

Interferência Eletromagnética entre Radares de Emprego Naval

Mário D. A. Tavares¹, Newton A. S. Gomes^{2,3}, Renan M. Richter², André P. Gonçalves⁴ e Maurício R. Baldan^{2,3}

¹ Diretoria de Sistemas da Armas da Marinha - DSAM, Rio de Janeiro/RJ - Brasil

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos/SP - Brasil

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos/SP - Brasil

⁴ Instituto de Pesquisa da Marinha - IPqM, Rio de Janeiro/RJ - Brasil

Resumo—O uso de radares no ambiente marítimo possui uma aplicação civil e militar. O efeito da interferência co-canal entre radares, implantados em embarcações distintas, ocorre com frequência em várias marinhas. Esse trabalho propõe desenvolver uma metodologia para atenuar o efeito da interferência entre radares que operam na mesma frequência. Um radar hipotético é empregado para simular o efeito de interferência co-canal entre embarcações, variando o ângulo de engajamento azimutal e a distância entre as embarcações. No final, é obtida uma topologia de disposição das embarcações em coluna, com uma distância máxima de 5,95 NM e uma disposição em linha com um valor máximo de 37,01 NM. Este trabalho evidencia que a interferência ocorre entre os radares, sendo demasiadamente dependente da condição angular de engajamento devido ao efeito da RCS (*Radar Cross Section* - Seção Reta Radar) da embarcação interferidora.

Palavras-Chave—Interferência, RCS, Detecção Radar.

I. INTRODUÇÃO

A guerra moderna tem motivado a implantação de vários sistemas eletrônicos em um ambiente naval. Em um cenário de guerra eletrônica, um dos elementos desses sistemas é o radar, que representa um dos sensores fundamentais para o emprego naval.

O radar naval tem a função de navegação, alerta antecipado e controle de armamento, por exemplo, detectando e identificando alvos em tempo real em vários tipos de missões.

Em seus deslocamentos marítimos, as embarcações militares realizam uma formação padronizada conforme a Fig. 1. Contudo, a ameaça de interferência mútua entre os sistemas de radares está aumentando à medida que a faixa de frequência militar é expandida, bem como à medida em que são implementados novos sistemas de comunicação/detecção na mesma banda de frequência ou quando ocorre operação simultânea de radares novos e antigos na mesma formação de deslocamento [1].

A partir dessa condição, procedimentos de proteção contra interferência são necessários para evitar a degradação dos sistemas de radares no raio operacional de combate. Em função desse problema, este trabalho se propõe a desenvolver uma metodologia no intuito de diminuir o efeito da interferência co-canal entre radares operando na mesma frequência em uma formação tática.

Com o fito de atingir esse objetivo, na seção II é apresentada a fundamentação teórica, descrevendo a equação radar, o



Fig. 1. Formação de navios de oito países durante o exercício RIMPAC em 2006 [2].

conceito da RCS (*Radar Cross Section* - Seção Reta Radar), a teoria sobre detecção e interferência radar. Na seção III são descritos o uso de um radar hipotético, o desenvolvimento da modelagem e simulação de uma embarcação e o planejamento de engajamento radar. Na seção IV são apresentados a RCS de uma embarcação e os efeitos interferentes na relação sinal-ruído no processo de detecção. Ao final, é apresentada a conclusão deste trabalho.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Equação Radar e a RCS

O conceito do radar está associado à propagação de ondas eletromagnéticas desenvolvidas a partir dos estudos do físico alemão Heinrich Rudolf Hertz, em 1883, onde aplicou a eletrodinâmica clássica das equações de Maxwell [3].

Tendo como referência um radar do tipo *pulse-doppler*, o seu princípio de funcionamento corresponde à detecção do fluxo de energia espalhado pelo alvo, medido em W/m^2 , a partir das ondas eletromagnéticas propagadas [4]. O receptor do radar detecta e estima a distância máxima entre esse alvo e o radar por (1) [5].

