

# 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

Contextualização

Objetivos

Posicionamento por GPS

Emissão de sinais

Onda plana

Posicionamento por AoA

Matriz de antenas

Cálculo de Ângulo de chegada

Finalização

Finalização

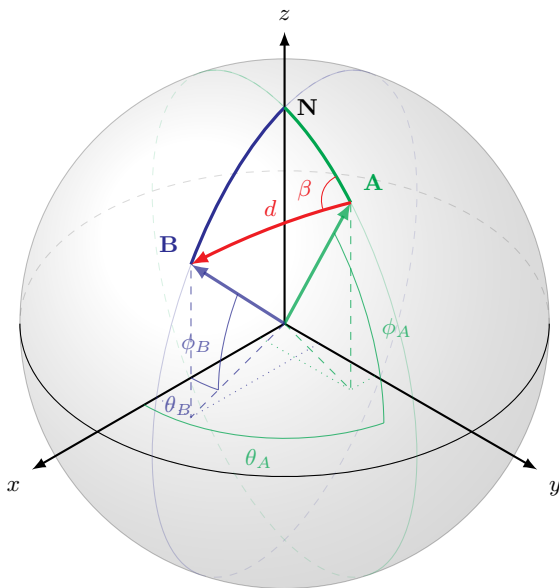
# Foguetes de sondagem

- ▶ 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

# Objetivos

- ▶ Construir um equipamento capaz de localizar o foguete
- ▶ Utilizar métodos de AoA para determinar direção de origem do sinal
- ▶ Comparar a performance com um sistema semelhante baseado em GPS
- ▶ Fazer um sistema portátil, para ser levado em campo

# Coordenadas Geográficas



- ▶  $A$  e  $B$  são coordenadas geográficas
- ▶  $\theta_A$  e  $\theta_B$  são latitudes
- ▶  $\phi_A$  e  $\phi_B$  são longitudes
- ▶ Conhecendo essas informações, é possível determinar o ângulo  $\beta$  relativo entre as duas coordenadas
- ▶ Também é possível determinar sua distância

# Cálculo de Bearing

$$\Delta\theta = \theta_B - \theta_A$$

$$\Delta\phi = \phi_B - \phi_A$$

$$X = \cos(\theta_B) \cdot \sin(\Delta\phi)$$

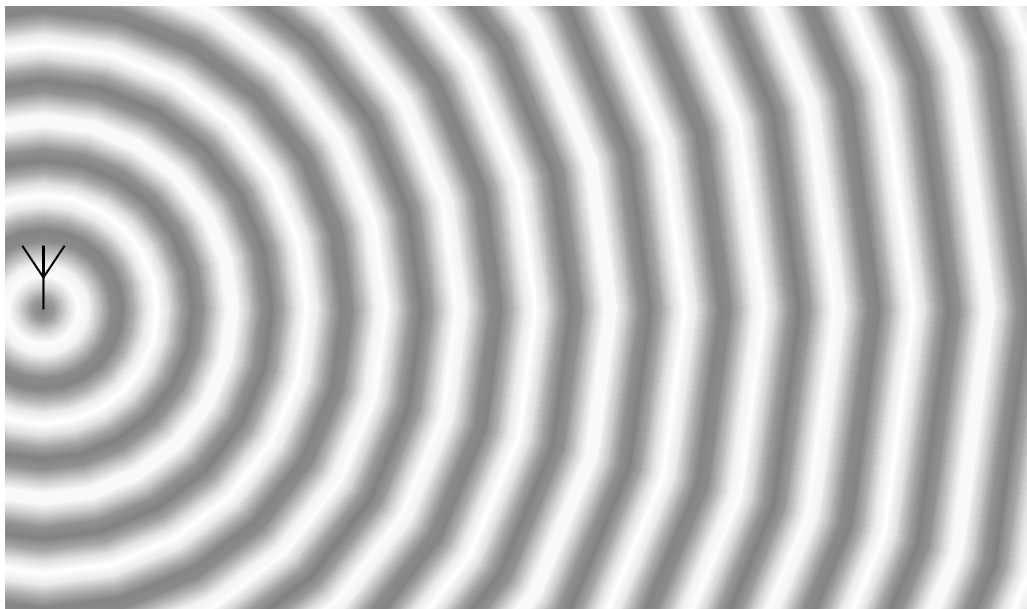
$$Y = \cos(\theta_A) \cdot \sin(\theta_B) - \sin(\theta_A) \cdot \cos(\theta_B) \cdot \cos(\Delta\phi)$$

