

Ecosistema Integrado de Simulação para Estimação Passiva de DoA com Abertura Sintética

COSTA, L. G., CRUZ, R. S. S. da; SILVA, D. O.; SOUSA, R. H e ANTREICH, F. D.
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

Resumo Este pôster descreve um ecossistema integrado que conecta o Advanced Radar Simulator (ARS), o Advanced MAGE Simulator e o CalculaDOA, coordenados por um Hub de interoperabilidade, para pesquisa e treinamento em sensoriamento passivo por abertura sintética. O ARS reproduz sete perfis de radar retangulares ou LFM, fixos ou rotativos, embarcados ou estacionários, oferecendo controle total de PRF, largura de pulso, modos de integração, técnicas ECM/ECM, detecção CFAR, MTI, filtragem casada e geração de cenários faixa-Doppler. O Advanced MAGE Simulator modela o receptor passivo: estima PRF, PW, frequência Doppler e modulação intrapulso dos sinais incidentes, além de aplicar algoritmos de abertura sintética para configurações de um ou dois sensores, produzindo dados de fase e amplitude prontos para avaliação de desempenho. O CalculaDOA recebe linhas de visada calibradas, executa filtros geométricos, constrói elipses de probabilidade e entrega estimativas de direção e posição dos emissores. O Hub padroniza formatos, sincroniza tempos e automatiza campanhas Monte Carlo, permitindo validação rápida de novos algoritmos.

I. INTRODUÇÃO

Este pôster apresenta uma arquitetura unificada que conecta o *Advanced Radar Simulator (ARS)*, o *Advanced MAGE Simulator* e o *CalculaDOA* por meio de um Hub de integração, formando um fluxo de trabalho completo para a geração, processamento e análise de sinais de abertura sintética nas configurações de uma e duas antenas. A plataforma permite modelar cenários com diferentes tipos de radares, incluindo sinais LFM e não-LFM, incorporar sensores satelitais e embarcados, e validar algoritmos de estimação passiva de direção de chegada (DoA) com apoio nos estudos [1]–[8]. Dessa forma, reduz-se a necessidade de ensaios em campo, acelera-se o ciclo de desenvolvimento de métodos avançados de formação de feixe e obtêm-se métricas de desempenho consistentes já na fase de simulação.

II. Resultados

A integração dos simuladores por meio do Hub demonstrou fidelidade elevada na reprodução das assinaturas de fase e amplitude previstas teoricamente, produzindo erros compatíveis com os limites de Cramér-Rao nas abordagens de uma e duas antenas. Esse ecossistema facilita campanhas extensivas de Monte Carlo, simplifica o intercâmbio de dados entre módulos e estabelece uma base modular para futuras extensões, como radares multiestáticos e novos esquemas de modulação.

