

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

BRUNA DIAS PIRES DE SOUZA

Redução do Nível de Lóbulos Laterais em Arranjo de Antenas 1D

São João da Boa Vista

2018

Bruna Dias Pires de Souza

Redução do Nível de Lóbulos Laterais em Arranjo de Antenas 1D

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Telecomunicações .

Orientador: Profº Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

São João da Boa Vista

2018

S729r	Souza, Bruna Dias Pires de Redução do nível de lóbulos laterais em arranjo de antenas 1D / Bruna Dias Pires de Souza. -- São João da Boa Vista, 2018 33 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista Orientador: Ivan Aritz Aldaya Garde 1. Análise numérica. 2. Antenas (Eletrônica). 3. Sistemas de comunicação sem fio. 4. Telecomunicações. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

REDUÇÃO DO NÍVEL DE LÓBULOS LATERAIS EM ARRANJO DE ANTENAS 1D

Aluno: Bruna Dias Pires de Souza

Orientador: Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

Banca Examinadora:

- Ivan Aritz Aldaya Garde (Orientador)
- Marcelo Luís Francisco Abbade (Examinador)
- Rafael Abrantes Penchel (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 41/2018)

São João da Boa Vista, 19 de dezembro de 2018

*"Bem-aventurado o homem que acha sabedoria,
e o homem que adquire conhecimento".
(Provérbios 3:13)*

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, por ter me conduzido até o presente momento, pelas oportunidades que me tem preparado, e por ter me dado as forças e condições necessárias para alcançar os meus objetivos.

À minha família, em especial os meus pais, Eliseu e Glaucia, que sempre me incentivaram e me deram toda a estrutura necessária ao longo da minha vida, me apoiando com muito amor e com muita paciência em todos os momentos.

Aos meus amigos e colegas de curso, que, de uma forma ou de outra, me ajudaram a prosseguir com o sonho da graduação.

Aos meus professores, por todos os ensinamentos técnicos e pessoais, sobretudo ao Prof. Dr. Elmer Mateus Gennaro, que ao longo de 3 anos da minha graduação foi meu orientador de pesquisa científica, e me proporcionou a convivência com a área acadêmica, sempre com excelentes oportunidades de estudo.

Finalmente, ao Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde, que me acompanhou ao longo do meu último ano da graduação como orientador deste trabalho, no qual desempenhou seu papel de forma exímia, com muita dedicação, paciência e compreensão.

RESUMO

Os arranjo de antenas foram amplamente propostos para melhorar as características de radiação e para permitir o controle dinâmico do padrão de radiação através de *beam steering* e *beam forming*, necessários nos sistemas de comunicação sem fio mais modernos. Todavia, em aplicações de ultra banda larga, tal como em sistemas fotônicos, o espaçamento mínimo entre os elementos radiadores é limitado em alguns comprimentos de onda, o que leva a presença de fortes lóbulos laterais, conhecidos por lóbulos de grade. Os lóbulos de grade representam um comprometimento crítico do sistema, impedindo o uso de arranjos de antenas esparsos em aplicações onde diafonia e falhas de segurança devem ser evitadas. Este trabalho apresenta, pela primeira vez segundo o conhecimento dos autores, uma análise numérica da redução do nível de lóbulos laterais (SLL) em arranjos de antenas esparsos 1D operando sob *beam steering* quando os elementos radiantes são dispostos de forma não uniforme (sendo a separação entre os elementos incrementada geometricamente). O método proposto é controlado por apenas um parâmetro, e por isso pode ser facilmente otimizado e estendido para dimensões maiores. Os resultados numéricos mostraram uma redução do SLL, no pior caso (ângulos de *steering* próximo à $\pm\pi/2$), de aproximadamente 5 dB para um arranjo não uniforme de 5 elementos com comprimento total de 6 comprimentos de onda.

PALAVRAS-CHAVE: ARRANJO DE ANTENAS, LÓBULOS DE GRADE, ARRANJO NÃO UNIFORME

ABSTRACT

Array antennas have been widely proposed to improve radiation features and to enable dynamic control of the radiation pattern through beam steering and beam forming, which are required in state-of-the-art wireless communication. However, in ultra wideband applications, as well as in photonic systems, the minimum separation distance between radiation elements is limited to several wavelengths, leading to the presence of strong side-lobes known as grating lobes. These grating lobes represent a critical impairment that prevents the adoption of these sparse array antennas in applications where crosstalk and security faults must be avoided. In this work, we numerically analyze, for the first time to our knowledge, the side-lobe level (SLL) reduction of 1D sparse antenna arrays under beam steering operation when the radiating elements are arranged non-uniformly (the separation between radiation elements is increased geometrically). The proposed method has a single parameter and, therefore, can be easily optimized and extended to higher dimensions. Numerical results reveal a SLL reduction, in the worst-case scenario (steering angles close to $\pm\pi/2$), of approximately 5 dB for a 5-element array with a total length of 6 wavelengths.

KEYWORDS: ANTENNA ARRAY, GRATING LOBES, NON UNIFORM ARRAY.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Definição do sistema de coordenadas e dos ângulos utilizados na técnica de <i>beam steering</i> no arranjo de antenas 1D implementado.	16
Figura 2	Configuração dos elementos radiantes e aproximação de distâncias em condições de campo distante.	17
Figura 3	(a) Magnitude do campo elétrico de um dipolo infinitesimal, sobreposto à (b) magnitude de um <i>FA</i> genérico constituído por 5 elementos, e à (c) magnitude do campo elétrico do arranjo de antenas, em termos do ângulo de elevação θ	20
Figura 4	(a) Magnitude do campo elétrico de um dipolo infinitesimal, (b) <i>FA</i> genérico de 5 elementos e (c) magnitude do campo elétrico do arranjo em sua totalidade. . .	20
Figura 5	Interferência construtiva em diferentes direções dos campos de radiação de arranjos uniformes com elementos idênticos: (a) arranjo de antena compacto e (b) arranjo de antena esparso. O ângulo de elevação θ é referenciado a partir do eixo z	21
Figura 6	Módulo do <i>FA</i> de (a) um conjunto de antenas compacto e (b) um conjunto de antenas esparso, ambos com espaçamento uniforme e elementos idênticos. . . .	22
Figura 7	Aparecimento de lóbulos de grade em um arranjo de antenas uniforme com separação entre os elementos idênticos $d = \lambda/2$, operando (a) sem <i>beam steering</i> , (b) sob <i>beam steering</i> em $\pi/4$ e (c) sob <i>beam steering</i> em $\pi/2$, ambos em relação ao eixo de referência, sob o qual os elementos estão dispostos.	22
Figura 8	Arranjo de antenas de comprimento total L com separação entre os elementos (a) uniforme, onde $\alpha = 1$, e não uniforme, sendo (b) $\alpha = 1, 2$ e (c) $\alpha = 1, 6$	23
Figura 9	Relação linear entre a variação de fase $\Delta\psi$ e a posição dos elementos no eixo azimutal, z , para um arranjo de 5 elementos, com espaçamento (a) uniforme e (b) não uniforme.	24
Figura 10	Magnitude do $FA(\theta)$ para um arranjo de antenas uniforme de 5 elementos em termos do ângulo de <i>beam steering</i> $\Delta\theta$ para comprimentos de arranjo entre λ e 6λ . A escala de cores é a mesma para todos os comprimentos de arranjo. (a), (b), (c), (d), (e), e (f) são para arranjo com comprimento total de 1λ , 2λ , 3λ , 4λ , 5λ , e 6λ , respectivamente.	27
Figura 11	Magnitude do $FA(\theta)$ para um arranjo de antenas não uniforme de 5 elementos em termos do ângulo de <i>beam steering</i> $\Delta\theta$ para comprimentos de arranjo entre λ e 6λ . A escala de cores é a mesma para todos os comprimentos de arranjo. (a), (b), (c), (d), (e), e (f) são para arranjo com comprimento total de 1λ , 2λ , 3λ , 4λ , 5λ , e 6λ , respectivamente.	27
Figura 12	Corte do módulo do <i>FA</i> do arranjo de antenas uniforme de 5 elementos com comprimento total 3λ , operando sob ângulos de <i>beam steering</i> : (a) $\Delta\theta = 0$, (b) $\Delta\theta = \pi/4$ e (c) $\Delta\theta = \pi/2$	28

Figura 13	Corte do módulo do FA do arranjo de antenas não uniforme de 5 elementos com comprimento total 3λ , operando sob ângulos de <i>beam steering</i> : (a) $\Delta\theta = 0$, (b) $\Delta\theta = \pi/4$ e (c) $\Delta\theta = \pi/2$	28
Figura 14	SLL de arranjos com variação de comprimento entre λ e 6λ em termos direcionamento de feixe $\Delta\theta$ e (a) $\alpha = 1$, arranjo uniforme, (b) $\alpha = 1, 2$, and (c) $\alpha = 1, 6$	29
Figura 15	Nível do lóbulos laterais em função do parâmetro α para arranjos direcionados em $\Delta\theta = \pi/2$ de comprimentos: (a) $L = 2\lambda$, (b) $L = 2, 8\lambda$, (c) $L = 3, 6\lambda$, (d) $L = 4, 4\lambda$, (e) $L = 5, 2\lambda$ e (f) $L = 6\lambda$	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UWB - *Ultra Wideband*

RF - Rádio Frequência

CMOS - *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

LIDAR - *Light Imaging Detection and Ranging*

P_{LS} - Potência do Lóbulo Secundário

P_{LP} - Potência do Lóbulo Principal

SLL - *Side-Lobe Level*

FA - Fator de Arranjo

LISTA DE SÍMBOLOS

λ - comprimento de onda

$\vec{E}_t$ - campo elétrico total radiado pelo arranjo de antenas

$\vec{E}_n$ - campo elétrico radiado pelo n -ésimo elemento do arranjo

k - número de onda

$\vec{r}_n$ - vetor posição do n -ésimo elemento do arranjo

$\hat{r}$ - vetor de posição unitário do arranjo

Δr_n - diferença de caminho entre a posição do n -ésimo elemento e do elemento situado na origem do arranjo

r_0 - distância do elemento situado na origem do arranjo

d - separação entre os elementos do arranjo

$\hat{z}$ - eixo onde os elementos do arranjo estão dispostos

θ - ângulo de elevação

ϕ - ângulo azimutal

ψ - fase de alimentação

θ_{max} - ângulo de *beam steering*

$\Delta\psi$ - variação da fase de alimentação

$\Delta\theta$ - variação do ângulo de *beam steering* a partir do *broadside*

N - número dos elementos do arranjo

α - parâmetro de incremento gradual do espaçamento do arranjo

L - comprimento total do arranjo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Arranjos de Antenas	12
1.2	Arranjos Esparsos	13
1.3	Revisão da Literatura e Solução Proposta	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Equacionamento do Fator de Arranjo	16
2.2	Nível de Lóbulos Laterais em Arranjos Esparsos	19
2.3	Lóbulos de Grade	20
3	METODOLOGIA	23
3.1	Técnica Proposta	23
3.2	Método Numérico	23
4	RESULTADOS	26
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