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

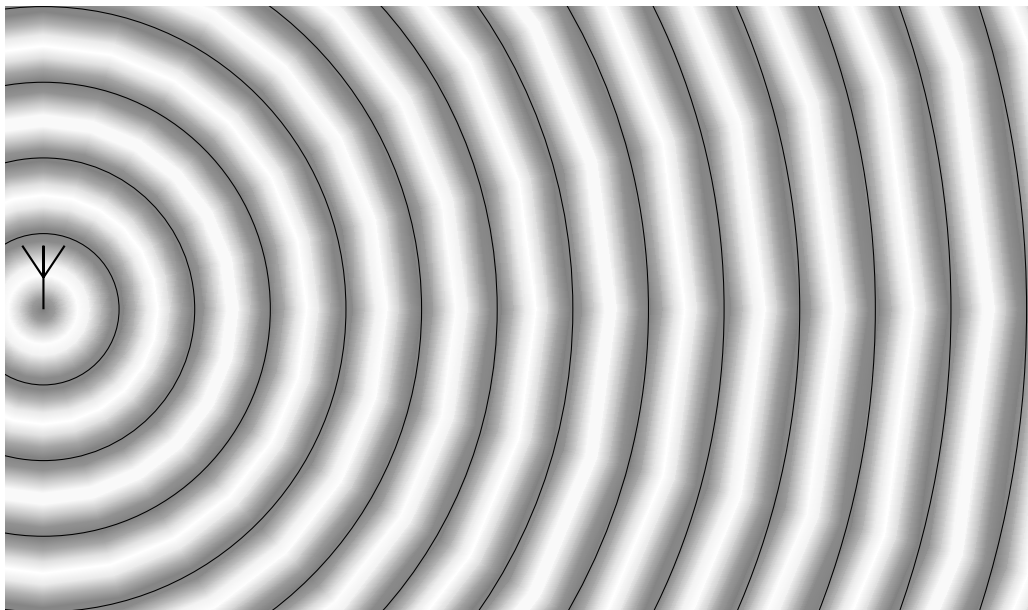
$$\beta = \arctan\left(\frac{X}{Y}\right)$$