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k_B T_e B W F_n (SNR_o)_{min}}} \quad (1)$$

Conforme descrito em (1), o alcance máximo do radar está condicionado à relação sinal-ruído do receptor SNR_o , sendo apresentado em mais detalhes na subseção II-B. Os outros termos de (1) são o amplificador de potência do transmissor P_t , o ganho da antena G , o comprimento de onda eletromagnética emitida λ em função da frequência de

operação, a constante de Boltzmann k_B , a temperatura de operação do sistema T_e , a largura de banda do receptor radar BW , a figura de ruído do receptor F_n e σ que corresponde à RCS do alvo sendo, esta, a única variável que não depende do sistema radar [6].

A RCS (σ) representa a relação entre o campo elétrico espalhado pelo alvo $\vec{E}_s$ e o campo elétrico incidente pelo radar $\vec{E}_i$ em função dos ângulos azimutais ϕ e de elevação θ , (2), cujos valores independem da distância entre o radar e o alvo selecionado [6].

$$\sigma(\theta, \phi) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{\vec{E}_s(r, \theta, \phi)}{\vec{E}_i(r, \theta, \phi)} \right|^2 \quad (2)$$

O valor da RCS em (2) é apresentado em m^2 , sendo empregado também o valor em $dBsm$, definido por (3). Os valores da RCS, em decorrência da ampla faixa dinâmica de resultados a serem obtidos, são normalmente descritos na unidade de $dBsm$. Este trabalho utiliza os valores da RCS em $dBsm$ [6].

$$\sigma = 10 \cdot \log_{10}(\sigma [m^2]) [dBsm] \quad (3)$$

No campo naval, a determinação da RCS de uma embarcação é um desafio de elevadas proporções. Contudo, em 1978 foram realizados estudos experimentais de medição da RCS de alvos marítimos [7]. Obter esses valores em função da frequência e seus azimutes é essencial para aplicação da equação radar no intuito de realizar a detecção do navio em estudo. Na Tabela I são descritos os valores das RCS de alguns tipos de embarcações.

TABELA I
VALORES DA RCS DE EMBARCAÇÕES TÍPICAS [7].

Tipo	Dimensão [m]	RCS [dBsm]
Carvoeiro	73,45	$30,5 \pm 3,5$
Fragata	103,02	$44,5 \pm 5,5$
Contêineres	211,83	$44,0 \pm 4,0$

B. Detecção Radar

Em um sistema radar, o receptor tem a função de realizar a detecção do alvo. Essa condição é obtida quando o sinal de eco S , medido em Watt, em relação ao ruído N , também medido em Watt, possui um valor capaz de discriminar o sinal de reflexão radar do ruído do sistema. A relação entre o sinal e o ruído é chamada de SNR (relação sinal-ruído), determinado em dB (decibéis). O receptor radar em uso possui um SNR_0 constante, que define a relação mínima de detecção de um alvo, nomeado de $SNR_{0(min)}$ e descrito na Fig. 2 [8].

Neste contexto, para ocorrer a detecção pelo radar, é necessário que a relação (4) seja atendida, sendo N_0 o piso de ruído do receptor radar. Conforme a Fig. 2, quando S corresponder a um valor S_{min} , é determinada a distância máxima $R_{d(max)}$ de detecção do alvo.

$$S \geq SNR_{0(min)} + N_0 \quad (4)$$

Outra forma de apresentar a condição de detecção é avaliar, temporalmente, a relação sinal-ruído SNR recebida pelo receptor em relação à condição mínima de detecção do receptor radar em uso, sintetizado em (5).

