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

Contextualização

Introdução

Foguetes de sondagem

Posicionamento por GPS

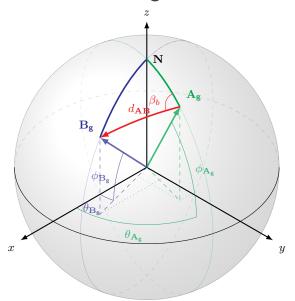
- ► Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso e localização
- Em alguns casos, o lançamento é realizado onde não há sinal de internet
- Mas mesmo nesses casos, é possível haver o sinal da telemetria de bordo

Heitor

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
- \blacktriangleright θ_A e θ_B são latitudes
- $\blacktriangleright \phi_A$ 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

$$\Delta_{\theta} = \theta_{B} - \theta_{A}$$

$$\Delta_{\phi} = \phi_{B} - \phi_{A}$$

$$X = \cos(\theta_{B}) \cdot \sin(\Delta_{\phi})$$

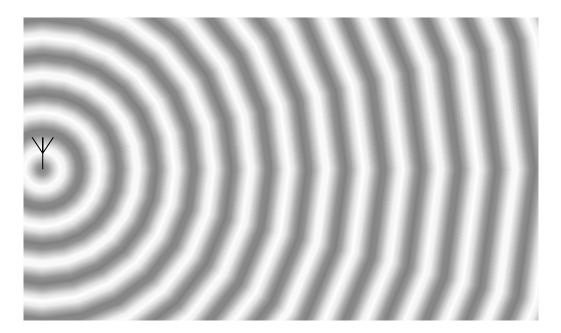
$$Y = \cos(\theta_{A}) \cdot \sin(\theta_{B}) - \sin(\theta_{A}) \cdot \cos(\theta_{B}) \cdot \cos(\Delta_{\phi})$$

$$Z = \sin^{2}\left(\frac{\Delta_{\theta}}{2}\right) + \cos(\theta_{B}) \cdot \cos(\theta_{A}) \cdot \sin^{2}\left(\frac{\Delta_{\phi}}{2}\right)$$

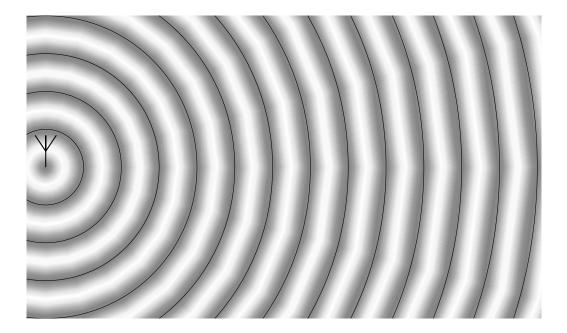
$$\beta = \arctan\left(\frac{X}{Y}\right)$$

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

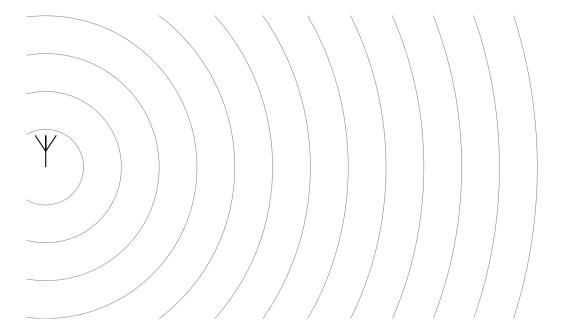
Emissão de sinal radial



Frentes de onda



Representação de frentes de onda

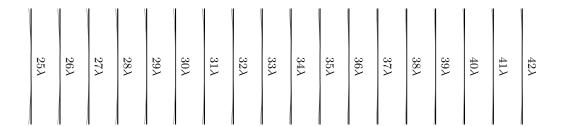


00000



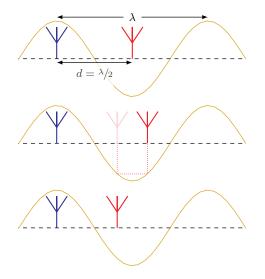
Onda plana

Comportamento da onda em espaço distante (far field)

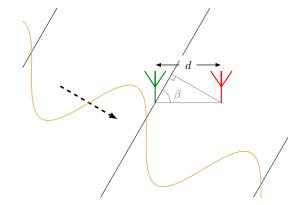


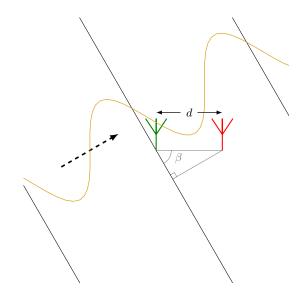
Onda plana

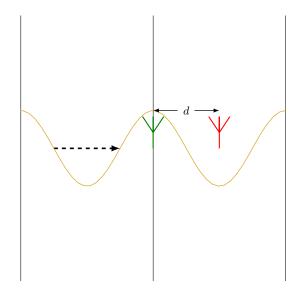
Estimar defasagem

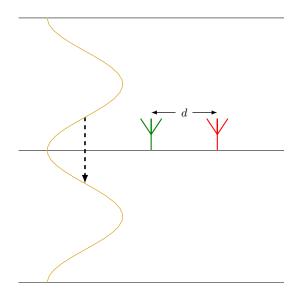


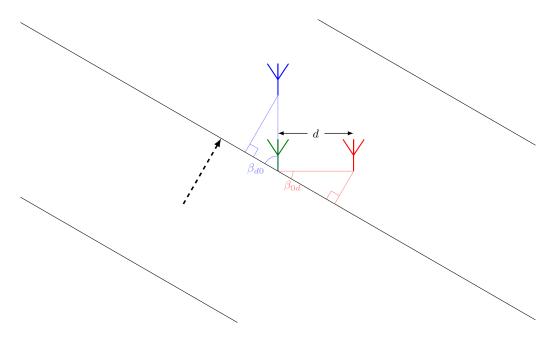
- Toma-se uma antena como referência
- Posiciona-se uma segunda antena a uma distância determinada
- Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal
- ► Se a distância for maior que $\lambda/2$, haverá conflito de defasagem
- Se for menor, há perda de resolução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











Definição de onda

Posicionamento por GPS

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

$$x_{0} = r \cdot \cos(\theta_{\omega})$$

$$y_{0} = r \cdot \sin(\theta_{\omega})$$

$$k(x, y, t, \theta_{\omega}, r_{\omega}, \lambda, \omega) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{(y - y_{0})^{2} + (x - x_{0})^{2}} + \omega \cdot t$$

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

Análise de vetores complexos

Posicionamento por GPS

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

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

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

$$\Delta_{x,y} = \arg(Z_{0,0} \cdot Z_{x,y}^*)$$
 componente_{x,y} = $-\frac{\Delta_{x,y}}{\pi} \cdot \frac{\chi}{d\omega^2} = -\frac{\Delta_{x,y}}{\pi}$

Simulações!

Perguntas?

Perguntas?

Obrigado!