mu$  para se obter o desempenho desejado do sistema. O ajuste do filtro adaptativo aumenta à medida que a ordem do filtro M e o tamanho do passo  $\mu$  são aumentados. Ou seja, grandes passos de adaptação causam grandes flutuações nos coeficientes do filtro.

#### 3.2 Antenas adaptativas

A filtragem espacial é utilizada para distinguir entre as propriedades espaciais do sinal e do ruído. O dispositivo utilizado para realizar a filtragem espacial é chamado filtrador espacial, que recebe o sinal irradiado de uma direção específica e atenua os sinais irradiados não desejados das outras direções. [4][9]. No processo de filtragem espacial, elementos de antenas são dispostos em arranjo, providenciando um meio de amostragem para o sinal recebido no espaço. O sinal de um conjunto de antenas coletado em um determinado instante de tempo constitui um *snapshot* (captura instântanea). Uma captura instantânea de dados em uma filtragem espacial desempenha um papel análogo ao conjunto de pulsos de entrada consecutivos que há em filtros transversais em um determinado instante de tempo [2][4]. A técnica dos feixes adaptativos consiste em ajustar dinamicamente os padrões de arranjo de maneira a otimizar algumas características do sinal recebido. Arranjos multipolarizados também podem cancelar sinais interferentes tendo diferentes estados de polarização do sinal desejado, mesmo se esses sinais possuírem a mesma direção de chegada [2][15].

#### 3.2.1 Filtragem espacial adaptativa

Através da técnica de processamento de sinais da filtragem espacial, o direcionamento do arranjo de antenas pode ser controlado eletronicamente, pois é possível direcionar a maioria da energia do sinal na direção desejada. O padrão da seleção de direção do feixe é alcançado usando receptores adaptativos, os quais são gerados a partir de um algoritmo de filtragem espacial adaptativa[2][6].

A vantagem do uso da filtragem espacial vem a partir do direcionamento do ganho do arranjo, pois na recepção, é possível controlar a fase e a amplitude relativa do sinal recebido. Isso é possível de ser visualizado através da figura 9, onde os lóbulos apenas direcionam a energia no sinal desejado e bloqueia os sinais nas outras direções, pois são controlado pela filtragem espacial adaptativa [2][6].



Figura 9 – Separação de sinais da filtragem espacial.

A maior diferença entre a filtragem espacial adaptativa e a filtragem espacial convencional é a capacidade do filtrador espacial adaptativo de ajustar seu desempenho para adequar-se ao ambiente. A proposta da filtragem espacial adaptativo é de direcionar os feixes aos alvos desejados, enquanto as interferências são anuladas, através do ajuste do vetor de coeficientes w(n). Tais coeficientes w(n) são ajustados com o intuito de otimizar o desempenho de acordo com os critérios estabelecidos, como pode ser visto através da figura 9. Nos algoritmos adaptativos da filtragem espacial, os vetores de coeficientes w(n)são estimados e então atualizados de acordo com o tempo de execução. Com esse ajuste interativo, o desempenho do conformador de feixe aponta para a direção desejada[2][6].

Foi descrito que a interconexão entre elementos de uma antena pode providenciar uma fase fixa para cada elemento ou pode formar um arranjo de fase. Coeficientes complexos para cada elemento do arranjo podem ser calculados para otimizar algumas propriedades do sinal recebido. Isso nem sempre resulta em padrões de arranjo tendo um máximo valor de sinal na direção desejada, mas busca o melhor sinal de saída do arranjo. As antenas em cada arranjo são espaçadas segundo o critério de formatação de feixe, enquanto que os arranjos são espaçados buscando satisfazer o critério de diversidade espacial [2][14][17].

#### 3.2.2 Antenas inteligentes

Nas antenas inteligentes, os elementos de antena alteram seu diagrama dinamicamente com os máximos de radiação em direções específicas desejadas, onde localizam-se os usuários. Elas podem ser obtidos controlando-se a fase de alimentação de cada elemento da rede. O figura 10 mostra um exemplo de diagrama de radiação de uma rede de antenas com o sinal desejado (vermelho) sendo recebido com intensidade máxima de sinal em 30° e o sinal interferente (preto) sendo bloqueado.



Figura 10 – Exemplo da ação de uma antena inteligente.

O sinal recebido em cada um dos elementos de antena apresenta características que dependem da direção de chegada do sinal, as quais dependem do tipo de arranjo utilizado. A direção de chegada do sinal  $\theta$  é o ângulo formado entre uma linha imaginária fixa e a direção de onde incide uma frente de onda, medido no sentido anti-horário[2][12].

A idéia principal em uma rede inteligente é usar a informação disponível a partir dos vários elementos da rede de antenas que, propriamente processada, permita adaptar o diagrama de radiação; através do controle de amplitudes e fases, para a direção desejada. Para isso, é exigido o uso de um sinal desejado, um sinal de treinamento e a direção de chegada do sinal desejado.

## 4 Aplicações das Antenas Inteligentes

#### 4.1 MIMO

Como um forte exemplo de aplicação, tem-se os sistemas MIMO. Para a compreensão desses sistemas, faz-se primeiramente a construção de sistemas SISO (*Single Input Single Output*), MISO (*Multiple Input Single Output*) e SIMO (*Single Input Multiple Output*) para então obter a descrição de sistemas MIMO.

#### 4.1.1 SISO, MISO e SIMO

SISO têm sido convencionalmente utilizados em sistemas de comunicação. Em geral, uma entrada é um sinal transmitido de uma antena singular, e a saída é o sinal recebido por uma antena singular [45].