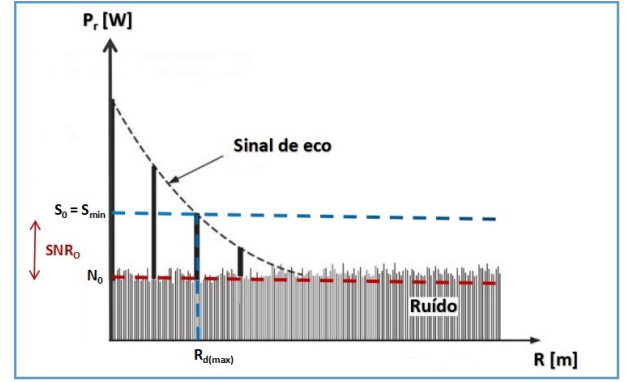


Fig. 2. Descrição da detecção radar de um alvo em função da potência recebida pelo um receptor determinando o alcance máximo [8].

$$SNR \geq SNR_{0(min)} \quad (5)$$

C. Interferência Radar

A interferência eletromagnética tem o propósito de inviabilizar o uso do espectro eletromagnético por um sistema de comunicação e/ou detecção em uma determinada banda de frequência em um determinado período de tempo.

Conforme a Fig. 3, é apresentado um diagrama de sinais em função do tempo atuando no receptor do radar.

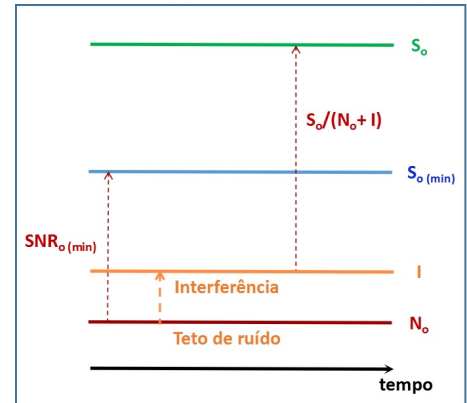


Fig. 3. Diagrama de sinais em função do tempo no receptor radar.

O sinal de interferência I é inserido no receptor do radar alterando a condição de detecção descrita em (5), pois com a inclusão da interferência I , o teto de ruído N_0 se eleva. A condição de detecção passa a ser determinada por (6).

$$\left(\frac{S_0}{N_0 + I} \right) \geq SNR_{0(min)} \quad (6)$$

Na possibilidade de realizar a interferência entre radares, existem 3 condições possíveis para a sua execução. A primeira condição é o acoplamento mútuo; a segunda possibilidade é quando a sensibilidade é comum entre os receptores, que está relacionada ao sinal de transmissão e processamento de sinal empregado; e, por último, a distância entre os sistemas de radar [9].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Radar Hipotético

Neste trabalho é utilizado o conceito de um radar hipotético, no intuito de se avaliarem os requisitos técnicos de um radar

de emprego naval de uso geral. Os dados são apresentados na Tabela II.

TABELA II
DADOS TÉCNICOS DO RADAR HIPOTÉTICO

Frequência de Operação	9,41 GHz	LP	600 ns
Velocidade de Rotação	12 RPM	IRP	2,5 ms
Abertura Vertical da Antena	50°	AMNA	202 NM
Polarização	Horizontal	Potência de Pico	20 kW
P_{fa}	10^{-6}	G	32 dB

Os radares possuem uma capacidade de determinar um alcance máximo, definido pela sigla AMNA (Alcance Máximo Não Ambíguo). Para o radar hipotético empregado nesse trabalho é no valor de 202 NM (374,1 km). O AMNA está correlacionado com o IRP (Intervalo de Repetição de Pulso), que representa a taxa de emissão de um pulso radar [10].

Há também uma distância mínima na qual o radar inicia a sua detecção, definida pela largura de pulso (LP) da onda eletromagnética emitida pelo transmissor. No caso do radar hipotético é um valor próximo de 0,048 NM (90 m) [10].

O $SNR_{0(min)}$ do radar hipotético é definido para um valor de 31,73 dB na frequência de operação do radar. Considerando uma temperatura T_e de 313 K, uma BW de 60 MHz e uma F_n de 4,7 dB, é obtido o teto de ruído N_0 no valor de -118,7 dBW. Empregando (4), a condição para ocorrer a detecção no radar hipotético, sem interferência, é que $S \geq -86,97$ dBW.

