

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE RADARES LPI (*LOW PROBABILITY OF INTERCEPT*) FRENTE A SENSORES PASSIVOS AEROEMBARCADOS DE GUERRA ELETRÔNICA

ANALYSIS OF LPI RADAR PERFORMANCE (LOW PROBABILITY OF INTERCEPT) VERSUS BOARDED PASSIVE SENSORS OF ELECTRONIC WARFARE

O Cap Av Renan Miranda Richter concluiu o CFOAV em 2008. Possui graduação em Ciências Aeronáuticas e Administração pela Academia da Força Aérea (2008), especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica (2017) e mestrado em Guerra Eletrônica pelo Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais (PPGAO/2020). Atualmente é oficial adjunto da Subchefia de Avaliação e Doutrina do COMPREP.

Contato: richterrmr@fab.mil.br



O Cap RNR Thiago de Souza Mansur Pereira concluiu a graduação em Engenharia Eletrônica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica em 2007 e possui mestrado em Guerra Eletrônica pelo ITA (2014). No ano de 2018 solicitou demissão da FAB.



RESUMO

Este artigo traz um estudo acerca da mensuração dos riscos advindos dos radares LPI (*Low Probability of Intercept*) frente a sensores passivos aeroembarcados de Guerra Eletrônica. Atualmente, tais radares representam o “estado da arte” do combate eletromagnético e ensejam cada vez mais atenção por parte das equipagens oponentes. Estes equipamentos utilizam comumente técnicas de modulação intrapulso, as quais conseguem tornar suas transmissões deveras furtivas, com alcance e resolução radares bastante otimizados. O contraponto feito a sensores passivos justifica-se pelo fato de que a priori tais equipamentos possuem uma vantagem de detecção em distância se comparados ao radar em geral e por isso são bastante difundidos como plataformas stand-off. A análise teórica do artigo repousa sobre os conceitos de modulação intrapulso do tipo LFM (*Linear Frequency Modulation*) e das equações radar/sensor passivo. Conduziram-se também simulações direcionadas aos aspectos de perda de detecção em distância levando-se em conta alguns cenários de variação de parâmetros do radar e do sensor passivo. O resultado da análise permitiu confirmar o quão um radar LPI pode ser um equipamento de extremo valor em um teatro de operações e o quanto as Forças Armadas brasileiras devem estar atentas ao advento de tais dispositivos.

Palavras-Chave: Modulação intrapulso, Guerra Eletrônica, Sinais Radar, Sensores Passivos.

ABSTRACT

This paper brings a study about the measurement of the risks of LPI (*Low Probability of Intercept*) radars against passive sensors of Electronic Warfare. Currently, such radars represent the “state of the art” of electromagnetic combat and are increasingly attracting attention from opponent’s equipment. This type of radar commonly uses intrapulse modulation techniques which can turn transmissions into ones really stealth, with radar scope and resolution quite optimized. The counterpoint to passive sensors is justified by the fact that a priori such equipment has a distance detection advantage if compared to radar equipment and therefore they are quite widespread as stand-off platforms. The theoretical analysis of the article rests on the concepts of intrapulse modulation of the LFM type (*Linear Frequency Modulation*) and the radar / passive sensor equations. Simulations were also conducted on distance loss detection aspects, taking into account some scenarios in which variation of radar and passive sensor parameters are included. The result of the analysis allowed to confirm how a LPI radar could become an equipment of extreme value in a theater of operations and how much attention Brazilian Armed Forces must pay regarding the advent of such devices.

Keywords: Intrapulse Modulation, Electronic Warfare, Radar Signals, Passive Sensors

I – INTRODUÇÃO

A Guerra Moderna, dia a dia mais complexa, e que arraiga de maneira crescente a Ciência às suas concepções, impõe constantes desafios às nações que conduzem suas Forças Armadas sob a égide do constante desenvolvimento e aperfeiçoamento operacionais. Sistemas furtivos, dotados da mais alta letalidade, radares das mais diversas concepções e comunicações advindas das mais variadas fontes, emaranham o ambiente eletromagnético e são peças determinantes no curso de conflitos armados [1].

