

Análise de sistemas de geolocalização baseados em GPS e AoA para foguetes de sondagem atmosférica

Heitor Rodrigues Savegnago

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
UFABC

2025



Introdução

Foguetes de sondagem

GNSS

Coordenadas Geográficas

Emissão de sinais

Equação do sinal

Frente de onda

Onda plana

AoA

Chegada do sinal

Malha de antenas

Calculo de fase

Determinar AoA

Resultados

Simulação

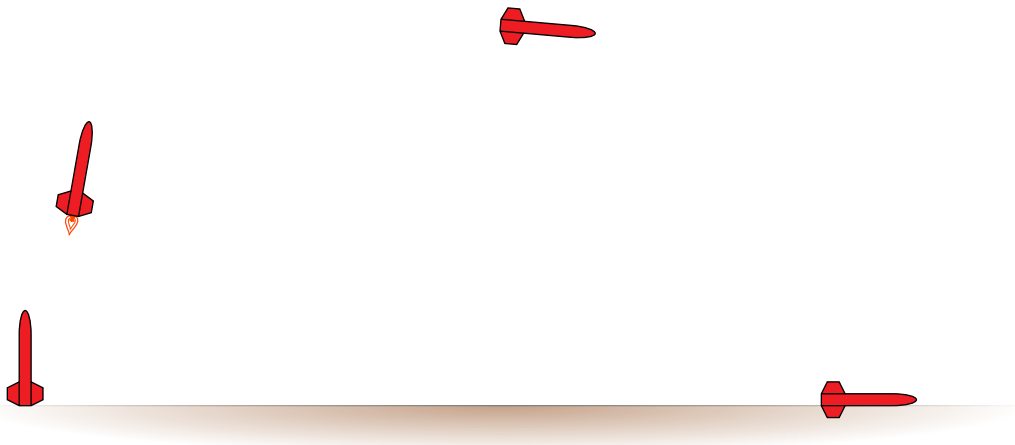
Três antenas

Cinco antenas

Setes antenas

Conclusão

Finalização



Fonte: Autor.

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso e localização

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso e localização
- ▶ Em alguns casos, o lançamento é realizado onde não há sinal de internet

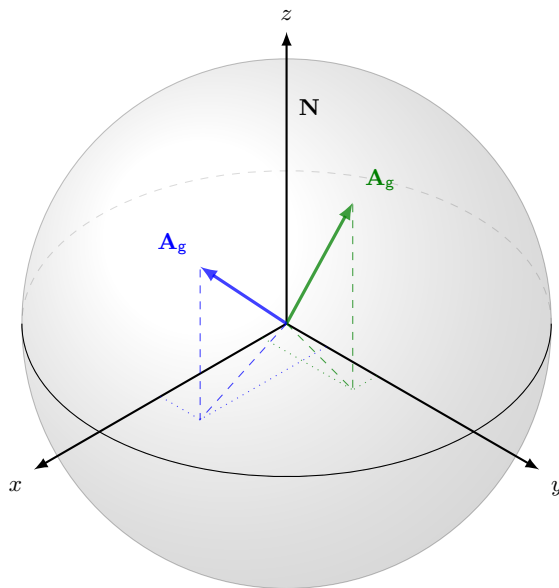
Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso e localização
- ▶ Em alguns casos, o lançamento é realizado onde não há sinal de internet
- ▶ Mas mesmo nesses casos, é possível haver o sinal da telemetria de bordo

Foguetes de sondagem

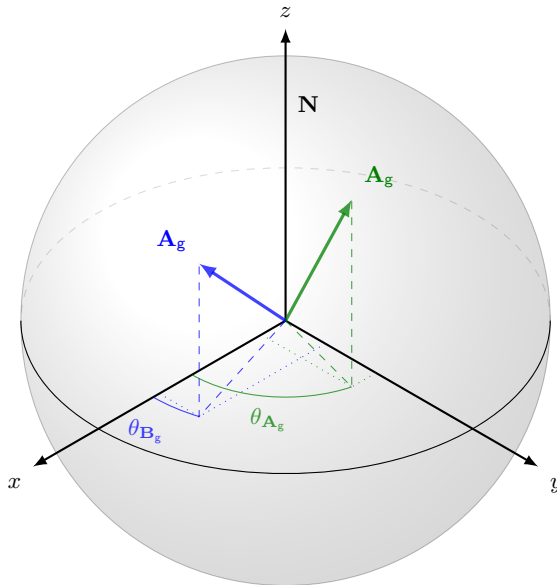
- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso e localização
- ▶ Em alguns casos, o lançamento é realizado onde não há sinal de internet
- ▶ Mas mesmo nesses casos, é possível haver o sinal da telemetria de bordo
- ▶ Utilizar métodos de AoA para determinar direção de origem do sinal

Coordenadas Geográficas



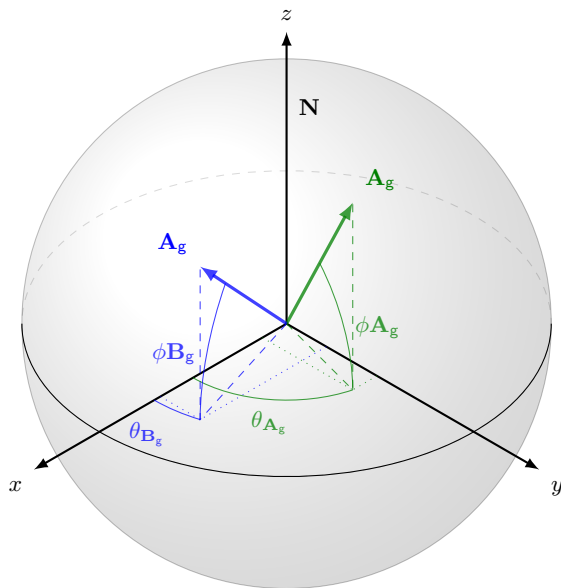
- A_g e B_g são coordenadas geográficas

Coordenadas Geográficas



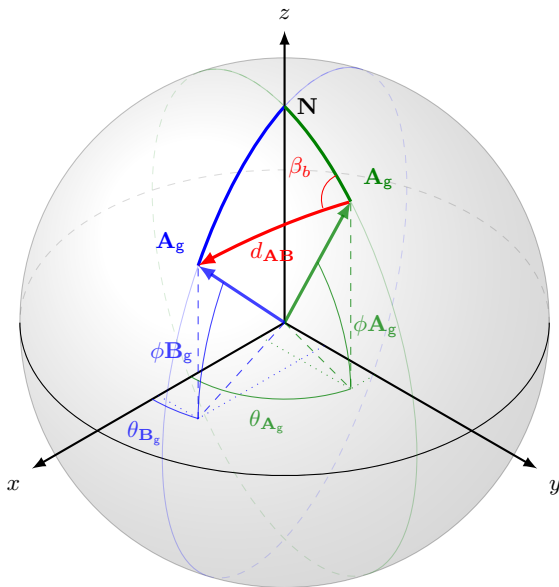
- ▶ A_g e B_g são coordenadas geográficas
- ▶ θ_{A_g} e θ_{B_g} são latitudes

