

# Modelagem e Avaliação Experimental do Erro de Amplitude na Determinação do Ângulo de Chegada em Sensores RWR

Adônis Virgílio Teixeira Pinto<sup>1</sup>, Felipe Streitenberger Ivo<sup>2</sup> e Renato Machado<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Segundo Esquadrão do Sexto Grupo de Aviação (2°/6° GAV), Anápolis/GO – Brasil

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

**Resumo** – A informação de ângulo de chegada (AOA, *Angle of Arrival*) em sensores RWR (*Radar Warning Receiver*) que utilizam o método de comparação de amplitude é suscetível a distintas fontes de erro que podem afetar a acurácia e a precisão deste parâmetro. A variação da razão sinal-ruído (SNR), a qual é relacionada diretamente à amplitude do sinal obtido pelo receptor, é um dos fatores que podem comprometer a determinação de AOA. Neste artigo, apresenta-se um experimento conduzido em laboratório para se avaliar o erro na determinação de AOA proveniente da variação da SNR. Realiza-se uma análise teórica, baseada em um modelo em que a SNR é função do ângulo de detecção da ameaça e da resposta do receptor, incluindo o padrão e a posição das antenas. A análise experimental valida os resultados teóricos obtidos pelo modelo considerado. Por fim, destaca-se que os testes realizados demonstram a possibilidade de se avaliar o processamento de AOA de sensores RWR dispostos em cadeia reduzida por meio de testes conduzidos, sendo uma alternativa para ensaios de campo ou em câmara anecoica.

**Palavras-Chave** – AOA, RWR, comparação de amplitude.

## I. INTRODUÇÃO

A determinação da direção de chegada ou *Angle of Arrival* (AOA) de um sinal eletromagnético tem sido amplamente utilizada em distintas aplicações; a exemplo de sistemas radares, sensores de Guerra Eletrônica (GE) e Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) [1]–[3]. Dependendo das aplicações e das exigências de precisão e acurácia das informações de AOA, são utilizados diferentes métodos e algoritmos para sua determinação [4]. Especificamente em aeronaves equipadas com sensores do tipo RWR (*Radar Warning Receiver*), tipicamente são utilizadas duas técnicas de estimativa de AOA, a saber, técnica de comparação de fase, a qual utiliza princípios de interferometria para comparar a fase de sinais interceptados entre duas ou mais antenas de recepção; e técnica de comparação de amplitude, a qual é geralmente referenciada pela sigla inglês *Amplitude Comparison-based Monopulse* (ACM), em que é feita a comparação da amplitude do sinal, podendo inclusive ser proveniente de um único pulso RADAR, interceptado por duas ou mais antenas receptoras [3]–[5].

Devido a sua simplicidade de implementação, alta confiabilidade e menor tempo de processamento de sinal, o método ACM tem sido o mais utilizado em sensores RWR [6], sendo esta técnica o escopo de análise deste artigo. Todavia, o método ACM é passível de diversas fontes de erro que podem

comprometer a correta obtenção do parâmetro AOA pelo sensor que é utilizado como parâmetro para processamento de separação de sinais [5]. Assim, este artigo tem por objetivo modelar e analisar, de forma analítica e experimental, o impacto do erro gerado na marcação de AOA de um sistema RWR que utiliza a técnica ACM em função da variação da razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* – SNR) que varia de acordo com a frequência e a direção da emissão, considerando apenas um sistema simples de recepção de RWR composto por duas antenas adjacentes de forma a cobrir um setor angular de noventa graus. Além disso, propõem-se testes conduzidos de laboratório utilizando o Emulador de Ameaças RADAR Excalibur, do Laboratório de Guerra Eletrônica, para demonstração de conceito e avaliação do sistema considerando um típico receptor RWR com capacidade de operar em banda larga (2 – 18 GHz), sendo selecionadas emissões de sinais pulsados em três frequências diferentes, a saber: 2,5; 9,0 e 17,5 GHz. Considerou-se que o transmissor (TX) e o receptor (RX) estão separados de 40 km, com uma variação do AOA de TX de 0°, 22,5°, 45°, 67,5° e 90° em relação ao RX. A razão sinal-ruído foi avaliada para cada uma das duas antenas receptoras, bem como o erro de AOA em função da SNR para as três frequências de teste. Por fim, apresenta-se também o erro de AOA considerando a variação da largura de feixe de 3 dB da antena receptora, sendo consideradas as seguintes direções do feixe: 90°, 65° e 115°.