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

# Emissão de sinal radial



# Frentes de onda

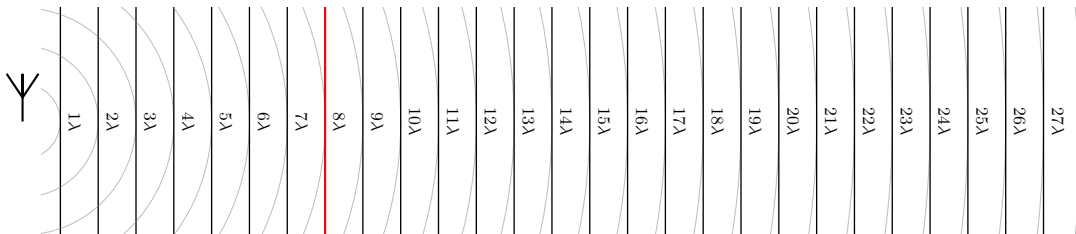




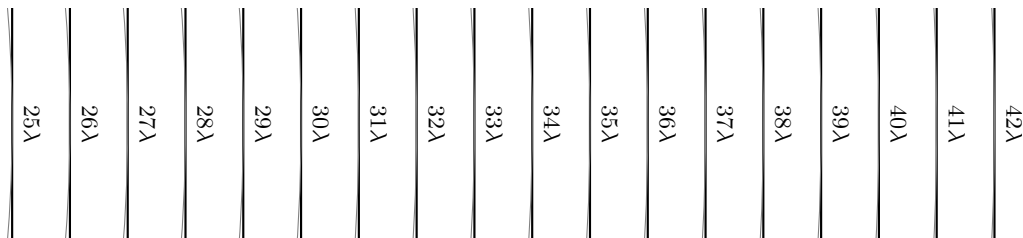
# Representação de frentes de onda



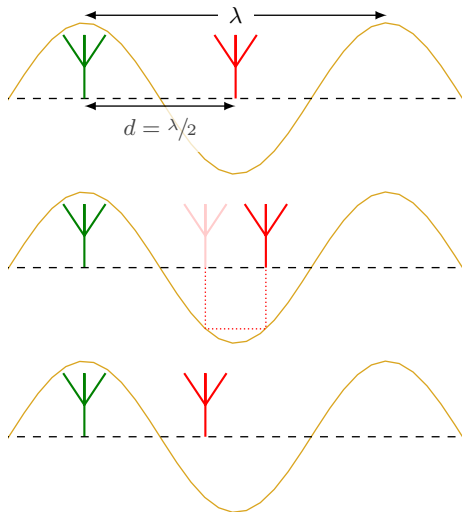
# Comportamento da onda no espaço próximo



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

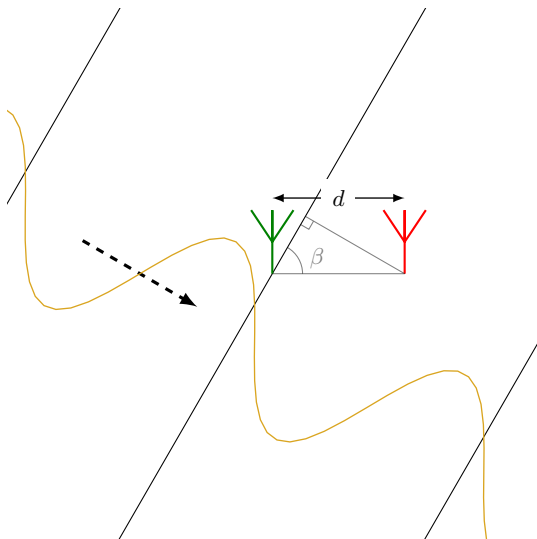


# Estimar defasagem

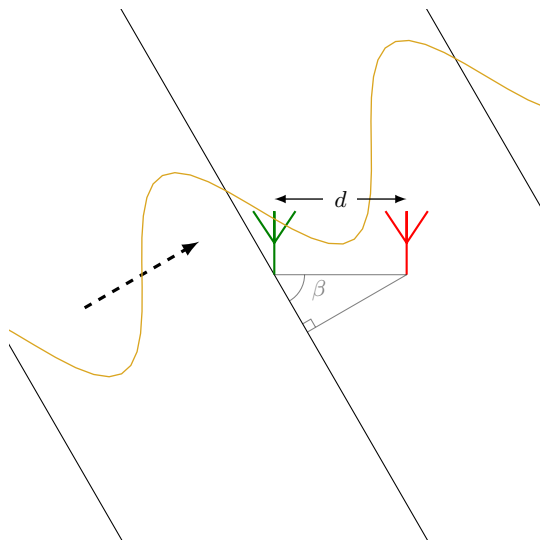


- ▶ Toma-se uma **antena** como referência
- ▶ Posiciona-se uma segunda **antena** a uma distância determinada
- ▶ Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal
- ▶ Se a distância for maior que  $\lambda/2$ , haverá conflito de defasagem
- ▶ Se for menor,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