B. Modelagem e Simulação da Embarcação

Neste estudo, é utilizado um CAD (Computer Aided Design) de uma embarcação com características geométricas equivalentes às utilizadas nas marinhas, na escala 1 : 1, implica a obtenção de uma elevada correlação ao ambiente real, Fig. 4.

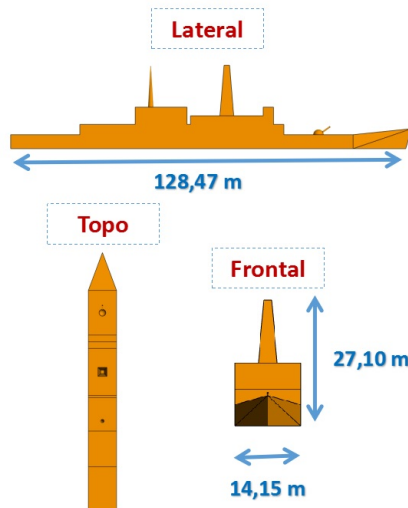


Fig. 4. Geometria da embarcação empregada nas simulações eletromagnéticas.

O software utilizado no estudo é o FEKO®, da empresa ALTAIR, sendo aplicado o método assintótico RL-GO (Ray Launching - Geometrical Optics) com discretizações (mesh)

de $\lambda/2$ no CAD. Todas as modelagens e simulações utilizaram uma máquina Intel Xeon E-2246 com 12 núcleos e uma memória RAM de 64 GB.

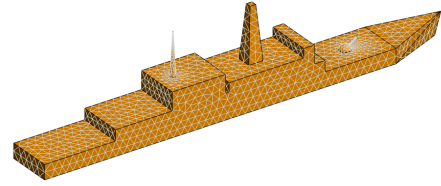


Fig. 5. Apresentação do mesh modelado no FEKO® para a embarcação.

O material empregado no modelo CAD é o metálico (PEC - Perfect Electric Conductor). O mesh realizado no FEKO® obteve uma estrutura com um total de 3.318 triângulos com arestas de dimensões no valor de $1,98 \pm 0,72$ m, tendo um máximo de 3,63 m e um mínimo de 0,06 m, Fig. 5.

C. Planejamento de Engajamento

Na Fig. 6 está apresentada a disposição de engajamento do radar em 360° de azimuth ϕ , sendo o ângulo 0° a popa, 90° o través de boreste, 180° a proa e 270° o través de bombordo.

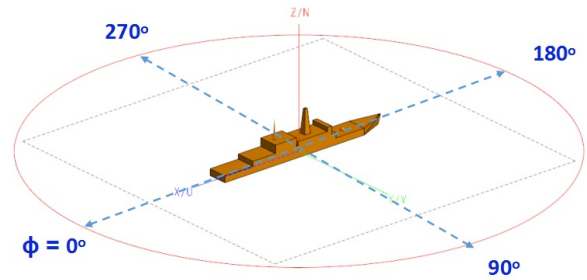


Fig. 6. Visão geral dos ângulos de engajamento realizado pelo radar na embarcação.

O radar hipotético é simulado na frequência de 9,41 GHz, na polarização horizontal. A metodologia empregada consiste em realizar o engajamento em todos os ângulos azimutais com passos de 1°.

O experimento realizado corresponde a compreender a condição de posicionamento de uma embarcação vítima com relação à embarcação interferidora, a que recebe o efeito da interferência, e a embarcação interferidora, a que realiza a interferência, variando o azimuth ϕ e a distância R conforme disposição topológica descrita na Fig. 7. As embarcações vítima e interferidora realizam um deslocamento em trajetórias de deslocamento em paralelo.