Neste contexto, surgem os modernos radares LPI (*Low Probability of Intercept*), equipamentos que representam a vanguarda da Guerra Eletrônica e que utilizam técnicas de modulação intrapulso para a potencialização de algumas de suas capacidades. Com tais técnicas eles conseguem reduzir suas potências de pico, distribuindo seus pulsos em larguras temporais consideravelmente maiores, diminuindo sua detectibilidade sem afetar, contudo, seu alcance. Em segunda instância, a modulação intrapulso proporciona aos radares LPI a possibilidade do desacoplamento de dois conceitos: o de largura de pulso e o de resolução em distância. Isto confere notável vantagem aos radares LPI de tal forma que ela concede a possibilidade do incremento da energia do pulso (aumento de largura de pulso) sem, no entanto, comprometer sua célula de resolução [2]. A Fig. 1 representa uma comparação entre um pulso LPI e um pulso radar convencional.

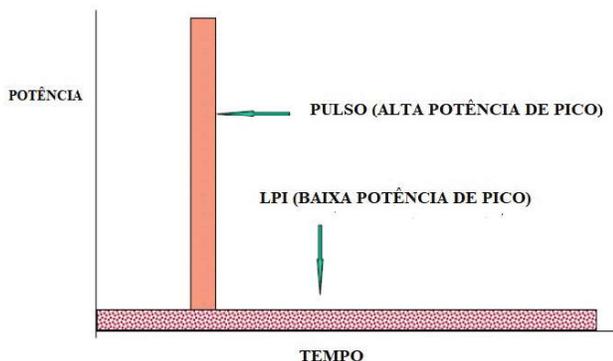


Figura 1 - Comparativo entre um sinal radar convencional e um radar LPI.

Visto isso, este artigo tem como enfoque principal a investigação da vantagem em distância de detecção que os radares LPI possuem frente a receptores passivos de Guerra Eletrônica aeroembarcados, os quais, em tese, representam a maior capacidade de contraposição operacional neste quesito.

Analisando teoricamente a técnica de modulação intrapulso do tipo LFM em consonância com o parâmetro “*time-bandwidth product*” (explicitado no texto como “ganho de processamento”)

paralelamente com as equações do radar e do sensor passivo, foram realizadas simulações variando-se alguns parâmetros de ambos os equipamentos. Este artigo pretende, portanto, lançar dados relevantes de mensuração das ameaças provenientes de um embate entre um radar LPI e um sensor passivo aeroembarcado. Foi ainda enfatizado no escopo do trabalho o conceito de filtro casado, parte fundamental do processamento de um sinal radar, em que ocorre a compressão do pulso, fundamental para se atingir o limiar de detecção.

O artigo foi organizado em cinco seções. Na seção II foi abordada a modulação intrapulso e de que forma ela pode se tornar uma potencial aliada para sistemas radar, além de uma dedução teórica da modulação do tipo LFM. Ainda foi apresentado nesta seção o conceito de filtro casado e sua importância para o processamento dos sinais radar. Na seção III foram explicitados as equações e os parâmetros sobre os quais se desenrolaram as simulações. Na seção IV foram quantizados os resultados advindos das simulações, e finalmente na seção V foram tecidas considerações acerca da importância do estudo das características de um radar LPI para as Forças Armadas brasileiras em geral. As Figs. 2 e 3 representam, respectivamente, um radar LPI e uma aeronave que possui um sensor passivo aeroembarcado de Guerra Eletrônica.



Figura 2 - Radar LPI de vigilância espanhol Aries, banda de operação de 600 MHz.



Figura 3 - Aeronave P-3AM da Força Aérea Brasileira.

II – A MODULAÇÃO INTRAPULSO

O propósito basilar de um sistema radar é, por meio de emissões eletromagnéticas, em um trajeto de incidência e posterior reflexão, obter informações de um alvo de interesse, entre eles: detecção em si, distância, velocidade, entre outros [1].

