

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS - CECS

Heitor Rodrigues Savegnago

**ANÁLISE DE SISTEMAS DE GEOLOCALIZAÇÃO BASEADOS EM
GPS E AOA PARA FOGUETES DE SONDAGEM ATMOSFÉRICA**

Santo André, SP
2025

Heitor Rodrigues Savegnago

ANÁLISE DE SISTEMAS DE GEOLOCALIZAÇÃO BASEADOS EM GPS E AOA PARA FOGUETES DE SONDAGEM ATMOSFÉRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal do ABC como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Roberto de Santana Casella.

Santo André, SP
2025

Agradecimientos

Resumo

Alterar

O objetivo principal do projeto é a concepção de um sistema de localização relativa para um foguete de sondagem atmosférica. Este sistema servirá para guiar um grupo de busca em campo na tarefa de localizar o veículo após o aterrizagem.

O direcionamento da busca seria feita utilizando o método de ângulo de chegada relativo ao sinal oriundo da telemetria do foguete. O sinal será recebido por uma matriz de antenas, viabilizando os cálculos de ângulo.

O objetivo secundário do projeto é comparar a performance deste sistema com a performance de outro sistema de localização relativa, que utiliza coordenadas geográficas para os cálculos. Este outro sistema se baseia em cálculos de azimuth entre as coordenadas do veículo e do grupo de busca.

Por se tratar de um sistema com dados processados no veículo, se houverem problemas internos com o GPS de bordo, estes cálculos são inviabilizados. Outro problema deste sistema é relativo à precisão da coordenada geográfica, fazendo com que, à certa distância, a precisão da direção perca sua confiabilidade.

Por outro lado, a versão utilizando o ângulo de chegada não depende dos dados transmitidos no sinal, bem como poderá funcionar bem a distâncias mais curtas.

Figuras

1	Caption	1
2	Representação geométrica de distância e ângulo em relação ao norte entre coordenadas geográficas A e B	3
3	Cálculo do ângulo de <i>Bearing</i> β entre as coordenadas dos Campi Santo André e São Bernardo do Campo da UFABC.	5
4	Característica de frente de onda a cada λ a partir da antena.....	6
5	Ângulo de Chegada (<i>Angle of Arrival</i> , AoA) com par de antenas em diversas direções equivalentes.	7
6	Diferentes valores para d	8
7	Possível disposição de matriz de antenas.....	8
8	Característica de frente de onda a cada λ a partir da antena emissora.....	10
9	Ângulo de Chegada (<i>Angle of Arrival</i> , AoA) (Θ) com par de antenas em diversas direções equivalentes, sistema com ângulo $\alpha = 20^\circ$	11
10	Diferentes valores para d	12
11	Agora sim 0	12
12	Agora sim	12
13	Gráfico	14
14	Gráfico	14
15	Gráfico	15

Tabelas

Códigos

Abreviaturas e Siglas

AoA	Ângulo de Chegada (<i>Angle of Arrival</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite (<i>Global Navigation Satellite System</i>)
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
LoRa	<i>Longe Range</i>
LoS	Linha de visão (<i>Line of Sight</i>)
NLoS	Sem Linha de visão (<i>Non Line of Sight</i>)
RF	Radiofrequência (<i>Radio Frequency</i>)
SDR	Rádio Definido por Software (<i>Software-Defined Radio</i>)
SNR	Relação Sinal-Ruído (<i>Signal-Noise Ratio</i>)
UCA	Matriz Circular Uniforme (<i>Uniform Circular Array</i>)
ULA	Matriz Linear Uniforme (<i>Uniform Linear Array</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura do documento	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Fundamentação teórica	3
2.1.1	Direcionamento por coordenadas geográficas	3
2.1.2	Estimar AoA utilizando matriz de antenas	6
2.1.3	AoA aux	10
2.2	Trabalhos relacionados	15
3	METODOLOGIA	17
4	RESULTADOS	18
5	CONCLUSÃO	19
	REFERÊNCIAS	20

1 Introdução

1.1 Motivação

Foguetes de sondagem atmosférica são veículos aeroespaciais sub-orbitais utilizados para levar sensores e experimentos científicos a altos níveis atmosféricos, com o intuito de realizar estudos e análises relacionados às diversas condições ali presentes [1]. Estes veículos geralmente utilizam motor de propelente sólido, de um ou dois estágios, e são equipados com sistemas de controle, telemetria e recuperação, além de transportarem o experimento científico, denominado carga-paga [2, 3]. Algumas das vantagens desses veículos são o baixo custo e a menor necessidade de alcance pra sistemas de telemetria e rastreo, tendo em vista que não entram em órbita [4].

No contexto de foguetes de sondagem, existem competições que fomentam o desenvolvimento e competitividade em equipes universitárias de foguetemodelismo [5]. Algumas dessas competições tem grande parte de suas categorias definidas nas bases de foguetes de sondagem, com apogeu de voo entre 1 km e 10 km de altura acima do nível do solo. Nestes casos, a sequência de operações normal do foguete, apresentada na Figura 1, consiste em: ignição do primeiro estágio do motor, decolagem, período propulsionado, término de queima do primeiro estágio, desacoplamento do primeiro estágio, ignição do segundo estágio, segundo período propulsionado, término de queima do segundo estágio, início do período inercial balístico, apogeu, detecção do apogeu pelos sistemas embarcados e liberação do paraquedas piloto, liberação do paraquedas principal a certa altitude e finalmente o pouso [2, 3]. Desacoplamento do primeiro estágio, ignição e fase propulsionada do segundo somente se aplicam a foguetes de dois estágios.

Figura 1: Caption



Fonte: Autor

A partir do momento do pouso, o próximo objetivo nessas competições consiste em localizar o foguete, vários métodos podem ser empregados nessa situação, desde cores chamativas no veículo e paraquedas, até sinais sonoros. Essas competições geralmente recomendam, e até exigem, a presença de um Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System*, GNSS), capaz de transmitir as coordenadas do veículo após o pouso para localização, como um Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*, GPS) [6].

O processo de localização baseada em dados simples de GNSS, latitude e longitude, pode se tornar mais complicado se o grupo de busca não tem certeza de como encontrar essas coordenadas. Existem dispositivos de GNSS portáteis, porém estes podem criar dificuldades na interface com os dados recebidos da telemetria do foguete. Neste caso, seria possível desenvolver um dispositivo capaz de lidar diretamente com as informações de localização fornecidas pela telemetria e guiar o grupo de buscar na direção correta.

Os dados recebidos da telemetria ainda precisam de certo grau de confiabilidade para que sejam devidamente processados e tratados, o que pode ser um problema se o veículo está longe do grupo de busca ou o dispositivo de GNSS a bordo não esteja apto a fornecer dados corretamente. Nesse caso, ainda é possível buscar o foguete utilizando o próprio sinal da telemetria, independente dos dados transmitidos.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver e projetar um dispositivo portátil capaz de indicar a direção da origem de um sinal de Radiofrequência (*Radio Frequency*, RF) baseado em métodos de detecção de Ângulo de Chegada (*Angle of Arrival*, AoA).

Como objetivo secundário, a análise comparativa com um sistema de utilidade semelhante, porém baseado inteiramente em coordenadas de GNSS.