São empregadas 4 (quatro) condições hipotéticas para a realização dessa análise. A primeira condição é que as antenas estão sincronizadas em uma condição em que os lóbulos principais das antenas do radar se encontram em oposição de fase em ganho máximo, conforme Fig. 8. Uma segunda condição é que os diagramas temporais dos pulsos radar estão em fase, com a mesma largura de pulso (LP) e o mesmo intervalo de repetição de pulso (IRP). A terceira condição é que o mar está calmo, sem a existência de clutter originado das ondas marítimas. A quarta condição é que os engajamentos são realizados de um para um, não havendo uma

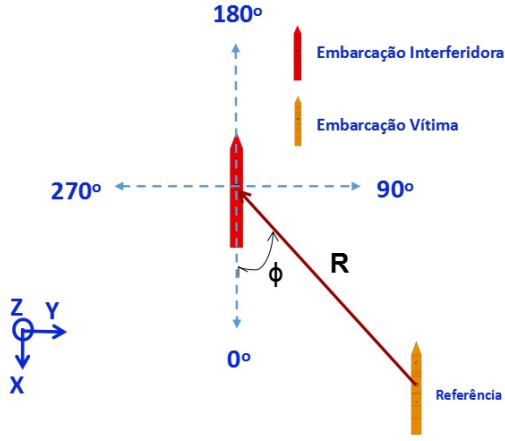


Fig. 7. Visão de topo do procedimento de engajamento entre embarcação vítima e interferidora com uma distância R e azimute ϕ .

terceira ou mais embarcações no processo. Estas proposições ideais correspondem a uma hipótese de máxima possibilidade de interferência, sendo uma condição de pior caso a ser analisado para a embarcação vítima.

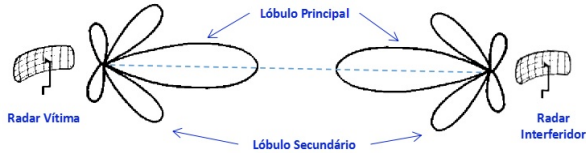


Fig. 8. Diagrama de engajamentos do radar vítima com o radar interferidor.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. RCS Estática da Embarcação

Aplicando o CAD da embarcação no FEKO®, é realizado o modelamento da emissão do vetor de Poynting $\vec{S}$ conforme a Fig. 9, tendo uma variação azimutal de $0^\circ \leq \phi < 360^\circ$ e elevação de $\theta = 90^\circ$.

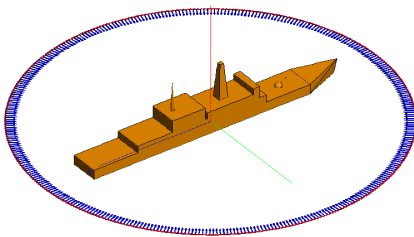


Fig. 9. Modelamento do CAD da embarcação para determinação da RCS estática.

Na Fig. 10 são apresentados os valores da RCS, em dBsm, em função do azimute ϕ . O tempo realizado para determinação da RCS foi de 2 dias, 10 horas e 3 minutos. A partir dos dados obtidos, é observado que os maiores valores estão nos azimutes de 0° , 90° , 180° e 270° , com uma RCS média de $25,29 \pm 10,82$ dBsm tendo um valor máximo de $100,07$ dBsm e um valor mínimo de $-0,30$ dBsm.

A partir dos dados obtidos da RCS da embarcação são determinados os valores de S_0 em função de ϕ com passos de 1° .

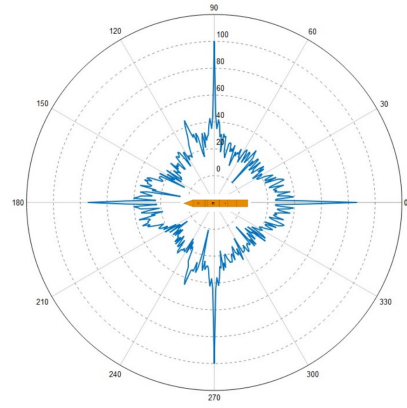


Fig. 10. RCS estática da embarcação, na forma polar, com eixo radial em dBsm.