O SIMO utiliza uma antena de transmissão e duas de recepção, melhorando a partir disso a taxa de transmissão de dados em comparação com o SISO. Para exemplificar essa teoria, utiliza-se uma antena de transmissão e duas antenas de recepção numa estação base. O sinal transmitido é denotado por x e os sinais recebidos são indicados por  $y_1$  e  $y_2$ . Os coeficientes do canal entre a antena de transmissão e a estação base são representados por  $h_1$  e  $h_2$ . Os sinais de ruído nas antenas de recepção são denotados por  $n_1$  e  $n_2$ , os quais são aborados como independentes. A relação entre esses sinais pode ser vista pelas equações 4.1 e 4.2. E seu esquemático pode ser analisado pela figura 11.[45]

$$y_1 = h_{1x} + n_1 \tag{4.1}$$

$$y_2 = h_{2x} + n_2 \tag{4.2}$$



Figura 11 – Sistema SIMO 2x2 de comunicação.

A estação base pode combinar os sinais provenientes dessas duas antenas de recepção e melhorar a qualidade do sinal. O uso da diversidade selecionaria o melhor dos dois sinais, ou seja, o sinal com o maior coeficiente de canal, então a saída da diversidade de seleção do receptor, indicado por  $Y_{sel}$ , seria expresso pela equação 4.3. Onde a letra *i* representa o sinal com maior coeficiente de canal [45].

$$y_{sel} = max(x_1) + n_i.$$
 (4.3)

Ganhos iguais combinados simplesmente adicionaria os dois sinais, porém é necessário alinhar suas fases. A estação base aplicaria os pesos de fase, indicados por u1 e u2para a saída, indicada por  $Y_{iqual}$ , como pode ser visto na equação 4.4.

$$y_{igual} = u_1 y_1 + u_2 y_2. \tag{4.4}$$

Se os elementos de antena estão suficientemente próximos um do outro, e só a fase varia, então a equação é simplificada para

$$y_{iqual} = 2h_1 x \tag{4.5}$$

Portanto, o sinal recebido é duas vezes o sinal que seria recebido se houvesse apenas uma antena no receptor. Então, ao utilizar o arranjo de antenas, há um ganho de sinal, que é o próprio ganho da filtragem espacial.

A relação máxima de combinação desses dois sinais, não seria suficiente simplesmente para adicionar os dois sinais, depois de alinhar suas fases para eles serem adicionados corretamente, mas também faria com que eles tivessem maior pesos de escala, tornando-os sinais mais potentes. Os pesos de escala, indicados por  $u_1$  e  $u_2$ , podem ser visualizados a partir da figura 12 [45].



Figura 12 – Direcionamento do feixe de máxima energia.

$$y_{out} = u_1 y_1 + u_2 y_2 \tag{4.6}$$

No geral, os ganhos dos sinais transmitidos ou recebidos de múltiplas antenas são chamados de filtragem espacial, e o seu uso nesse contexto pode ser visto através da figura 12. Ou seja, ele seleciona o feixe desejado para direcionar a energia para os sinais de interesse.

Pode ser notado também a partir da figura 8 que se a posição do ponto onde a seta está apontando se mover pelo semi-círculo apontado, mesmo que para a mesma distância já apontada, apenas com um ângulo diferente, o sinal de saída recebido seria decrementado, pois os fatores da fase não corresponderiam às atuais fases dos coeficientes de canal, então os sinais somados não teriam mais as fases totalmente alinhadas. Em um determinado ponto, as fases seriam tão diferentes que se os sinais fossem adicionados, eles poderiam ter diferentes fases e seriam então cancelados um com o outro. Desde que haja apenas um ângulo com o qual o arranjo de antenas recebe o máximo da antena de transmissão, é formado um feixe em uma única direção, que é determinado pelos pesos de escala[41][44][45].

O mesmo pode ser visto para o MISO, onde o transmissor é composto por um arranjo de antenas, e o receptor é uma antena singular móvel, aplicando-se então a mesma elaboração de ideia. Através da filtragem espacial, os pesos de escala são otimizados para receberem o sinal máximo da estação móvel em uma determinada localização. Há apenas um ângulo com o qual o arranjo de antenas recebe a máxima energia da estação móvel, formando um feixe em uma direção única, o qual é determinado pelos pesos da fase,  $u_1$  e  $u_2$ .

No caso geral, a partir da aplicação de pesos em múltiplas antenas, o transmissor aponta a maior quantidade de energia em direções específicas. Além disso, a escolha apropriada dos pesos pode fazer com que o transmissor anule a transmissão de energia em outras direções. O princípio da filtragem espacial pode ser utilizado para realçar o desempenho do sistema. As antenas, como já explicitado, podem distinguir dois campos eletromagnéticos diferentemente orientados, conhecidos como polarizações, o que permite a diversidade de polarização [39][40][41][45].

A técnica da diversidade tem vários benefícios, pois a qualidade de enlace é mais estável e a média de desempenho é melhorada, devido ao ganho de diversidade. Porém, para isso, é necessário mais robustez para o sistema. A condição para a técnica da diversidade ser efetiva é que as cópias dos sinais sejam independentes, minimizando a probabilidade de más condições de propagação[45].

#### 4.1.2 Tecnologia MIMO

Para aumentar a capacidade do envio de dados em um sistema de comunicação, há a possibilidade de aumentar a potência de transmissão. Outra possibilidade é aumentar a largura de banda da frequência de rádio, porém esse é um recurso limitado. Devido à essas dificuldades, o sistema MIMO vem como uma possibilidade de solução, pois através dele, pode-se aumentar a taxa de transmissão de dados sem a de aumentar significativamente a potência de transmissão e utilizando a mesma quantidade de recursos de frequência [39][40][41][45].

A evolução nos sistemas de comunicação fez com que as configurações de transmissão e recepção evoluíssem para um patamar com o qual pudesse suprir as demandas necessárias, para isso foram utilizados diversos métodos, dentre eles as múltiplas antenas no modelo de comunicação.

A ideia central por trás do uso de sistemas sem fio MIMO é a utilização de múltiplas antenas, tanto na transmissão quanto na recepção, para aumentar o desempenho do sistema. Os benefícios de múltiplas antenas elevam-se a partir do uso de uma nova dimensão, a espacial, deixando de ser apenas a temporal, que é a dimensão natural dos dados de sistemas de comunicação, como pode ser visto na figura 13 [39][40][41][44][45].