Este artigo está organizado na seguinte forma. A Seção II apresenta a fundamentação teórica da obtenção de AOA para o tipo de sensor RWR considerado neste estudo. A Seção III faz uma análise da SNR no sensor e do erro de apontamento decorrente de sua variação. Na Seção IV, descreve-se a metodologia utilizada para a demonstração experimental utilizando o Excalibur para fins de validação conceitual. Por fim, a Seção VI conclui o artigo com conclusões e algumas considerações finais.

## II. MÉTODO DE COMPARAÇÃO DE AMPLITUDE UTILIZADO PARA OBTENÇÃO DO PARÂMETRO AOA

A determinação de AOA por um sensor RWR aeroembarcado que utiliza o método de amplitude ACM pode ser entendida a partir da interceptação de um sinal em um arranjo composto por apenas duas antenas adjacentes e ortogonais, tipicamente de largura de feixe ( $\theta_B$ ) de 90°, conforme exibido na

Fig. 1. Este arranjo de antenas geralmente é projetado para prover uma cobertura de sinais em um setor de 90° em azimute da aeronave. É interessante observar que, quando este arranjo é ampliado com mais duas antenas, a capacidade de cobertura é aumentada para 360°, como é usual em aeronaves com equipamentos de Guerra Eletrônica aeroembarcados. Cabe

Adônis V. T Pinto, adonis.pinto@gmail.com; Felipe S. Ivo, fivo@ita.br; Renato Machado, rmachado@ita.br. Esta pesquisa foi financiada pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

ressaltar que cada uma das antenas que compõe o RWR é conectada a um receptor de sinais, sendo estes denominados RX-1 e RX-2 na Fig. 1.

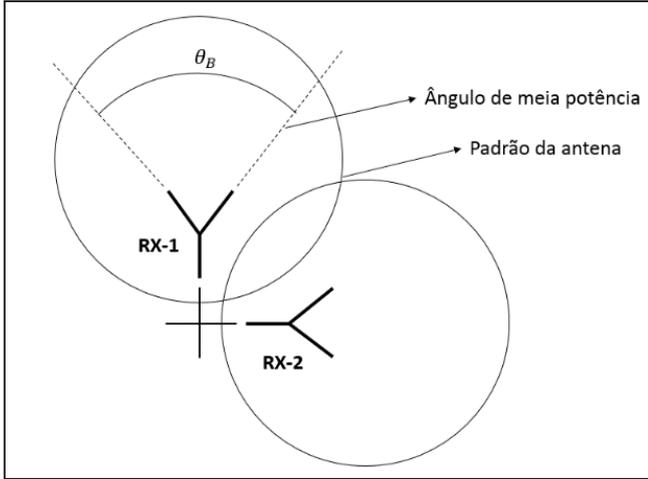


Fig. 1. Arranjo de duas antenas para método de comparação de amplitude.

Em cada uma das duas antenas que compõe o RWR da Fig.1, pode ser associado um ganho,  $G(\theta)$ , que é uma função do ângulo azimutal ( $\theta$ ). Agora, a potência de RF na saída de cada uma das  $n$  antenas pode ser modelada em função do ângulo em que o sinal será interceptado, sendo dada por

$$P_i(\theta) = P_{rx} \cdot G_i(\theta), \quad (1)$$

em que  $P_{rx}$  é a potência recebida considerando a área efetiva de uma antena omnidirecional,  $P_i(\theta)$  é a potência recebida na  $i$ -ésima antena receptora e  $G_i(\theta)$  é o ganho associado a ela.

A fim de podermos medir  $G_i(\theta)$ , considera-se como a antena do tipo espiral-plana como padrão. Esse tipo de antena opera em uma banda larga e é normalmente utilizada em arranjos de RWR [9]. Além disso, a antena espiral plana é caracterizada por suas pequenas dimensões e peso e possui largura de feixe de cerca de  $90^\circ$ , o que a habilita para um sistema como o exposto na Fig. 1. Segundo [6], o ganho  $G_i(\theta)$  pode ser bem modelado por uma função gaussiana