B. Relação Sinal-Ruído da Interferência na Embarcação

Considerando os dados do radar hipotético, o efeito da distância entre a fonte de sinal interferente e a vítima da interferência alteram o diagrama de sinais apresentado na Fig. 3. Tendo como referência a equação (1), a distância de detecção R está relacionada a condição $R \sim \sqrt[4]{1/SNR}$. Considerando o caso em que a interferência $I = 0$, o aumento da distância R entre as embarcações, em um azimute fixo ϕ , corresponde a um menor valor de SNR . Ao empregar os dados do radar hipotético, é traçada a marcação de alcance mínimo, o AMNA, o teto de ruído N_0 e o sinal de eco radar S_0 , Fig. 11.

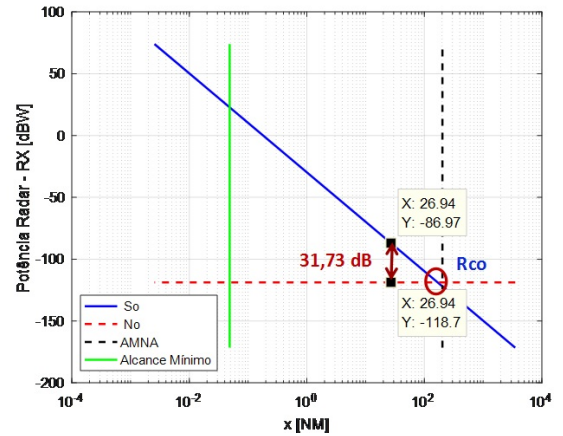


Fig. 11. Diagrama de sinais em função da distância entre a embarcação vítima e interferidora quando $I = 0$, identificando o ponto de crossover (R_{co}).

Ao engajar uma embarcação que possui uma RCS de $4 m^2$ em um determinado azimute ϕ , o alcance máximo de detecção R_d sem interferência é no valor de $26,94$ NM. Nesta distância, que corresponde ao alcance máximo, o receptor possui um $SNR = SNR_{0(min)} = 31,73$ dB. A partir dessa marcação, o radar perde a detecção do alvo e o valor de SNR diminui até que $S_0 = N_0$, descrito em (4). Esta condição corresponde à distância de crossover R_{co} , que representa a condição em que o sinal de eco radar é igual ao teto de ruído. A partir dessa distância, o sinal de ruído N_0 é maior que o sinal de eco radar S_0 , proporcionando uma condição de interferência natural no sistema radar.

A Fig. 12 apresenta o valor de R_d aplicado aos dados

das RCS obtidas na simulação da embarcação em função dos azimutes ϕ , onde d_{max} corresponde ao valor de AMNA e d_{min} representa a distância mínima detectável pelo radar hipotético. Em todos os azimutes calculados, a distância de *crossover* R_{co} está acima do valor de AMNA.

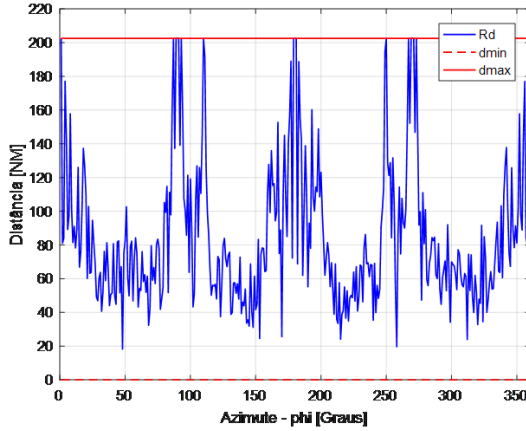


Fig. 12. Alcance de detecção R_d da embarcação interferidora pela embarcação vítima quando $I = 0$.

Ao avaliar os dados da Fig. 12, em todos os azimutes engajados, a embarcação interferidora é detectada, tendo um valor mínimo de alcance de 18,23 NM (33,76 km) e um valor máximo de 202,48 NM (375,00 km). É importante observar que fora os azimutes de 0° , 90° , 180° e 270° , a RCS cai abruptamente para valores em torno de 20 dBsm ($100 m^2$), o que leva a uma diminuição significativa do alcance de detecção nas condições diagonais de engajamento radar.