A diversidade espacial depende do uso de múltiplas antenas em pelo menos um dos lados do sistema de comunicação, podendo ser tanto no transmissor quanto no receptor. A evolução da ideia de diversidade espacial é o uso de múltiplas antenas nos dois terminais do enlace de comunicação, como pode ser visto na Figura 13, que representa uma conexão MIMO com duas antenas transmissoras e duas receptoras, ou 2x2 [39][40][41][45].

Outro benefício do uso de múltiplas antenas nos dois terminais é a multiplexação espacial. Sistemas MIMO utilizam a ferramenta da filtragem espacial para aumentar a relação sinal ruído (SNR), focando a energia apenas nas direções desejadas. Ele permite tratar da interferência quando múltiplos usuários se comunicam em uma estação base [39][40][41][45].

Para ser possível a execução do MIMO, deve ser possível distinguir os diferentes ângulos de transmissão e recepção da antena, para isso foi desenvolvido nesse trabalho uma fundamentação teórica a respeito do processamento adaptativo de sinais, como uma opção para utilização da filtragem espacial no contexto de melhorar a distinção desses ângulos.



Figura 13 – Sistema de comunicação MIMO 2x2.

Parte III CONSTRUÇÃO E ANÁLISE

#### 4.2 Diagrama geral do sistema

De acordo com os requisitos levantados a partir do referencial teórico, foi elaborado o diagrama geral do sistema baseado na proposta de estudo, como pode ser visto na Figura 14. Como o objetivo é a implementação de um sistema de antenas inteligentes utilizando filtros adaptativos, foi desenvolvida uma simples abstração dos elementos gerais necessários para a análise do sistema.



Figura 14 – Diagrama geral do sistema implementado.

Primeiramente, tem-se o arranjo de antenas de recepção, o qual é um conjunto de elementos de antenas, espaçados por D cada elemento. Esse arranjo contém mais de um elemento, e sua quantidade é determinada de acordo com a aplicação proposta.

Os sinais que chegam no arranjo passam pelo bloco adaptativo, que é composto pelo DOA e pelo algoritmo de controle adaptativo. No DOA, os sinais são estimados de acordo com a sua direção de chegada e então, vão para o algoritmo de controle. Nesse algoritmo, os sinais passam por um processo adaptativo, o qual atua diretamente sobre os coeficientes w de valores ajustáveis de maneira recursiva, para com isso modificar os sinais de entrada.

Esse ajuste de pesos no bloco dos coeficientes w é necessário para a adaptação dos sinais a cada passo de iteração. Por meio dessa adaptação a cada iteração, é possível extrair dinamicamente uma maior quantidade do sinal desejado naquela direção de recepção.

O sistema recebe ruído e sinais interferentes em seu processo de comunicação. Uma representação do ruído branco é utilizada para simular esse dano ao sinal desejado. Os sinais interferentes são considerados em sua forma singular, múltipla, fixa e móvel; com o intuito de uma melhor análise sobre os diversos casos de interferência no processo real de comunicação.

Após o ajuste dos coeficientes, é realizado o somatório dos sinais adaptados, o que leva aos sinais de saída, que correspondem à mensagem recebida no receptor da mensagem enviada. Essa saída leva em consideração todos os passos realizados e almeja uma aproximação ótima dos sinais transmitidos.

#### 4.3 Metodologia de modelagem

O projeto foi desenvolvido na ferramenta MATLAB, a qual é uma das ferramentas mais práticas para esse tipo de simulação. As simulações podem ser desenvolvidas tanto no arquivo M do MATLAB quanto na interface do SIMULINK. A simulação deste trabalho foi desenvolvida no arquivo M, onde são coletados os dados e então analisados de acordo com os objetivos estipulados.

O processo de construção do sistema baseia-se em uma sequência de passos e análises envolvendo o algoritmo adaptativo utilizado, bem como sua estrutura de funcionamento e o seu comportamento. A partir disso, faz-se a implementação do sistema proposto baseado na elaboração construtiva dos princípios de funcionamento.

A sequência de passos utilizadas para chegar no sistema proposto, teve como requisito primeiramente a implementação do algoritmo adaptativo LMS, pois ele será utilizado para executar o processo de adaptação da filtragem espacial do arranjo de antenas. Suas definições de projeto e equações utilizadas encontram-se no quadro 1 a seguir. Definições de projeto:

- Ordem do filtro: M
- Passo de adaptação:  $\mu$
- Vetor de coeficientes inicial:  $w(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T$
- Sinal desejado: d(n)
- Sinal do erro: e(n)
- Sinal de entrada no instante n: u(n)

Execução:

Para cada iteração n, calcule

$$u(n) = \begin{bmatrix} u(n) & u(n-1) & \dots & u(n-M+1) \end{bmatrix}^{T}$$
(4.7)

$$d(n)e(n) = d(n) - w^{T}(n)u(n)$$
(4.8)

$$w(n+1) = w(n) + \mu u(n)e(n)$$
(4.9)

O parâmetro W controla a quantidade de distorção produzida pelo canal, com a distorção crescendo de acordo com W. Após a implementação desse algoritmo baseado em suas equações, foi realizada a variação de alguns parâmetros essenciais na compreensão do filtro e na análise de seu desempenho, os quais se encontram no quadro 2 a seguir.

Parâmetros analisados:

- Ordem do filtroM
- Passo de adaptação  $\sigma^2$
- Vetor de coeficientes w

Variação dos valores:

$\sigma^2$	0.01	0.001	0.001	_
w	2.9	3.1	3.3	3.5
M	9	11	13	_

Nessa sequência de passos, foi necessário validar os resultados obtidos para a verificação do seu correto funcionamento. A partir disso, foram realizados testes em cenários conhecidos e então comparados com os existentes na literatura. Em cima das curvas obtidas nos oito cenários a seguir, observa-se um comportamento similar ao obtido no experimento computacional 9.13 do (Haykin, 1991); portanto funciona como previsto. A curva de aprendizagem referente a cada caso de acordo com a variação dos parâmetros pode ser vista em cada cenário do quadro 3. A evolução do erro ocorre de maneira decremental com um comportamento aproximado ao obtido no experimento computacional citado, o que valida o comportamento adaptativo do algoritmo.