1.1 ARRANJOS DE ANTENAS

Os sistemas de comunicações mais modernos vêm utilizando, em sua maioria, antenas de alto desempenho, conhecidas por proporcionarem melhores características de radiação. Para tanto existem duas soluções: a primeira delas consiste em utilizar um único elemento, mas projetado com geometrias otimizadas, afim de atender as especificações de radiação necessárias, e a segunda é empregar um conjunto de elementos radiantes operando coerentemente, conhecidos como arranjos de antenas, que formam uma única configuração elétrica e geométrica (BALANIS, 2005). Por um lado, a primeira solução é mais simples por fazer uso de apenas um elemento, mas, por outro lado, é uma solução inviável em muitos casos, pois as dimensões necessárias para que uma única antena atenda as características de alto ganho e diretividade requeridas podem ser excessivamente grandes e, portanto, dispendiosa. A segunda solução apresenta uma complexidade maior na sua construção, mas é muitas vezes preferível e fisicamente apropriada. Dessa forma, os arranjos de antenas tem sido bastante explorados para a implementação de antenas de alto desempenho, que além de melhorarem as características de radiação ainda permitem o controle dinâmico do padrão de radiação. Tal controle dinâmico é feito mudando as amplitudes e as fases dos sinais de alimentação dos diferentes elementos radiantes, e por isso chamado de direcionamento de feixe (usualmente conhecido por *beam steering*¹).

Os arranjos de antenas, em sua grande maioria, são constituídos por elementos idênticos, o que facilita a configuração do arranjo como um todo. Defini-se, no mínimo, cinco fatores usados para controlar o padrão de radiação total de um arranjo de antenas com elementos idênticos (BALANIS, 2005), sendo eles:

- A configuração geométrica do conjunto de antenas, que pode ter qualquer formato, por exemplo: linear, circular, esférica, entre outros;
- A separação relativa entre os elementos;
- A amplitude de excitação dos elementos individuais;
- A fase de excitação dos elementos individuais; e
- O padrão de radiação relativo dos elementos individuais.

Vale ressaltar que um arranjo de antenas não precisa ser formado por elementos idênticos, mas, dados os fatores de controle apresentados acima, é compreensível que arranjos de antenas com elementos idênticos são mais simples, práticos e convenientes.

No espaço livre, o campo elétrico total do conjunto de elementos variantes é determinado pela adição vetorial dos campos radiados pelos elementos individuais, assumindo que a corrente em cada elemento é a mesma que a do elemento isolado. Entretanto, essa definição só é válida quando não

¹ Como as traduções de *beam steering* e de *beam forming* ainda não são bem formalizadas, estes termos serão utilizados em inglês ao longo do trabalho.

há acoplamento mútuo entre os elementos radiantes do arranjo, o que, usualmente, não acontece, e depende da separação entre os elementos (BALANIS, 2005). Assim, o padrão de radiação de um arranjo de antenas é basicamente delineado pela condição de interferência entre os campos radiados pelos diferentes elementos.

1.2 ARRANJOS ESPARSOS

A separação entre os elementos é um fator de extrema importância em arranjo de antenas, pois a distância entre os mesmos afeta significativamente o padrão de radiação e pode evitar ou não o acoplamento mútuo entre os campos elétricos radiados por cada unidade do arranjo. Nesse sentido, os arranjos de antenas são classificados de acordo com a distância de separação entre os elementos que os compõem, usualmente normalizado pelo comprimento de onda de operação do sistema, denominado por λ . As configurações podem ser classificadas como arranjos compactos e arranjos esparsos.

Os arranjos compactos são limitados por uma separação entre os elementos menor que $\lambda/2$, e portanto, desde que a fase de excitação dos elementos sejam idênticas, a diferença de fase entre estes não é grande o suficiente para que ocorram interferências construtivas entre os campos elétricos gerados por cada elemento que compõem o arranjo, a não ser na direção perpendicular ao eixo onde os elementos são dispostos. Contudo, quando esse limite de separação é excedido, os campos elétricos radiados se somam construtivamente em diferentes direções, o que ocorre sempre que a diferença do comprimento elétrico entre os caminhos, isso é, a separação espacial entre os elementos, é múltipla do comprimento de onda. Tal configuração é conhecida como arranjo esparsos, onde a excitação dos elementos sempre está presente, de modo que, diferentemente das outras configurações lineares, a distância entre os elementos pode ser maior que $\lambda/2$ (QUEIROZ, 2004). Os arranjos esparsos podem ser encontrados em diferentes domínios de comunicação, como, por exemplo, em antenas de banda ultra larga e em antenas fotônicas.

As antenas de banda ultra larga (*ultra wideband, UWB*) representam uma tecnologia de comunicação sem fio altamente difundida em rádio frequência (RF). Defini-se por sistema de banda ultra larga aquele em que a banda ocupada é superior ao 20% da frequência central de operação, o que permite que os sistemas UWB operem com pulsos extremamente estreitos e de baixa potência para transmissão. Dessa forma, o uso de antenas UWB permite elevar a taxa de dados com uma densidade espectral de potência reduzida (VASCONCELOS; SOUZA; FARAH, 2009), permitindo a coexistência dos sinais UWB sem que haja interferência entre si, ou com sinais dos demais sistemas RF (HERINGER et al., 2006). Devido a essa robustez, sistemas de comunicação UWB são propícios para comunicação sem fio em ambientes fortemente caracterizados por multipercusos. Além disso, o sistema todo pode ser integrado em pequenas dimensões, leve, com baixo custo e completamente implementado em circuito digital, usando a tecnologia semicondutor de metal óxido complementar (*complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS*) (HEIDARY, 2001), o que torna os sistemas que operam em UWB ainda mais vantajosos. Contudo, a grande faixa de frequência faz com que a separação entre os elementos varie desde uma distância menor que o comprimento de onda de operação, λ , até uma distância de vários λ . Ainda, utilizando arranjos esparsos em sistemas RF pode-se conseguir uma área efetiva grande com um número pequeno de elementos no arranjo, o que faz com que esse tipo de configuração seja

propício para operar neste domínio, e consequentemente, em sistemas de comunicação UWB.

Por outro lado, antenas operando em frequência ópticas, também denominadas antenas fotônicas, estão se tornando um elemento crítico em aplicações que variam desde espectroscopia (LANGGUTH et al., 2017) até comunicação no espaço livre (ALÙ; ENGHETA, 2010), e detecção e alcance de imagem a laser (*light imaging detection and ranging*, LIDAR) (PHARE et al., 2018). Neste contexto, as antenas fotônicas totalmente dielétricas atraíram uma atenção crescente devido à integrabilidade e à compatibilidade com a tecnologia CMOS estabelecida (PITA et al., 2016). Semelhante ao domínio RF, os arranjos de antenas fotônicas foram propostos para melhorar as características de radiação, tais como eficiência de energia e diretividade, além de permitir *beam steering* e *beam forming*¹, para controlar dinamicamente o padrão de radiação (SUN et al., 2013; KIM et al., 2016). As restrições de fabricação, no entanto, colocam um limite inferior à separação entre os elementos radiantes. Por um lado, a área ocupada pelo elemento de radiação é geralmente maior que λ e, por outro lado, a rede de alimentação, se implementada no mesmo plano, aumenta ainda mais a distância mínima entre os elementos a fim de evitar o acoplamento entre guias de onda (PITA et al., 2017), o que faz dos arranjos esparsos a única solução para arranjos de antenas fotônicas.

Todavia, um dos grandes problemas dos arranjos esparsos, como se analisará posteriormente, é o surgimento de lóbulos laterais de alta intensidade, que podem resultar em perdas de eficiência, falhas de segurança e diafonia. Nos arranjos esparsos, quando a diferença de caminhos elétricos é um número inteiro de comprimento de onda, os lóbulos que aparecem devido as interferências totalmente construtivas entre os campos são denominados lóbulos de grade (*grating lobes*).

1.3 REVISÃO DA LITERATURA E SOLUÇÃO PROPOSTA

Para reduzir os lóbulos de grade em arranjos de antenas esparsos duas soluções principais são encontradas na literatura. A primeira solução é a implementação de arranjos de antenas com espaçamento reduzido entre os elementos radiantes. Recentemente, em sistemas fotônicos, diferentes abordagens foram propostas para reduzir o espaçamento entre os elementos: em (ZHANG et al., 2018) 24 guias de onda orientados verticalmente são construídos com uma separação entre elementos de $1\ \mu\text{m}$, que é menor que o comprimento de onda da operação, mas ainda maior que $\lambda/2$. Entretanto, o padrão de radiação de campo distante apresenta múltiplos lóbulos de alta intensidade mesmo quando o erro de fase é corrigido, além de requerer um pós processamento cuidadoso na construção de guias de ondas verticais, o que é mais crítico. Por outro lado, (PHARE et al., 2018) apresenta um arranjo de antenas composto por 64 facetas emissoras de guias de onda com separação sub-comprimento de onda. O acoplamento entre guias é evitado usando guias de ondas com diferentes seções transversais (de 300 nm a 400 nm), o que resulta em diferentes elementos de radiação e, consequentemente, a estrutura não pode ser considerada como um arranjo uniforme e torna o controle do padrão de radiação mais desafiador.

A segunda solução para reduzir os lóbulos de grade encontrada na literatura se trata de arranjos não uniformes de guias de onda: em (KHODIER; CHRISTODOULOU, 2005) a posição dos elementos é feita através de otimização por meio do método de enxame de partículas, enquanto que em (BRAY et al., 2002) um algoritmo genérico é empregado. Dessa forma, espera-se que uma abordagem

combinada entre as duas soluções resulte em um desempenho melhor, isto é, arranjos de elementos não uniformemente distribuídos com separação próxima ao comprimento de onda de operação. Como será visto no Capítulo 2, os lóbulos laterais podem ser mais críticos quando o arranjo opera sob *beam steering*.