No momento em que a embarcação interferidora aciona o seu radar, o teto de ruído se eleva, sendo determinado por $N_0 + I$. Considerando a condição anterior de engajamento com o ângulo ϕ , com a RCS de $4 m^2$, o alcance radar com interferência R_{dI} é menor que o alcance mínimo do radar hipotético e a distância de *crossover* com interferência R_{coI} é no valor de 0,086 NM (159,27 m), Fig. 13.

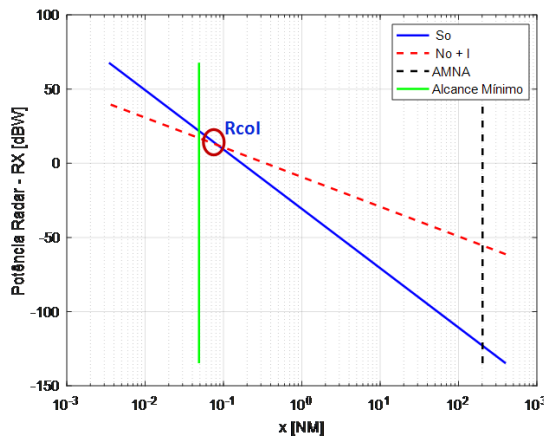


Fig. 13. Diagrama de sinais em função da distância entre a embarcação vítima e interferidora quando $I > 0$, identificando o ponto de *crossover* de interferência (R_{coI}).

O valor de R_{coI} , Fig. 13, corresponde a posição em relação à embarcação vítima em que a embarcação interferidora para de interferir, mas sem ocorrer a sua detecção por parte da

embarcação vítima. Em síntese, se a distância física R , Fig. 7, entre a embarcação vítima e a interferidora for maior que R_{coI} , a interferência é efetiva na embarcação vítima.

Em função dessa análise, é calculado o valor de R_{coI} em todos os azimutes de engajamento e apresentado na Fig. 14.

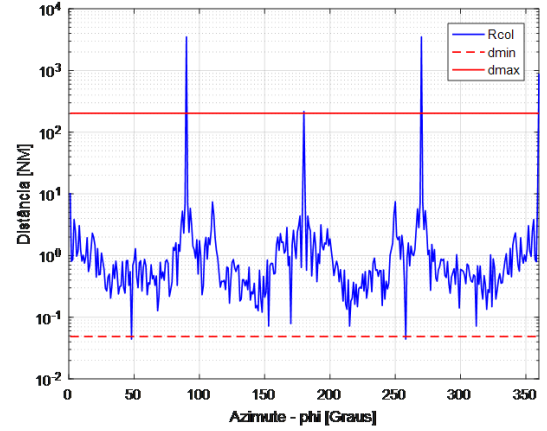


Fig. 14. Disposição dos valores de R_{coI} em relação aos azimutes ϕ de engajamento da embarcação vítima.

Conforme a Fig. 14, os valores de R_{coI} possuem uma elevada variação em função do azimute ϕ . Tendo o objetivo de evitar o efeito da interferência entre radares em uma formação naval em qualquer ângulo azimutal, a condição de menor R_{coI} é escolhida, tendo um valor de 0,13 NM (240,76 m).

Contudo, existem ângulos ϕ em que os valores de R_{coI} são bem elevados, Fig. 14. Nos ângulos de 0° , 90° , 180° e 270° , o R_{coI} está no limite de detecção do radar hipotético de 202 NM (374,1 km), o que possibilita uma navegação com as embarcações quando dispostas em linha ou em coluna.

Mesmo tendo elevados valores de R_{coI} nesses azimutes, é calculado o valor de R_{dI} que corresponde ao alcance máximo de detecção da embarcação interferidora pela embarcação vítima com interferência efetiva. Esses valores são apresentados na Tabela III.

TABELA III
VALORES DE R_{dI} PARA AZIMUTES ESPECÍFICOS.