$$G_i(\theta) = A_i^2 e^{-k^2(\theta-\alpha)^2}, \quad (2)$$

em que  $A_i$  é a raiz quadrada do ganho máximo da antena no *boresight*,  $\theta$  é o azimute da emissão, ou seja, o AOA do sinal,  $\alpha$  representa o *squint angle*, que é o ângulo de deslocamento entre as larguras de feixe, e  $k^2$  varia com a largura de feixe de meia potência,  $\theta_B$ , e é dado por

$$k^2 = \frac{2,776}{\theta_B^2}. \quad (3)$$

O diagrama de radiação gaussiano de (2) é ilustrado na Fig. 2

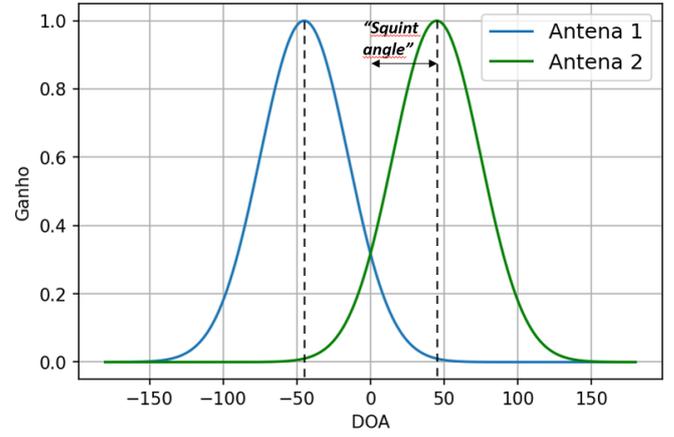


Fig. 2. Diagrama de radiação gaussiano de duas antenas ortogonais e adjacentes.

Ao relacionar a amplitude entre duas antenas adjacentes do arranjo, pode-se obter valor da relação de amplitude, definido como

$$R(\theta) = \frac{G_1(\theta)}{G_2(\theta)}. \quad (4)$$

Substituindo (2) em (4) e desenvolvendo-se as equações, obtém-se que o valor de AOA, aqui denominado de  $\theta$ , é dado por

$$\theta = R(\theta)|_{dB} \left( \frac{\theta_B^2}{48\alpha} \right). \quad (5)$$

Logo, tendo o conhecimento da largura do feixe de meia potência e do *squint angle* do arranjo, a direção do emissor, ou seja, o AOA, pode ser obtida por meio de (5).

### III. RAZÃO SINAL-RUÍDO PARA O ARRANJO DE DUAS ANTENAS

Conforme [7], o ruído associado ao canal de cada antena é uma das fontes de erro que afeta a amplitude do sinal medido no respectivo canal. De acordo com [3], o erro médio quadrático de apontamento de AOA é obtido da seguinte forma

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_{R_{dB}}}{\left| \frac{dR(\theta)|_{dB}}{d(\theta)} \right|}, \quad (6)$$

sendo que  $\sigma_{R_{dB}}$  é o erro da amplitude devido ao ruído e  $\frac{dR(\theta)|_{dB}}{d(\theta)}$  é a variação de amplitude em relação ao AOA em dB.

A variação de amplitude  $\sigma_{R_{dB}}$  está associada à flutuação do nível de amplitude medida em relação à amplitude verdadeira do sinal nos canais das duas antenas adjacentes, e pode ser dada por [6]

$$\sigma_{R_{dB}} = 20(\log e) \left( \frac{\Delta A_1}{A_1} - \frac{\Delta A_2}{A_2} \right), \quad (7)$$

em que  $A_1$  e  $A_2$  representam as amplitudes verdadeiras nos canais 1 e 2, e  $\Delta A_1$  e  $\Delta A_2$ , as variações de amplitude nos canais.

Ainda, segundo [3] a razão sinal-ruído SNR pode ser associada diretamente à flutuação de amplitude  $\Delta A$  apresentada anteriormente em (7) e é equacionada como

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{\sqrt{2S/N}}. \quad (8)$$

Ao considerar que o ruído nos dois canais são decorrelacionados e que ele decorre apenas do ruído térmico ( $N_0$ ), o erro de amplitude devido ao ruído pode ser obtido a partir de (7), da seguinte maneira:

$$\sigma_{R_{dB}} = 20(\log e) \left( \frac{1}{2S/N_0} + \frac{1}{2S/N_0} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