Parâmetros	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$
$\sigma^2$	0.0001	0.001	0.01	0.00001	0.0001	0.001	0.001	0.01
М	11	11	11	9	13	13	9	9

Baseado nesses quadros e nos algoritmos elaborados na ferramenta computacional, tem-se os resultados das curvas de acordo com cada cenário analisado.



Figura 15 – Cenário  $C_1$  do filtro LMS.



Figura 16 – Cenário  $C_2$  do filtro LMS.



Figura 17 – Cenário  $C_3$  do filtro LMS.

De acordo com a mudança no tamanho do passo de adaptação  $\sigma^2$  e com a ordem do filtro fixa em M = 11, foram obtidas as figuras 15, 16 e 17. Como foram mantidos todos os outros parâmetros fixos e apenas o passo da adaptação foi modificado, nesse número de iterações, percebe-se que quanto maior o passo  $\sigma^2$  maior tende a ser o erro quadrático médio, o que condiz com a teoria levantada.



Figura 18 – Cenário  $C_4$  do filtro LMS.



Figura 19 – Cenário  $C_5$  do filtro LMS.

De acordo com a mudança na ordem do filtro M e com o passo de adaptação fixo em  $\sigma^2 = 0.0001$ , foram obtidas as figuras 15, 18 e 19. Nesse número de iterações, percebese que quanto menor for a ordem do filtro M menos flutuante tende a ser a variação do vetor de coeficientes w. Isso pode ser facilmente visto em w = 3.5; o que condiz com a teoria levantada.



Figura 20 – Cenário  $C_6$  do filtro LMS.



Figura 21 – Cenário  $C_7$  do filtro LMS.

Na comparação entre as figuras 19 e 20, nota-se que elas possuem a mesma ordem do filtro fixas agora em M = 13 e passos de adaptação diferentes. Percebe-se que o cenário  $C_5$  tem um passo menor que o  $C_6$  e portanto possui um menor erro quadrático médio. O mesmo pode ser notado na comparação entre os cenários  $C_7$  e  $C_8$ .



Figura 22 – Cenário  $C_8$  do filtro LMS.

Por fim, na comparação entre os cenários  $C_2$ ,  $C_6 \in C_7$ , os quais possuem o mesmo passo fixo em  $\sigma^2 = 0.001$ , mas com a ordem do filtro é variada, é possível perceber que quanto maio a ordem do filtro, maior a flutuação no vetor de coeficientes w(n), consequentemente mais brusca é a variação do erro quadrático médio, o que também condiz com a teoria levantada.

Em destaque, observa-se o cenário  $C_4$ , pois ele possui o menor passo e a menor ordem do filtro. Isso faz com que ele possua o vetor de coeficientes menos flutuante em conjunto com um menor erro quadrático médio nessa sequência de iteração; o que demonstra um bom processo de filtragem adaptativa.

A partir das curvas obtidas pela sequência de passos realizada, da fundamentação teórica e dos objetivos estabelecidos, foi possível dar prosseguimento na construção do sistema e implementar a filtragem espacial adaptativa em um arranjo de antenas.

#### 4.4 Resultados e discussão

A coleta e análise dos resultados foram obtidas através da variação de alguns fatores que atuam diretamente sobre a forma de adaptação do sinal, que visa a minimização do sinal interferente e maior direcionamento para o sinal principal.

O diagrama de radiação do sistema de cancelamento de interferência é composto por quatro ou mais sinais em sua composição. Se for considerado o caso com apenas um sinal interferente, ele possui quatro sinais, como pode ser visto na figura 23. O sinal de cor vermelha representa o sinal desejado, ou seja, a direção que deve ser direcionada a maior quantidade de energia no diagrama de radiação. O sinal de cor preta representa o sinal interferente, o qual é de interesse ser bloqueado em sua totalidade. O sinal de cor verde representa a forma de arranjo determinística, que é utilizado para apontar para o sinal desejado. Ele não cancela interferência ou atua sobre o sinal, apenas direciona o feixe para a direção de interesse de acordo com valores prévios computados. O sinal de cor azul representa a forma de arranjo adaptativa do sistema, a qual atua como bloqueador do sinal interferente de cor preta e direcionador do sinal principal de cor vermelha.



Figura 23 – Ilustração do diagrama proposto com um sinal interferente.

Se for considerado o caso com mais de um sinal interferente, como pode ser visto na figura 24, o diagrama de radiação possui mais de quatro sinais. Esse formato exige maior robustez do sistema, pois os processos de adaptação exigem uma filtragem cada vez mais elaborada durante sua execução. O sistema funciona de acordo com o anterior descrito, porém com mais de um sinal interferente representado pelas cores azul e preta.



Figura 24 – Ilustração do diagrama proposto com mais de um sinal interferente.

A partir do diagrama proposto, foram considerados casos com variação do número de antenas, para analisar a influência do tamanho de arranjo nos passos de adaptação. Casos com apenas um sinal interferente e com mais que um sinal interferente. Também foi analisado a adaptação em sinais interferentes fixos e móveis. Para tanto, foram elaborados alguns quadros com possíveis cenários para o cancelamento de interferência.