Portanto, pode-se calcular a distância de um radar para um alvo através do cômputo do intervalo de tempo desde o instante de início da emissão até o instante de chegada da emissão. Sendo T o intervalo de tempo citado anteriormente e C a velocidade de propagação da luz no vácuo, a distância R do radar até o alvo pode ser calculada por (1) [2]:

$$R = cT/2 \quad (1)$$

Neste contexto, é oportuno inserir o conceito de Intervalo de Repetição de Pulso (IRP), que consiste no intervalo de tempo decorrido entre a emissão de dois pulsos consecutivos. No entanto, deve-se tomar um certo cuidado ao empregar a definição. Tendo em vista a possibilidade de chegada do primeiro pulso refletido após a emissão do segundo pulso, uma inconsistência pode ser gerada à lógica do equipamento, já que ele não possuirá a garantia de qual pulso estará processando e com isso, a avaliação de distância pode ser prejudicada. Por isso, para definições de máximo alcance radar (R_{max}), a IRP pode ser definida por (2):

$$IRP = 2(R_{MAX}/c) \quad (2)$$

Além do aspecto anteriormente citado, deve-se incutir outro fato básico para que o processamento do radar não seja errôneo, ou até mesmo ignore a presença de dois alvos próximos: a resolução mínima em distância (ΔR_{min}). Tal definição descortina-se pela possibilidade de sobreposição de ecos de dois pulsos subsequentes, em um mesmo azimute. Se tal fato ocorrer, o radar não será capaz de distinguir alvos diferentes, portanto, sabendo que a largura de pulso é representada por τ , a resolução mínima em distância fica definida por (3):

$$\Delta R_{min} = c\tau/2 \quad (3)$$

Pela equação (3), fica denotada a relação entre a largura de pulso e a resolução em distância. Se o objetivo é incrementar a resolução em distância, deve-se diminuir a largura de pulso. Entretanto, gera-se uma dicotomia: a diminuição da largura de pulso acarreta invariavelmente um aumento da potência de pico do radar, tal como exposto por (4), em que E_p é a energia do pulso e P_p é a potência de pico do radar:

$$E_p = P_p \cdot \tau \quad (4)$$

Desta forma, ao incrementar-se a resolução em distância, a potência de pico teria também que ser aumentada para uma emissão com boa confiabilidade para retorno de processamento e indesejavelmente, mais suscetível a interceptações. Transmitir sinais com considerável potência de pico é bastante contraindicado em um teatro de operações, onde o oponente está ávido por captar informações advindas do espectro eletromagnético, armazená-las e obter informações de Inteligência acerca do inimigo. Somente por estes aspectos básicos de projeto de um radar, ficou evidenciado o quanto é minuciosa a definição do caráter e objetivo principal de um sistema desta estirpe. Haveria de se considerar, portanto, inúmeras relações de compromisso que acabaram por incentivar a pesquisa e o desenvolvimento de novas tendências [3].

Neste ínterim, desenvolveu-se a modulação intrapulso, uma alternativa frente ao desenvolvimento de receptores passivos com maior capacidade. Também conhecidas como técnicas IMOP (*Intentional Modulation on Pulse*), elas atuam alterando a fase, a frequência, ou a amplitude do pulso gerado e seu escopo apresenta os seguintes aspectos fundamentais: a busca por resolução em distância, a busca por resolução em frequência e a maximização de alcance do radar. Todas elas se baseiam no aumento da largura de pulso, com conseqüente distribuição de energia no domínio do tempo e diminuição da potência de pico. Outro aspecto de fundamental importância é o desacoplamento das noções de largura de pulso e de resolução em distância, fundamentais para as atividades-fim de um radar [4].