Assim, neste trabalho foi analisada, pela primeira vez segundo o conhecimento dos autores, a redução do nível dos lóbulos laterais (*side-lobes level*, SLL) e a sua dependência com ângulo de *beam steering* quando os elementos radiantes de um arranjo 1D são distribuídos não uniformemente, sendo a faixa de separação média dos elementos de $0,25\lambda$ à $1,5\lambda$. Na disposição aqui apresentada a separação entre os elementos radiantes é acrescida geometricamente, onde a geometria do arranjo é determinada por apenas um parâmetro e por isso pode ser facilmente otimizada, diferentemente das soluções anteriormente apresentadas.

O restante do presente trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o entendimento e realização do mesmo, o Capítulo 3 mostra a metodologia utilizada no desenvolvimento, o Capítulo 4 exhibe os resultados obtidos e o Capítulo 5 conclui o trabalho e apresenta os passos futuros deste estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EQUACIONAMENTO DO FATOR DE ARRANJO

O diagrama de radiação de um arranjo de antenas é construído pela interferência entre os campos elétricos radiados por cada elemento que constitui o arranjo. Da mesma forma, o sinal recebido é formado por uma combinação linear dos sinais captado por cada elemento. Assim, se os elementos exercerem a mesma influência no arranjo, isto é, elementos idênticos, alimentados coerentemente, e com mesma defasagem entre si tanto na recepção quando na fonte de alimentação da transmissão, por reciprocidade, os diagramas de radiação de recepção e de transmissão são iguais (CARDAMA et al., 2004).

Aplicando o princípio da superposição, o campo total radiado na região de campo distante por um arranjo de N elementos radiantes coerentes pode ser expressado como (BALANIS, 2005):

$$\vec{E}_T(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_n(\theta, \phi) \exp j(k\hat{r} \cdot \vec{r}_n + \psi_n), \quad (2.1)$$

onde $\vec{E}_n$ é o campo elétrico radiado pelo n -ésimo elemento se o arranjo estiver centrado na origem da coordenada, ψ_n representa a fase de alimentação relativa do sinal de alimentação, k é o número de onda ($k = 2\pi/\lambda$), $\vec{r}_n$ é o vetor posição do n -ésimo elemento, e $\hat{r}$ é o vetor unitário dado por:

$$\hat{r} = \sin \theta \cos \phi \hat{x} + \sin \theta \sin \phi \hat{y} + \cos \theta \hat{z}. \quad (2.2)$$

Os sistemas de coordenadas descritos nas equações acima estão representados na Figura 1.

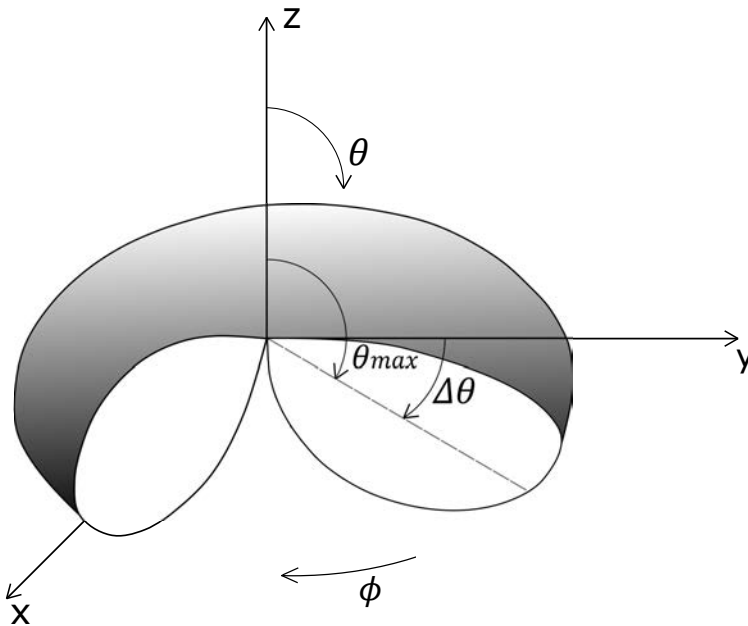


Figura 1 – Definição do sistema de coordenadas e dos ângulos utilizados na técnica de *beam steering* no arranjo de antenas 1D implementado.

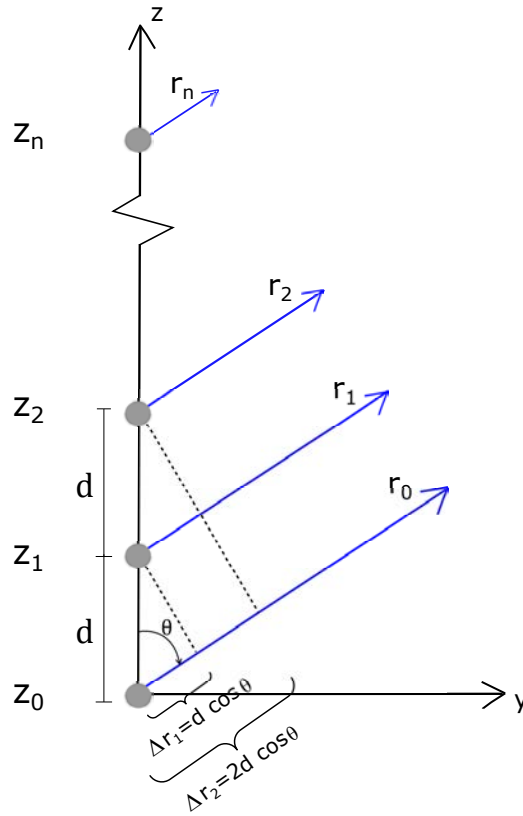


Figura 2 – Configuração dos elementos radiantes e aproximação de distancias em condições de campo distante.

A Figura 2 apresenta a diferença de caminho, em campo distante, para cada um dos elementos de um arranjo linear 1D, onde, a partir da teoria de raios paralelos, a diferença de caminho entre o elemento situada na origem, r_0 , e o n -ésima elemento é:

$$\Delta r_n = r_n - r_0 = -n d \cos \theta, \text{ para } n = 1, 2, \dots, N. \quad (2.3)$$

Para arranjos 1D com elementos radiantes uniformes (sendo o campo radiado $\vec{E}$) posicionados ao longo do eixo $\hat{z}$, a equação 2.1 é simplificado a:

$$\vec{E}_T(\theta, \phi) = \vec{E}(\theta, \phi) \cdot \sum_{n=1}^N \exp j(k z_n \cos \theta + \psi_n), \quad (2.4)$$

onde $k z \cos \theta$ é a defasagem por diferença de caminho somada a fase progressiva de alimentação ψ , isto é, a diferença de fase dos campos elétricos radiados por dois elementos consecutivos em campo distante (CARDAMA et al., 2004).

A partir da equação 2.4 pode-se observar que o diagrama de radiação do arranjo é obtido por dois termos, o diagrama de radiação de um único elemento, $\vec{E}(\theta, \phi)$, multiplicado por uma somatória que considera a interferência dos campos gerados pelos N elementos de antenas. O segundo termo do lado direito da equação 2.4 é chamado de fator de arranjo (FA) e adquire a seguinte forma:

$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^N \exp j(k z_n \cos \theta + \psi_n). \quad (2.5)$$

Pode-se observar que o FA depende unicamente da posição dos elementos irradiantes e das suas fases de alimentação, além de ser independente de ϕ , pois o arranjo aqui proposto apresenta simetria circular em relação ao eixo z , como pode ser visto na Figura 2.

Um caso particular corresponde ao cenário em que a diferença de fase entre os campos elétricos radiados por elementos consecutivos é incrementada de forma uniforme, em que a equação anterior pode ser reescrita como:

$$\Psi = k d \cos \theta + \psi. \quad (2.6)$$

Se os coeficientes de alimentação do FA são reais e positivos, o ponto de máximo do diagrama de radiação acontece na direção em que os campos radiados por cada antena são adicionados em fase, o que corresponde a um desfasamento nulo das interferências, $\psi = 0$. Ainda, considerando que ângulo θ , que indica a direção de radiação no espaço, só assume valores reais entre $[0, \pi]$, ψ assume um intervalo de variação de $[-k d + \psi, k d + \psi]$, chamado de região visível. Assim, somente a faixa de variação do $FA(\psi)$ que inclui o intervalo acima pertence ao diagrama de radiação (CARDAMA et al., 2004). A partir das considerações acima, quando a região visível inclui a origem, $\psi = 0$, o máximo do padrão de radiação ocorre na direção do espaço (CARDAMA et al., 2004):

$$\Psi = k d \cos \theta_{max} + \psi = 0,$$

$$\theta_{max} = \arccos\left(\frac{-\psi}{k d}\right), \quad |\psi| \leq k d. \quad (2.7)$$

Dessa forma, definindo as fases ψ_n o FA pode ser adaptado, e consequentemente, o padrão de radiação total pode ser controlado, permitindo *beam steering*. Esse é o princípio de funcionamento de arranjos com varredura de fase, onde a direção dos máximos é variada por controladores eletrônicos de fase progressiva, os quais possuem importante aplicação em radares e sistemas de comunicações gerais.

Para arranjos com separação uniforme d e diferença de fase uniforme entre os elementos adjacentes $\Delta\psi = \psi_{i+1} - \psi_i$, o FA resulta em (BALANIS, 2005):

$$AF(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(k d \cos(\theta) + \Delta\psi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(k d \cos(\theta) + \Delta\psi)\right]}. \quad (2.8)$$

Da equação 2.8 pode-se deduzir que para $k d \cos \theta = m\pi \mid m \in \mathbb{Z}$ o módulo do FA converge para o número de elementos de arranjo, N , e que alterando a diferença de fase entre os elementos, $\Delta\psi$, consegue-se controlar a direção dos lóbulos. Além disso, o número dos lóbulos com amplitude N dentro da região visível $0 \leq \theta < \pi$, isto é, o número de lóbulos de grade aumenta de acordo com o produto $k \cdot d$. Em particular, quanto maior for o produto $k \cdot d$, menor é o período, e consequentemente, mais lóbulos de grades estão presentes. Se o número de onda for expresso por $k = 2\pi/\lambda$, o número de lóbulos depende do valor $2\pi d/\lambda$, ou seja, o número de lóbulos depende da separação em comprimento elétrico. No geral, os lóbulos de grade surgem quando o espaçamento entre os elementos é múltiplo de λ , contudo, em certos casos, sob grandes ângulos de *steering*, $\Delta\psi = \pi/2$ por exemplo, os lóbulos de grade podem aparecer para espaçamentos compreendidos entre $\lambda/2$ e λ . O efeito do ângulo de

direcionamento $\Delta\psi$ no número de lóbulos de grade, no entanto, requer solução numérica da equação 2.8.