1.3 Estrutura do documento

Completar isso depois

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentação teórica

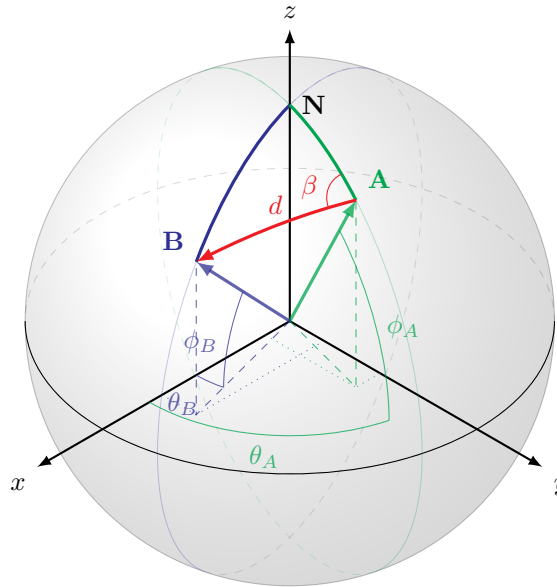
2.1.1 Direcionamento por coordenadas geográficas

Coordenadas geográficas são definidas por dois valores, latitude e longitude, associadas a coordenadas esféricas referenciadas a partir do centro da terra, assumindo o raio da coordenada como o raio médio da superfície do planeta, cerca de $R_{\text{Terra}} = 6371 \cdot 10^3 \text{ m}$ [7, 8]. A latitude equivale à componente polar ϕ centralizada na linha do equador, enquanto a longitude equivale à componente θ centralizado do meridiano de Greenwich [7, 9].

Conhecendo as coordenadas de dois pontos distintos A e B, é possível determinar seu ângulo de *bearing* β relativo, referente ao norte, ou seja, o ângulo da direção a se seguir para chegar do ponto A ao ponto B a partir da direção do norte no ponto de origem A [9].

Sendo **A** e **B** duas coordenadas geográficas, ϕ_A e ϕ_B suas respectivas latitudes, θ_A e θ_B suas respectivas longitudes, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Representação geométrica de distância e ângulo em relação ao norte entre coordenadas geográficas **A** e **B**.



Fonte: Autor.

Calculam-se Δ_ϕ e Δ_θ .

$$\Delta_\phi = \phi_B - \phi_A \quad (1)$$

$$\Delta_\theta = \theta_B - \theta_A \quad (2)$$

Através da lei dos haversines é possível obter a distância mínima d entre as coordenadas, sobre a superfície, e também o ângulo de *Bearing* β formado no vértice **A** do triângulo esférico **NAB** [8]. Para o cálculo de distância, os ângulos devem ser tratados em radianos.

$$X = \cos(\theta_B) \cdot \sin(\Delta_\phi) \quad (3)$$

$$Y = \cos(\theta_A) \cdot \sin(\theta_B) - \sin(\theta_A) \cdot \cos(\theta_B) \cdot \cos(\Delta_\phi) \quad (4)$$

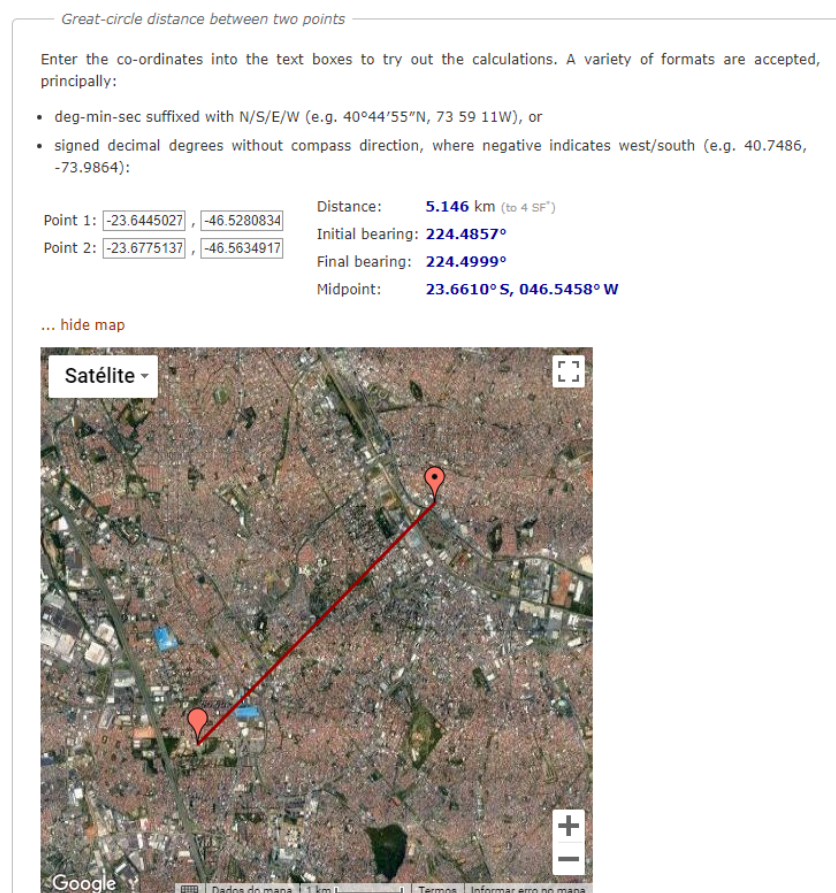
$$Z = \sin^2\left(\frac{\Delta_\theta}{2}\right) + \cos(\theta_B) \cdot \cos(\theta_A) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta_\phi}{2}\right) \quad (5)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{X}{Y}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

$$d = R_{\text{Terra}} \cdot 2 \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{Z}}{\sqrt{1-Z}}\right) \quad (7)$$

O ângulo β calculado aqui é referente à direção cardinal Norte, assim, uma equipe de busca equipada com uma bússola simples seria capaz de seguir a direção correta. A Figura 3 apresenta a aplicação desenvolvida por Veness, capaz de calcular o ângulo de *Bearing* entre duas coordenadas, note que, neste caso, o ângulo referido é relacionado à direção cardinal Leste [8].

Figura 3: Cálculo do ângulo de *Bearing* β entre as coordenadas dos Campi Santo André e São Bernardo do Campo da UFABC.



Fonte: Veness 2019 [8]

2.1.2 Estimar AoA utilizando matriz de antenas

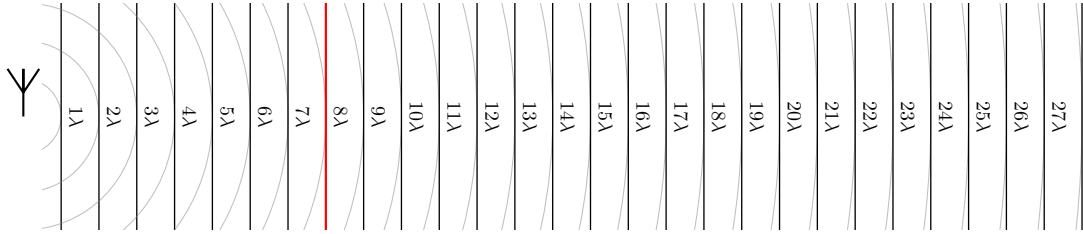
Analisando a defasagem de sinal RF em um conjunto de antenas, é possível estimar seu Ângulo de Chegada (*Angle of Arrival*, AoA), essa técnica pode ser utilizada para determinar a direção do emissor em relação à matriz de antenas utilizada. Baseando-se em dados como a distância entre as antenas, o comprimento de onda λ do sinal e a velocidade da luz no meio, usualmente tomada como $c = 299792458,6 \pm 0,3 \text{ m s}^{-1}$ no ar [10, 11, 12]. A Equação 16 apresenta a relação do comprimento de onda λ com a frequência f , com a frequência angular ω e a velocidade da luz c .