Coordenadas Geográficas



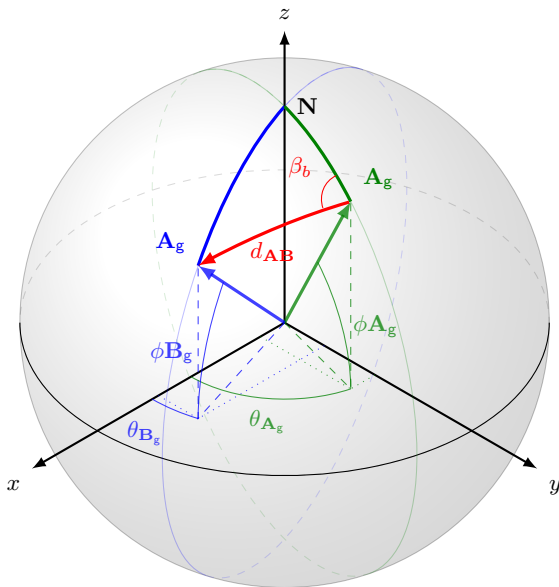
- ▶ A_g e B_g são coordenadas geográficas
- ▶ θ_{A_g} e θ_{B_g} são latitudes
- ▶ ϕ_{A_g} e ϕ_{B_g} são longitudes

Coordenadas Geográficas



- ▶ A_g e B_g são coordenadas geográficas
- ▶ θ_{A_g} e θ_{B_g} são latitudes
- ▶ ϕ_{A_g} e ϕ_{B_g} são longitudes
- ▶ Conhecendo essas informações, é possível determinar o ângulo β_b relativo entre as duas coordenadas

Coordenadas Geográficas



- ▶ A_g e B_g são coordenadas geográficas
- ▶ θ_{A_g} e θ_{B_g} são latitudes
- ▶ ϕ_{A_g} e ϕ_{B_g} são longitudes
- ▶ Conhecendo essas informações, é possível determinar o ângulo β_b relativo entre as duas coordenadas
- ▶ Também é possível determinar sua distância d_{AB}

Coordenadas Geográficas

- ▶ É necessário decodificar os dados recebidos pela telemetria do foguete;

Coordenadas Geográficas

- ▶ É necessário decodificar os dados recebidos pela telemetria do foguete;
- ▶ A precisão da busca fica dependente da precisão do GNSS;

Coordenadas Geográficas

- ▶ É necessário decodificar os dados recebidos pela telemetria do foguete;
- ▶ A precisão da busca fica dependente da precisão do GNSS;
- ▶ O método baseia-se na ideia de que a equipe de busca tem acesso à própria coordenada geográfica;

Coordenadas Geográficas

- ▶ É necessário decodificar os dados recebidos pela telemetria do foguete;
- ▶ A precisão da busca fica dependente da precisão do GNSS;
- ▶ O método baseia-se na ideia de que a equipe de busca tem acesso à própria coordenada geográfica;
- ▶ Num espaço sem acesso à internet, obter tal coordenada pode ser um problema;

Coordenadas Geográficas

- ▶ É necessário decodificar os dados recebidos pela telemetria do foguete;
- ▶ A precisão da busca fica dependente da precisão do GNSS;
- ▶ O método baseia-se na ideia de que a equipe de busca tem acesso à própria coordenada geográfica;
- ▶ Num espaço sem acesso à internet, obter tal coordenada pode ser um problema;
- ▶ Se o sinal da telemetria for fraco, pode se tornar inviável utilizar este método.

Definição de onda

$$w(x, y, t, \theta, r, \phi, \lambda, \omega) = \frac{\sin(aux) + \cos(aux)}{\sqrt{2}}$$

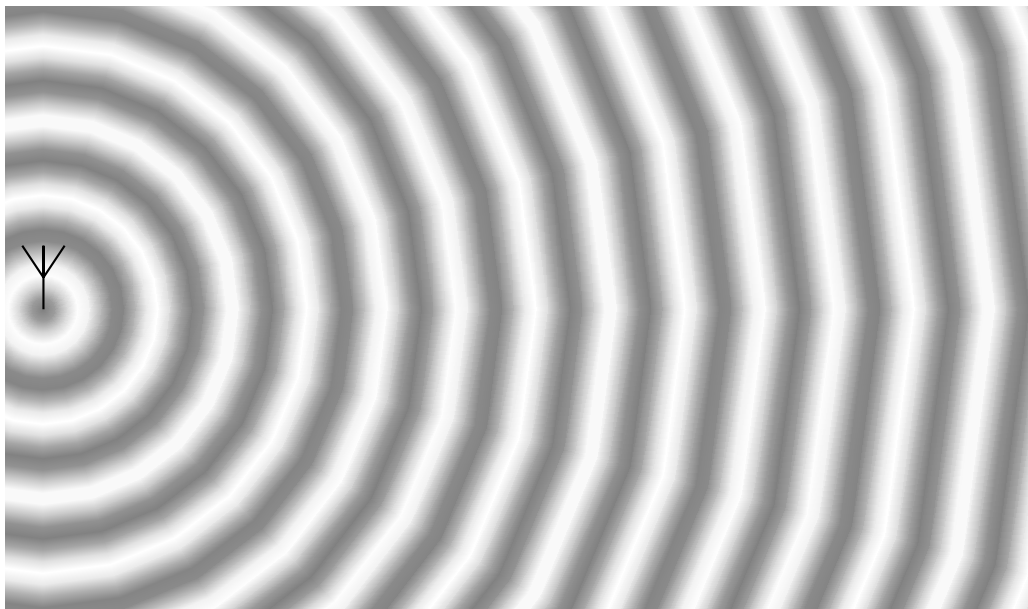
$$aux(x, y, t, \theta, r, \phi, \lambda, \omega) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2} + \omega \cdot t + \phi$$