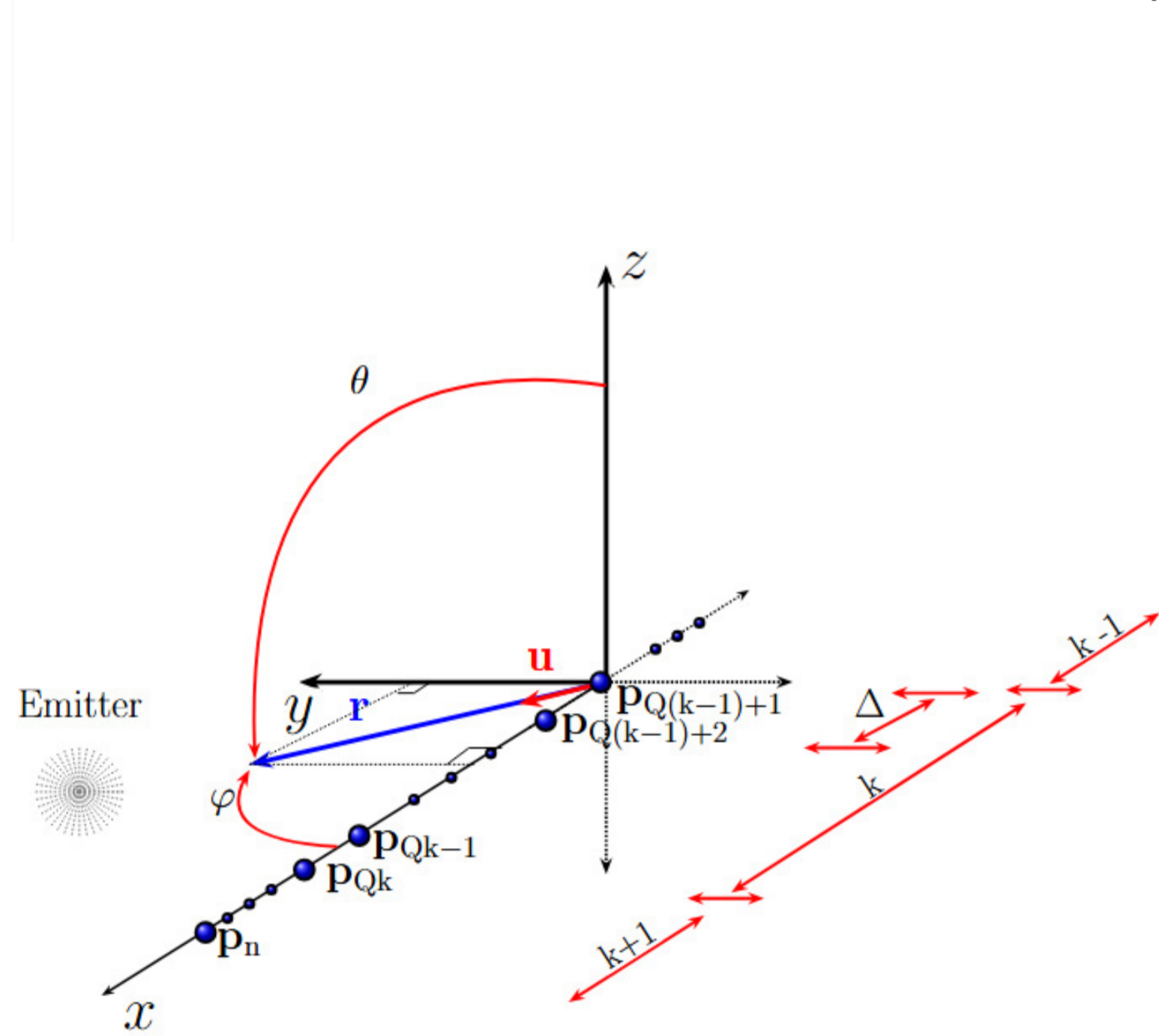


Figura 1: Abertura Sintética com uma antena.