A. Modulação do tipo LFM (*Linear Frequency Modulation*)

A técnica do tipo LFM constitui-se basicamente de uma modulação linear na frequência portadora do pulso. Um sinal com modulação LFM, em que f_0 é a frequência inicial da portadora, BW é a largura de banda do radar e $a(t)$ é uma função que define a amplitude do pulso, pode ser representado por [5]:

$$x(t) = a(t) \cdot \cos[2\pi f_0 t + \frac{\pi BW}{\tau} t^2] \quad (5)$$

Sua representação complexa pode ser dada por (6) e a expressão do envelope complexo do sinal pode ser dada por (7), sendo e o número de Euler e j a unidade imaginária:

$$\hat{x}(t) = a(t) e^{j \frac{\pi BW t^2}{\tau}} e^{j 2\pi f_0 t} \quad (6)$$

$$U(t) = a(t) e^{j \frac{\pi BW t^2}{\tau}} \quad (7)$$

Passando a tratar o sinal no domínio da frequência, não é mais necessário operar com base em $x(t)$. O fato de a modulação transportar o espectro de banda base para banda de passagem faz com que toda a observação possa ser feita no envelope complexo do sinal. Dessa maneira, adota-se uma função bastante difundida em estudos de radar denominada *rect*, para representação de pulsos retangulares ideais. A relação é dada por (8):

$$U(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j\frac{\pi BW t^2}{\tau}} \quad (8)$$

Efetuando-se a Transformada de Fourier do sinal chega-se a (9) no domínio da frequência:

$$U(f) = \sqrt{\frac{\tau}{2BW}} e^{-j\frac{\pi BW}{\tau} f^2} [Z(x_2) - Z(x_1)] \quad (9)$$

Em que $Z(x)$ é a integral complexa de Fresnel, tal que:

$$Z(x) = \int_0^x e^{j\frac{\pi z^2}{2}} dz \quad (10)$$

$$x_2 = -2f \sqrt{\frac{\tau}{2BW}} + \sqrt{\frac{\tau BW}{2}} \quad (11)$$

$$x_1 = -2f \sqrt{\frac{\tau}{2BW}} - \sqrt{\frac{\tau BW}{2}} \quad (12)$$

Utilizando a partir de agora o princípio da fase estacionária, em que ω é a frequência angular do pulso e assumindo que o integrando é altamente oscilatório, tem-se:

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) e^{j\varphi(t, \omega)} dt \quad (13)$$

Em que $\varphi(t, \omega) = [\phi(t) - \omega t]$

Para o caso de modulação LFM, tal que o ponto estacionário seja $t = t_0$ e a primeira derivada seja um ponto nulo, tem-se (14), para valores $-BW/2 \leq f \leq BW/2$:

$$U(f) \approx j \sqrt{\frac{\tau}{BW}} e^{-j\frac{\pi}{4}} e^{-j\frac{\pi f^2}{2BW}} \quad (14)$$

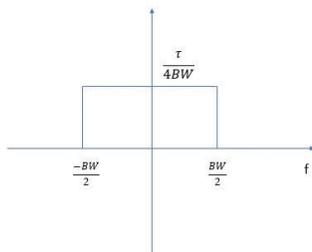


Figura 4 - O espectro de amplitude $|U(f)|^2$ de um pulso LFM.

Portanto, o aspecto deste sinal (Fig. 4) apresenta grande diferença em relação à análise de espectro de um sinal sem modulação intrapulso, o qual tem sua largura de banda descrito por:

$$BW = 1/\tau \quad (15)$$

De posse de todas as considerações, podem-se inferir as vantagens de um radar LPI que utiliza técnicas de modulação LFM. O projeto de um modelo intrapulso desacopla os conceitos de BW e largura de pulso. Uma emissão pode então transportar muito mais energia, já que estará mais distribuída temporalmente. Consequentemente, o pulso terá maior alcance e em segunda instância, terá maior resolução espacial, já que agora a resolução espacial é regida por:

$$\Delta R_{LFM} = c/2BW \quad (16)$$

B. Filtro Casado para modulação LFM

O filtro casado é um dispositivo criado para maximizar a relação sinal-ruído na recepção do radar, aparato este que processa o sinal, gerando um “ganho de processamento”, capaz de ultrapassar o limiar de detecção do radar. O termo “casado” faz referência ao filtro ser otimizado exatamente para um único tipo de forma de onda [7].