Para arranjos com separação não uniforme entre os elementos, não existe uma expressão analítica geral fechada relacionando o FA com a posição e alimentação dos elementos. A solução numérica da equação 2.5, no entanto, é relativamente simples. Assim, a fim de validar o método numérico aplicado nesse trabalho, a equação 2.5 foi computada para um arranjo uniforme e comparada a 2.8, o que apresentou uma boa convergência.

2.2 NÍVEL DE LÓBULOS LATERAIS EM ARRANJOS ESPARSOS

Em sistemas de antenas composto por um único elemento ou em arranjos compactos os lóbulos laterais costumam ser bem definidos, ao contrário de arranjos esparsos, onde são necessárias algumas considerações:

- (i) Segundo (SUN et al., 2014), o SLL é computado apenas para o elemento radiante, e por tanto, o FA é desconsiderado;
- (ii) O SLL pode ser calculado através do arranjo como um todo; e
- (iii) O SLL pode ser calculado considerando apenas o FA .

Se a segunda abordagem for escolhida para o cálculo do SLL , através do arranjo como um todo, considera-se também o padrão de radiação do elemento. Neste trabalho, no entanto, foi escolhida a terceira abordagem, pois conduz a uma análise independente do elemento de radiação. Assim, o nível de lóbulo lateral foi definido como a razão de potência entre o lóbulo secundário mais forte (P_{LS}), e a potência do lóbulo principal (P_{LP}), que é o lóbulo desejado:

$$SLL = \frac{P_{LS}}{P_{LP}} = \left[\frac{FA(\theta_{LS})}{FA(\theta_{LP})} \right]^2, \quad (2.9)$$

onde θ_{LS} e θ_{LP} são os ângulos de elevação do lóbulo lateral mais forte e do lóbulo desejado, respectivamente.

A equação acima, 2.9, apresenta o SLL em escala linear, contudo esse calculo também é comumente apresentada em escala logarítmica:

$$SLL = 10 \log \left[\frac{P_{LS}}{P_{LP}} \right], \quad (2.10)$$

A métrica de determinação do SLL a partir do FA é praticável devido o domínio do FA na estrutura de arranjo de antenas. A Figura 3 apresenta, em escala linear, a magnitude do campo elétrico de um dipolo infinitesimal, denominado por $|E_{elemento}|$, sobreposto à magnitude do FA de um arranjo de antenas genérico de 5 elementos e à magnitude do campo elétrico do arranjo em sua totalidade, construído a partir da multiplicação entre os módulos do campo elétrico de um único elemento, o dipolo infinitesimal nesse caso, e do FA . A partir dessa figura, observa-se que o FA é dominante na formação do campo elétrico do arranjo de antenas, o qual assume a mesma forma do FA na direção do lóbulo principal, onde a interferência entre os campos elétricos é totalmente construtiva, sendo apenas as demais direções limitado pelo campo elétrico do elemento de radiação multiplicador.

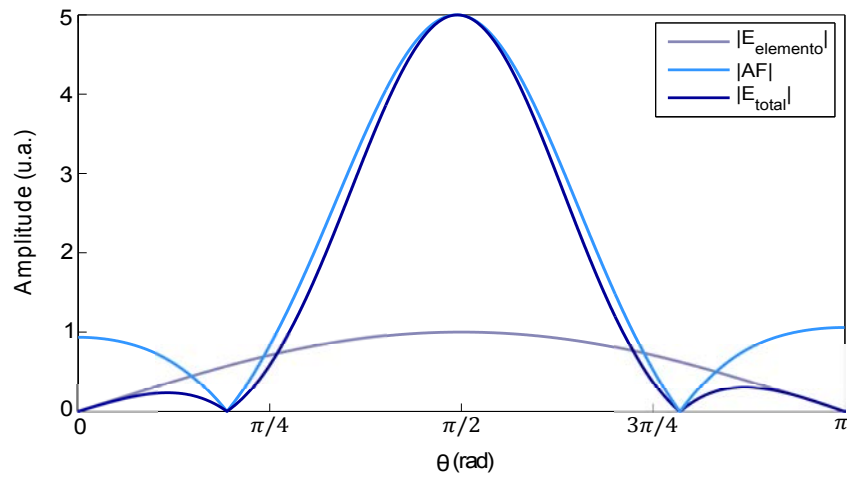


Figura 3 – (a) Magnitude do campo elétrico de um dipolo infinitesimal, sobreposto à (b) magnitude de um FA genérico constituído por 5 elementos, e à (c) magnitude do campo elétrico do arranjo de antenas, em termos do ângulo de elevação θ .

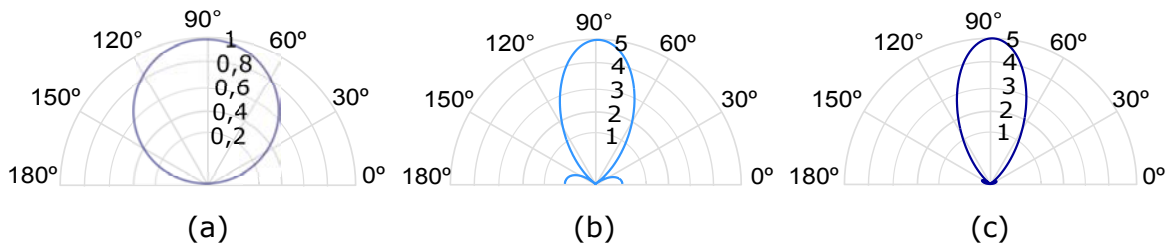


Figura 4 – (a) Magnitude do campo elétrico de um dipolo infinitesimal, (b) FA genérico de 5 elementos e (c) magnitude do campo elétrico do arranjo em sua totalidade.

A Figura 4, por sua vez, apresenta as mesmas curvas acima, porém em coordenadas polares, onde também é possível verificar a relevância do FA na estrutura do arranjo de antenas. A Figura 4 (a) mostra a magnitude do campo elétrico de um dipolo infinitesimal, a Figura 4 (b) apresenta o FA de um arranjo composto por 5 elementos, e a Figura 4 (c) apresenta o módulo do campo elétrico total do arranjo. Na terceira figura nota-se a redução dos lóbulos laterais antes presente no FA , o que ocorre devido a modelagem do campo elétrico do elemento unitário.

2.3 LÓBULOS DE GRADE

Quando os elementos radiantes do arranjo são dispostos uniformemente (com o mesmo espaçamento entre elementos adjacentes) e a distância de separação excede $\lambda/2$, ou seja, em arranjos esparsos, o padrão de radiação pode apresentar múltiplos feixes com o mesmo nível de potência (CARDAMA et al., 2004).

A Figura 5 (a) apresenta a configuração de um arranjo de antenas compacto, onde não há a geração de lóbulos laterais, pois quando a fase de excitação dos elementos são iguais a distância entre os elementos é pequena o suficiente para que os campos gerados só se somem em fase na direção perpendicular ao eixo onde os elementos estão dispostos. Por outro lado, a Figura 5 (b) apresenta a configuração de um arranjo de antenas esperso, em que a separação entre os elementos é grande o suficiente para que a diferença de comprimento entre os caminhos seja múltiplo do comprimento

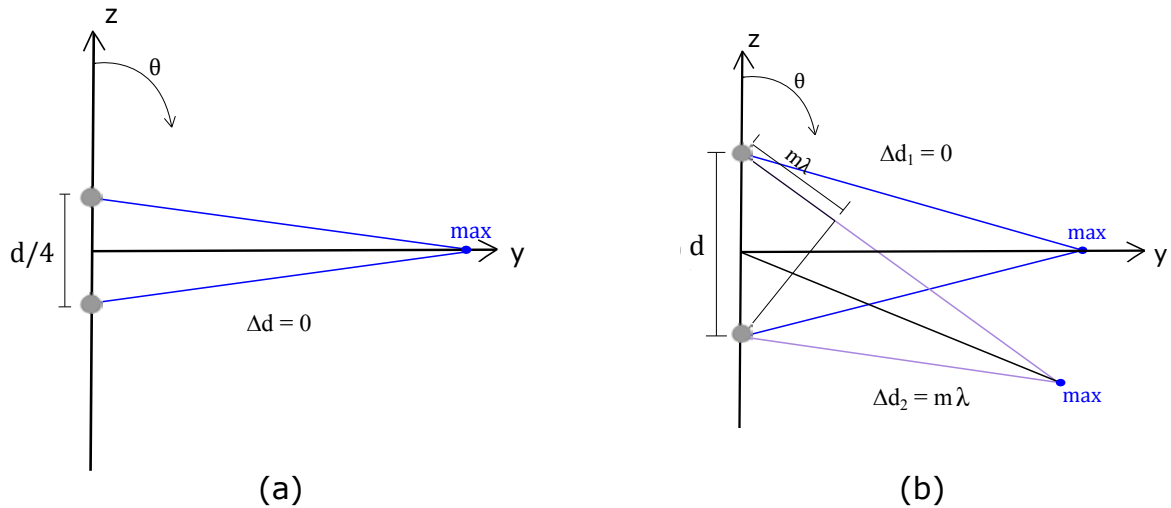


Figura 5 – Interferência construtiva em diferentes direções dos campos de radiação de arranjos uniformes com elementos idênticos: (a) arranjo de antena compacto e (b) arranjo de antena esparso. O ângulo de elevação θ é referenciado a partir do eixo z .

de onda, $\Delta d = m\lambda$, onde ocorrem interferências construtivas entre os campos elétricos em varias direções, resultando em pontos de máxima amplitude além da direção perpendicular ao eixo onde os elementos estão dispostos. Dessa forma, a presença desses lóbulos laterais de alto nível, denominados lóbulos de grade em analogia a estruturas de grade, ocorrem porque os diferentes elementos radiantes adicionam seus campos construtivamente em direções diferentes.