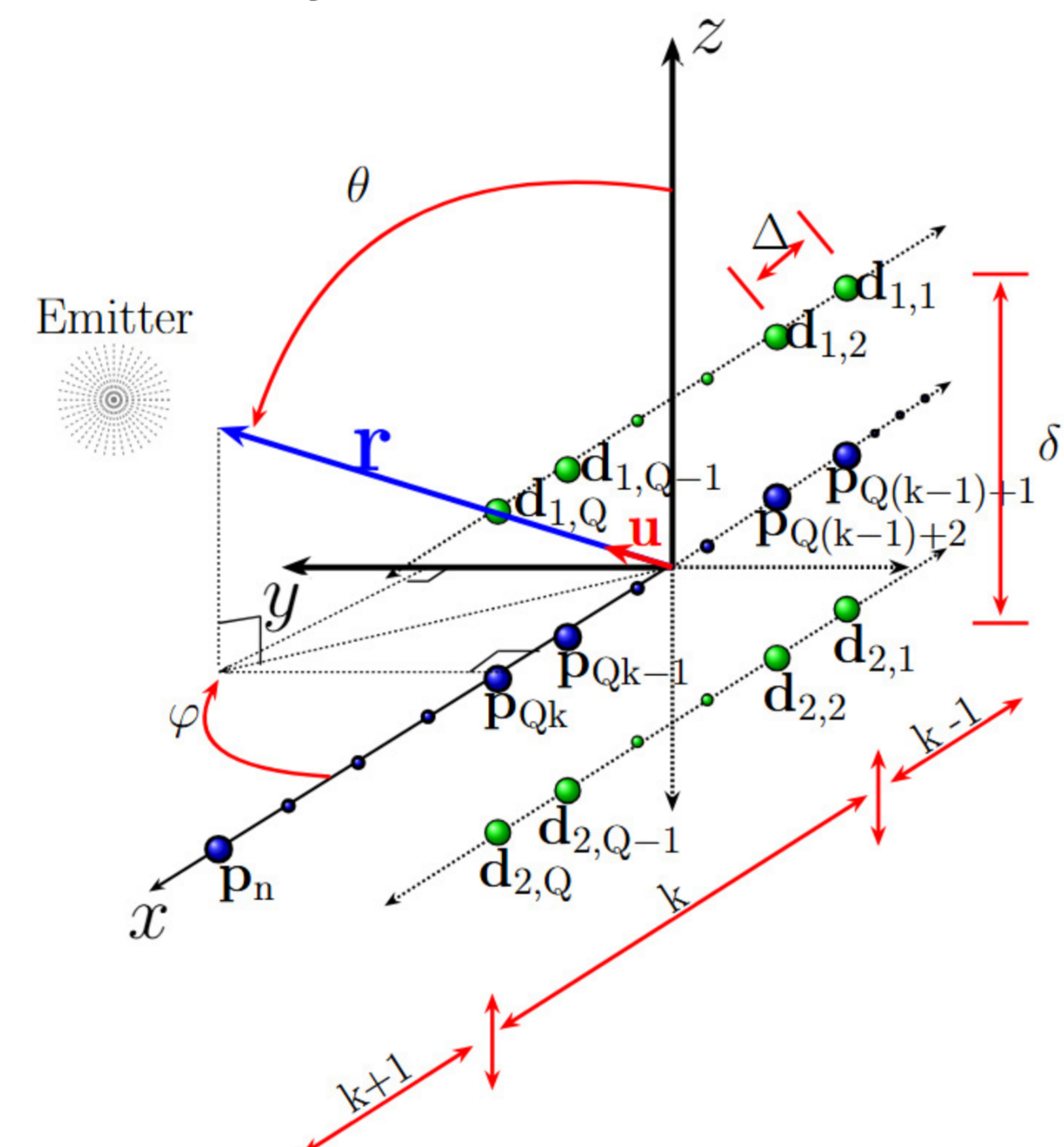


Figura 2: Abertura Sintética com duas antenas.

$$\mathbf{y}[k] \triangleq \underbrace{e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (k-1) Q \Delta \cos(\varphi)}}_{= \tilde{s}_k[k]} \mathbf{s}_k[Q]$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \cos(\varphi)} \\ \vdots \\ e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (Q-1) \Delta \cos(\varphi)} \end{bmatrix} = \mathbf{a}(\varphi, f_c, v_x, T_s)$$

$$+ \begin{bmatrix} \tilde{n}_k[1] \\ \tilde{n}_k[2] \\ \vdots \\ \tilde{n}_k[Q] \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{n}}[k]$$