A resposta do filtro casado para a modulação LFM possui vantagens em relação à resposta de um filtro casado para um pulso não modulado, entre as quais, por ser alvo deste estudo, destaca-se o fator de processamento que gera vantagem sobre os radares comuns, chamado “*time-bandwidth product*” ($BW \cdot \tau$). Este termo aumenta a relação sinal-ruído na saída do filtro e é conhecido também como “ganho de compressão”. Em geral o “ganho de compressão” para emissões não moduladas aproxima-se da unidade. Já para radares detentores de modulação intrapulso ele pode se revelar muito maior que a unidade, o que enseja uma análise pormenorizada das suas características, as quais são alvo deste artigo.

III – DESCRIÇÃO TEÓRICA DA SIMULAÇÃO DE RADAR LPI VERSUS SENSOR PASSIVO AERO-EMBARCADO

A proposta da simulação reside na mensuração do fator vantagem MAGE frente a um hipotético radar LPI, em que serão investigadas condições variantes. A sigla MAGE faz referência ao termo “Medidas de Apoio de Guerra Eletrônica”, divisão da Guerra Eletrônica que lida com sensores passivos.

O primeiro aspecto a ser definido é o conceito de vantagem MAGE, o qual consiste na diferença entre a máxima distância de detecção MAGE e a

simulação, a vantagem MAGE ($V_{MAGE(\%)}$) foi equacionada em termos de porcentagem, tal qual (17), em que R_{MAGE} é a distância máxima de detecção MAGE e R_{MAXRAD} é a distância máxima de detecção radar:

$$V_{MAGE(\%)} = \frac{R_{MAGE} - R_{MAXRAD}}{R_{MAXRAD}} \quad (17)$$

A equação radar utilizada segue a notação (18), em que $(S/N)_{pdfarad}$ é a relação sinal-ruído para uma determinada probabilidade de detecção e uma determinada probabilidade de falso alarme, P_t é a potência de transmissão do radar, G é o ganho do radar, em que foram admitidos os ganhos de transmissão e recepção iguais, λ é o comprimento de onda da emissão, L_R é a seção reta radar do alvo, BW é a largura de banda LFM, T é a largura de pulso e L_R são as perdas totais do radar:

$$(S/N)_{pdfarad} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma BWT}{(4\pi)^2 (R_{MAXRAD})^4 L_R} \quad (18)$$

A equação do sensor passivo, por sua vez, seguiu a notação (19), em que $(S/N)_{pdfamage}$ é a relação sinal ruído referente ao sensor passivo para uma determinada probabilidade de detecção e uma determinada probabilidade de falso alarme, G_M é o ganho referente ao receptor MAGE e L_M são as perdas referentes ao sensor passivo:

$$(S/N)_{pdfamage} = \frac{P_t G_M \sigma \lambda^2}{(4\pi)^2 (R_{MAGE})^2 L_M} \quad (19)$$

Para o estabelecimento de valores sinal-ruído do radar, foi utilizada a Fig. 5 para o caso 5 de Swerling (supondo uma aeronave de grande porte, aproximadamente não flutuante nos valores de seção reta radar):

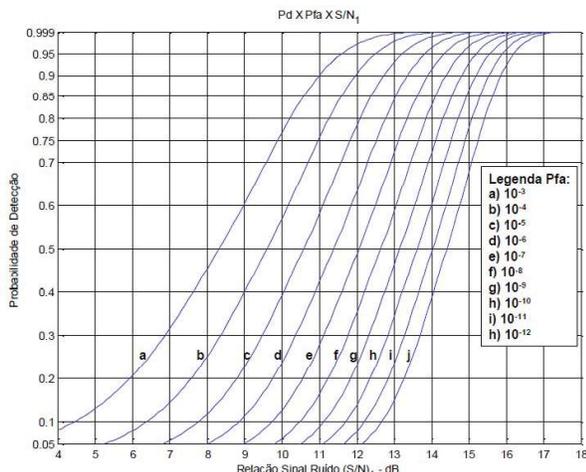


Figura 5 - Valores de Swerling 5 (alvos pouco flutuantes) [2].