A partir de (1) e (2), os valores da SNR para cada canal podem ser equacionados na saída das antenas em função do ângulo  $\theta$ :

$$\begin{aligned} SNR_1(\theta) &= P_{rx} \cdot \left( \frac{A_1^2 e^{-k^2(\theta-\alpha)^2}}{N_0} \right) \\ SNR_2(\theta) &= P_{rx} \cdot \left( \frac{A_2^2 e^{-k^2(\theta+\alpha)^2}}{N_0} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Portanto, ao analisar (9), nota-se que a SNR é máxima quando os valores de  $\theta$  são  $\alpha$  e  $-\alpha$ , respectivamente. Logo, por meio de (10), observa-se que quando a SNR é máxima em um canal, ela é mínima no outro e que, também, o menor erro de amplitude atrelado à SNR ocorre no ângulo de *overlapping* entre as antenas.

Desta forma, representamos a SNR máxima de  $SNR_0$ , de modo que, substituindo (10) em (9) obtém-se o erro

$$\sigma_{R_{dB}} = 20(\log e) \left( \frac{1}{2(SNR_0 e^{-k^2(\theta-\alpha)^2})} + \frac{1}{2(SNR_0 e^{-k^2(\theta+\alpha)^2})} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

A partir de (5), tem-se que o denominador de (6) é fixo, já que  $\frac{dR(\theta)_{dB}}{d(\theta)}$  depende apenas de  $\theta_B$  e  $\alpha$ , os quais, a princípio, não devem variar com o ângulo de detecção. Portanto, o erro de apontamento de AOA pode ser dado por

$$\sigma_\theta = 20(\log e) \left[ \left( \frac{1}{2(SNR_0 e^{-k^2(\theta-\alpha)^2})} + \frac{1}{2(SNR_0 e^{-k^2(\theta+\alpha)^2})} \right)^{1/2} \right] \left( \frac{\theta_B^2}{48\alpha} \right). \quad (12)$$

Pela análise apresentada, cabe ressaltar de (12) principalmente que a SNR varia com o ângulo de apontamento da emissão em relação ao sistema de detecção com o arranjo das duas antenas; e ainda que esta relação influencia diretamente o erro de apontamento realizado pelo RWR.

#### IV. DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL

Os experimentos concebidos foram realizados para a avaliação do método ACM na obtenção de AOA, permitindo se analisar os impactos da variação da SNR com o ângulo de apontamento entre as antenas de transmissão e de recepção. Para a realização dos experimentos, utilizou-se o emulador de sinais RADAR Excalibur-DRS em seu modo conduzido, ou seja, na situação em que os sinais de RF são injetados

diretamente através de cabos coaxiais nas entradas do receptor (*front-end*). O procedimento requer que as antenas do RWR que se desejam testar sejam removidas e os cabos de RF sejam conectados diretamente do Excalibur ao *front-end*. Uma maneira de conferir mais fidedignidade ao teste conduzido é determinando-se experimentalmente o comportamento de irradiação das antenas do arranjo do RWR em uma câmara anecoica e importando os diagramas de irradiação das antenas que foram caracterizadas no software de simulação *Threat Builder* do Excalibur, o qual é o responsável por gerenciar os cenários de emissores desejados para os ensaios.

Assim, conforme representado na Fig. 6, foi estabelecido um setup experimental para demonstração de conceito para testes de AOA e as relações entre a SNR e a direção da emissão a partir de um sistema receptor com duas antenas associadas às portas 3 e 4 do Excalibur. Utilizando o *Threat Builder*, atribuiu-se às antenas de recepção RX-1 e RX-2 as portas 3 e 4, respectivamente. Na saída de cada um dos cabos de RF utilizou-se um adaptador de RF do tipo SMA para o tipo N, seguidos de bloqueadores DC (DC BLOCK) como elementos de proteção dos analisadores. Por fim, a análise do sinal recebido na antena RX-1, proveniente da porta 3, foi realizada através de um analisador de espectro modelo E4433B, enquanto o sinal da antena RX-2, associado à porta 4, foi realizado por um analisador de sinal modelo N9035B.