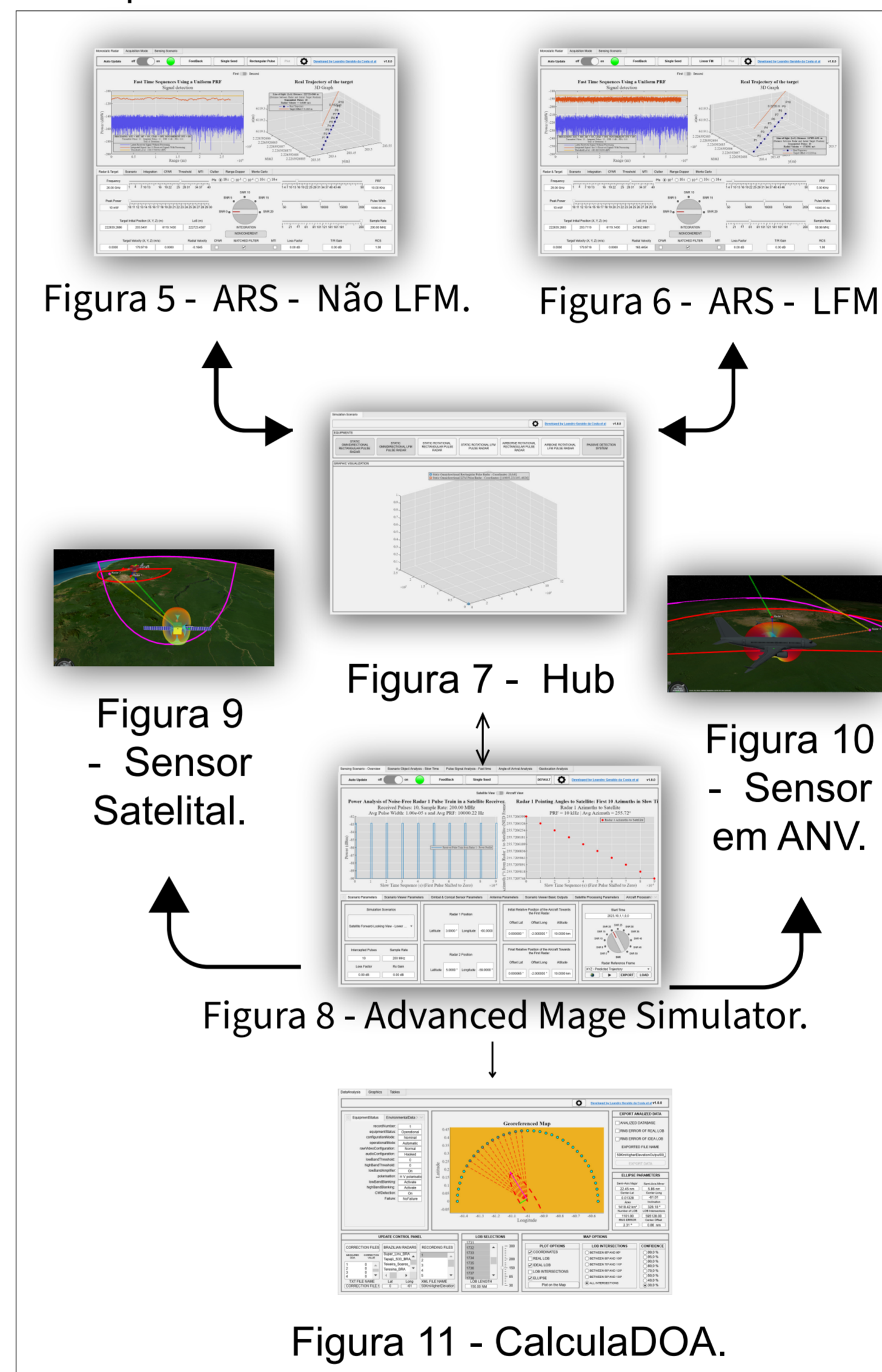
Figura 3: Modelo de Sinal para abordagem com uma antena.

$$\tilde{\mathbf{y}}[k] \triangleq \underbrace{e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (k-1) Q \Delta \sin(\theta) \cos(\varphi)}}_{= \tilde{\tilde{s}}_k[k]} \tilde{\mathbf{s}}_k[Q]$$

$$\begin{bmatrix} e^{+j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Q-1}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) + \frac{\delta}{2\Delta} \cos(\theta) \right)} \\ e^{+j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Q-1}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) - \frac{\delta}{2\Delta} \cos(\theta) \right)} \\ e^{+j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Q-3}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) + \frac{\delta}{2\Delta} \cos(\theta) \right)} \\ e^{+j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Q-3}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) - \frac{\delta}{2\Delta} \cos(\theta) \right)} \\ \vdots \\ e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Q-3}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) - \frac{\delta}{2\Delta} \cos(\theta) \right)} \\ e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Q-3}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) + \frac{\delta}{2\Delta} \cos(\theta) \right)} \\ e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Q-1}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) - \frac{\delta}{2\Delta} \cos(\theta) \right)} \\ e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{Q-1}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) + \frac{\delta}{2\Delta} \cos(\theta) \right)} \end{bmatrix} = \mathbf{a}(\varphi, \theta, f_c, v_x, T_s)$$

Figura 4: Modelo de Sinal para abordagem com duas antenas.