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi \cdot c}{\omega} \quad (8)$$

Se um emissor estiver distante o bastante, é possível considerar que sua frente de onda tem um comportamento planar, essa característica simplifica as operações envolvidas. A distância de Fraunhofer (d_F) é a mínima para essa condição, que define o início da região de *far-field*, conforme apresentado na Equação 17, onde D é a maior dimensão da antena [13]. Tomando $D = 2\lambda$, para uma antena de dipolo, obtém-se $d_F = 8\lambda$. A Figura 8 ilustra o comportamento planar de uma frente de onda além de d_F .

$$d_F = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \Rightarrow d_F = \frac{2 \cdot (2 \cdot \lambda)^2}{\lambda} = 8\lambda \quad (9)$$

Figura 4: Característica de frente de onda a cada λ a partir da antena.



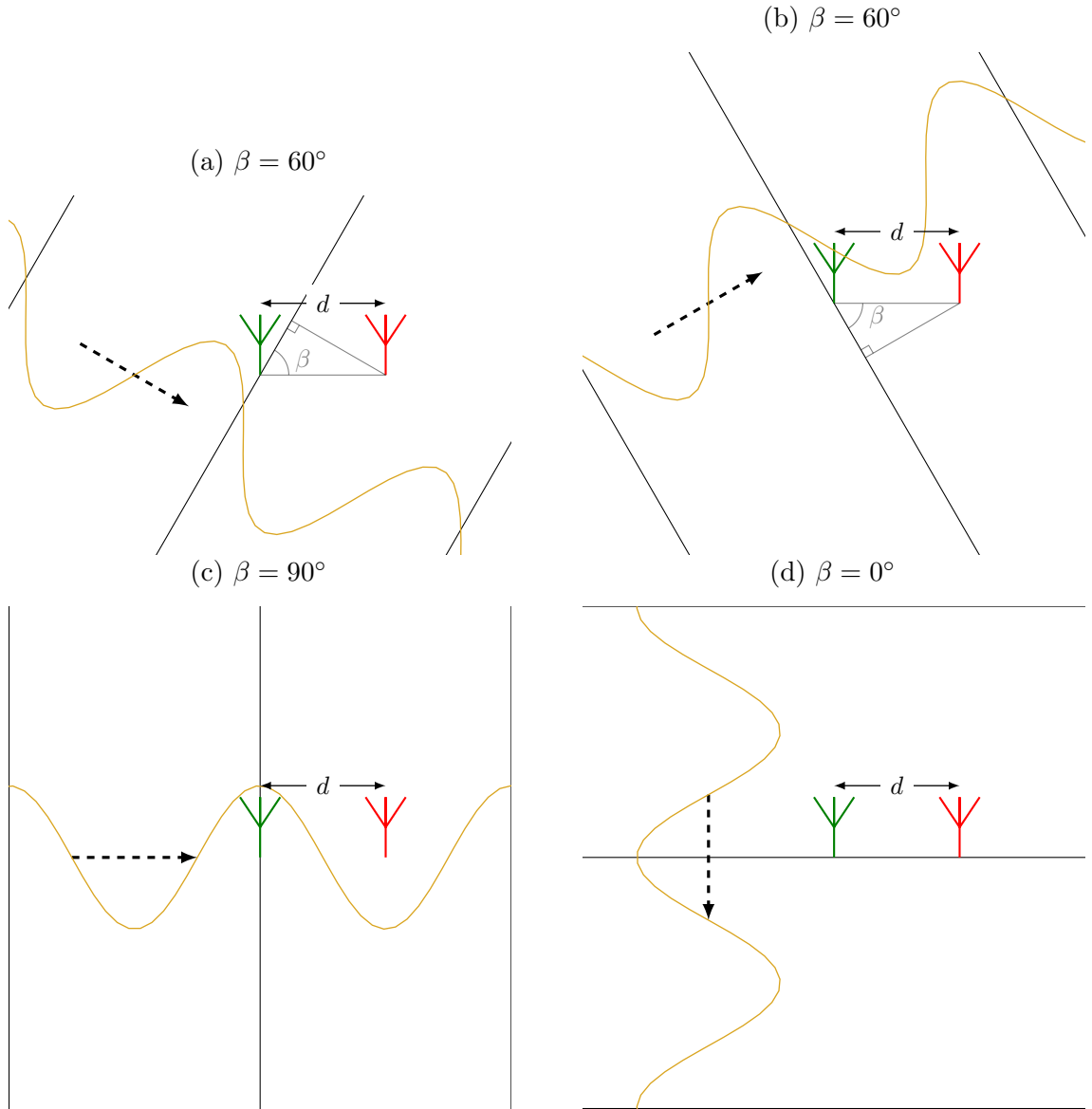
Fonte: Autor.

Tomando agora um par de antenas separadas por uma distância fixa d , torna-se viável fazer a análise trigonométrica entre as antenas e a frente de onda que chega, onde essa distância d será a hipotenusa do triângulo. A Figura 9 apresenta a disposição das antenas em dois casos de chegada de sinal RF. Para realizar a análise, é necessário conhecer uma segunda dimensão do triângulo retângulo envolvido, esta é obtida analisando a defasagem entre o sinal das antenas, conforme apresentado na Equação 18.

$$d \cdot \sin(\beta) = \lambda \cdot \frac{\Delta\Phi}{2\pi} \Rightarrow \beta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\Delta\Phi}{2\pi}\right) \quad (10)$$

É importante ressaltar que um sistemas com um único par de antenas não é capaz de determinar completamente o AoA, já que o valor calculado de β é igual para casos simétricos, a relação é apresentada nas Figuras 9a e 9b. Existem ainda dois casos notáveis,

Figura 5: AoA com par de antenas em diversas direções equivalentes.



Fonte: Autor.

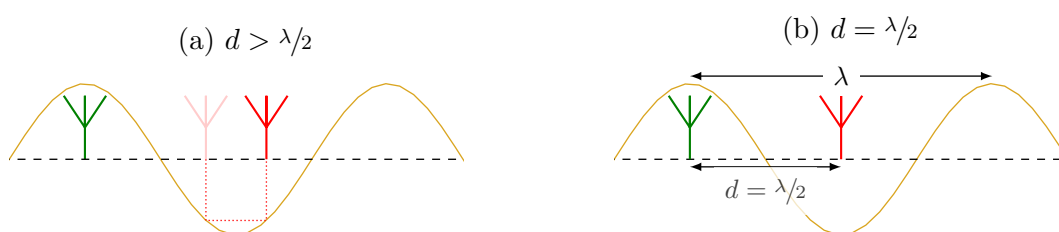
onde o sinal chega alinhado com a linha das com as antenas ou perpendicular a ela, apresentados respectivamente nas Figuras 9c e 9d.

