

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

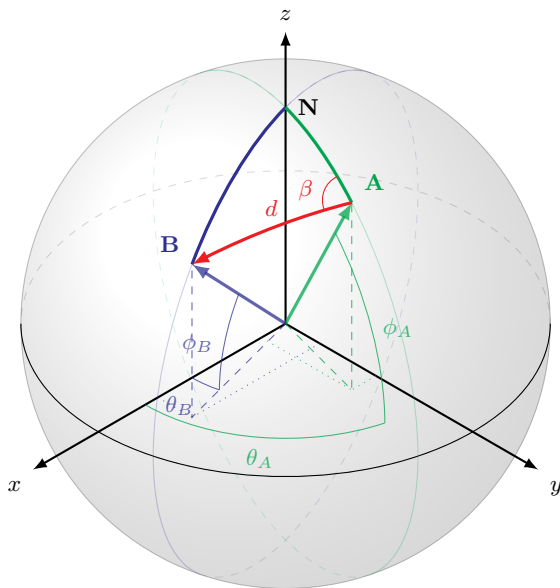
Foguetes de sondagem

- ▶ 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
- ▶ θ_A e θ_B são latitudes
- ▶ ϕ_A e ϕ_B são longitudes
- ▶ Conhecendo essas informações, é possível determinar o ângulo β relativo entre as duas coordenadas
- ▶ Também é possível determinar sua distância

Cálculo de Bearing

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

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

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

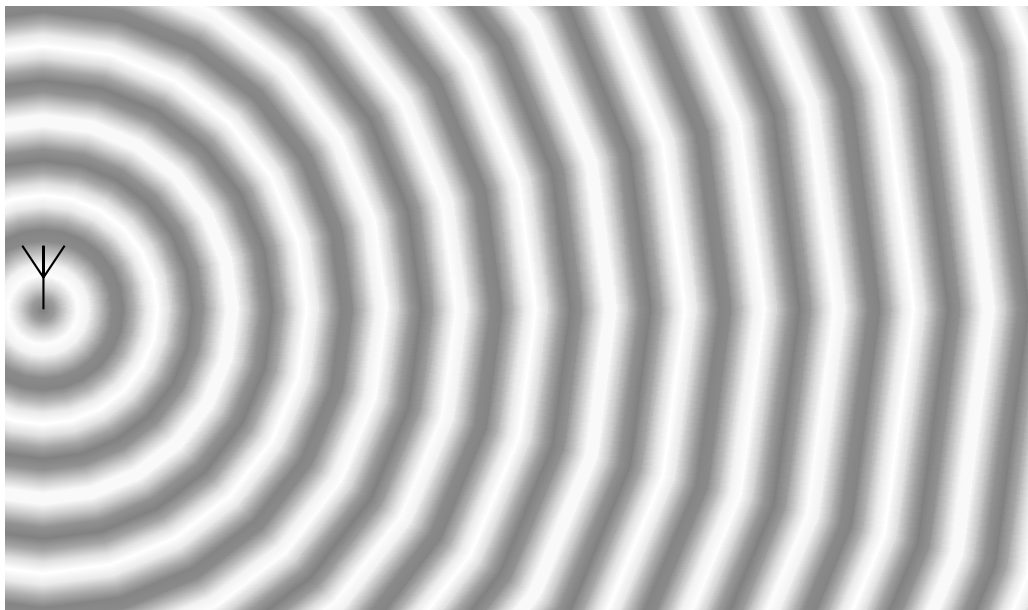
$$Y = \cos(\theta_A) \cdot \sin(\theta_B) - \sin(\theta_A) \cdot \cos(\theta_B) \cdot \cos(\Delta\phi)$$

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

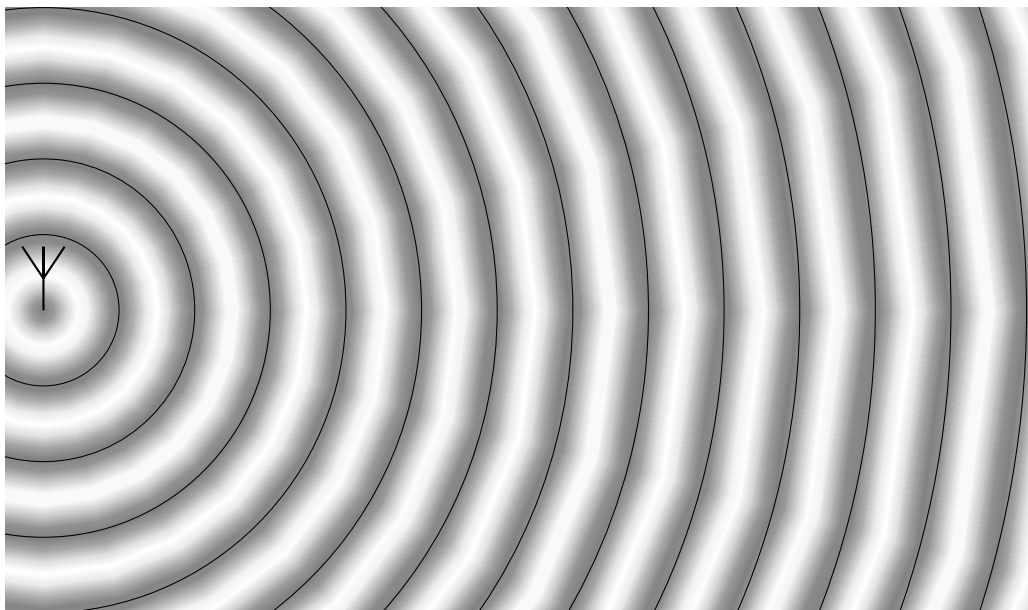
$$\beta = \arctan\left(\frac{X}{Y}\right)$$