Ecossistema Integrado com Advanced Radar Simulator (ARS), o Advanced MAGE Simulator e o CalculaDOA, coordenados por um Hub de interoperabilidade:



III. Conclusão

A integração do ARS, do Advanced MAGE Simulator e do CalculaDOA, coordenada por um Hub de interoperabilidade, estabeleceu um fluxo de trabalho completo e reprodutível para geração, recepção e análise de sinais de abertura sintética nas configurações de uma e duas antenas. As campanhas de Monte Carlo mostraram que as assinaturas sintetizadas e os estimadores implementados produzem erros compatíveis com os limites de Cramér-Rao, confirmando a fidelidade dos modelos e a robustez da cadeia de processamento.

REFERÊNCIAS

- COSTA, L. G. da; ANTREICH, F. D. Caracterização em voo de sistemas de detecção passiva. In: SYMPOSIUM ON OPERATIONAL APPLICATIONS IN DEFENSE AREAS. Proceedings [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2023. ISSN 1983-7402. Poster Presentation.
- NOGUEIRA, D. do E. S.; COSTA, L. G. da; ALVES, D. I.; COUTINHO, O. L.; KRUGER, A. M.; MACHADO, R. Simulação e análise dos efeitos da técnica de interferência range gate pull-off em detectores CFAR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS. Proceedings [...]. Belém, PA: Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Telecomunicações (SBrT), 2024.
- COSTA, L. G. da; SILVA, D. O.; ANTREICH, F. D. Single antenna passive synthetic aperture doa estimation. In: SYMPOSIUM ON OPERATIONAL APPLICATIONS IN DEFENSE AREAS. Proceedings [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2024. ISSN 1983-7402. Paper Presentation.
- COSTA, L. G. da; SILVA, D. O.; SOUZA, R. H. de, and ANTREICH, F. D., "Dual-antenna passive synthetic aperture DoA estimation for airborne platforms," in Proceedings of the Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT). Sociedade Brasileira de Telecomunicações, 2025.
- COSTA, L. G. da; ANTREICH, F. D. Caracterização de sistemas de detecção passiva. In: SYMPOSIUM ON OPERATIONAL APPLICATIONS IN DEFENSE AREAS. Proceedings [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2023. ISSN 1983-7402. Paper Presentation.
- NOGUEIRA, D. do E. S.; COSTA, L. G. da; ALVES, D. I.; COUTINHO, O. L.; KRUGER, A. M.; MACHADO, R. Simulação e análise dos efeitos da técnica de interferência range gate pull-off em detectores CFAR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS. Proceedings [...]. Belém, PA: Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Telecomunicações (SBrT), 2024.
- COSTA, L. G. da; NOGUEIRA, D. do E. S.; ALVES, D. I.; ANTREICH, F. D.; COUTINHO, O. L. Simulador Avançado de Radar: programa de computador. Depositante: Instituto Tecnológico de Aeronáutica. BR n. 512025001025-7. Depósito: 22 mar. 2024. Concessão: 25 mar. 2025.
- COSTA, L. G. da; PIRES, M. A. de F.; ALVES, D. I.; ANTREICH, F. D. CALCULADOA: programa de computador. Depositante: Instituto Tecnológico de Aeronáutica. BR n. 512025001022-2. Depósito: 18 mar. 2018. Concessão: 25 mar. 2025.
- COSTA, L. G. Single and Dual-Antenna Passive Synthetic Aperture Direction-of-Arrival (DOA) Estimation for Airborne Platforms. 2025. 366f. Dissertation of Master of Science – Aeronautics Institute of Technology, São José dos Campos.