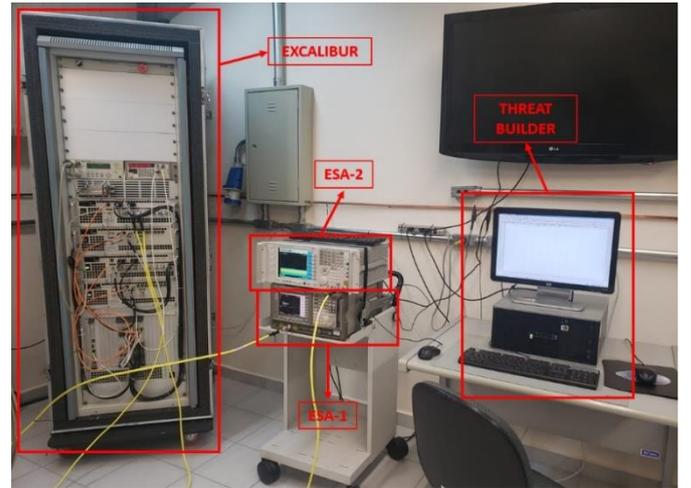


Fig. 3. Arranjo experimental utilizado para teste de AOA.

Para a execução dos testes foram configurados no *Threat Builder* três emissores RADAR distintos, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 1. Ressalta-se que, apesar do *Threat Builder* ter a capacidade de atribuir parâmetros da assinatura RADAR como padrões horizontais e verticais de antenas, varredura e outras características, devido às particularidades do teste de conceito foi utilizado um cenário de testes em que estes parâmetros não são alterados.

TABELA 1. EMISSORES RADAR PROGRAMADOS

Emissor	PW [μs]	PRI [ms]	PRF [kHz]	F [GHz]	ERP [dBm]
1	10.0	1.0	10	2.5	110
2	10.0	1.0	10	9.0	110
3	10.0	1.0	10	17.5	110

As antenas RX-1 e RX-2 do RWR foram configuradas de acordo com um padrão de irradiação gaussiano obtido pela

Equação (2), com a largura de feixe  $\theta_B$  de  $90^\circ$ . O diagrama foi gerado em linguagem de programação *Python* e importado ao *Threat Builder* para simular o sistema receptor considerando um “squint angle” ( $\alpha$ ) de  $45^\circ$  para as antenas, estando elas deslocadas de  $90^\circ$  uma da outra no arranjo. O diagrama do arranjo é exibido na Fig. 4.

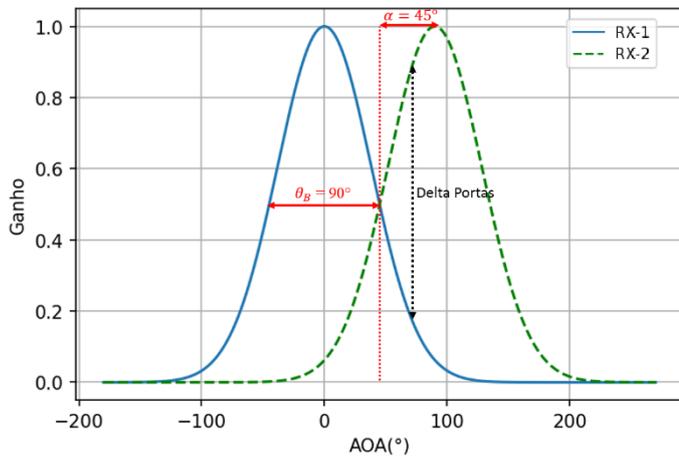


Fig. 4. Diagrama de irradiação das antenas do arranjo receptor.

Enquanto a antena transmissora TX está posicionada a uma distância de 40 km do arranjo receptor, conforme ilustrado na Fig. 5, sendo estabelecido para os experimentos uma variação do AOA de  $0^\circ$ ,  $22,5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67,5^\circ$  e  $90^\circ$ .

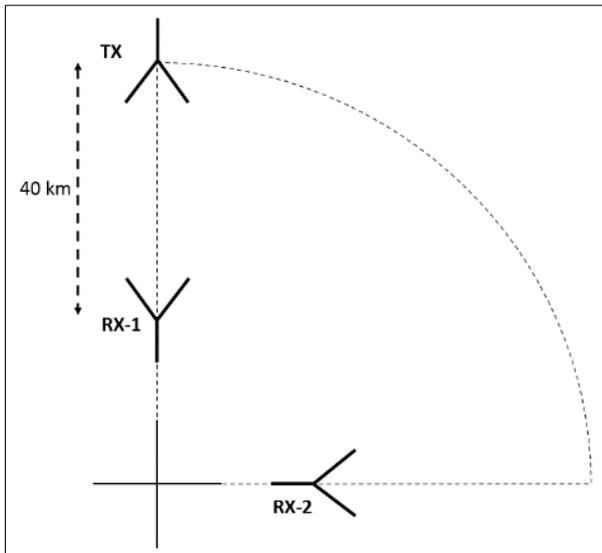


Fig. 5. Teste de rotação da antena TX em relação ao arranjo.