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

Emissão de sinal radial



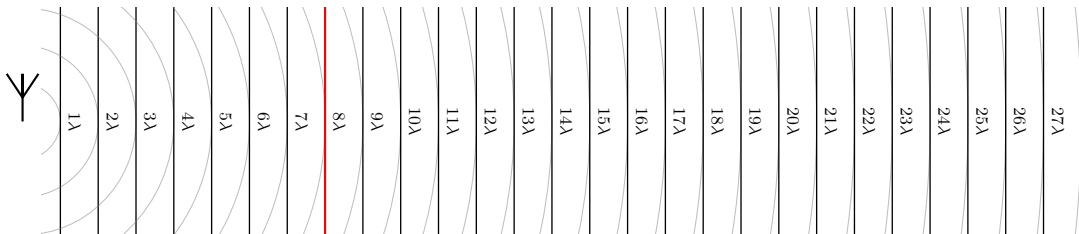
Frentes de onda



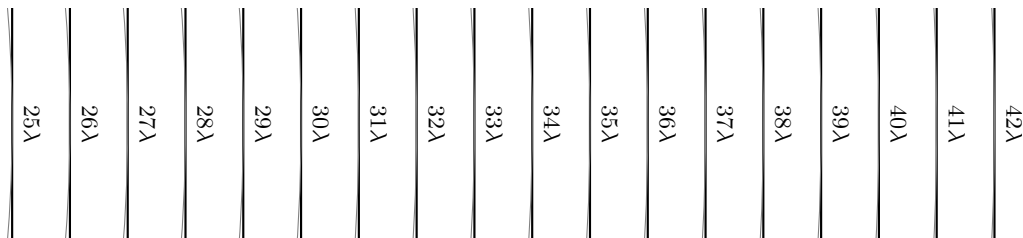
Representação de frentes de onda



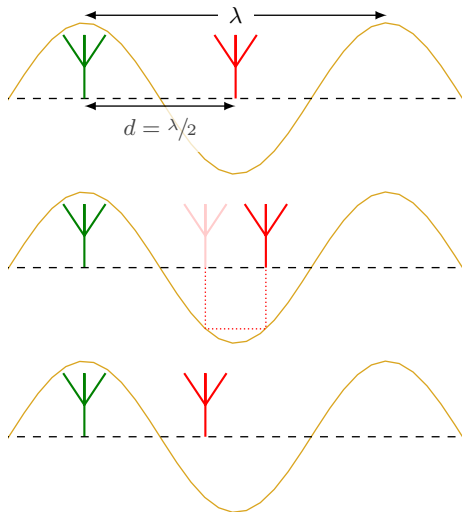
Comportamento da onda no espaço próximo



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

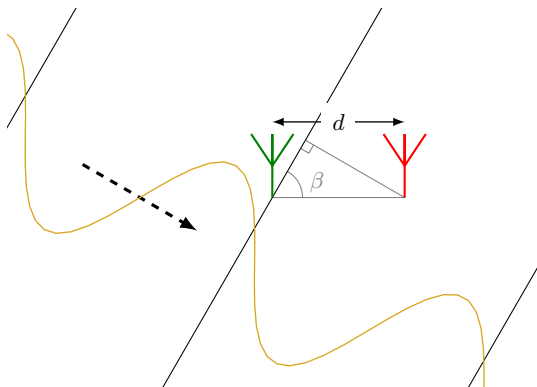


Estimar defasagem

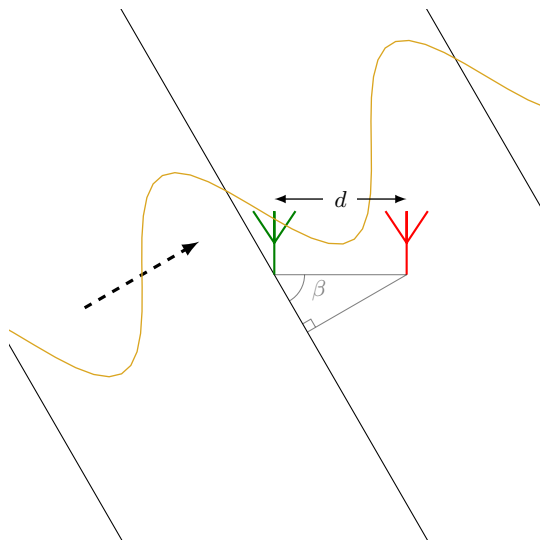


- ▶ Toma-se uma **antena** como referência
- ▶ Posiciona-se uma segunda **antena** a uma distância determinada
- ▶ Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal
- ▶ Se a distância for maior que $\lambda/2$, haverá conflito de defasagem
- ▶ Se for menor,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