Boxplot do erro RMS de azimute em função da SNR (dB) no subcenário com ângulo de elevação $\approx 0^\circ$ e linha de visada (LoS) de 200 km. Faixa de azimute restrita de -60° a 60° :

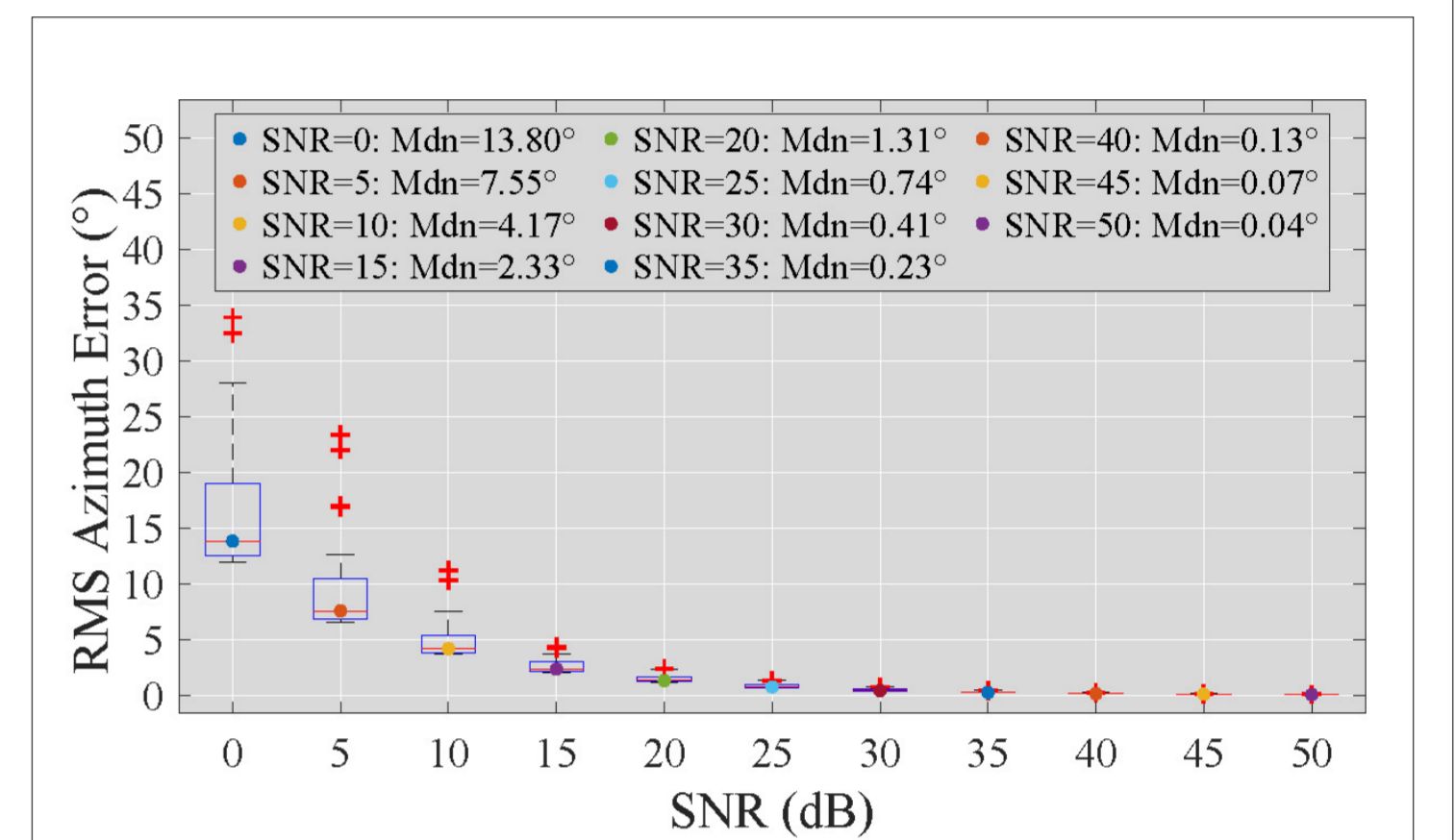


Figura 12 - Abertura Sintética com uma antena.