## V. RESULTADOS E ANÁLISE

Dentro dos parâmetros estabelecidos para o teste, foram medidos os níveis de potência nos analisadores de espectro e os sinais das portas 3 e 4 para cada um dos AOA previstos da antena TX. Assim, utilizando (5), calculou-se o AOA para cada uma das posições de TX, considerando os emissores da Tabela 1. Por fim, baseado dos valores de potência medidos em todos os ângulos de TX nos dois canais, foram avaliados os valores da SNR para cada AOA dos emissores determinados. Considerou-se a TSS (Sensibilidade Tangencial ou *Tangential Sensitivity*) de  $-60$  dBm [6]. A TSS é definida

quando o valor do sinal supera o valor do ruído em 8 dB [1]. Os resultados obtidos das medições de SNR, através de (10), para os Emissores 1, 2 e 3 são apresentados nas Figs. 6, 7 e 8.

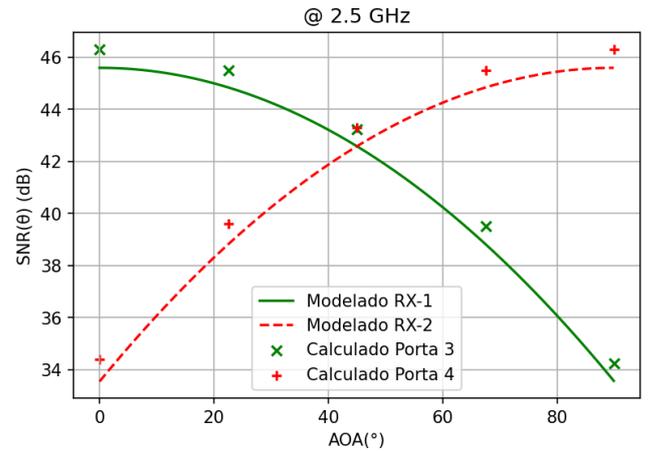


Fig. 6. Variação da SNR em função do AOA do Emissor 1.

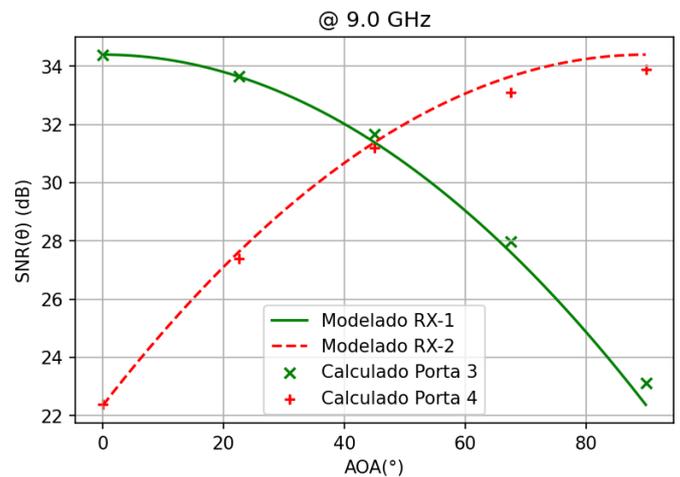


Fig. 7. Variação da SNR em função do AOA do Emissor 2.

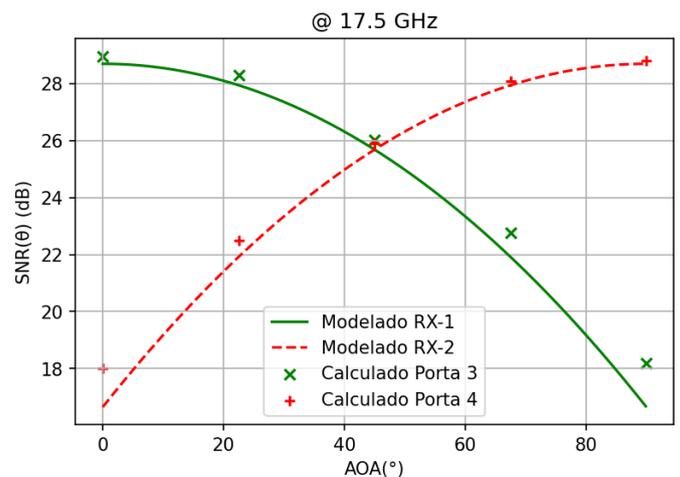


Fig. 8. Variação da SNR em função do AOA do Emissor 3.