$$x_0 = r_0 \cdot \cos(\theta)$$

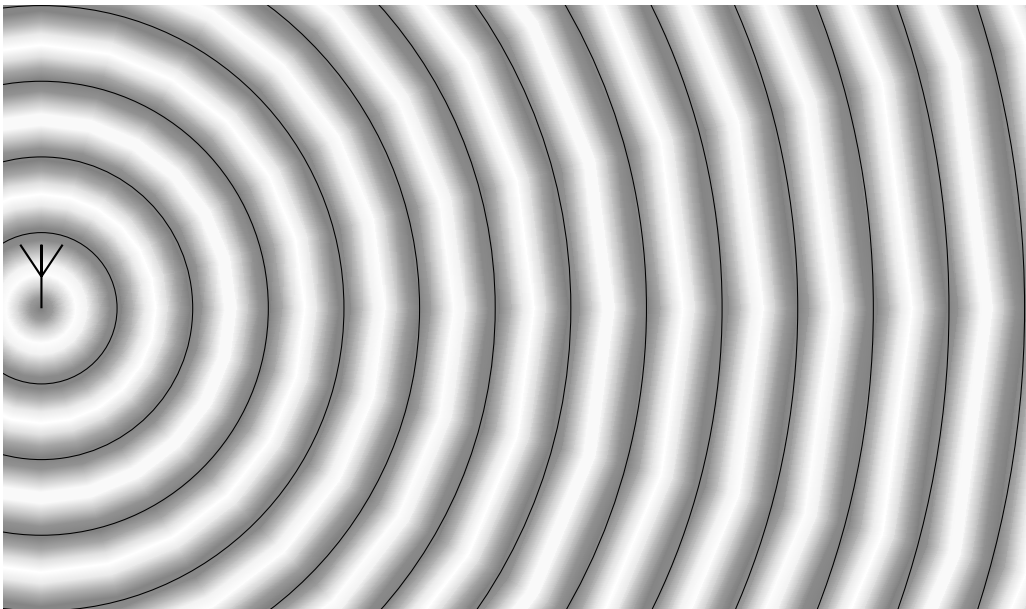
$$y_0 = r_0 \cdot \sin(\theta)$$

$$r_0 = r \cdot \lambda$$

Emissão de sinal radial



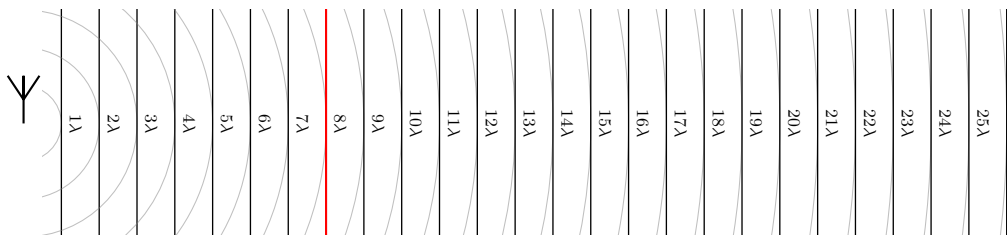
Frentes de onda



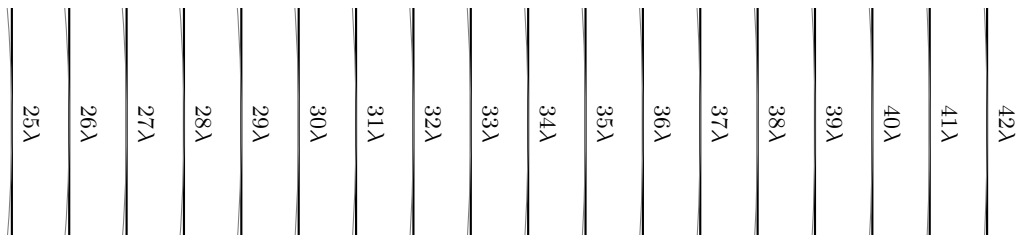
Representação de frentes de onda



Comportamento da onda no espaço próximo

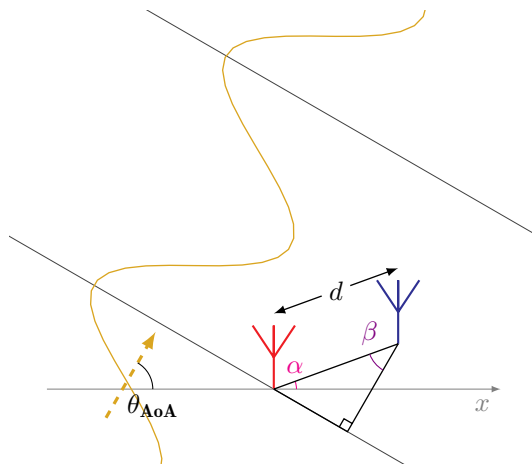


Comportamento da onda em espaço distante (*far field*)



Angle of Arrival

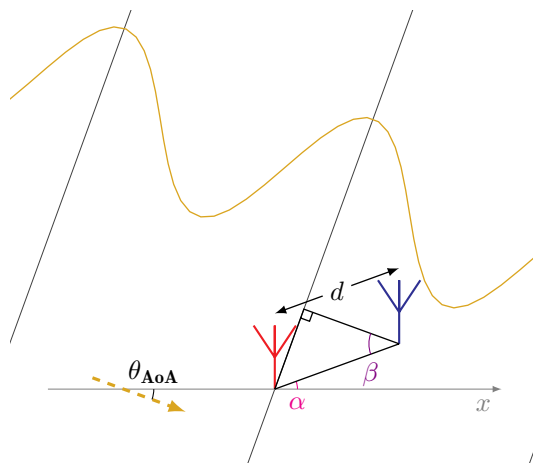
$$\theta_{\text{AoA}} = 60^\circ, \alpha_k = 20^\circ, \beta_{\pm k} = 40^\circ$$



Fonte: Autor.

Angle of Arrival

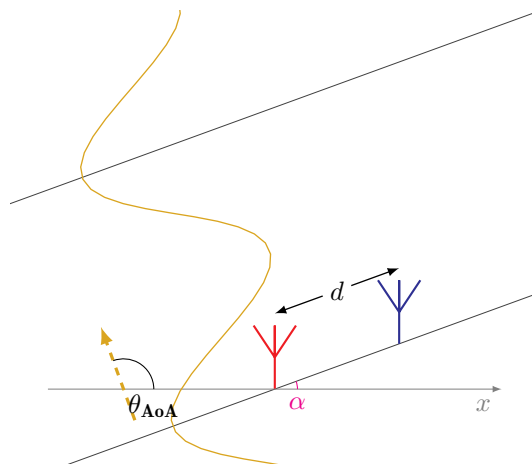
$$\theta_{AoA} = -20^\circ, \alpha_k = 20^\circ, \beta_{\pm k} = 40^\circ$$



Fonte: Autor.

Angle of Arrival

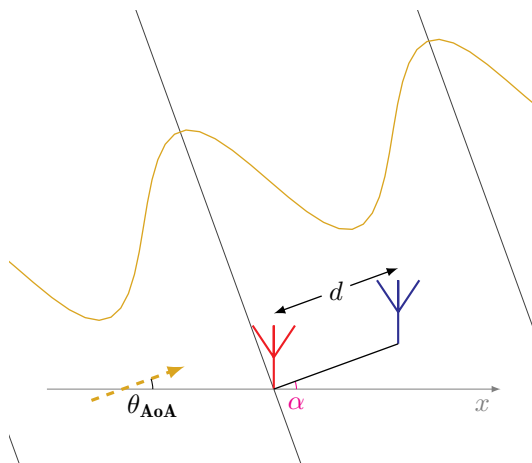
$$\theta_{\text{AoA}} = 110^\circ, \alpha_k = 20^\circ, \beta_{\pm k} = 90^\circ$$



Fonte: Autor.