Como explicitado nos fundamentos teóricos, o fator de forma caracteriza os defasamentos em cada elemento de arranjo utilizado, ou seja, os sinais de cada antena são ponderados por um ganho complexo, expresso por w(n), que é o vetor conformador de feixe. O fator de forma determinístico atua baseado em valores já determinados de maneira prévia à execução do processo. Já o fator de forma adaptativo utiliza a influência do w para a adaptação dinâmica do sinal durante a execução do processo. O ângulo da direção de chegada  $\phi$  dos sinais desejados e interferentes foram modificados de acordo com a análise elaborada. Suas definições de projeto e equações utilizadas encontram-se no quadro 4 a seguir. Definições de projeto:

- Algoritimo utilizado: LMS
- Vetor de coeficientes: w(n)
- Direção do sinal de chegada:  $\phi$
- Fator de arranjo determinística:  $AF = \sum e^{j2\pi D cos(\phi)}$
- Fator de arranjo adaptativo:  $AF = \sum w(n)e^{j2\pi D cos(\phi)}$

Na elaboração do algoritimo, foram declaradas algumas condições iniciais. Primeiramente, foi utilizada a razão  $D = \frac{d}{\lambda}$ , onde d é a distância entre os elementos de arranjo e  $\lambda$  é o comprimento de onda. Esse valor de D = 0.5 foi fixado para ser utilizado em todos os cenários do algoritmo, porém ele também poderia ser variado de acordo com o interesse de análise. Como exemplo de análise seria verificar a influência do espaçamento entre os elementos para aumentar o ganho de diversidade do sistema.

Para a representação dos cenários que contém múltiplas direções dos sinais principal e interferente, tem-se o quadro 5 a seguir. Parâmetros fixos:

- N (Número de antenas) = 15
- $n_0$  (ruído branco) = 0.001
- A: sinal fixo
- B: sinal móvel

Direção dos sinais:

- C<sub>1</sub>: Principal e Interferente em direções opostas
- $C_2$ : Principal e Interferente em direções espelhadas
- $C_3$ : Principal e Interferente em direções iguais
- $C_4$ : Principal e Interferente em direções diferentes

Parâmetros variáveis:

Parâmetros	$C_{1A}$	$C_{1B}$	$C_{2A}$	$C_{2B}$	$C_{3A}$	$C_{3B}$	$C_{4A}$	$C_{4B}$
Principal	$45^{\circ}$	$45^{\circ}$	$45^{\circ}$	$45^{\circ}$	90°	90°	0°	0°
Interferente	225°	$225^{\circ}$	135°	$135^{\circ}$	90°	90°	90°	90°

E com isso, foram obtidos os seguintes resultados referentes a cada cenário:





(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{1A}$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{1A}$ . Figura 25 – Resultados obtidos do cenário  $C_{1A}$ .



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{1B}$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{1B}$ . Figura 26 – Resultados obtidos do cenário  $C_{1B}$ .

Observa-se por meio dos cenários  $C_{1A}$  e  $C_{1B}$  que em ambos os casos, a filtragem do sinal interferente é realizada, porém no sistema móvel, após 400 iterações, o sistema perde significativamente desempenho.



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{2A}$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{2A}$ . Figura 27 – Resultados obtidos do cenário  $C_{2A}$ .



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{2B}$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{2B}$ . Figura 28 – Resultados obtidos do cenário  $C_{2B}$ .

Observa-se por meio dos cenários  $C_{2A}$  e  $C_{2B}$  que em ambos os casos, a filtragem do sinal interferente é realizada, porém no sistema fixo, o sistema perde um desempenho linearmente crescente com o decorrer das iterações. Já no sistema móvel, ele perde desempenho, mas após 300 iterações ele tende a normalizar.



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{3A}$ .

(b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{3A}$ .

Figura 29 – Resultados obtidos do cenário  $C_{3A}$ .



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{3B}$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{3B}$ . Figura 30 – Resultados obtidos do cenário  $C_{3B}$ .

Observa-se por meio dos cenários  $C_{3A}$  e  $C_{3B}$  que em ambos os casos, a filtragem do sinal interferente é realizada, porém o cenário  $C_{3A}$  perde desempenho de forma linearmente crescente no decorrer das iterações, mas sem variações bruscas no erro. Já o sistema fixo manteve uma média aproximada de erro.



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{4A}$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{4A}$ . Figura 31 – Resultados obtidos do cenário  $C_{4A}$ .

A partir dos cenários descritos, percebe-se que os valores correspondentes aos cenários  $C_{4B} \in C_{11}$  são idênticos ao cenário  $C_{10}$ , sendo esse utilizado nessa análise como um caso geral de compartilhamento entre os diferentes cenários abordados. Sua importância está na possibilidade de se analisar um tipo de cenário específico utilizando outras abordagens de variação. Como esse cenário  $C_{10}$  está presente nos três quadros, seu comportamento no diagrama de radiação é o mesmo, não sendo necessário repetir o experimento mais duas vezes. Esse caso geral é de especial interesse em uma análise comparativa, pois através da intersecção das variações de parâmetros obtidas, é possível realizar um estudo de desempenho.



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{10}$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{10}$ . Figura 32 – Resultados obtidos do cenário  $C_{10}$ .

O processo referente ao cenário  $C_{4A}$  manteve uma média aproximadamente constante no decorrer da adaptação, porém com uma leve ascensão. Já o cenário móvel  $C_{10}$ mostrou uma boa curva de desempenho até 300 iterações, mas a partir disso obteve um elevado crescimento no erro até aproximadamente 500 iterações, quando voltou a normalizar sua variação mesmo com um mau desempenho. Consequentemente, a filtragem do sinal interferente foi realizada.

Para a representação dos cenários que contém os sinais principal e interferente em uma direção inicial fixa, tem-se o quadro 6 a seguir.

Parâmetros fixos:

- Sinal principal na direção 0°
- Sinal interferente na direção  $90^{\circ}$
- Sinal interferente móvel no sentido anti horário

Parâmetros variáveis:

Parâmetros	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$
N	9	11	13	15	15	15
$n_0$	0.001	0.001	0.001	0.01	0.1	0.001

E com isso, foram obtidos os seguintes resultados referentes a cada cenário:



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_5$ .

(b) Erro obtido por meio do cenário  $C_5$ .

Figura 33 – Resultados obtidos do cenário  $C_5$ .



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_6$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_6$ .

Figura 34 – Resultados obtidos do cenário  $C_6$ .

Observa-se por meio dos cenários  $C_5$  e  $C_6$  que em ambos os casos, a filtragem do sinal interferente é realizada. As curvas de erro referentes aos cenários  $C_5$  e  $C_6$  foram aproximadamente a mesma, porém o  $C_5$  obteve um maior pico e o  $C_6$  mostrou variações mais bruscas do erro no decorrer das iterações.