Tendo por base os valores calculados de AOA nas Figs. 6, 7 e 8, nota-se uma variação máxima de baixa dimensão em relação às curvas modeladas, em que foi encontrado um desvio

de amplitude máximo de 1,6 dB medido na porta 3 em um AOA de 90° para o emissor 3 (17,5 GHz).

Foi avaliado ainda o erro de AOA  $\sigma_\theta$  em função do ângulo de detecção do sinal para os três emissores (2,5, 9,0 e 17,5 GHz), de acordo com a formulação matemática dada por (12), considerando os valores de  $SNR_0$  obtidos nas Figs. 9, 10 e 11 e a TSS de -60 dBm.

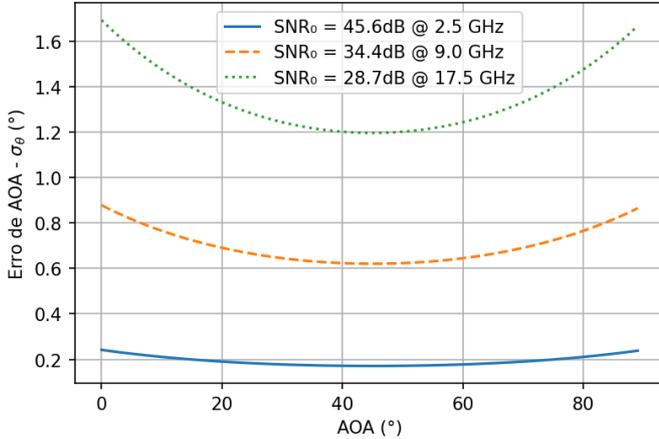


Fig. 9. Erro de AOA  $\sigma_\theta$  em função de AOA para os três emissores avaliados.

Analisando-se a Fig. 9, constata-se que o erro de AOA é mínimo quanto mais próxima é a emissão do ângulo bissetor entre as antenas e máximo conforme se aproxima das extremidades do arranjo. Verifica-se, adicionalmente, que o erro aumenta com a frequência, o que diminui a razão sinal-ruído.

Foi também avaliado o efeito no erro de AOA,  $\sigma_\theta$ , de acordo com a variação do AOA do emissor, considerando o Emissor 2 (9,0 GHz), porém alterando-se a sua largura de feixe,  $\theta_B$ , para os valores de 65° e 115°, mantendo-se a TSS de -60 dBm, e considerando a  $SNR_0$  de 34,4 dB, obteve-se os resultados apresentados na Fig. 10.

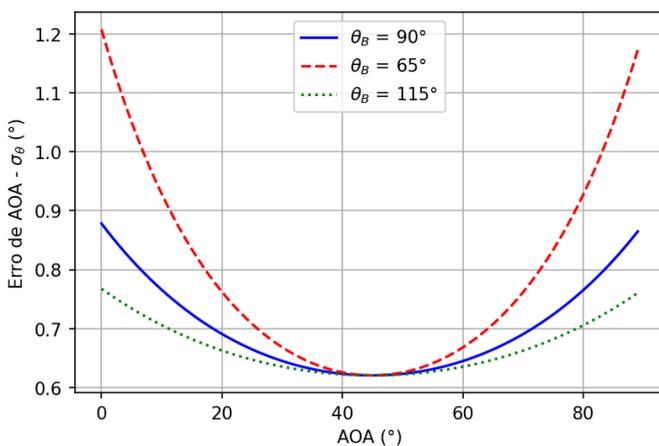


Fig. 10. Erro de AOA, em função de AOA para três larguras de feixe distintas.

Logo, observou-se que, analogamente ao resultado apresentado na Fig. 9, o erro aumenta conforme a direção da emissão afasta-se do ângulo bissetor entre as antenas e, adicionalmente, o erro aumenta conforme diminui-se a largura do feixe. O aumento da frequência de uma emissão RADAR

resulta em uma diminuição da largura de feixe da antena. Logo, tem-se que a informação de AOA está suscetível a maiores ou menores erros conforme se altera a frequência da emissão.