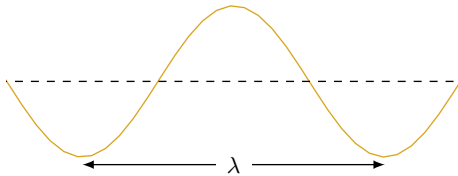
Angle of Arrival

$$\theta_{\text{AoA}} = 20^\circ, \alpha_k = 20^\circ, \beta_{\pm k} = 0^\circ$$

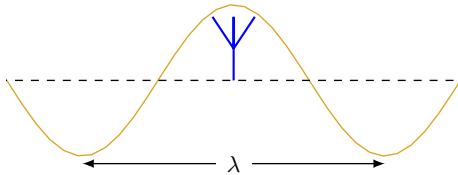


Fonte: Autor.

Distância d

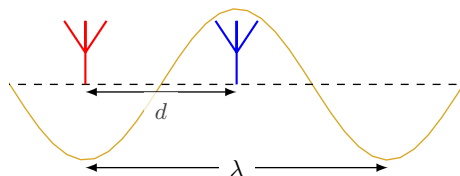


Distância d



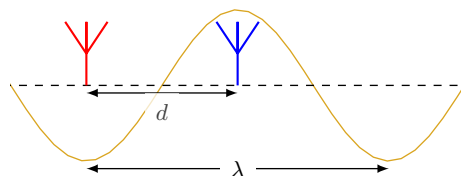
- Toma-se uma **antena** como referência

Distância d



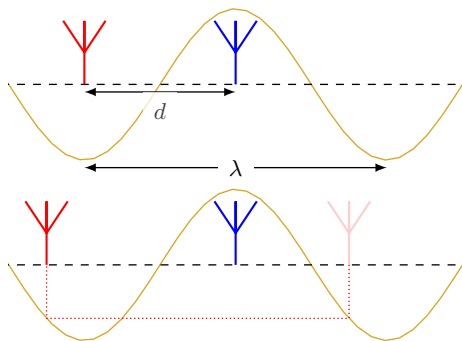
- Toma-se uma **antena** como referência
- Posiciona-se uma **segunda antena** a uma distância d determinada

Distância d



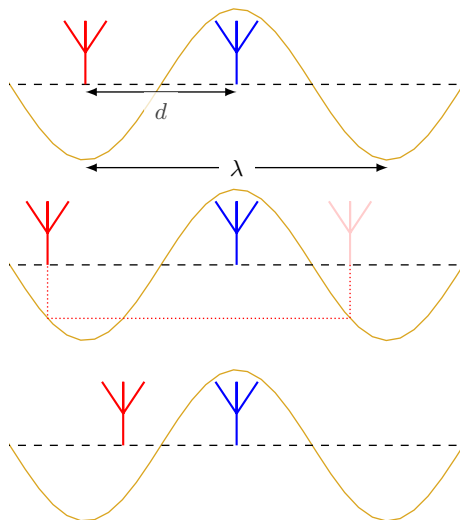
- Toma-se uma **antena** como referência
- Posiciona-se uma **segunda antena** a uma distância d determinada
- Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal

Distância d



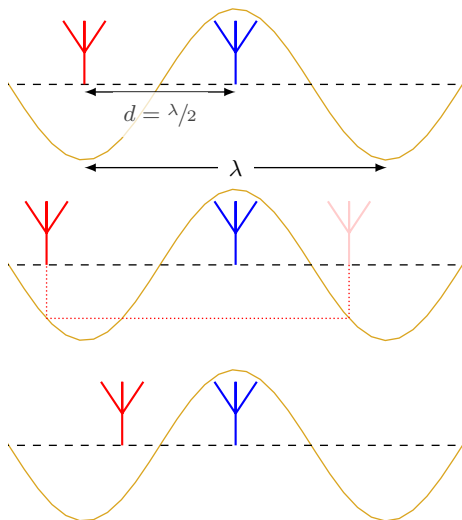
- Toma-se uma **antena** como referência
- Posiciona-se uma **segunda antenna** a uma distância d determinada
- Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal
- Se a distância for maior que $\lambda/2$, haverá conflito de defasagem

Distância d



- ▶ Toma-se uma **antena** como referência
- ▶ Posiciona-se uma **segunda antenna** a uma distância d determinada
- ▶ Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal
- ▶ Se a distância for maior que $\lambda/2$, haverá conflito de defasagem
- ▶ Se for menor, há perda de resolução

Distância d



- ▶ Toma-se uma **antena** como referência
- ▶ Posiciona-se uma **segunda antena** a uma distância d determinada
- ▶ Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal
- ▶ Se a distância for maior que $\lambda/2$, haverá conflito de defasagem
- ▶ Se for menor, há perda de resolução
- ▶ Adota-se a distância de $d = \lambda/2$

Geometria da malha de antenas

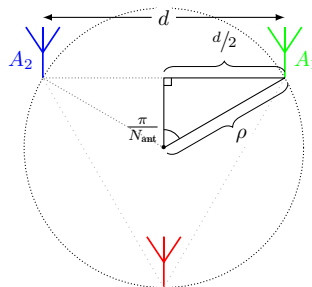
$$\rho = \frac{d}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N_{\text{ant}}}\right)}$$

$$k = \{1, 2, \dots, N_{\text{ant}}\}$$

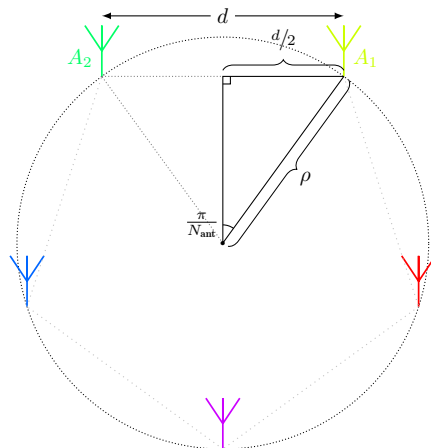
$$A_k = \rho \cdot \exp\left(i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N_{\text{ant}}}\right) = (\mathcal{R}e(A_k), \mathcal{I}m(A_k)) = (x_{A_k}, y_{A_k})$$