Em comparação dos cenários  $C_5$ ,  $C_6$  com o cenário  $C_{10}$ , os quais possuem o mesmo ruído branco mas diferentes números de antenas; percebe-se que no  $C_{13}$ , o qual possui o maior número de antenas, o erro segue constante aproximadamente em zero durante boa parte da execução e quando ocorre uma subida, o seu pico de erro é o maior dentre esses três cenários. Já nos cenários  $C_5$  e  $C_6$ , o erro segue aproximadamente menor do que zero e possui um pico de erro também menor. O que indica que a escolha do número de antenas a ser utilizado deve levar em conta todos os parâmetros de projeto.



(a) Diagrama obtido cenário  $C_7$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_7$ .

Figura 35 – Resultados obtidos do cenário  $C_7$ .

Observa-se por meio do cenário  $C_7$  que a filtragem do sinal interferente é realizada. Também é possível notar que ele tem uma curva de erro aproximadamente constante até 300 iterações mas após isso sofre uma subida abrupta até 450 iterações quando volta a ter uma curva constante com uma leve decaída nas últimas iterações. Em comparação com o cenário  $C_{10}$ , os quais possuem o mesmo ruído branco  $\sigma^2 = 0.001$ , mas número de antenas diferentes, percebe-se que o erro de pico é menor no  $C_7$  do que no  $C_{10}$ .



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_8$ .

(b) Erro obtido por meio do cenário  $C_8$ .

Figura 36 – Resultados obtidos do cenário  $C_8$ .



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_9$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_9$ .

Figura 37 – Resultados obtidos do cenário  $C_9$ .

Observa-se por meio dos cenários  $C_8$  e  $C_9$  que a filtragem do sinal interferente é realizada. No  $C_8$  o erro é baixo e aproximadamente constante, após 300 iterações, ele cresce bastante, após 150 iterações ele volta a normalizar. Já no  $C_9$  ele cresce lentamente e linearmente até 300 iterações, quando tem uma subida abrupta e só volta a crescer que nem antes após aproximadamente 150 iterações.

De acordo com a comparação entre os cenários  $C_8 \in C_9$  com o  $C_{10}$ , percebe-se que todos os parâmetros são fixos e só varia o valor do ruído branco  $\sigma$  inserido no sistema, o que traz resultados notáveis. O  $C_9$  é o que possui o maior ruído branco, e consequentemente o que mais tem crescimento de erro durante a execução do processo; ele é o que possui o maior pico de erro também. Já os cenários  $C_8 \in C_{10}$  são bem semelhantes e possuem praticamente a mesma curva de erro, apesar do ruído branco do  $C_{10}$  ser menor. Para a representação dos cenários que contém mais de um sinal interferente, tem-se o quadro 7 a seguir.

Parâmetros fixos:

- Sinal principal na direção 0°
- N (Número de antenas) = 15
- $n_0$  (ruído branco) = 0.001
- Sinal interferente móvel no sentido anti horário

Parâmetros variáveis:

Parâmetros	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$
$I_1$	90°	90°	90°
$I_2$	_	$120^{\circ}$	$120^{\circ}$
$I_3$	-	_	$150^{\circ}$

E com isso, foram obtidos os seguintes resultados referentes a cada cenário:



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{12}$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{12}$ .

Figura 38 – Resultados obtidos do cenário  $C_{12}$ .

Observa-se por meio dos cenários  $C_{12}$  e  $C_{13}$  que a filtragem do sinal interferente é realizada e que a curva de erro deles é semelhante. A única diferença entre esses dois cenários é que o  $C_{13}$  possui um sinal interferente a mais que o  $C_{12}$ , mas a diferença é nítida no valor do erro, pois percebe-se que o pico de erro nessas iterações no  $C_{12}$  é aproximadamente 3500, já no  $C_{13}$  ele é em torno de 5500; o que indica que quanto mais sinais interferentes no sistema, maior a quantidade de erro no processo de adaptação. No cenário  $C_{10}$ , o qual possui os mesmos parâmetros e só muda a quantidade de interferentes, que esse só possui um, é nítida a diferença de erro no processo, pois ele tende a manter constante ao redor de zero até o 300 iterações e só depois cresce. Comprova-se também o fato dele possuir só um sinal interferente e ter seu pico de erro em torno de 900, o que é muito menor que os outros dois picos explicitados.



(a) Diagrama obtido do cenário  $C_{13}$ . (b) Erro obtido por meio do cenário  $C_{13}$ . Figura 39 – Resultados obtidos do cenário  $C_{13}$ .

Por meio das análises comparativas entre cada cenário e do caso  $C_{10}$  em comum entre eles, faz-se algumas considerações à respeito do comportamento de cada variação de parâmetro em relação à curva de erro e ao desempenho do sistema.

Primeiro, é fácil constatar que quanto maior o valor do erro, pior é o desempenho do arranjo adaptativo. Porém, esse valor de erro pode ser analisado de acordo com a inclinação da ascendente, constante ou descendente da média aproximada nesse número de iterações; e pode também ser analisado em comparação com valores de picos de erro na amostra selecionada.

Para sinais interferentes móveis, o arranjo adaptativo tende a perder desempenho com o decorrer das iterações. Nos experimentos elaborados, o processo de adaptação tende a perder desempenho após 300 iterações. Se os sinais principal e interferente estiverem na mesma direção ou em uma direção aproximada, mais o erro tende a aumentar no processo de filtragem.

Para mais de um sinal interferente, o arranjo adaptativo perde desempenho significativamente. Quanto mais sinais interferentes estiverem agindo sobre o sistema, pior tende a ser seu desempenho de filtragem. Para o sinal interferente fixo, a flutuação do erro costuma ser grande e contínua; e é sempre maior que a móvel baseado nos experimentos realizados.