Já para a obtenção dos valores de sinal-ruído atinentes à recepção MAGE, foram utilizadas a Fig. 6 e a Tabela I para a obtenção dos valores reais, com base em determinadas probabilidades de detecção (Pd) e probabilidades de incidência de falsos alarmes (Pfa):

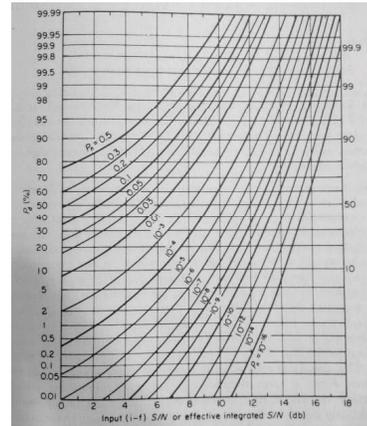


Figura 6 - Valores de Pd/Pfa para determinadas relações sinal-ruído MAGE (integração de um único pulso) [6].

Tabela 1 - Número de pulsos (M) necessários por integração do MAGE, para determinadas PD e PFA [6].

RELAÇÃO SINAL-RUÍDO REQUERIDA PARA UM NÚMERO DE PULSOS CONSECUTIVOS ACIMA DO LIMIAR DE DETECÇÃO			
M	S/N (dB)	Pd	Pfa
1	13.5	0.9	10-4
2	11.5	0.95	10-3
5	9.1	0.98	6.3 x 10-2
10	8.2	0.99	0.25
20	7.5	0.995	0.5

Os parâmetros potência de transmissão do radar, ganho do radar, ganho do MAGE, perdas totais do radar, perdas totais do MAGE, largura de pulso e comprimento de onda foram baseados em um radar de busca aérea convencional e em um equipamento MAGE convencional. Já os dados de seção reta radar foram baseados em uma aeronave de grande porte, esteira de turbulência categoria “B”.

IV – SIMULAÇÕES

Inicialmente foi comparado, em um modelo que considera apenas os sinais disponíveis tanto para o radar quanto para o receptor passivo, de que forma se dá o impacto do “ganho de processamento” da modulação LFM em relação à vantagem MAGE. A Fig. 7 elucida o aspecto, em que hipoteticamente foram selecionadas uma sensibilidade de 15.1 dBm para o radar (valor para uma probabilidade de detecção de 99% e uma probabilidade de falso alarme de 10-6) e de 8.2 dBm para o receptor passivo (valor para uma probabilidade de detecção de 99% e uma

probabilidade de falso alarme de 25%, considerando a integração de 10 pulsos consecutivos)[6]. Tais sensibilidades foram selecionadas com base na Fig. 6 e na Tabela 1.

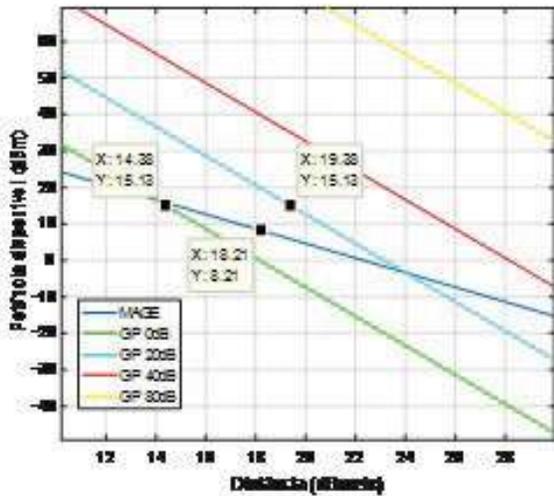


Figura 7 - Impacto inicial de um ganho de processamento sobre a vantagem MAGE.

Os dados obtidos foram explicitados pela Tabela 2:

Tabela 2 - Valores relativos de vantagem MAGE para radar sem ganho de processamento e ganho de processamento de 20 dB.

GANHO DE PROCESSAMENTO	0 dB	20 dB
VANTAGEM MAGE	26%	-6%

Inferese pela Tabela 2 que sensores passivos são bastante superiores contra radares sem modulação intrapulso (ganho de processamento de 0 dB) apresentando vantagem MAGE da ordem de 26%. Em um exemplo prático: se um radar possui um alcance nominal de 200 NM (milhas náuticas), um equipamento MAGE pode detectá-lo a 252 NM. No entanto, observa-se uma inversão de teor em que um ganho de processamento da ordem de 20 dB representou uma queda de vantagem para -6%, ou seja, um radar LPI com este ganho de processamento detectaria uma aeronave com um receptor passivo com vantagem em distância.