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

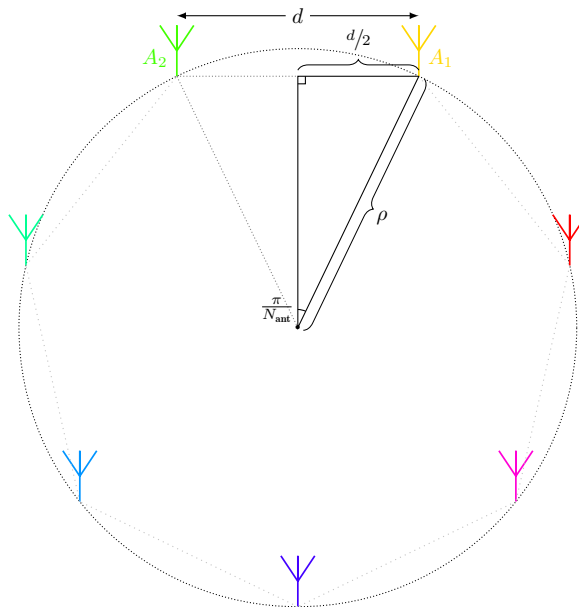
Três antenas



Cinco antenas



Sete antenas



Cálculo de defasagem

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

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

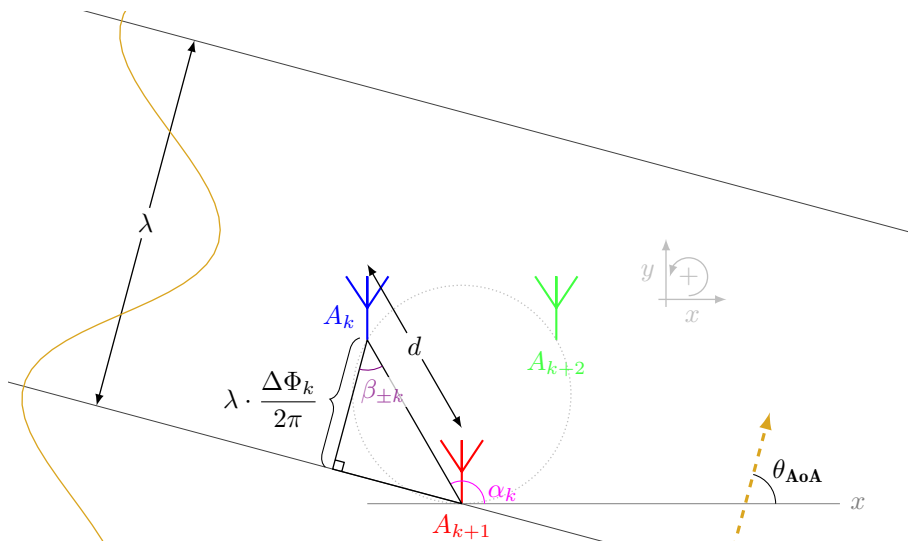
$$Q_k = \int_0^T \sin(\omega \cdot \tau) \cdot w(x_{A_k}, y_{A_k}, \tau) \partial \tau$$

$$Z_k = \frac{\omega}{\pi} \cdot (I_k + iQ_k)$$

$$\Delta_{\Phi} = \Phi_k - \Phi_{k+1} = \arg(Z_k) - \arg(Z_{k+1}) = \arg(Z_k \cdot \overline{Z_{k+1}})$$

$$\beta_{\pm k} = \arccos\left(\frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\Delta_{\Phi}}{2\pi}\right)$$

Geometria do sistema



Determinar AoA

$$\theta_{\pm k} = \alpha_k \pm \beta_{\pm k}$$

$$\Theta = \{\theta_{\pm k} \mid \forall k\}$$

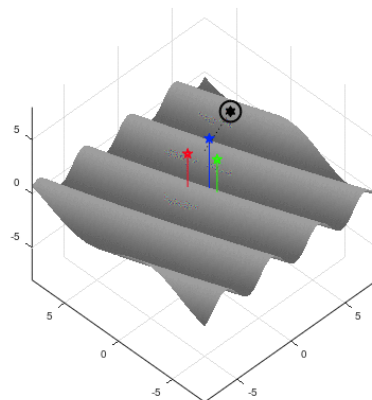
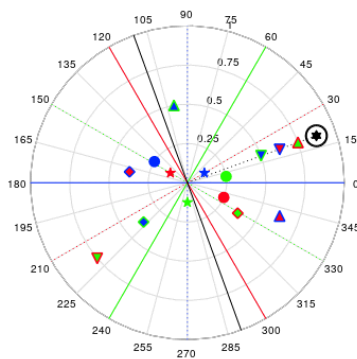
$$\delta = \frac{\pi}{2 \cdot (1 + N_{\text{ant}})}$$

$$\Theta_{[\cdot, \cdot]} = \left\{ \left\lfloor \frac{\theta}{\delta} \right\rfloor \cdot \delta \mid \forall \theta \in \Theta \right\}$$

$$\theta_{\mathcal{M}_o} = \mathcal{M}_o(\Theta_{[\cdot, \cdot]})$$

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

$$\theta_{\text{AoA}} = \widetilde{\Theta_F}$$

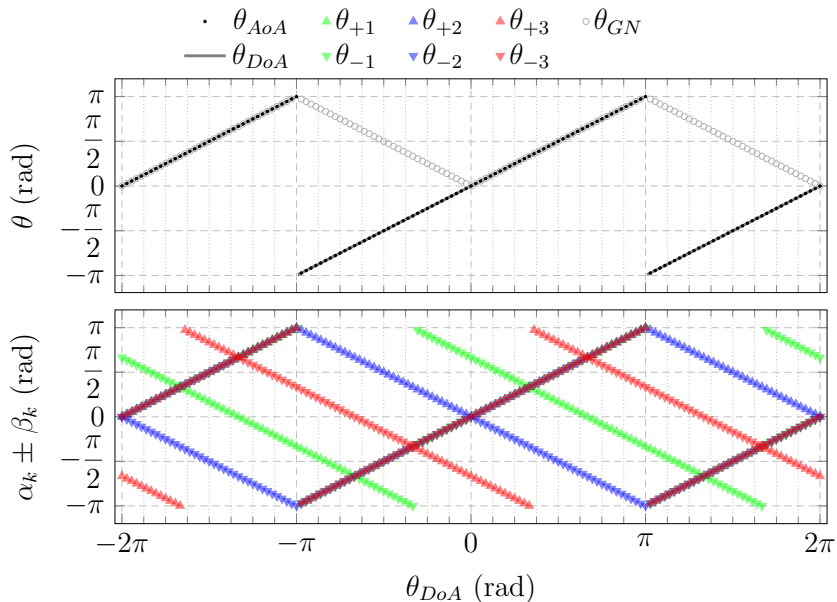


R² para três antenas

SNR (dB)	Sem ATT			Com ATT		
	R ² (%)	G-N R ² (%)	G-N válidos (%)	R ² (%)	G-N R ² (%)	G-N válidos (%)
∞	100,00	100,00	98.62	100,00	100,00	100.00
20	88,78	0,23	84.14	95,85	2,25	86.90
17	82,09	0,26	86.90	89,95	3,44	86.90
14	96,10	0,13	88.28	97,83	0,03	83.45
7	78,56	1,61	88.28	92,02	1,39	88.97
0	82,35	3,40	86.90	77,93	0,10	85.52