Ressalta-se, entretanto, que para esta análise foi considerado um *squint angle* ( $\alpha$ ) fixo, desconsiderando a mudança de  $\alpha$  com a alteração da largura do feixe.

## VI. CONCLUSÃO

O método de comparação de amplitude para medir AOA pode ter influência direta no desempenho do RWR, inclusive na sua capacidade de separar fontes de emissões de sinais RADAR idênticas, porém espacialmente separadas. Neste sentido, este trabalho buscou mensurar de forma analítica a contribuição do parâmetro da razão sinal-ruído com o erro de AOA, a partir de um modelo simples considerando um setor de noventa graus coberto por duas antenas adjacentes. Foram apresentados ainda ensaios de laboratório para demonstração de conceito de forma a mensurar a variação do erro com a variação de diferentes parâmetros do sistema.

A partir do modelo proposto, e dos testes realizados, verificou-se que a SNR na determinação de AOA em um sistema RWR que opera pelo método ACM sofre alterações com a direção da qual provem o sinal.

Além disso, observou-se também que a variação da SNR com o AOA da emissão, compromete o erro de acurácia de AOA. Logo, para sistemas RWR cuja finalidade principal é indicar a posição do emissor, a própria direção angular em relação ao sistema receptor afetará a determinação pelo método ACM, de tal forma que, quanto mais próximo ao *boresight* das antenas, ou seja, à frente das antenas, maior será o erro, ao passo que, quanto mais próximo ao ângulo bissetor entre as antenas menor será o erro.

Similarmente, ao analisar a relação de compromisso entre a alteração da largura de feixe e o erro de AOA, nota-se que, para os mesmos AOA do sinal, o erro será maior conforme diminui-se a largura do feixe de meia potência, assim como quanto ao incremento do erro devido uma menor SNR. Portanto, evidencia-se também que a variação da largura de feixe, que pode ocorrer pela variação de frequência, ocasionará erros de AOA.

Deve-se ressaltar, entretanto, que os erros de AOA estudados neste modelo são de pequena dimensão para um sensor RWR, porém são erros acumulativos e se mostraram não lineares com o ângulo de chegada. Além disso, para o estudo de caso analisado neste trabalho, a potência efetivamente irradiada foi fixada em um valor elevado comparativamente ao que ocorreria em um cenário real onde este valor pode ser menor e comprometer ainda mais a SNR. Não obstante, as emissões podem também estar suscetíveis a efeitos indesejados na detecção que não foram incorporados no modelo como, por exemplo, o multicaminho.

Por fim, os experimentos de laboratório demonstraram que o sistema Excalibur-DRS pode ser utilizado para testar o desempenho de AOA, inclusive suas fontes de erro, para avaliação de um sensor RWR real disposto em cadeia reduzida.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. B. Tsui, *Microwave Receivers With EW Applications*. Scitech Publishing, 2005.
- [2] M. Zuo and S. Xie, "A novel DOA estimation method for an antenna array under strong interference," *EURASIP J Adv Signal Process*, vol. 2022, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s13634-022-00930-y.
- [3] R. G. Wiley, *ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals*. Norwood, MA: Artech House, 2006
- [4] E. Yan *et al.*, "Improving accuracy of an amplitude comparison-based direction-finding system by neural network optimization", *IEEE Access*, vol. 8, p. 169688–169700, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024031.
- [5] S. Robertson, *Practical ESM Analysis*. Norwood, MA: Artech House, 2019.
- [6] A. de Martino, *Introduction to modern EW systems*, 2° ed. Norwood, MA: Artech House, 2018.
- [7] M. F. Iqbal, Z. Khalid, M. Zahid, e A. Abdullah, "Accuracy improvement in amplitude comparison-based passive direction finding systems by adaptive squint selection", *IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 14, n° 5, p. 662–668, maio 2020, doi: 10.1049/iet-rsn.2019.0465.
- [8] F. S. Ivo, P. C. da S. Euphrásio, A. P. Gonçalves, R. J. Zandoná, L. de A. Faria, e O. L. Coutinho, "Operação remota do sistema gerador de cenários de guerra eletrônica DRS-Excalibur associada à transmissão de sinais radar em fibra óptica", *Spectrum-Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, vol. 1, São José dos Campos, SP, p. 4–11, set. 30, 2021.
- [9] A. B. Constantine, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2° ed. New York - NY: John Wiley & Sons, 1997.