A escolha da distância d entre as antenas deve ser feita de forma a otimizar a resolução da medida de defasagem, com a maior distância possível, porém é necessário evitar ambiguidades na análise, como o sinal é periódico, o valor se repetirá a cada λ , e terá valores simétricos quando $d > \lambda/2$, ilustrado na Figura 10a. Adota-se então $d = \lambda/2$, conforme apresentado na Figura 10b [11, 12].

Para contornar a ambiguidade gerada pela simetria no sistema, é possível adicionar uma terceira antena, de forma que não esteja alinhada com as duas primeiras. Um exemplo é apresentado na Figura 7.

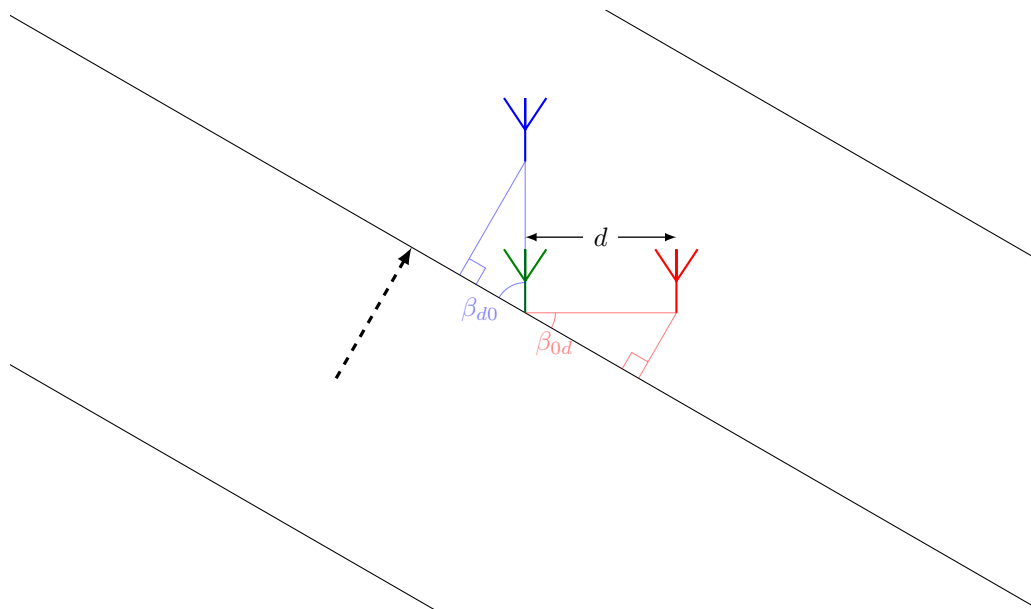
Para obter o valor de defasagem entre antenas, é interessante representar o sinal

Figura 6: Diferentes valores para d .



Fonte: Autor.

Figura 7: Possível disposição de matriz de antenas.



Fonte: Autor.

recebido como um valor complexo. Uma forma de obter o valor complexo é realizando a integração de período completo no produto do sinal recebido na antena por uma senoide ou cossenoide de mesma frequência. Nas Equações 11 e 12, S e C são respectivamente proporcionais às componentes em fase e em quadratura do sinal w recebido na antena, k é uma função auxiliar que garante frequência correta em todos os operandos. É válido notar que w e k são funções de várias variáveis.

$$S = \int_0^T w(t) \cdot \sin(k(t)) \partial t \quad (11)$$

$$C = \int_0^T w(t) \cdot \cos(k(t)) \partial t \quad (12)$$

Finalmente, na Equação 13, Z é o valor complexo associada ao sinal recebido em na antena.

$$Z_{x,y} = 2 \cdot (S + \imath C) \quad (13)$$

A defasagem entre um par de antenas é dado pelo ângulo do valor resultante da multiplicação do valor complexo da primeira antena pelo complexo conjugado da segunda antena, conforme apresentado na Equação 14.

$$\Delta\Phi_{x,y} = \arg(Z_{0,0} \cdot Z_{x,y}^*) \quad (14)$$

Com este valor é possível estimar valor de β no intervalo $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

Utilizando a terceira antena perpendicular ao primeiro par e alinhada com uma das antenas iniciais, conforme Figura 7, é possível estimar o valor de β no intervalo $0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ$. Cada par de antena pode indicar o valor da coordenada geométrica associada ao eixo que a caracteriza, conforme indicado na Equação 15. Essa propriedade somente é válida nessa geometria.

$$\text{componente}_{x,y} = -\frac{\Delta_{x,y}}{\pi} \cdot \frac{\cancel{d} \cdot \cancel{2}}{\cancel{d} \cdot \cancel{2}} = -\frac{\Delta_{x,y}}{\pi} \quad (15)$$

2.1.3 AoA aux

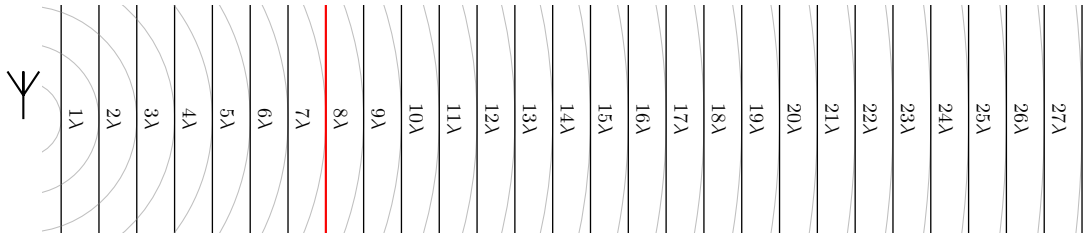
Analisando a defasagem de sinal RF em um conjunto de antenas, é possível estimar seu Ângulo de Chegada (*Angle of Arrival*, AoA), essa técnica pode ser utilizada para determinar a direção do emissor em relação à matriz de antenas utilizada. Baseando-se em dados como a distância entre as antenas, o comprimento de onda λ do sinal e a velocidade da luz no meio, usualmente tomada como $c = 299792458,6 \pm 0,3 \text{ m s}^{-1}$ no ar [10, 11, 12]. A Equação 16 apresenta a relação do comprimento de onda λ com a frequência f , a frequência angular ω e a velocidade da luz c .

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi \cdot c}{\omega} \quad (16)$$

Se um emissor de sinal estiver distante o suficiente, é possível considerar que a frente de onda tem um comportamento planar, essa característica simplifica as operações envolvidas. A distância de Fraunhofer (d_F) é a mínima para essa condição, que define o início da região de *far-field*, conforme apresentado na Equação 17, onde D é a maior dimensão da antena [13]. Tomando $D = 2\lambda$, para uma antena de dipolo, obtém-se $d_F = 8\lambda$. A Figura 8 ilustra o comportamento planar de uma frente de onda, com destaque na distância d_F .

$$d_F = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \Rightarrow d_F = \frac{2 \cdot (2 \cdot \lambda)^2}{\lambda} = 8\lambda \quad (17)$$

Figura 8: Característica de frente de onda a cada λ a partir da antena emissora.