Afim de ilustrar melhor a presença dos lóbulos de grade, a Figura 6 compara os padrões de radiação do FA referentes a (a) um conjunto compacto e (b) um conjunto esparso. Na primeira ilustração, Figura 6 (a), não há interferência construtiva entre os campos elétricos irradiados pelos elementos que compõem o arranjo além da direção do feixe principal, e, portanto, não há lóbulos de grade no padrão de radiação de um arranjo compacto. Na Figura 6 (b), o fator de arranjo apresenta três feixes de nível alto: o lóbulo principal, e dois lóbulos de grade. Nesse caso, a separação entre os elementos é grande o suficiente para que haja interferências construtivas entre os campos elétricos radiados pelos elementos do arranjo, e, assim, há pontos de máximos além dos lóbulo principal, fazendo com que alguns lóbulos secundários tenham a mesma amplitude do feixe principal, caracterizando os lóbulos de grade.

Entretanto, além da distância de separação entre os elementos de um arranjo, o controle dinâmico do padrão de radiação também é um fator que pode causar o aparecimento de lóbulos de grade. A Figura 7 apresenta o módulo do FA de um arranjo de antenas uniforme, com separação entre os elementos igual à $\lambda/2$, sob *beam steering* com referência ao eixo onde os elementos estão dispostos, em três posições diferentes. Na Figura 7 (a) tem-se o módulo do FA quando o arranjo não está operando sob *beam steering*, em que há apenas o lóbulo principal como feixe de nível alto, e alguns lóbulos secundários de amplitudes menores. Quando esse arranjo é alimentado para deslocar o feixe para $\theta_{max} = \pi/4$, em relação ao eixo de referência, como mostra a Figura 7 (b), o feixe principal é direcionado à posição desejada, e os lóbulos secundários continuam com amplitudes pequenas. Todavia, quando o arranjo é disposto de forma que a máxima radiação seja na direção axial (*endfire*), como visto na Figura 7 (c), onde o lóbulo principal se posiciona na direção do eixo do arranjo, alguns dos lóbulos secundários crescem em amplitude, tornando-se do mesmo nível do lóbulo principal.

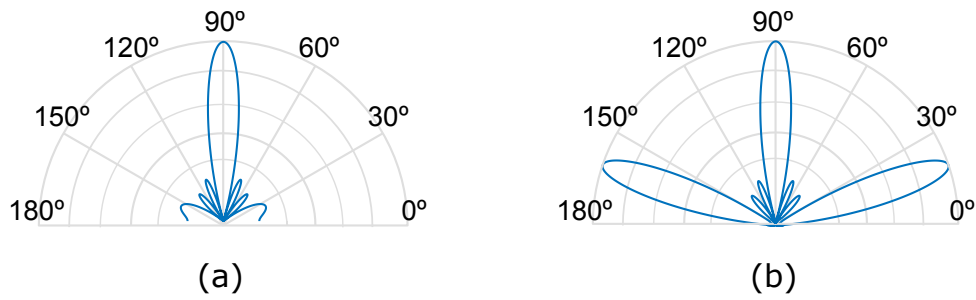


Figura 6 – Módulo do FA de (a) um conjunto de antenas compacto e (b) um conjunto de antenas esperso, ambos com espaçamento uniforme e elementos idênticos.

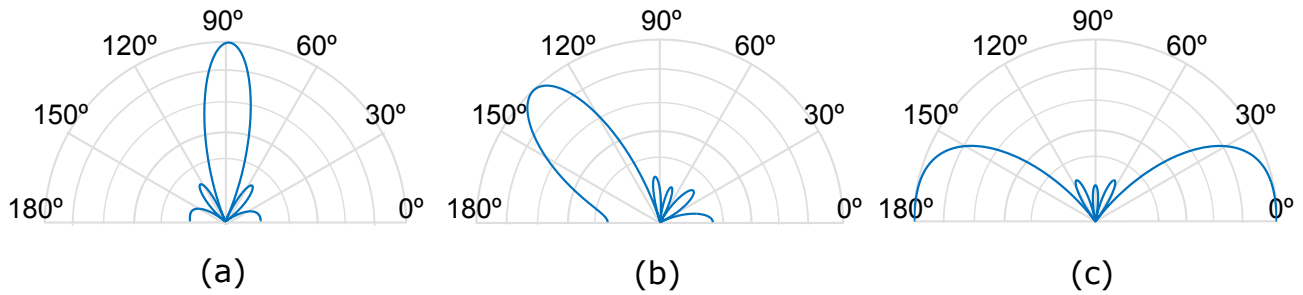


Figura 7 – Aparecimento de lóbulos de grade em um arranjo de antenas uniforme com separação entre os elementos idênticos $d = \lambda/2$, operando (a) sem *beam steering*, (b) sob *beam steering* em $\pi/4$ e (c) sob *beam steering* em $\pi/2$, ambos em relação ao eixo de referência, sob o qual os elementos estão dispostos.

Assim, o *beam steering* implica no aparecimento de lóbulos de grade até mesmo onde a separação entre os elementos é o limite pré estabelecido de $d = \lambda/2$. Nos arranjos esparsos, o *beam steering* tem o mesmo efeito, os lóbulos de grade estão presente quando o feixe é direcionado em qualquer posição em relação ao eixo de referência.

3 METODOLOGIA

3.1 TÉCNICA PROPOSTA

No presente trabalho foi analisada, pela primeira vez segundo o conhecimento dos autores, a redução do nível de lóbulos laterais e sua dependência com ângulo de *beam steering* quando os elementos radiantes não são uniformemente distribuídos em um arranjo de antenas 1D e com separação média dos elementos variável, de $0,25 \lambda$ a $1,5 \lambda$.

Para analisar a redução do *SLL* em um arranjo de antenas com distribuição não uniforme operando nesse regime, foram comparados um arranjo uniforme de comprimento L , apresentado na Figura 8 (a), com um arranjo não uniforme onde a separação entre o i -ésimo e o $i + 1$ -ésimo elemento é α vezes a separação entre o $i - 1$ -ésimo e o i -ésimo elemento, como apresentado na Figura 8 (b) e (c). Deste modo, uma vez determinado o comprimento total do arranjo e o número de elementos, a geometria do arranjo 1D é totalmente determinada por um único parâmetro, o que o torna adequado para otimização exaustiva. Esse método também pode ser estendido para arranjos de maiores dimensões.

Entretanto, tal abordagem é limitada por uma faixa do parâmetro α , pois, quanto maior for o fator de multiplicação maior será a distância de separação entre os elementos, principalmente nos últimos elementos do arranjo. Uma separação excessivamente grande poderá resultar no aparecimento de lóbulos laterais indesejados e, conseqüentemente, no aparecimento de lóbulos de grade. Dessa forma, a fim de caracterizar o método proposto da forma mais adequada, foi feito um estudo do valor do parâmetro α em função do comprimento total do arranjo.

3.2 MÉTODO NUMÉRICO

A princípio, aplicada a equação base de fator de arranjo uniforme, 2.4, foi implementado numericamente um arranjo 1D de dois elementos centrado na origem e, conseqüentemente, com espaçamento uniforme entre os elementos. Para isso, foram definidos os parâmetros necessários, tais como o ângulo

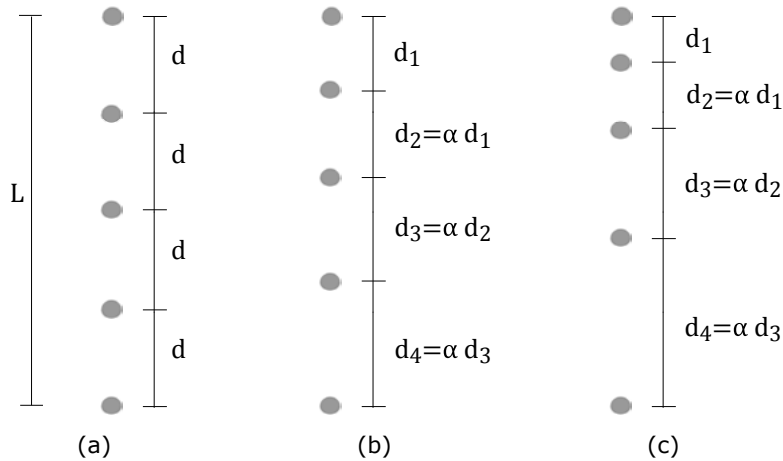


Figura 8 – Arranjo de antenas de comprimento total L com separação entre os elementos (a) uniforme, onde $\alpha = 1$, e não uniforme, sendo (b) $\alpha = 1, 2$ e (c) $\alpha = 1, 6$.

de *beam steering* $\Delta\theta$, inicialmente perpendicular ao eixo azimutal, em $\pi/2$, e os vetores de amplitude, de posição, e de fase de alimentação, sendo o ultimo nulo. A fim de validar a métrica utilizada, implementou-se numericamente a equação 2.8, com os mesmos valores anteriormente setados, em que pode-se verificar a convergência de ambas soluções, e assim validar o método numérico utilizado.

A partir de então, iniciaram-se as simulações com um arranjo uniforme de mais elementos sob *beam steering*, onde foi definido o vetor $\Delta\theta$ no intervalo de variação de $[-\pi/2, \pi/2]$, para percorrer os dois primeiros quadrantes do *FA*. Para que haja direcionamento do lóbulo principal, foi acrescentada a fase de alimentação, $\Delta\psi$, que apresenta uma relação linear com a posição dos elementos, como apresentada na Figura 9 (a). Além disso, como o vetor de variação de fase é uma função de $\Delta\theta$, foi feito uma varredura do ângulo θ_{max} no intervalo de $[0, \pi]$, permitindo a técnica de *beam steering*. A Figura 1 define os ângulos utilizados para a realização do *beam steering*.

Assim, a cada interação, o *FA* é calculado para um dado valor de θ , e concatenada os seus resultados dentro de uma matriz até que todo o vetor θ seja percorrido, resultando assim em uma *FA* em função de θ , isto é, um arranjo de antenas sob *beam steering*. É importante ressaltar que os vetores θ e $\Delta\theta$ foram discretizados de forma a atender o teorema da amostragem de Nyquist, a fim de que os resultados obtidos não sofressem *aliasing* gráfico. Dessa forma, foram obtidos arranjos de antenas 1D de N elementos com espaçamento uniforme.

Finalmente, iniciou-se a implementação do arranjo 1D não uniforme. Para variar a separação entre os elementos foi utilizado uma progressão geométrica de razão α , que permitiu um incremento gradual na separação entres os elementos. A Figura 8 (a) apresenta um arranjo de 5 elementos disposto uniformemente, junto aos arranjos de mesmo número de elementos não uniformes, com fator de multiplicação (b) $\alpha = 1.2$ e (c) $\alpha = 1.6$, com o intuito de explicitar a diferença de disposição dos elementos em cada configuração. Pode-se observar que os arranjos possuem o mesmo comprimento total, L .