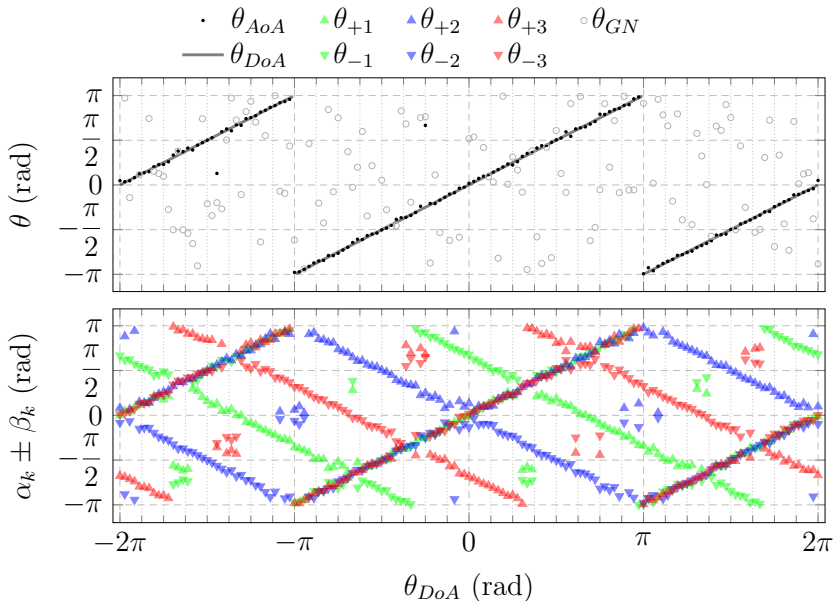
Fonte: Autor, saídas das simulações disponíveis em [GitHub](#).

Caso ideal ($\text{SNR} \rightarrow \infty \text{ dB}$).



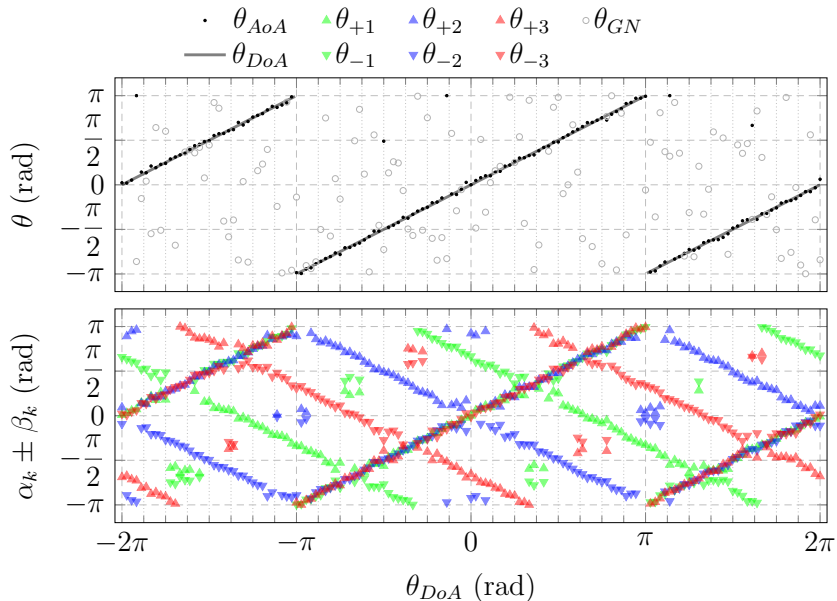
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

Caso SNR = 0 dB, sem atenuação.



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

Caso SNR = 0 dB, com atenuação.



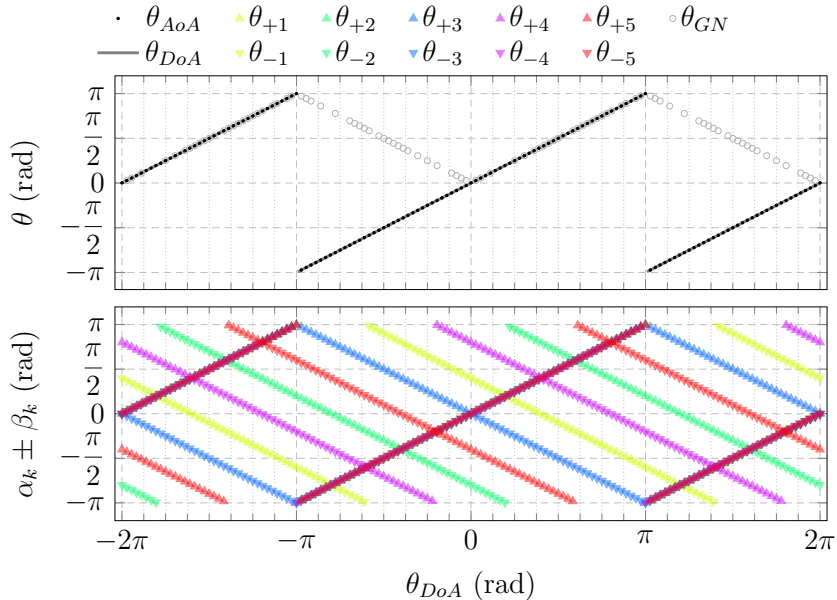
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

R² para cinco antenas

SNR (dB)	Sem ATT			Com ATT		
	R ² (%)	G-N R ² (%)	G-N válidos (%)	R ² (%)	G-N R ² (%)	G-N válidos (%)
∞	100,00	100,00	67.59	100,00	100,00	70.34
20	100,00	19,79	24.83	100,00	13,56	22.76
17	100,00	7,50	20.69	91,90	0,04	20.69
14	84,26	0,75	23.45	84,24	0,03	24.14
7	99,99	0,93	21.38	99,99	0,06	15.86
0	76,30	0,87	22.07	82,43	7,77	16.55