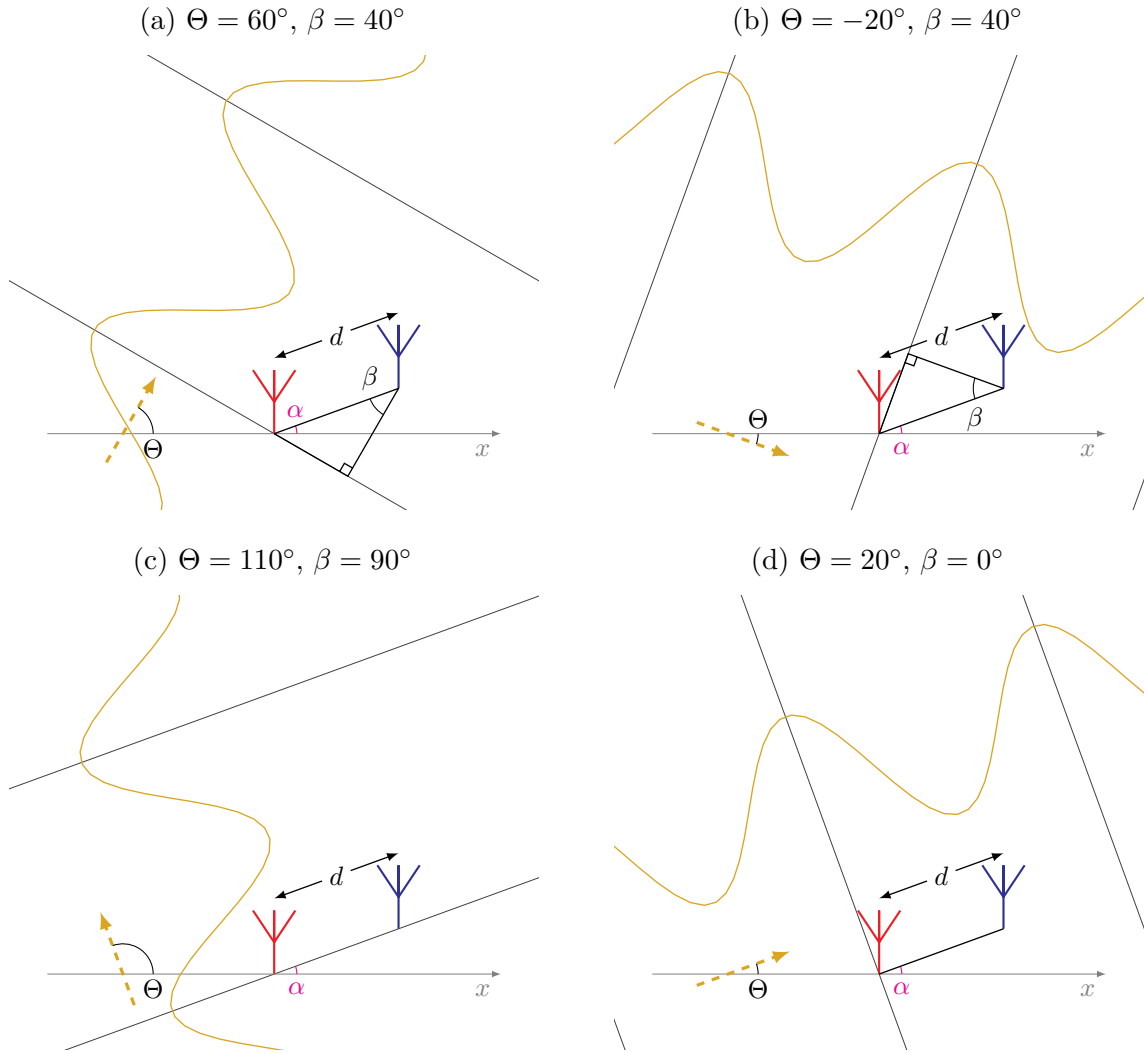
Fonte: Autor.

Tomando agora um par de antenas separadas por uma distância fixa d , torna-se viável fazer a análise trigonométrica entre as antenas e a frente de onda que chega, onde essa distância d será a hipotenusa do triângulo. A Figura 9 apresenta a disposição das antenas em quatro casos de chegada de sinal RF. Para realizar a análise, é necessário conhecer uma segunda dimensão do triângulo retângulo envolvido, esta é obtida analisando a defasagem entre o sinal das antenas, conforme apresentado na Equação 18.

$$d \cdot \cos(\pm\beta) = \lambda \cdot \frac{\Delta\Phi}{2\pi} \quad (18)$$

É importante ressaltar que um sistemas com um único par de antenas não é capaz de determinar completamente o AoA, já que o valor calculado de β é igual para casos simétricos, a relação é apresentada nas Figuras 9a e 9b. Existem ainda dois casos notáveis,

Figura 9: AoA (Θ) com par de antenas em diversas direções equivalentes, sistema com ângulo $\alpha = 20^\circ$.

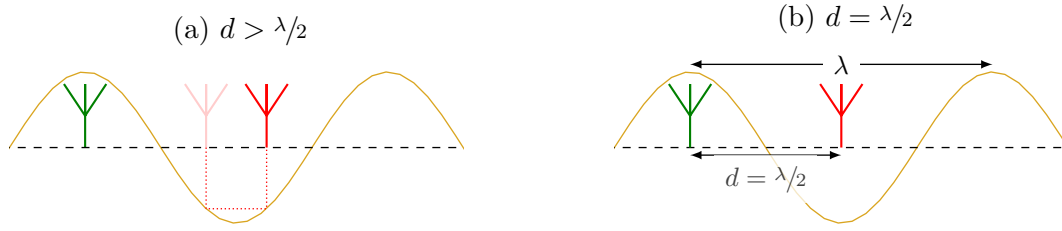


Fonte: Autor.

onde o sinal chega alinhado com o par de antenas ou perpendicular a elas, apresentados respectivamente nas Figuras 9c e 9d.

A escolha da distância d entre as antenas deve ser feita de forma a otimizar a resolução da medida de defasagem, com a maior distância possível. Porém é necessário evitar ambiguidades na análise, como o sinal é periódico, o valor se repetirá a cada λ , e terá valores simétricos quando $d > \lambda/2$, ilustrado na Figura 10a. Adota-se então $d = \lambda/2$, conforme apresentado na Figura 10b [11, 12].

Figura 10: Diferentes valores para d .



Fonte: Autor.