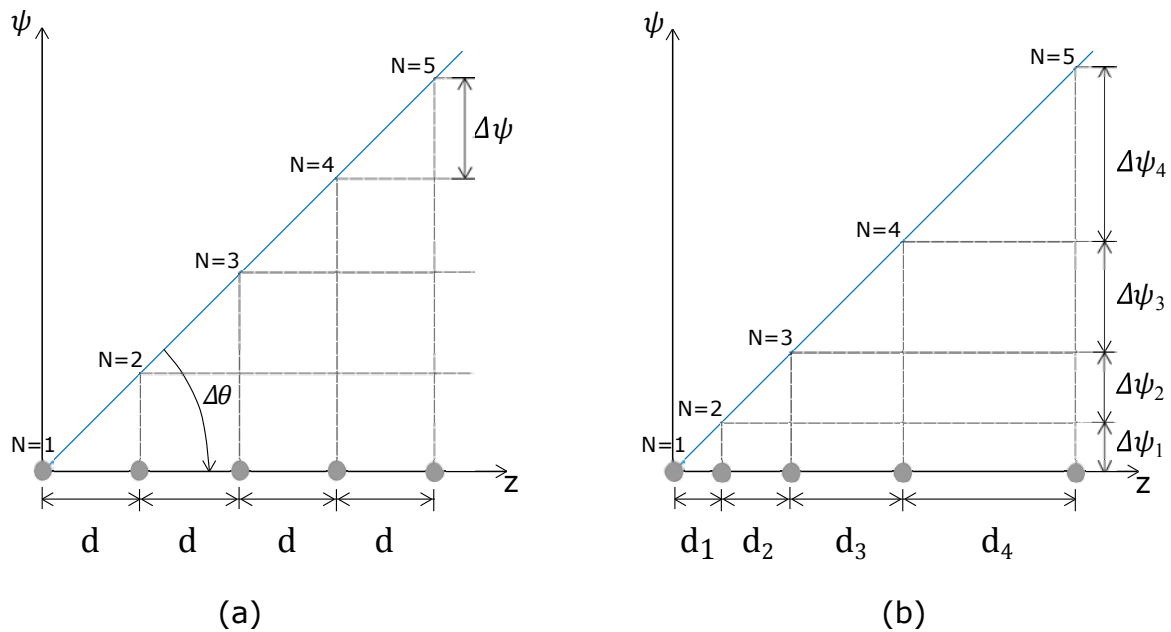


Figura 9 – Relação linear entre a variação de fase $\Delta\psi$ e a posição dos elementos no eixo azimutal, z , para um arranjo de 5 elementos, com espaçamento (a) uniforme e (b) não uniforme.

Dessa forma, para a implementação numérica dos arranjos não uniformes partiu-se do princípio de que o comprimento total de um arranjo é dado por:

$$L = \sum_{m=1}^{N-1} d_m . \quad (3.1)$$

Introduzindo na equação 3.1 a expressão para a separação d_m escrita em função de d_1 , tem-se:

$$L = \sum_{m=1}^{N-1} d_1 \cdot \alpha^{m-1} \text{ para } \alpha \in [1, \infty), \quad (3.2)$$

pois $d_m = d_1 \cdot \alpha^{m-1}$, logo $m = 2 \rightarrow d_2 = d_1 \cdot \alpha$, $m = 3 \rightarrow d_3 = d_1 \cdot \alpha^2 = d_2 \cdot \alpha$ e assim sucessivamente.

A equação 3.2 pode ser re-escrita como:

$$L = d_1 \cdot \sum_{m=0}^{N-2} \alpha^m . \quad (3.3)$$

Abrindo o somatório em termos gerais tem-se:

$$L = d_1 \cdot \frac{1 - \alpha^{(N-2)+1}}{1 - \alpha} = d_1 \cdot \frac{1 - \alpha^{N-1}}{1 - \alpha} . \quad (3.4)$$

A equação 3.4 mostra que para $\alpha = 1$ a distância de separação não é bem definida, pois representa uma indeterminação. Isso ocorre porque para $\alpha = 1$ se obtêm o caso trivial, em que a separação é uniforme. Assim, testando a convergência nas proximidades de $\alpha = 1$, tem-se:

$$L = \lim_{\alpha \rightarrow 1} d_1 \cdot \frac{1 - \alpha^{N-1}}{1 - \alpha} = d_1 \cdot (N - 1). \quad (3.5)$$

Passando a equação 3.5 em função da distância inicial se obtêm:

$$d_1 = \frac{L}{N - 1} \quad (3.6)$$

A equação 3.6 representa a distância mínima de separação do arranjo, a partir da qual se iniciou a progressão geométrica, e a equação 3.5 representa o comprimento total do arranjo não uniforme, que, dessa forma, terá o mesmo comprimento de um arranjo uniforme desde que ambos possuam o mesmo número de elementos. A partir de então, o vetor de posição dos elementos foi setado como uma função da distância de separação entre os elementos, onde, a cada interação, esse vetor armazena uma nova posição referente ao elemento subsequente. O vetor de variação da fase de alimentação, por sua vez, também é função do vetor de posição, o que torna a alimentação de fase não uniforme, tal como a separação entre os elementos. A relação linear entre a disposição dos elementos e a variação de fase de alimentação é apresentada na Figura 9 (b). Assim, foram obtidos arranjos de antenas 1D de N elementos com espaçamento não uniforme entre os elementos.

4 RESULTADOS

A partir do método apresentado no capítulo anterior, foram calculados os FA de antenas de arranjo com espaçamento entre elementos uniforme e não uniforme. Tal implementação foi realizada no *software* computacional Matlab.

A Figura 10 mostra a amplitude do FA de um arranjo composto por 5 elementos uniformemente distribuídos, com comprimento total variando de λ à 6λ , isto é, com separação entre os elementos de $0,25\lambda$ à $1,5\lambda$. Os gráficos de contornos são apresentados com o ângulo de elevação no eixo vertical versus o ângulo de *beam steering* no eixo horizontal. Analisando a Figura 10 (a), correspondente a $L = \lambda$ ($d = 0,25\lambda$), observa-se que há apenas um único lóbulo de grade (lóbulo principal, nesse caso). Esse resultado é esperado da equação 2.8, onde fica claro que, para um valor baixo de $k \cdot d$, o FA apresenta apenas um único máximo dentro da região visível. Para um arranjo de comprimento total $L = 2\lambda$, apresentado na Figura 10 (b), lóbulos secundários emergem, mas apenas para ângulos de *beam steering* extremos, perto de $\pm\pi/2$. Conforme o comprimento do arranjo aumenta, e consequentemente o espaçamento entre os elementos, surgem lóbulos de grades para menores ângulos de *beam steering*. Portanto, para $L = 3\lambda$ ($d = 0,75\lambda$), apresentado na Figura 10 (c), vários lóbulos de grade estão presente para ângulos de *beam steering* de $\pm\pi/4$, e para $L = 4\lambda$ ($d = \lambda$), apresentado na Figura 10 (d), há vários lóbulos de grade, independente do ângulo de *beam steering*. Assim, o número de lóbulos de grade aumenta para arranjos mais longos, e aumenta ainda mais para ângulos de *beam steering* maiores. Para um ângulo de *beam steering* de $\pi/8$, por exemplo, um arranjo de comprimento $L = 5\lambda$ apresenta dois lóbulos de grade, enquanto que um arranjo de comprimento $L = 6\lambda$ apresenta quatro lóbulos de grade, como pode ser visto na Figura 10 (e) e Figura 10 (f), respectivamente.

Aplicando espaçamento não uniforme entre os elementos do arranjo obteve-se a Figura 11, que é equivalente à Figura 10. Comparando ambas as figuras, uma diferença importante pode ser observada: quando a separação entre os elementos não é uniforme, não há vários lóbulos de grade com amplitude máxima. No entanto, conforme o comprimento total do arranjo aumenta, lóbulos de grade com alta potência surgem, como apresentado na Figura 11 (f). Como no caso de arranjos uniformes, esses lóbulos secundários aparecem para elevados ângulos de *beam steering*, ou seja, o SLL é deteriorado para ângulos de *beam steering* mais altos. Adicionalmente, pode-se observar que o FA do arranjo não uniforme não é tão regular quanto o do arranjo uniforme, o que significa que em arranjos não uniformes os valores não são bem definidos.

Para que os resultados sejam melhor compreendidos, a Figura 12 mostra o corte do FA apresentado na Figura 10 (c), que é o corte do módulo do FA do arranjo uniforme simulado com comprimento total $L = 3\lambda$. Analisando a Figura 12 comprova-se que (a) sem *beam steering* ($\Delta\theta = 0$) o módulo do FA é composto apenas pelo lóbulo principal, sendo os lóbulos secundários de amplitude mínima. Porém, quando o arranjo é submetido à *beam steering*, tanto em (b) $\pi/4$ quanto em (c) $\pi/2$, os lóbulos secundários se tornam significativos, e grandes o suficiente para serem caracterizados lóbulos de grade, onde a amplitude destes é a mesma dos lóbulos principais. Comparando a Figura 10 (c) com a Figura 12 observa-se que os lóbulos de grade surgem quando o arranjo é submetido a *beam steering* a

partir do ângulo de direcionamento $\Delta\theta = \pi/4$.