O número de antenas depende dos requisitos do projeto, mas o valor do ruído branco sempre atrapalha no desempenho. Quanto menor ruído no sistema, melhor seu desempenho.

Sinais interferentes fixos exigem menos robustez do sistema para o processo de filtragem. O processamento adaptativo de arranjo se ajusta de forma dinâmica e é uma

opção bastante viável para o cancelamento de interferência de sinais móveis.

Parte IV CONCLUSÕES

#### 4.5 Conclusões da pesquisa

Na primeira coleta de resultados, foram elaborados alguns quadros correspondentes às situações a serem investigadas com o algoritmo LMS. Com isso foram elaboradas comparações técnicas e gráficas com o intuito de analisar o desempenho da filtragem em cada situação.

Baseado na análise das curvas de erro quadrático médio a cada sequência de passos de iteração, foi possível concluir que quanto menor for o passo de adaptação menor será também o seu erro quadrático médio. E quanto menor for a ordem do filtro, menos flutuante será o vetor de coeficientes. Isso demonstra as condições necessárias para a análise de desempenho da filtragem adaptativa, o que condiz com o referencial teórico. Porém, é importante notar que cada tipo de filtragem necessita de parâmetros que o atendam de maneira ótima, então o valor o passo de adaptação e da ordem do filtro depende inteiramente do projeto do filtro a ser executado, mas baseado também nessa análise realizada para melhor atender às condições desejadas.

Na segunda coleta de resultados, foram elaborados alguns quadros correspondentes às situações a serem investigadas do diagrama de radiação do cancelamento de interferência. Com isso, foram elaboradas comparações técnicas e gráficas com o intuito de analisar o desempenho da filtragem espacial em cada situação.

Como o sinal de entrada não é estacionário, o algoritmo deveria perder desempenho, pois ele acompanha a variação das características da entrada, o que foi fielmente visto nas figuras que possuíam o sinal interferente móvel.

Quanto mais sinais interferentes estiverem afetando o arranjo, pior será o desempenho em relação ao erro quadrático do sistema. Quanto maior o ruído branco no sistema de recepção do arranjo, pior será o desempenho da filtragem.

O número de elementos de antena depende diretamente do projeto do sistema para atender aos requisitos especificados. O arranjo de antenas adaptativo se ajusta em tempo real para realizar o processo de filtragem. Esta é uma boa solução, apesar da perda de desempenho após determinadas iterações. Para corrigir esse problema, necessita-se de códigos mais robustos e de um aumento da complexidade do sistema.

Através da visualização dos diagramas de irradiação dos conformadores de feixe, pôde-se evidenciar o desempenho da filtragem espacial. A criação de nulos espaciais na direção dos sinais interferentes, ou seja, através da manipulação do padrão de irradiação, garante-se a possibilidade de uma maior eficiência espectral e menor potência irradiada pelos transmissores, o que aumenta a eficiência do sistema de comunicação.

#### 4.6 Conclusões gerais e perspectivas

Foi implementada nesse trabalho a técnica de filtragem espacial adaptativa para sistemas de recepção com múltiplas antenas e posteriormente analisado seu desempenho em ambientes controlados.

A partir dos resultados obtidos, pôde-se verificar a validação do funcionamento de tais implementações e realizar uma análise comparativa de seu desempenho de acordo com a variação dos parâmetros especificados.

De maneira específica, por meio da ferramenta MATLAB, foi implementado um algoritmo adaptativo do tipo FIR que utiliza técnicas de filtragem espacial adaptativa para um arranjo de antenas. Esse algoritmo foi aplicado no cancelamento de interferência em sistemas ruidosos. A partir dessa aplicação, foram variados parâmetros específicos e foi realizado uma comparação entre os resultados dessas variações. Por fim, os resultados obtidos foram comparados com os encontrados na literatura, e com isso foi realizada uma validação desses experimentos de acordo com cada cenário abordado.

Baseado no conhecimento construído com essa pesquisa, pode-se citar como perspectivas futuras a este trabalho:

- Cancelamento de interferência utilizando outros algoritmos adaptativos;
- Estudo de sistemas não-lineares em um sistema de arranjo;
- Implementação de algoritmos adaptativos em processadores digitais;
- Modelagem matemática do comportamento estatístico do algoritmo abordado;
- Utilização do processamento adaptativo de arranjo para aplicações acústicas;
- Aplicação de conformadores de feixe em sistemas MIMO.

#### Bibliografia

- BALANIS, Constantine A. Antenna Theory: Analysis and Dseign. Republic Of Singapore: John Wiley & Sons, 1938.
- [2] HAYKIN, Simon. Adaptive Filter Theory. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1991.
- [3] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*. John Wiley & Sons, INC, 1012.
- [4] QUEIROZ, Wamberto J. L.. Uma Nova Abordagem para a Análise de Arranjos de Antenas com Parâmetros Aleatórios.2004. 203 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba,, 2004.
- [5] ANTI-JAMMING, Adaptive Beamforming Algorithms For et al. Adaptive Beamforming Algorithms for Anti-Jamming.International Journal Of Signal Processing, Image Processing And Pattern Recognition. Islamabad, Pakistan, p. 1-11. mar. 2011.
- [6] DUNGRIYAL, Kapil; ANAND; KUMAR, Sriram. PERFORMANCE OF MIR-LMS ALGORITHM FOR ADAPTIVE BEAM FORMING IN SMART ANTENNA. India: International Journal Of Electrical, Electronics And Data Communication, 2014.
- [7] REDDY, B. S.; BHALCHANDRA, A. S.; RATNAPARKHE, V. R.. Adaptive Digital Beam Forming using LMS Algorithm. Aurangabad, India: losr Journal Of Electronics And Communication Engineering (iosr-jece), 2014.
- [8] CASTRO, Roberto Mouzinho de. ESTUDO DE ALGORITMOS ADAPTATIVOS DE BEAMFORMING COM DETECÇÃO DE ÂNGULO DE CHEGADA. Rio de Janeiro: Coppe, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [9] MARRA, Guilherme Carneiro. UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO MULTISPLIT LMS EM CONFORMADORES ADAPTATIVOS DE FEIXE. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [10] SALAMANCA, Julián Jair López. Utilização Conjunta de Técnicas de Formatação de Feixe, Diversidade Espacial e Equalização na Recepção de Sinais. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- [11] LIMA, Gustavo CorrÊa. ESTUDO DE TÉCNICAS DE FORMATAÇÃO DE FEIXE PARA TRANSMISSÃO OFDM.Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [12] PERRI, Eduardo B.. Smart Antennas: Antenas Inteligentes Aplicadas à Telefonia Celular. São Paulo: Teleco - Inteligência em Telecomunicações, 2009.
- [13] CHINATTO JÚNIOR, Adílson Walter. PROCESSAMENTO LARGAMENTE LINEAR EM ARRANJO DE ANTENAS::PROPOSTA, AVALIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DE ALGORITMOS. Campinas: Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação Departamento de Micro-ondas e Óptica, 2011.