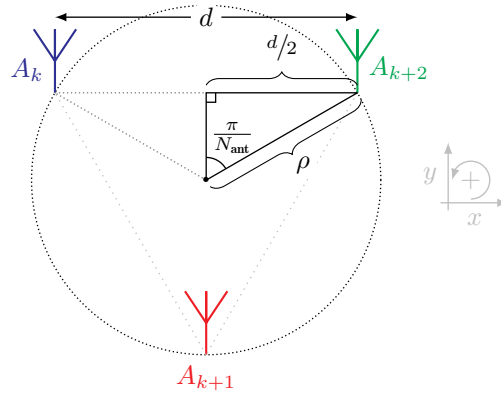


Figura 11: Agora sim 0

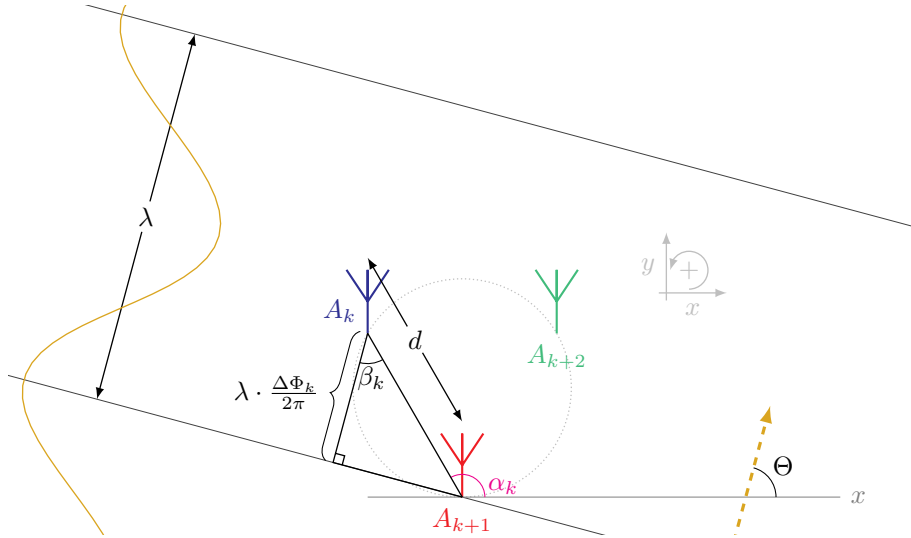


Figura 12: Agora sim

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (19)$$

$$\rho = \frac{d}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N_{\text{ant}}}\right)} \quad (20)$$

$$k = \{1, 2, \dots, N_{\text{ant}}\} \quad (21)$$

$$A_k = \rho \cdot \exp \left(\imath \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N_{\text{ant}}} \right) = (x_{A_k}, y_{A_k}) = (\mathcal{R}e(A_k), \mathcal{I}m(A_k)) \quad (22)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad (23)$$

$$I_k = \int_0^T \cos(\omega \cdot \tau) \cdot w(\tau, x_{A_k}, y_{A_k}) \partial \tau \quad (24)$$

$$Q_k = \int_0^T \sin(\omega \cdot \tau) \cdot w(\tau, x_{A_k}, y_{A_k}) \partial \tau \quad (25)$$

$$Z_k = \frac{\omega}{\pi} \cdot (I_k + \imath Q_k) \quad (26)$$

$$\Delta \Phi_k = \Phi_k - \Phi_{k+1} = \arg(Z_k) - \arg(Z_{k+1}) = \arg(Z_k \cdot \overline{Z_{k+1}}) \quad (27)$$

$$\beta_k = \pm \arccos \left(\frac{\chi}{d} \cdot \frac{\Delta \Phi_k}{2\pi} \right) \quad (28)$$

$$\alpha_k = \arg(A_k - A_{k+1}) \quad (29)$$

$$\theta_{\pm k} = \alpha_k \pm \beta_k \quad (30)$$

$$\Theta = \{\theta_{\pm k} = \alpha_k \pm \beta_k \mid \forall k\} \quad (31)$$

$$\delta = \frac{\pi}{2 \cdot (1 + N_{\text{ant}})} \quad (32)$$

$$\Theta_{[\bullet]} = \left\{ \left\lfloor \frac{\theta}{\delta} \right\rfloor \cdot \delta \mid \forall \theta \in \Theta \right\} \quad (33)$$

$$\theta_{\mathcal{M}_o} = \mathcal{M}_o \left(\Theta_{[\bullet]} \right) \quad (34)$$

$$\Theta_F = \{\theta \in \Theta \mid \theta_{\mathcal{M}_o} - \delta \leq \theta \leq \theta_{\mathcal{M}_o} + \delta\} \quad (35)$$