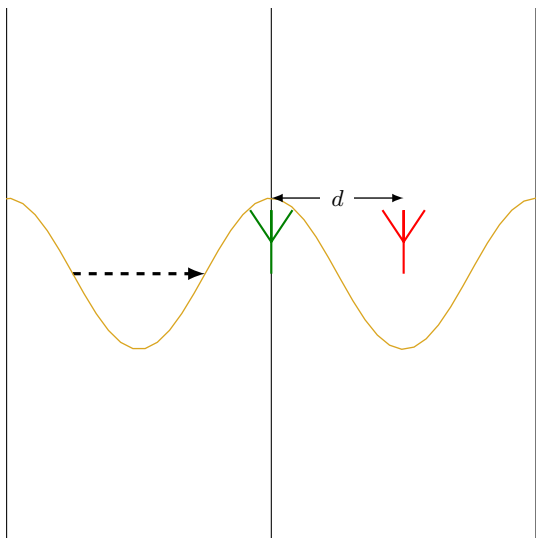
# Angle of Arrival



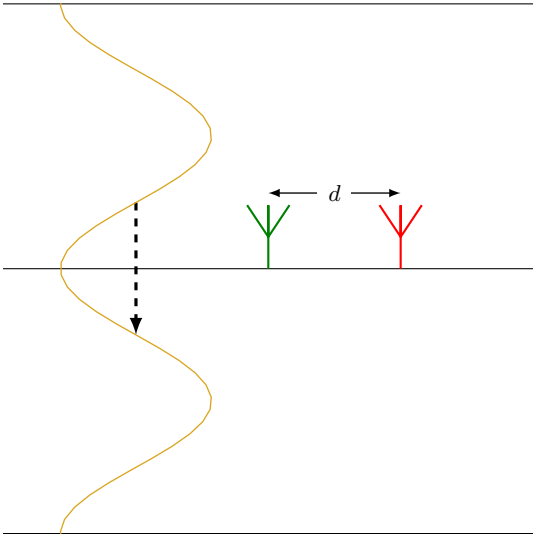
# Angle of Arrival



# Angle of Arrival

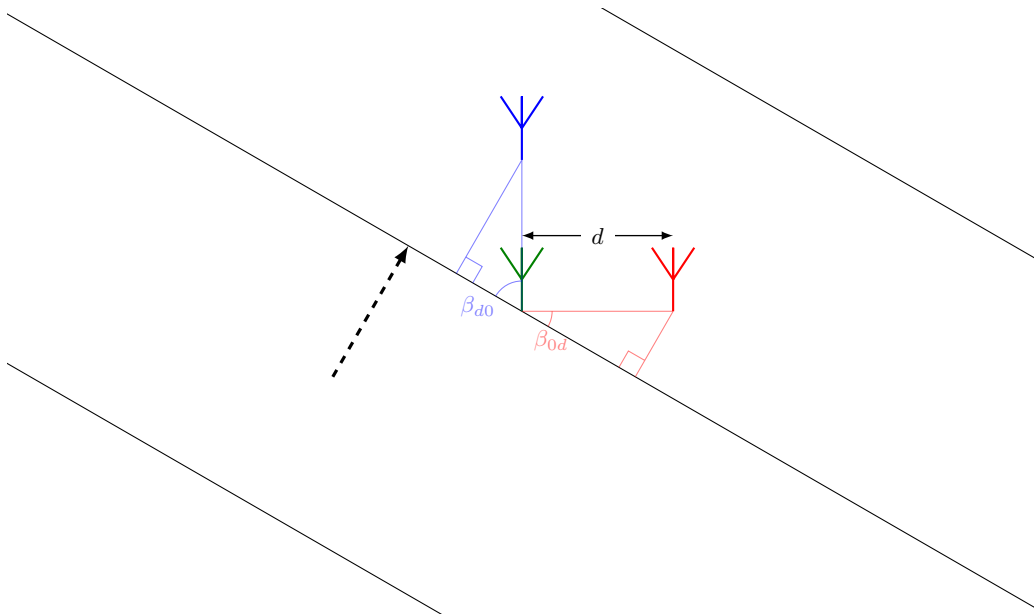


# Angle of Arrival





# Angle of Arrival



# Definição de onda

$$r = r_{\omega} \cdot \lambda$$

$$x_0 = r \cdot \cos(\theta_{\omega})$$

$$y_0 = r \cdot \sin(\theta_{\omega})$$

$$k(x, y, t, \theta_{\omega}, r_{\omega}, \lambda, \omega) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2} + \omega \cdot t$$

$$w(x, y, t, \theta_{\omega}, r_{\omega}, \lambda, \omega) = \sin(k + \phi) + \cos(k + \phi)$$

# Análise de vetores complexos

$$C(x, y) = \int_0^T w(x, y, t) \cdot \cos(k(x, y, t)) \partial t$$

$$S(x, y) = \int_0^T w(x, y, t) \cdot \sin(k(x, y, t)) \partial t$$

$$Z(x, y) = 2 \cdot (S + \imath C)$$

$$\Delta_{x,y} = \arg(Z_{0,0} \cdot Z_{x,y}^*)$$

$$\text{componente}_{x,y} = -\frac{\Delta_{x,y}}{\pi} \cdot \frac{\cancel{d} \cdot \lambda}{2} = -\frac{\Delta_{x,y}}{\pi}$$

# Simulações!

# Perguntas?

# Perguntas?

# Obrigado!