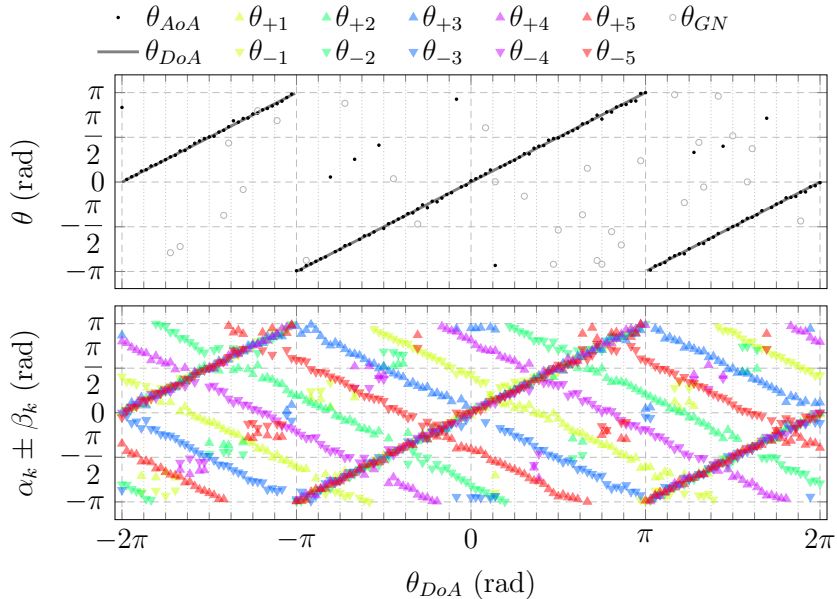
Fonte: Autor, saídas das simulações disponíveis em [GitHub](#).

Caso ideal ($\text{SNR} \rightarrow \infty \text{ dB}$).



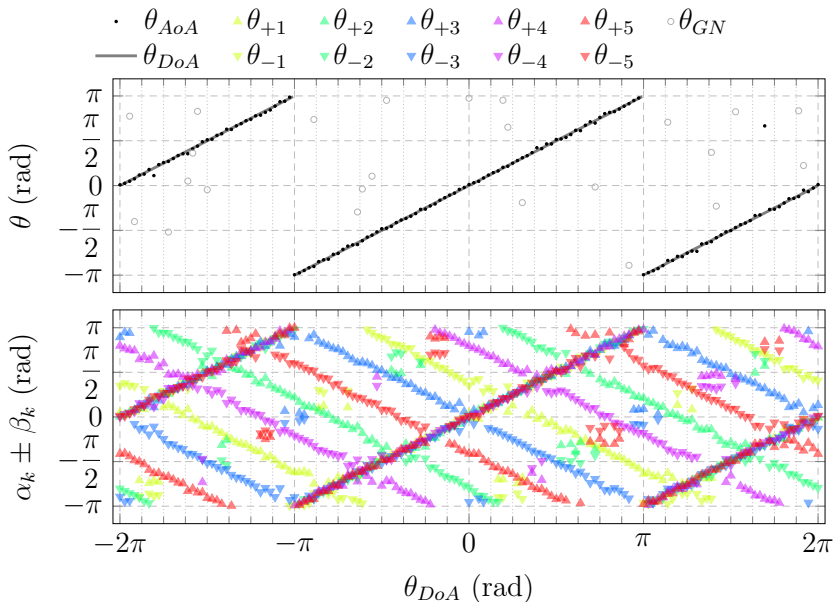
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

Caso SNR = 0 dB, sem atenuação.



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

Caso SNR = 0 dB, com atenuação.



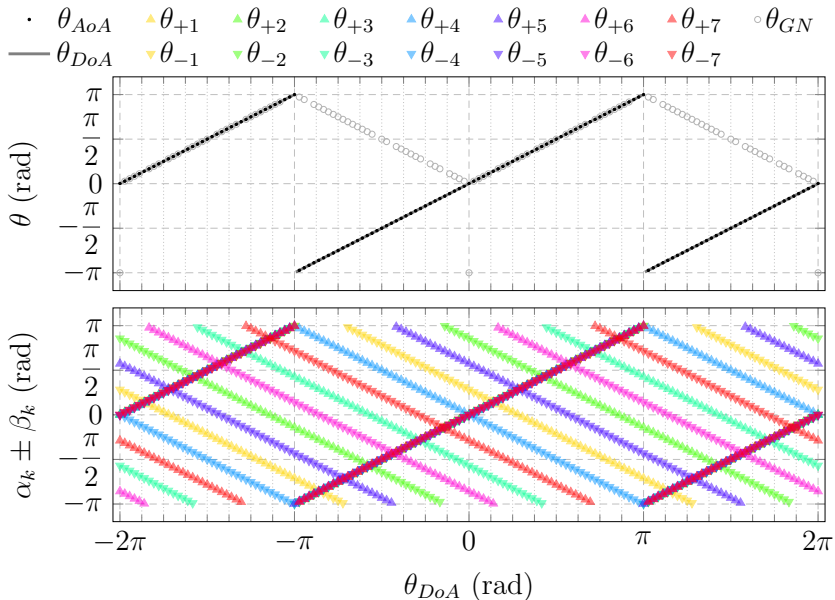
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

R² para sete antenas

SNR (dB)	Sem ATT			Com ATT		
	R ² (%)	G-N R ² (%)	G-N válidos (%)	R ² (%)	G-N R ² (%)	G-N válidos (%)
∞	100,00	82,53	82.07	100,00	100,00	75.86
20	100,00	9,97	26.21	100,00	2,59	31.03
17	100,00	9,14	14.48	84,25	15,84	21.38
14	91,90	1,41	24.83	84,24	6,51	27.59
7	84,23	9,35	22.07	91,90	4,84	20.00
0	91,86	7,95	22.07	84,20	0,14	23.45

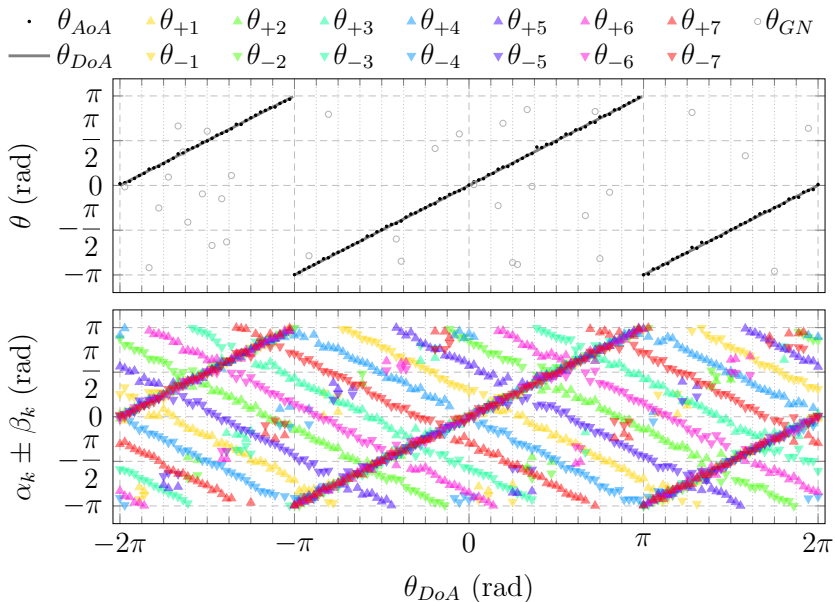
Fonte: Autor, saídas das simulações disponíveis em [GitHub](#).