$$\theta_{\text{AoA}} = \widetilde{\Theta_F} \quad (36)$$

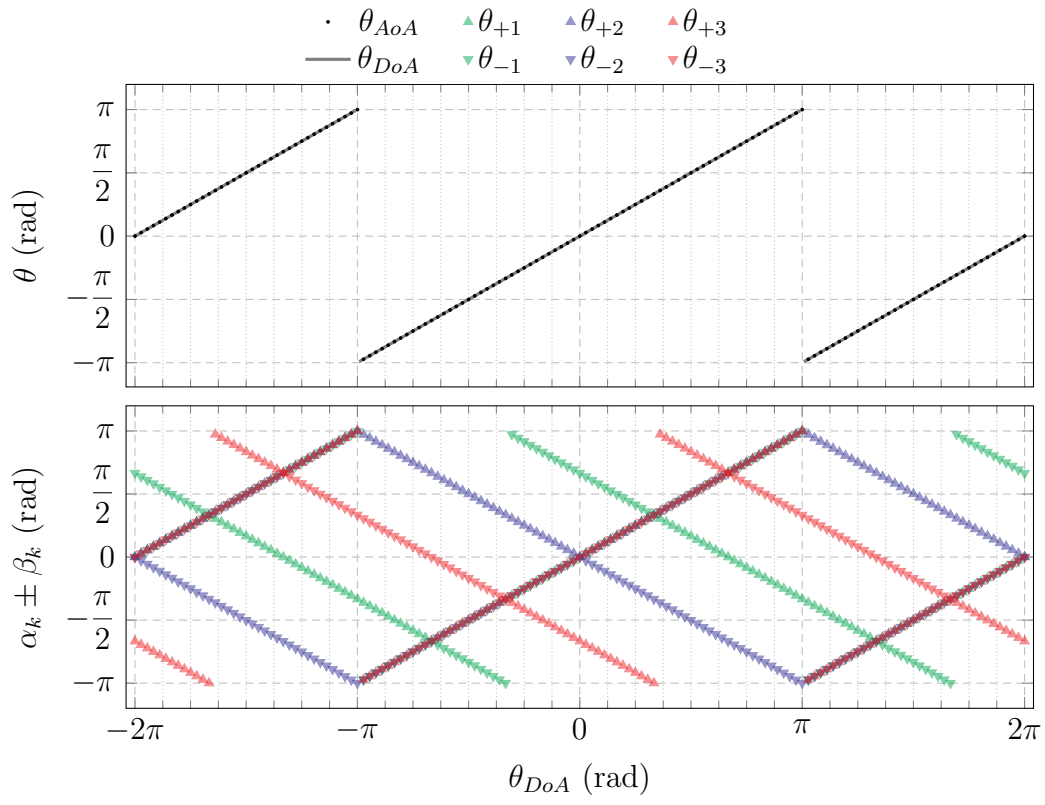


Figura 13: Gráfico

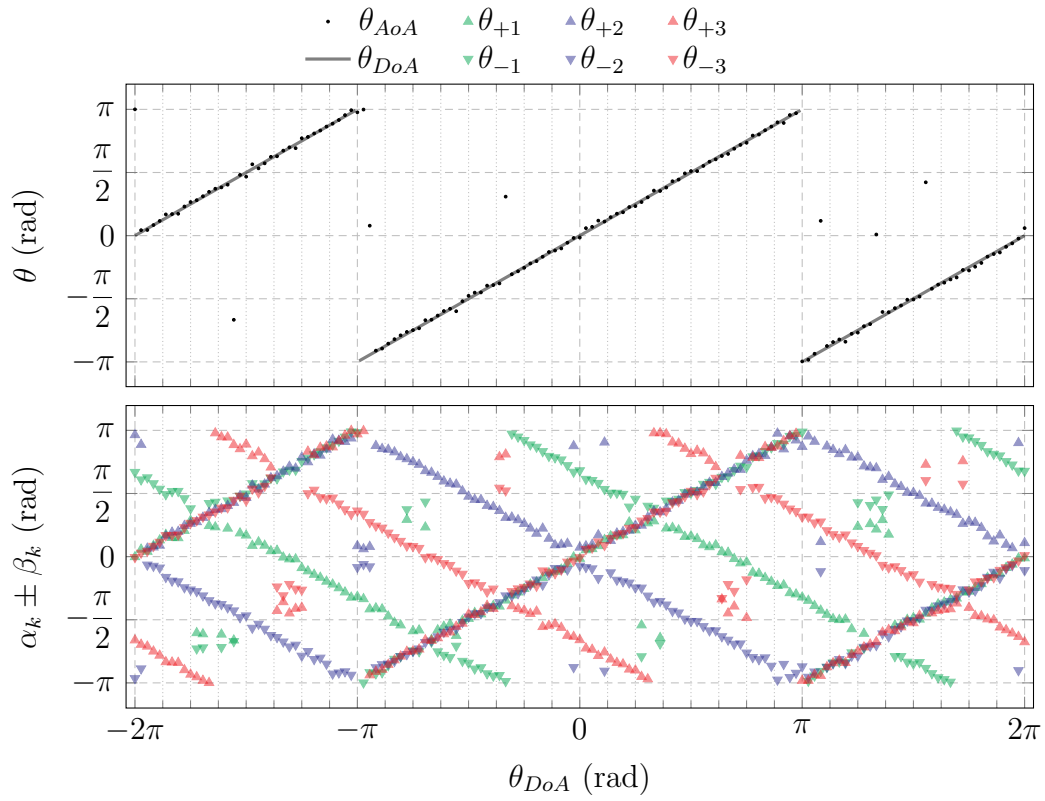


Figura 14: Gráfico

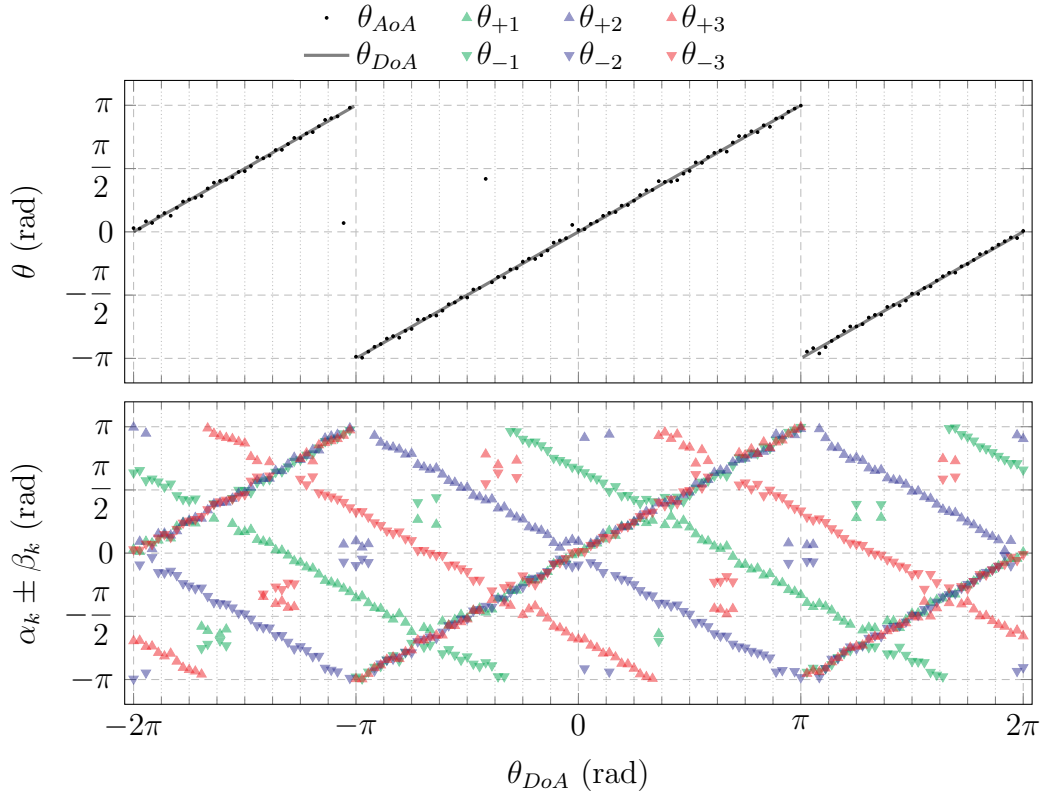


Figura 15: Gráfico

2.2 Trabalhos relacionados

Em seu trabalho, Horst [12] analisa dois algoritmos de detecção de AoA, realizando as análises em ambientes internos e utilizando matrizes de antenas. O primeiro método analisado consiste em uma aproximação do ângulo, feita utilizando um software fornecido pela Texas Instruments, fabricante do hardware utilizado. Já o segundo método, baseia-se na construção matemática do AoA baseado na diferença de fase instantânea do sinal entre as antenas do sistema, uma abordagem semelhante à proposta neste trabalho. Os resultados obtidos indicam que o método de aproximação teve melhor acurácia nos valores de ângulo.

A proposta de Zeaiter *et al.* [14] busca validar a performance da detecção de AoA em ambiente fechado, realizando a análise em diferentes modulações, larguras de canal e fatores de espalhamento. Também propõe que, ao combinar de seu algoritmo de localização de AoA com a função de autocorrelação, é possível analisar os dados de dois sinais recebidos simultaneamente.

Outro trabalho de Zeaiter *et al.* [15] consiste em uma aproximação do AoA utilizando um método de autocorrelação em um sinal *Longe Range* (LoRa) de baixa potência. Seu objetivo consiste em detectar o sinal LoRa operando em transmissão de baixa potência, caso onde a vida útil da bateria do sistema transmissor é estendida. O algoritmo apresentado busca picos de autocorrelação no sinal recebido, além de utilizar Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) para denotá-los e melhorar a Relação Sinal-Ruído

(*Signal-Noise Ratio*, SNR). Quando um pico é detectado, o algoritmo é capaz de encontrar o AoA.