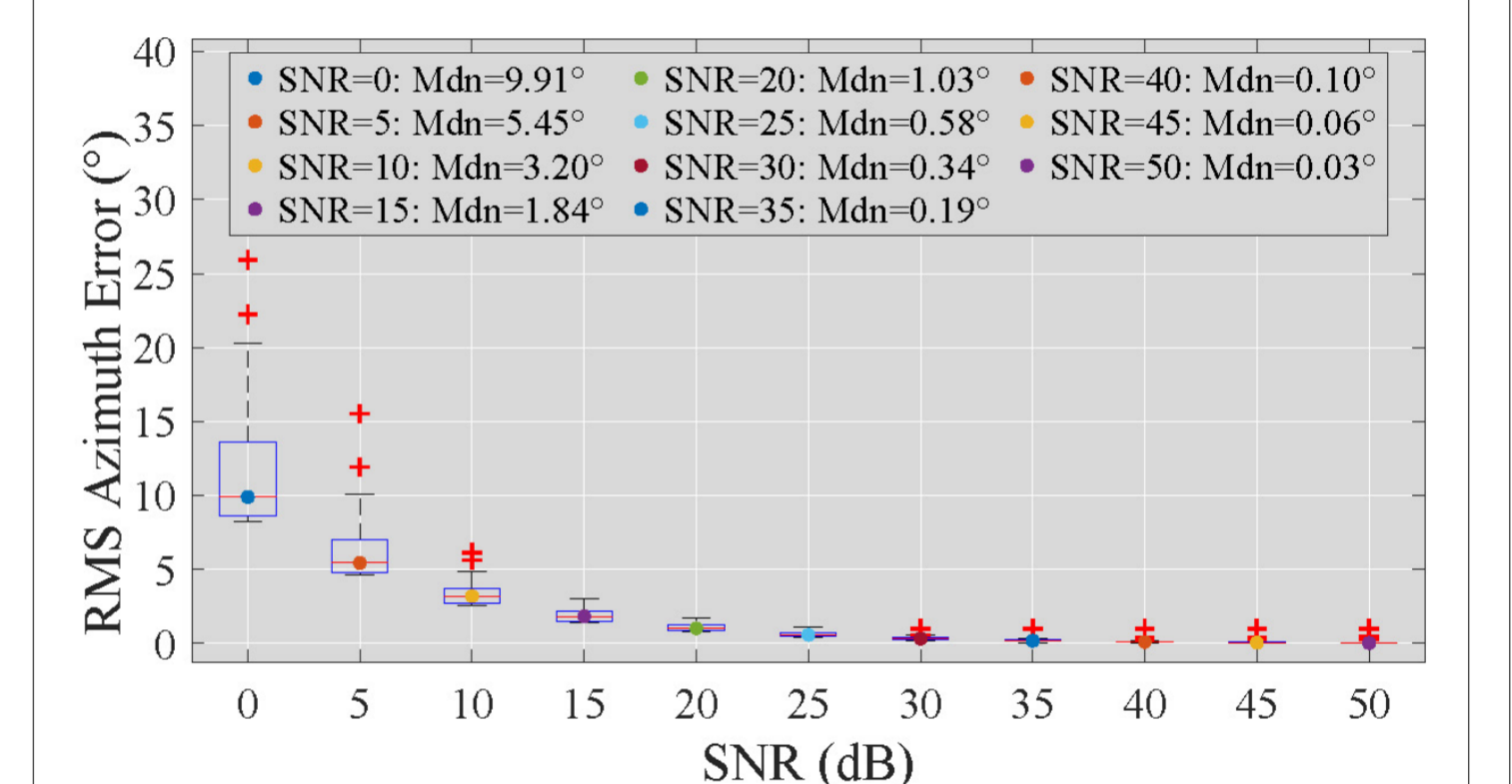


Figura 13 - Abertura Sintética com duas antenas.