Por sua vez, a Figura 13 apresenta o corte do módulo do FA do arranjo não uniforme simulado, de comprimento total $L = 3\lambda$, representado anteriormente na Figura 11 (c). Através da Figura 13 pode-se verificar que o módulo do FA em arranjos não uniformes não são tão bem definidos quanto nos arranjos uniformes, pois, devido os diferentes espaçamentos entre os elementos, cada par de elemento se interfere construtivamente de forma singular, o que, quando somando, forma um fator de

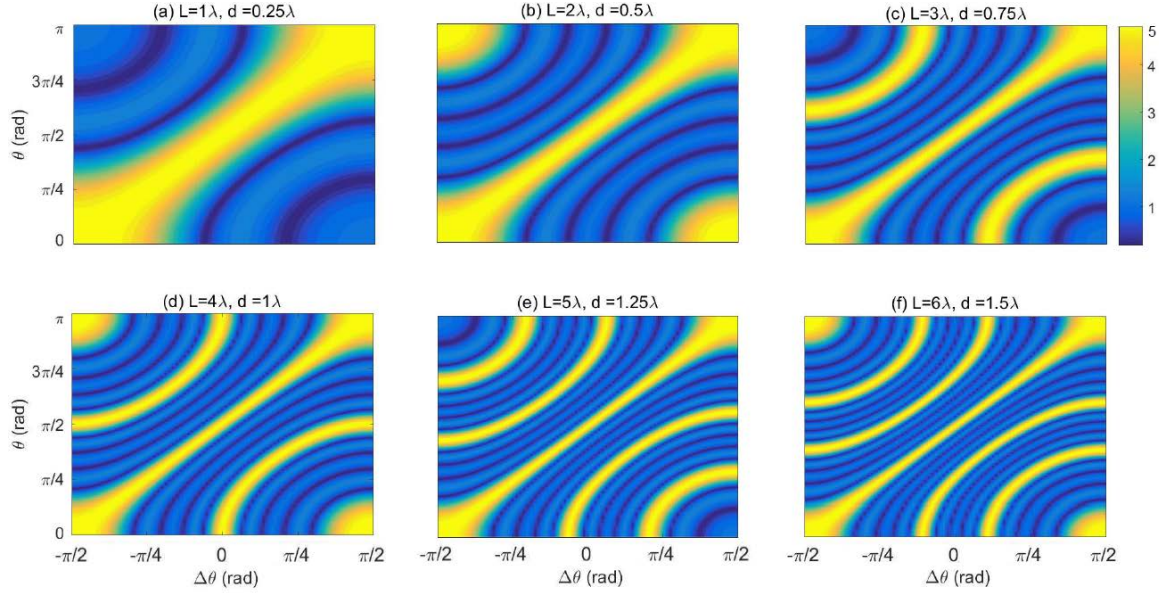


Figura 10 – Magnitude do $FA(\theta)$ para um arranjo de antenas uniforme de 5 elementos em termos do ângulo de *beam steering* $\Delta\theta$ para comprimentos de arranjo entre λ e 6λ . A escala de cores é a mesma para todos os comprimentos de arranjo. (a), (b), (c), (d), (e), e (f) são para arranjo com comprimento total de 1λ , 2λ , 3λ , 4λ , 5λ , e 6λ , respectivamente.

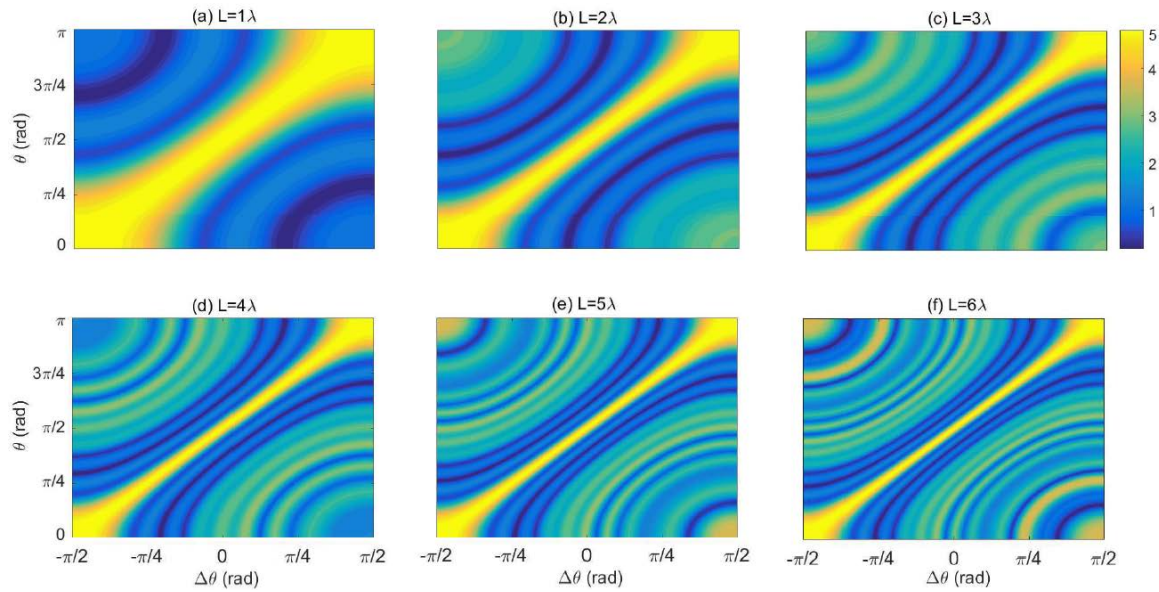


Figura 11 – Magnitude do $FA(\theta)$ para um arranjo de antenas não uniforme de 5 elementos em termos do ângulo de *beam steering* $\Delta\theta$ para comprimentos de arranjo entre λ e 6λ . A escala de cores é a mesma para todos os comprimentos de arranjo. (a), (b), (c), (d), (e), e (f) são para arranjo com comprimento total de 1λ , 2λ , 3λ , 4λ , 5λ , e 6λ , respectivamente.

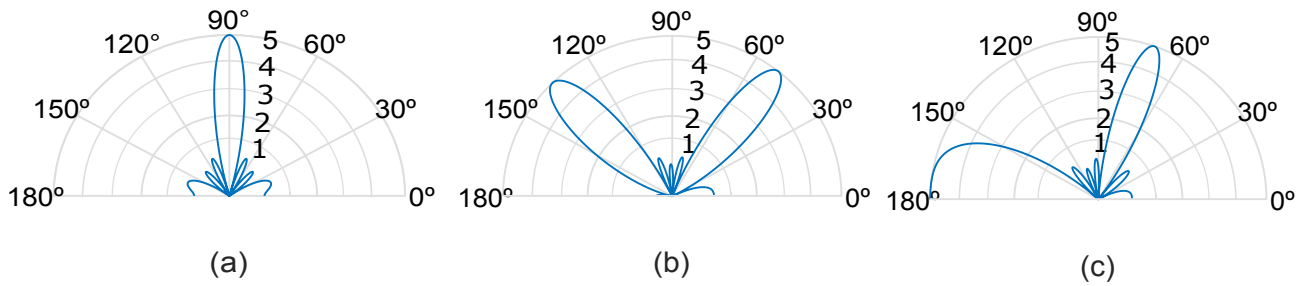


Figura 12 – Corte do módulo do FA do arranjo de antenas uniforme de 5 elementos com comprimento total 3λ , operando sob ângulos de *beam steering*: (a) $\Delta\theta = 0$, (b) $\Delta\theta = \pi/4$ e (c) $\Delta\theta = \pi/2$

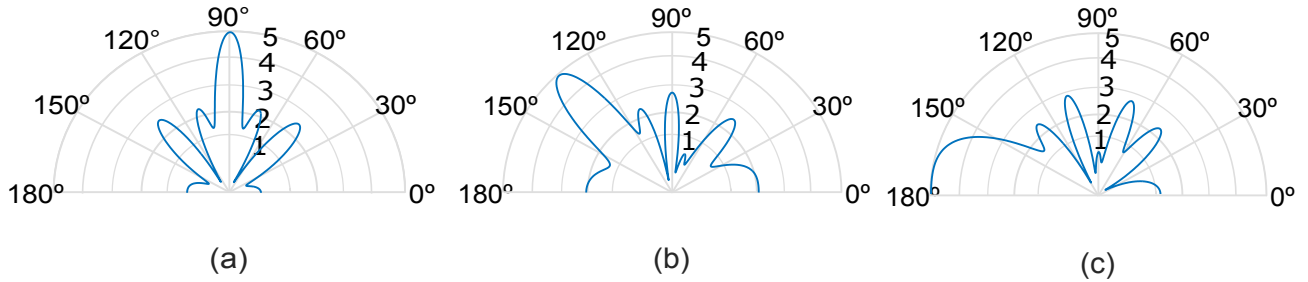


Figura 13 – Corte do módulo do FA do arranjo de antenas não uniforme de 5 elementos com comprimento total 3λ , operando sob ângulos de *beam steering*: (a) $\Delta\theta = 0$, (b) $\Delta\theta = \pi/4$ e (c) $\Delta\theta = \pi/2$

arranjo incalculável. Na figura (a), onde não há direcionamento de feixe, os lóbulos secundários são maior em amplitude em relação ao arranjo uniforme, mas não são grandes os suficientes para serem classificados lóbulos de grade. Entretanto, quando o arranjo é submetido a *beam steering*, figuras (b) e (c), os lóbulos secundários que antes apareciam no arranjo uniforme são reduzidos significativamente, o que resulta na inexistência de lóbulos de grade nesse fator de arranjo. Dessa forma, como pode ser visto na Figura 11 (c), independentemente do ângulo de *beam steering* para o comprimento de $L = 3\lambda$ não surgem lóbulos de grade no fator de arranjo simulado.

A fim de quantificar o SLL das distribuições uniforme e não uniforme dos arranjos de antenas, a Figura 14 apresenta o SLL calculado a partir do FA empregado, onde cada sub-figura corresponde à um valor de α : Figura 14 (a) é para $\alpha = 1$, isto é, espaçamento uniforme; Figura 14 (b) é para um valor intermediário, $\alpha = 1, 2$; e Figura 14 (c) é para $\alpha = 1, 6$. Em relação ao espaçamento uniforme para arranjos compactos (comprimento total de 1λ) não há lóbulos de grade, independente do ângulo de *beam steering*. À medida que o comprimento total aumenta, no entanto, os lóbulos de grade aparecem. Desse modo, quanto maior for o arranjo, menor é o ângulo de direcionamento no qual lóbulos de grade aparecem. Assim, para um comprimento total de 3λ , vê-se que um SLL de 0 dB é obtido para o ângulo de $\pi/8$ rad. Para arranjos ainda maiores, os lóbulos de grade estão presentes até mesmo para ângulos de *beam steering* menores. Em particular, para um arranjo de comprimento total $L = 4\lambda$, nota-se que um SLL de 0 dB é obtido para todos os ângulos de *beam steering*. Para um valor não nulo de α , a Figura 14 (b) e a Figura 14 (c) mostram que o SLL apresenta uma forma de escadaria. Esse comportamento pode ser explicado considerando o arranjo como uma combinação de múltiplos arranjos de 2 elementos cada, com diferentes separações entre os elementos. Cada sub-arranjo, então,