Azimute [graus]	RCS [dBsm]	R_{dI} [NM]
0	86,43	24,28
90	100,07	37,01
180	74,21	5,95
270	100,07	37,01

Conforme a Fig. 15, na condição das embarcações em coluna, os ângulos prováveis são os de 0° ou 180° . O menor valor de R_{dI} é o recomendado. No caso, a distância das embarcações em coluna d_c deve ser menor que 5,95 NM (11,02 km). Na condição das embarcações em linha, os ângulos prováveis são os de 90° ou 270° . É recomendado, neste caso, que a distância das embarcações em linha d_l deve ser menor que 37,01 NM (68,54 km).

V. CONCLUSÃO

Este trabalho tem o objetivo de compreender o comportamento do efeito eletromagnético de 2 radares de emprego naval operados em embarcações distintas, na mesma frequência e em várias condições de azimute. É empregado o conceito

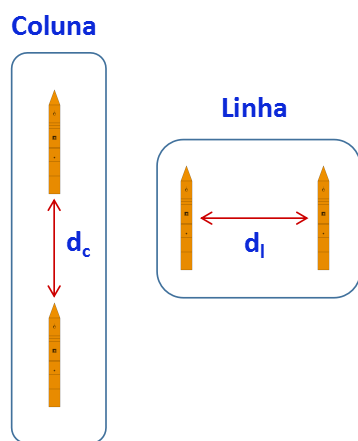


Fig. 15. Disposição da formação em linha e coluna.

de um radar hipotético para que seja realizado o conjunto de análises técnicas.

Através das simulações eletromagnéticas da embarcação, foram calculados os valores da RCS em função dos azimutes de engajamento. A partir desses valores, foram obtidas as relações de SNR para condições com interferência e sem interferência. Está evidenciado que a interferência ocorre entre os radares, sendo altamente dependente da condição angular de engajamento devido ao efeito da RCS da embarcação interferidora.

O efeito da interferência é menos efetivo nos ângulos de 0° , 90° , 180° e 270° . A partir dessa condição, é sugerida uma disposição de formação marítima no intuito de atenuar o efeito da interferência quando todas as embarcações utilizam o mesmo radar com frequências iguais, sendo a formação por coluna e por linha as ideais para essa situação.

Esse estudo contribui, de forma técnica, ao entendimento do efeito da interferência co-canal entre radares de emprego naval, propondo disposições e distâncias entre as embarcações visando atenuar os efeitos dessas interferências nos deslocamentos operacionais.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS) do INPE, pelo uso das suas instalações computacionais e a empresa ALTAIR pela possibilidade de emprego do software FEKO® nas modelagens e simulações eletromagnéticas.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Kim, Y. Kim, M. Kang, S. Cho, and B. Kim, "Inter-Radar Interference Analysis Based on L and S Band Propagation Models and Radar Beam-Scanning Scenarios," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 125 744–125 753, 2022.
- [2] Seaman James R. Evans, "Rimpac battlegroup 2006," Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2213083>. Acesso em: 22 de julho 2023.
- [3] D. J. Griffiths, *Eletrodinâmica*, 3rd ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.
- [4] C. Balanis, *Teoria de Antenas*. Rio de Janeiro: LTC, 2009, vol. 1.
- [5] B. Mahafza, *Radar Signal Analysis and Processing using Matlab*, Alabama, 2009.
- [6] E. F. Knott, J. F. Schaeffer, and M. T. Tulley, *Radar Cross Section*. SciTech Publishing, 2004.
- [7] P. Williams, H. Cramp, and K. Curtis, "Experimental Study of the Radar Cross-Section of Maritime Targets," *IEE Journal on Electronic Circuits and Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 121–136, 1978.

- [8] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 2nd ed. Mendham: SciTech Publishing, 1998.
- [9] O. van Gent, R. van Heijster, M. Heiligers, A. Theil, M. Driesse, and W. Sahebali, "TNO 2020 R11396 - Radar Interference Study," 2021.
- [10] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill, 1980.