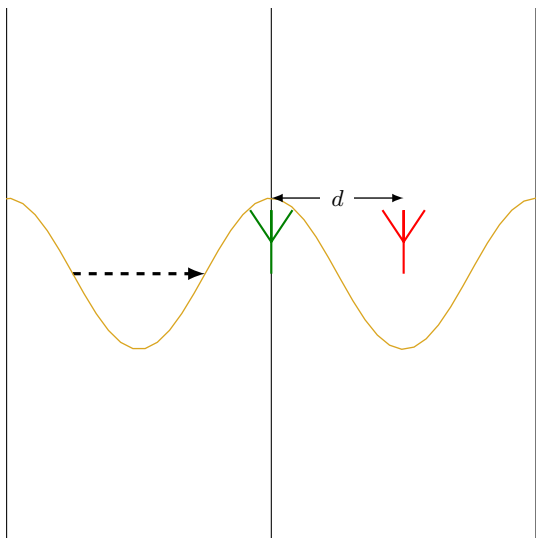
Angle of Arrival



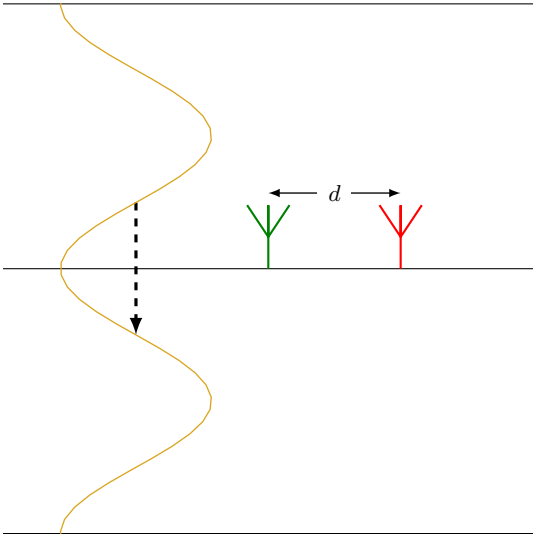
Angle of Arrival



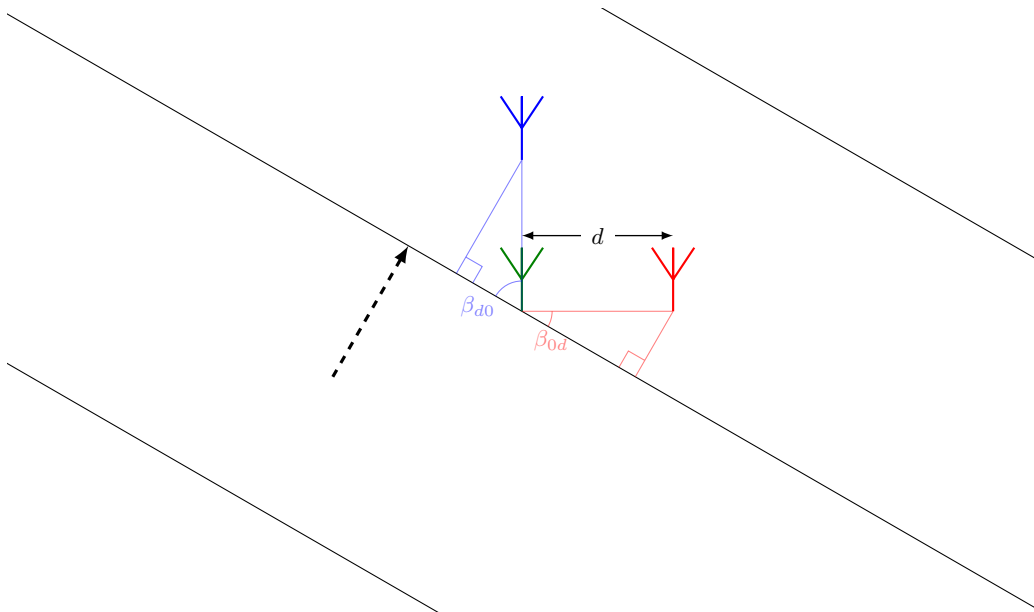
Angle of Arrival



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

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

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

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

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

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

Simulações!

Perguntas?

Perguntas?

Obrigado!