- [14] ARAUJO, Daniel Silva Vieira; SANTOS, José Carlos Araujo dos; DIAS, Maurício Henrique Costa. Algoritmos de conformação de feixe em banda dupla para aplicação em bloqueio de RF. Recife, Pe: Xxv SimpÓsio Brasileiro de TelecomunicaÇÕes, 2007.
- [15] HAYNES, Toby. A Primer on Digital Beamforming: Spectrum Signal Processing. Burnaby: Vecima Networks Inc, 1998.
- [16] OPPENHEIM, A. SCHAFER, V. BUCK, J.R. Discrete-Time Signal Processing. 2. ed. New Jersey; Prentice Hall, 1999.
- [17] J. Litva and T. K.-Y. Lo, Digital Beamforming in Wireless Communications,
- [18] RAMJEE, P. OFDM for Wireless Communication Systemss. Artech House, Boston, 1996.

[19] GROUT, Ian. Digital System Design with FPGAs and CPDLs. Oxford: Elsevier, 2008.

- [20] KEHTARNAVAZ, Nasser. Digital Signal Processing: LabVIEW-Based Hybrid Programming. 2. ed. San Diego: Elsevier, 2008.
- [21] DINIZ, Paulo S. R. Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation. 3. ed. New York: Springer, 2008.
- [22] ARAUJO, Osmar de. Sistema inteligente para determinação das direções de chegada de múltiplos sinais em arranjos de antenas. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2004.
- [23] SALAMANCA, Julián L.; RESENDE, Leonardo S.; ROCHA, Carlos Aurélio F. da. Uso de Formatação de Feixe, Diversidade Espacial e Equalização na Recepção de Sinais. Curitiba: Xxix SimpÓsio Brasileiro de TelecomunicaÇÕes, 2011.
- [24] GHAURI, Sajjad Ahmed; ALAM, Sheraz; SOHAIL, Farhan. Adaptive Filter Algorithms for Noise & Echo Cancellation. Islamabad, Pakistan: International Islamic University, 2013.
- [25] SHENOI, B. A. Signal Processing and Filter Design. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [26] MILIVOJEVIć, Zoran. Digital Filter Design. Usa: Mikroelektronika, 2009.
- [27] AHMED, Saad; HASEEB, Abdul; WAHEED, Amber. Adaptive Beamforming. Islamabad: Fuuast, 2009.
- [28]NGO, Hien Quoc. Massive MIMO: Fundamentals and System Designs. Linköping: Liu-tryck, 2015.
- [29] 0510507/CA, Certificação Digital Nº. Transmissão em canais MIMO. Rio de Janeiro: Puc, 2015.
- [30] TSE, David; VISWANATH, Pramod. Fundamentals of Wireless Communication: spatial multiplexing and channel modeling. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

- [31] Addressing the Test Challenges of MIMO Communications Systems. Austin: National Instruments, 2009.
- [32] LUTHER, Erik. **5G Massive MIMO Testbed:** From Theory to Reality. Austin: National Instruments, 2015.
- [33] Building an Affordable 8x8 MIMO Testbed with NI USRP. Austin: National Instruments, 2015.
- [34] 2 × 2 MIMO With NI USRP. Austin: National Instruments, 2015.
- [35] 6x6 MIMO-OFDM System with NI USRP. Austin: National Instruments, 2013.
- [36] Real-Time MIMO Channel Emulation on the NI PXIe-5644R. Austin: National Instruments, 2013.
- [37] GHAFFAR, Rizwan; KNOPP, Raymond; KALTENBERGER, Florian. Multi-user MIMO in LTE and LTE-Advanced - Receiver Structure and Precoding Design. Canada: Wei Peng, 2013.
- [38] REDDY.B, Venkata Subba. FPGA IMPLEMENTATION OF LOW-COMPLEXITY ICA BASED BLIND MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT OFDM RECEIVERS. Rourkela: National Institute Of Technology, 2009.
- [39] SIMÕES, Glauco Cesar Crystal Pereira. Um estudo sobre a Robustez de Técnicas de Processamento de sinais em Sistemas MIMO. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- [40] BAI, Lin; CHOI, Jinho. Low Complexity MIMO Detection. New York: Springer, 2012.
- [41] SIBILLE, Alain; OESTGES, Claude; ZANELLA, Alberto. **MIMO:** From theory to implementation. San Diego: Elsevier, 2011.
- [42] TORRES-ROSARIO, Juan A. IMPLEMENTATION OF A PHASED ARRAY ANTENNA USING DIGITAL BEAMFORMING. MayagÜez: University Of Puerto Rico MayagÜez Campus, 2005.
- [43] KRIM, Hamid; VIBERG, Mats. Two decades of array signal processing research. Usa: leee Signal Processing Magazine, 1996.
- [44] ORFANIDIS, Sophocles J. Electromagnetic Waves and Antennas, Rutgers University, 2004.
- [45] BROWN, Tim; KYRITSI, Persefoni; CARVALHO, Elizabeth de. Practical Guide to the MIMO Radio channel with MATLAB. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2012.
- [46]Gil (2008) GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.