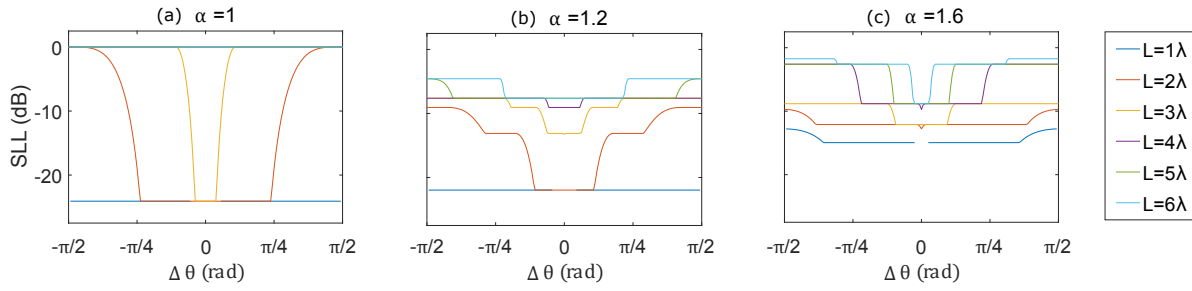


Figura 14 – SLL de arranjos com variação de comprimento entre λ e 6λ em termos direcionamento de feixe $\Delta\theta$ e (a) $\alpha = 1$, arranjo uniforme, (b) $\alpha = 1, 2$, and (c) $\alpha = 1, 6$.

contribui com uma grade em um ângulo de *beam steering* diferente, resultando na forma observada. Comparando com o arranjo uniformemente disposto, o SLL para $\alpha = 1, 2$, de comprimento $L < 2\lambda$ e pequenos ângulos de *beam steering*, o SLL é ligeiramente mais alto. No entanto, para arranjos de grandes comprimentos e maiores ângulos de *beam steering*, a amplitude dos lóbulos secundários é significativamente reduzido. Portanto, apesar do ser fraco para certas condições, o SLL foi reduzido em torno de 5 dB no pior cenário, isto é, arranjos de grande comprimento e com altos ângulos de *beam steering*. O SLL para altos valores de α , por exemplo $\alpha = 1, 6$, apresenta um comportamento similar ao de $\alpha = 1, 2$, a diferença, nesse caso, é que a redução do SLL para arranjos de grandes comprimentos e com altos ângulos de *beam steering* é menor do que em $\alpha = 1, 2$. Isso se explica pelo fato de que para um valor elevado de α os elementos mais distantes são separados por uma distância muito grande, resultando em lóbulos de grade para pequenos ângulos de *beam steering*.

Para verificar a relação entre a redução do nível de lóbulo lateral e o parâmetro α , a Figura 15 apresenta o SLL do pior cenário, o que ocorre quando o arranjo é submetido ao ângulo de *beam steering* $\Delta\theta = \pm\pi/2$, em função de diferentes valores do parâmetro α . A Figura 15 é apresentada para arranjos com comprimento total entre 2λ e 6λ , comprimentos nos quais surgem os lóbulos de grades

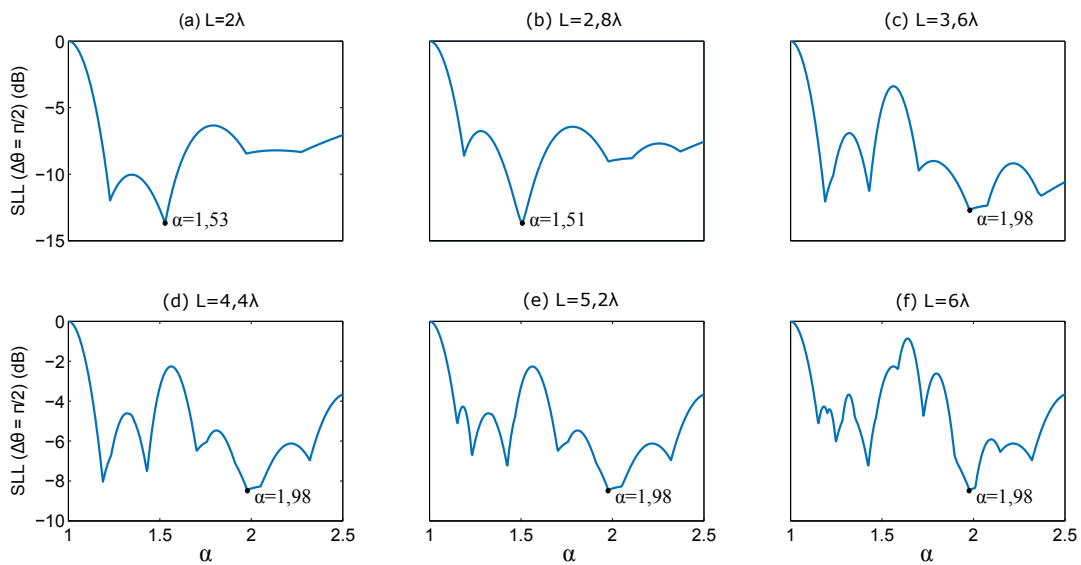


Figura 15 – Nível do lóbulos laterais em função do parâmetro α para arranjos direcionados em $\Delta\theta = \pi/2$ de comprimentos: (a) $L = 2\lambda$, (b) $L = 2,8\lambda$, (c) $L = 3,6\lambda$, (d) $L = 4,4\lambda$, (e) $L = 5,2\lambda$ e (f) $L = 6\lambda$.

quando os arranjos são submetidos a *beam steering*. Assim, analisando a Figura 15 observa-se que o valor ótimo do parâmetro α , isto é, o valor do parâmetro α para o qual o SLL é o menor possível, varia conforme o comprimento do arranjo aumenta. Na Figura 15 (a) tem-se que o lóbulo de grade existe apenas para arranjos uniforme, quando $\alpha = 1$, posteriormente, o SLL decresce até atingir o valor mínimo, que representa a razão de separação ótima entre os elementos do arranjo não uniforme, nesse caso $\alpha = 1,53$. Aumentando o valor de α o SLL volta a crescer, mas ainda não atingi o valor máximo, de 0 dB. O mesmo acontece para os arranjos não uniformes com diferentes comprimentos, contudo o valor ótimo de α muda conforme o comprimento do arranjo aumenta, indicando a dependência da redução do lóbulos laterais com o comprimento do arranjo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foi realizado o estudo do efeito do *beam steering* sobre o *SLL* em arranjos de antenas não uniformes 1D com separação média entre os elementos de $0,25\lambda$ e $1,5\lambda$. Os resultados numéricos mostraram que um arranjo disposto de forma não uniforme, a partir de uma progressão geométrica de razão α , apresenta uma redução significativa no *SLL* do *FA* do arranjo de antenas em comparação à um arranjo uniforme com as mesmas dimensões e número de elementos. Entretanto, foi comprovado que os resultados podem ser otimizados alterando o parâmetro de incremento gradual α . Todavia, no pior cenário, representado por elevados ângulos de *beam steering*, no caso $\Delta\theta = \pm \pi/2$ e um arranjo de grande comprimento, $L = 6\lambda$, conseguiu-se uma redução de aproximadamente 5 dB do *SLL*, para $\alpha = 1, 2$. Além disso, foi realizado um estudo da otimização do parâmetro α para arranjos de diferentes comprimentos, onde mostrou-se a dependência do valor ótimo de α com o comprimento total do arranjo.

Pretende-se estender a análise aqui apresentada para arranjos 2D e para outras formas de disposição dos elementos do arranjo, aplicando, a princípio, uma progressão geométrica a partir do elemento central do arranjo, e utilizando, posteriormente, o método de Monte Carlo, a fim de caracterizar a redução do *SLL* nos aspectos de configuração e disposição dos arranjos não uniformes.

REFERÊNCIAS

- ALÙ, A.; ENGHETA, N. Wireless at the nanoscale: optical interconnects using matched nanoantennas. **Physical Review Letters**, APS, v. 104, n. 21, p. 213902, 2010.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2005. ISBN 0471714623.
- BRAY, M. G. et al. Optimization of thinned aperiodic linear phased arrays using genetic algorithms to reduce grating lobes during scanning. **IEEE Transactions on antennas and propagation**, IEEE, v. 50, n. 12, p. 1732–1742, 2002.
- CARDAMA, Á. C. A. et al. **Antenas**. [S.l.]: Univ. Politèc. de Catalunya, 2004. v. 3.
- HEIDARY, K. Ultra-wideband antenna arrays. In: IEEE. **Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001. IEEE**. [S.l.], 2001. v. 2, p. 472–475.
- HERINGER, L. C. et al. Sistemas de comunicação de banda ultra larga. **vol**, v. 9, p. 8–20, 2006.
- KHODIER, M. M.; CHRISTODOULOU, C. G. Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, IEEE, v. 53, n. 8, p. 2674–2679, 2005.
- KIM, J.-H. et al. Design of nano-photonic phased-array antennas for wide-angle beam-steering. In: IEEE. **18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)**. [S.l.], 2016. p. 422–425.
- LANGGUTH, L. et al. Nano-antenna enhanced two-focus fluorescence correlation spectroscopy. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group, v. 7, n. 1, p. 5985, 2017.
- PHARE, C. T. et al. Silicon optical phased array with grating lobe-free beam formation over 180 degree field of view. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. **CLEO: Science and Innovations**. [S.l.], 2018. p. SM3I–2.
- PITA, J. L. et al. Side-lobe level reduction in bio-inspired optical phased-array antennas. **Optics Express**, Optical Society of America, v. 25, n. 24, p. 30105–30114, 2017.
- PITA, J. L. et al. Ultra-compact broadband dielectric antenna. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. **CLEO: Science and Innovations**. [S.l.], 2016. p. SM3G–7.
- QUEIROZ, W. J. L. **Uma Nova Abordagem para a Análise de Arranjos de Antenas com Parâmetros Aleatórios**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande Centro de Ciências e Tecnologia Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande, Paraíba - Brasil, 2004.
- SUN, J. et al. Two-dimensional apodized silicon photonic phased arrays. **Optics letters**, Optical Society of America, v. 39, n. 2, p. 367–370, 2014.
- SUN, J. et al. Large-scale nanophotonic phased array. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 493, n. 7431, p. 195, 2013.
- VASCONCELOS, V.; SOUZA, D.; FARAH, L. **Aplicações da Tecnologia UWB em Sistemas de Comunicação sem Fio e Construção de Antenas Banda Larga**. Tese (Doutorado) — PhD thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ZHANG, Y. et al. Sub-wavelength spacing optical phase array nanoantenna emitter with vertical silicon photonic vias. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. **Optical Fiber Communication Conference**. [S.l.], 2018. p. Tu2A–6.