Caso ideal ($\text{SNR} \rightarrow \infty \text{ dB}$).



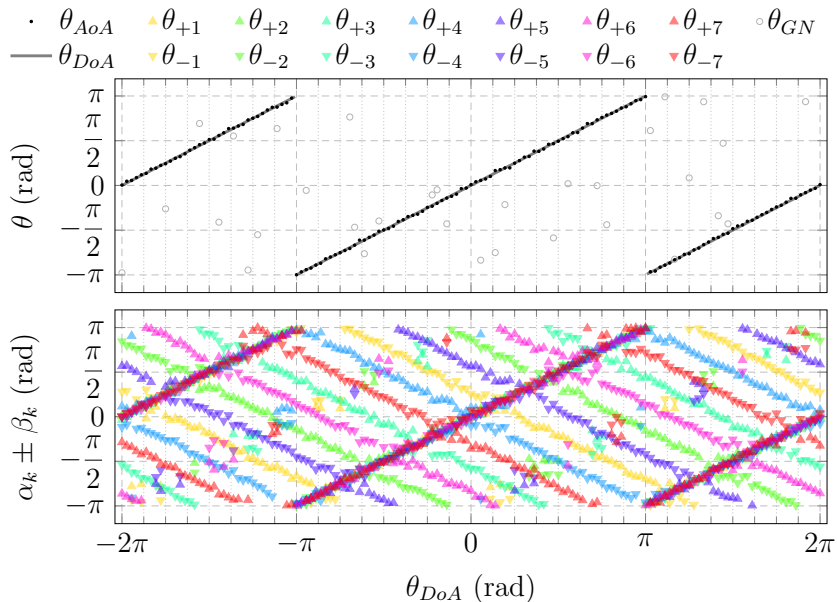
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

Caso SNR = 0 dB, sem atenuação.



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

Caso SNR = 0 dB, com atenuação.



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

Conclusão

- ▶ É necessário ter uma boa estratégia para localizar um foguete de sondagem;

Conclusão

- ▶ É necessário ter uma boa estratégia para localizar um foguete de sondagem;
- ▶ Para utilizar um GNSS, é necessário decodificar o sinal recebido;

Conclusão

- ▶ É necessário ter uma boa estratégia para localizar um foguete de sondagem;
- ▶ Para utilizar um GNSS, é necessário decodificar o sinal recebido;
- ▶ Mesmo com o sinal detectável, ainda é possível ter problemas para decodificá-lo;

Conclusão

- ▶ É necessário ter uma boa estratégia para localizar um foguete de sondagem;
- ▶ Para utilizar um GNSS, é necessário decodificar o sinal recebido;
- ▶ Mesmo com o sinal detectável, ainda é possível ter problemas para decodificá-lo;
- ▶ Analisando a defasagem do sinal entre pares de antenas torna possível estimar o AoA;

Conclusão

- ▶ É necessário ter uma boa estratégia para localizar um foguete de sondagem;
- ▶ Para utilizar um GNSS, é necessário decodificar o sinal recebido;
- ▶ Mesmo com o sinal detectável, ainda é possível ter problemas para decodificá-lo;
- ▶ Analisando a defasagem do sinal entre pares de antenas torna possível estimar o AoA;
- ▶ Cada par de antenas gera dois possíveis ângulos candidatos;

Conclusão

- ▶ É necessário ter uma boa estratégia para localizar um foguete de sondagem;
- ▶ Para utilizar um GNSS, é necessário decodificar o sinal recebido;
- ▶ Mesmo com o sinal detectável, ainda é possível ter problemas para decodificá-lo;
- ▶ Analisando a defasagem do sinal entre pares de antenas torna possível estimar o AoA;
- ▶ Cada par de antenas gera dois possíveis ângulos candidatos;
- ▶ A proposta utilizando votação se mostrou eficaz.

Conclusão

- Dispor as antenas da malha nos vértices de um polígono regular simplificou os cálculos;

Conclusão

- ▶ Dispor as antenas da malha nos vértices de um polígono regular simplificou os cálculos;
- ▶ Polígonos com quantidade par de lados sempre terão lados paralelos;

Conclusão

- ▶ Dispor as antenas da malha nos vértices de um polígono regular simplificou os cálculos;
- ▶ Polígonos com quantidade par de lados sempre terão lados paralelos;
- ▶ Mais pares na malha levaram a maior precisão nos valores obtidos;

Conclusão

- ▶ Dispor as antenas da malha nos vértices de um polígono regular simplificou os cálculos;
- ▶ Polígonos com quantidade par de lados sempre terão lados paralelos;
- ▶ Mais pares na malha levaram a maior precisão nos valores obtidos;
- ▶ O valor mínimo de R^2 obtido foi superior a 75 %;

Conclusão

- ▶ Dispor as antenas da malha nos vértices de um polígono regular simplificou os cálculos;
- ▶ Polígonos com quantidade par de lados sempre terão lados paralelos;
- ▶ Mais pares na malha levaram a maior precisão nos valores obtidos;
- ▶ O valor mínimo de R^2 obtido foi superior a 75 %;
- ▶ O valor médio de R^2 obtido foi superior a 92 %;

Conclusão

- ▶ Dispor as antenas da malha nos vértices de um polígono regular simplificou os cálculos;
- ▶ Polígonos com quantidade par de lados sempre terão lados paralelos;
- ▶ Mais pares na malha levaram a maior precisão nos valores obtidos;
- ▶ O valor mínimo de R^2 obtido foi superior a 75 %;
- ▶ O valor médio de R^2 obtido foi superior a 92 %;
- ▶ Houveram problemas relacionados ao uso de *software* livre e a manter a compatibilidade entre o GNU Octave e o MATLAB;.

Melhorias futuras

- Analisar diferentes disposições de antenas na malha, já que os cálculos não exigem a disposição poligonal;

Melhorias futuras

- ▶ Analisar diferentes disposições de antenas na malha, já que os cálculos não exigem a disposição poligonal;
- ▶ Contemplar outros tipos de ruído pode acrescentar ao modelo;

Melhorias futuras

- ▶ Analisar diferentes disposições de antenas na malha, já que os cálculos não exigem a disposição poligonal;
- ▶ Contemplar outros tipos de ruído pode acrescentar ao modelo;
- ▶ Construir um *hardware* capaz de aferir a defasagem em uma malha de antenas poderá contribuir para simulações mais completas.

Perguntas?

Obrigado!