BniLam *et al.* [16] propõe uma técnica que, sem qualquer informação prévia de largura de banda, consegue estimar AoA do sinal recebido. O sistema proposto consiste em uma Matriz Circular Uniforme (*Uniform Circular Array*, UCA) seguida de um filtro transversal, também utiliza de vetores especiais de largura de banda variável junto com um estimador de relação sinal-ruído térmico para determinar simultaneamente AoA e largura de banda do sinal recebido.

Em outro trabalho, BniLam *et al.* [17] estudam a possibilidade de estimar AoA para transceptores de Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT) em ambiente interno. Também propõe um modelo probabilístico adaptativo que opera no modelo de estimativa de AoA, incrementando sua performance. Seus resultados indicam que estes métodos superam a performance de modelos probabilísticos estáticos tradicionais, tanto em acurácia de localização quanto em estabilidade no valor obtido.

Neste trabalho, BniLam *et al.* [18] propõe um dispositivo de baixo custo capaz de estimar o AoA, de forma que seja viável sua utilização em dispositivos de IoT. O dispositivo consiste numa conversão de vários Rádio Definido por Software (*Software-Defined Radio*, SDR) individuais de baixo custo num único SDR com múltiplos canais de RF. Seus resultados experimentais indicam que o dispositivo é capaz de estimar valores de AoA de forma estável e acurada.

A proposta de BniLam *et al.* [19] neste trabalho consiste em um novo algoritmo para determinação de AoA chamado ANGLE (*ANGular Location Estimation*), baseado em modelos probabilísticos para a resposta do sinal recebido. Sua proposta ainda sugere duas versões do método, para o caso de amostragem única e de decomposição de subespaço, como utilizado no algoritmo MUSIC (*MUltiple SIgnal Classification*).

BniLam *et al.* [20] apresenta neste trabalho uma abordagem mais amigável para estimativa de AoA em redes LoRa. O sistema proposto, denominado LoRay (LoRa array) é composto por hardware e software preparados para fazer a estimativa de AoA em ambiente urbano, onde o sistema foi validado. O hardware utilizado foi descrito em um trabalho anterior [18]. Este sistema apresentou resultados estáveis e acurados para estimativa de AoA tanto nos casos Linha de visão (*Line of Sight*, LoS) e quanto nos Sem Linha de visão (*Non Line of Sight*, NLoS).

Em seu trabalho, Niculescu e Nath [21] propõe métodos para detecção de posição e orientação em cada nó de uma rede *ad hoc*. A proposta parte de possíveis problemas relacionados a utilização de GPS em ambiente fechado

3 Metodologia

4 Resultados

5 Conclusão

Referências

- [1] ISRO, Indian Space Research Organisation, Departament of Space, *Sounding Rockets*. endereço: <https://www.isro.gov.in/soundingRockets.html>.
- [2] ESA, European Space Agency, *Sounding rockets*. endereço: https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Sounding_rockets.
- [3] M. Sabbatini e N. Sentse, “ESA User Guide to Low Gravity Platforms,” *Directorate of Human Spaceflight and Operations*, 2014. endereço: https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/European_user_guide_to_low_gravity_platforms.
- [4] NASA, National Aeronautics and Space Administration, *About Sounding Rockets*. endereço: <https://www.nasa.gov/soundingrockets/overview/>.
- [5] ESRA, Experimental Sounding Rocket Association, *The Intercollegiate Rocket Engineering Competition*. endereço: <https://www.soundingrocket.org/what-is-irec.html>.
- [6] ESRA, Experimental Sounding Rocket Association, *Spaceport America Cup Intercollegiate Rocket Engineering Competition Rules & Requirements Document*. endereço: https://www.soundingrocket.org/uploads/9/0/6/4/9064598/sa_cup_irec_rules_and_requirements_document-2023_v1.3_20231001.pdf.
- [7] P. Guitarrara. “Coordenadas geográficas. ” endereço: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/coordenadas-geograficas.htm>.
- [8] C. Veness, *Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points*. endereço: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.
- [9] H. Fleming. “Coordenadas esféricas. ” endereço: <http://fma.if.usp.br/~fleming/diffeo/node4.html>.
- [10] D. Jennings, R. Drullinger, K. Evenson, C. Pollock e J. Wells, “The continuity of the meter: the redefinition of the meter and the speed of visible light,” *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, v. 92, n. 1, p. 11, 1987.
- [11] A. Bensky, *Wireless positioning technologies and applications*. Artech House, 2016. endereço: https://scholar.rose-hulman.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1012&context=electrical_grad_theses.
- [12] V. Horst, “Localization and Angle-of-Arrival in Bluetooth Low Energy,” 2021. endereço: <https://www.ds.informatik.uni-kiel.de/en/teaching/bachelor-and-master-theses/completed-master-and-bachelor-theses/2021%20bachelor%20thesis%20Valentin%20Horst.pdf>.
- [13] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 2005.

- [14] H. Zeaiter, O. Baala, F. Spies e V. Thierry, “Performance Evaluation of the Angle of Arrival of LoRa Signals under Interference,” em *9th IEEE International Conference on Communications and Electronics (ICE 2022)*, IEEE, Nha Trang, Vietnam: IEEE, jul. de 2022. endereço: <https://ut3-toulouseinp.hal.science/hal-03693641>.
- [15] H. Zeaiter, F. Spies, O. Baala e T. Val, “Measuring accurate Angle of Arrival of weak LoRa signals for Indoor Positioning,” em *12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2022)*, Beijing, China, set. de 2022. DOI: 10.1109/IPIN54987.2022.9918114. endereço: <https://hal.science/hal-03932846>.
- [16] N. BniLam, J. Steckel e M. Weyn, “2D angle of arrival estimations and bandwidth recognition for broadband signals,” em *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, IEEE, 2017, pp. 2041–2045. endereço: https://www.researchgate.net/publication/317397561_2D_angle_of_arrival_estimations_and_bandwidth_recognition_for_broadband_signals.
- [17] N. BniLam, G. Ergeerts, D. Subotic, J. Steckel e M. Weyn, “Adaptive probabilistic model using angle of arrival estimation for IoT indoor localization,” em *2017 International conference on indoor positioning and indoor navigation (IPIN)*, IEEE, set. de 2017, pp. 1–7.
- [18] N. BniLam, D. Joosens, J. Steckel e M. Weyn, “Low cost AoA unit for IoT applications,” em *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, IEEE, 2019, pp. 1–5. endereço: https://www.researchgate.net/profile/Noori-Bnilam-2/publication/332141599_Low_Cost_AoA_Unit_for_IoT_Applications/links/5ca2ee8d299bf116956bf0e/Low-Cost-AoA-Unit-for-IoT-Applications.pdf.
- [19] N. BniLam, E. Tanghe, J. Steckel, W. Joseph e M. Weyn, “ANGLE: ANGular location estimation algorithms,” *IEEE access*, v. 8, pp. 14 620–14 629, 2020. endereço: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8959176>.
- [20] N. BniLam, T. Janssen, M. Aernouts, R. Berkvens e M. Weyn, “LoRa 2.4 GHz communication link and range,” *Sensors*, v. 20, n. 16, p. 4366, 2020.
- [21] D. Niculescu e B. Nath, “Ad hoc positioning system (APS) using AOA,” em *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)*, vol. 3, 2003, 1734–1743 vol.3. DOI: 10.1109/INFCOM.2003.1209196.