Prosseguindo com a averiguação em distância, foi gerada também a Fig. 8 para a determinação exata do ganho de processamento que anularia a vantagem MAGE:

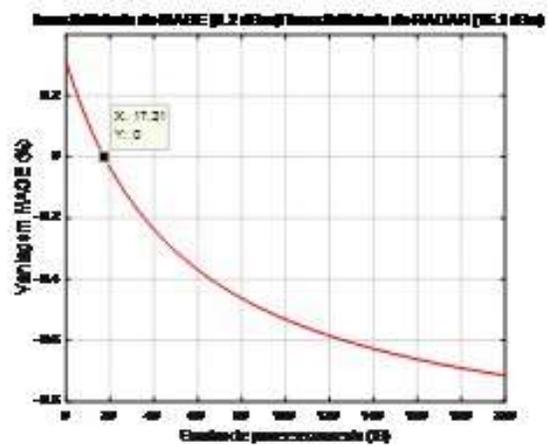


Figura 8 - Ganho de processamento correspondente à vantagem MAGE nula de um sensor passivo.

Desta forma conclui-se que para as hipóteses suscitadas, um ganho de processamento da ordem de 17.3 dB seria capaz de anular a vantagem MAGE do sensor passivo, ou seja, a partir deste valor, o sensor aeroembarcado de Guerra Eletrônica perderia seu principal valor no teatro de operações.

V – CONCLUSÕES

Inegavelmente, o desenvolvimento dos radares LPI trouxe problemas deveras complexos aos projetistas de sensores passivos [7]. A vantagem em distância sobre a qual tradicionalmente os equipamentos MAGE repousavam, precisou ser cuidadosamente reavaliada.

Os resultados advindos deste artigo lançam no cenário da Guerra Eletrônica atual alguns aspectos que alteram o modus operandi na lida contra radares LPI. O uso das técnicas de modulação intrapulso pode forçar drasticamente a alteração da maneira como sensores passivos farão frente a este tipo de ameaça. Um “ganho de processamento” da ordem de 17.31 dB, o qual foi constatado na simulação, capaz de anular a vantagem MAGE de um sensor, pode ser considerado baixo tendo em vista radares LPI com bandas de operação superiores a 100 MHz, hoje, plenamente usados. A atividade de Inteligência de Sinais, nesse caso, é de vital importância para o não sucumbimento dos vetores frente à tão veemente ameaça.

Desta forma, fica evidenciado que o fator planejamento de missão deve estar perfeitamente alinhado à atividade de Inteligência Operacional. Além disso, há de se vislumbrar possibilidades de atenuação das potencialidades dos referidos radares. Como o limiar para equívocos na lida contra radares LPI é bastante reduzido, as informações devem ser cada vez mais precisas para que, ao menos, as equipagens possam ser resguardadas frente ao fogo inimigo e, mais adiante, possam se estabelecer meios de neutralização das ameaças.

REFERÊNCIAS

- [1] RICHTER, R. M. **Um estudo acerca do desempenho de sistemas ELINT frente a radares de modulação intrapulso.** Trabalho de Conclusão de Curso (Lato Sensu) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017, 86F São José dos Campos.
- [2] NERI, F. **Introduction to electronic defense systems.** New York: Artech House, 2001.
- [3] SCHELERER, D. C. **Introduction to electronic warfare.** London: Artech House, 1986.
- [4] ANTONIK, P.; WICKS, M.C. **Waveform diversity: past, present and future.** OTAN. Itália, 2009.
- [5] GOZDE, Ç. **Feature based modulation recognition for intrapulse modulation.** 2006. 161f. Thesis (Applied Sciences) - Middle East Technical University, India.
- [6] WILEY, R. G. **ELINT: the interception and analysis of radar signals.** Washington: Artech House, 2006.
- [7] LEVANON, N.; MOZESON, E. **Radar signals.** London: Wiley-Interscience, 2004.