

A AVIAÇÃO DE PATRULHA E O COMBATE ELETRÔNICO MODERNO: UMA
ANÁLISE ACERCA DO DESEMPENHO DA AERONAVE P-3AM FRENTE AOS
RADARES LPI (LOW PROBABILITY OF INTERCEPT)

TÍTULO DO ARTIGO

CAP AV RENAN MIRANDA RICHTER

AUTOR

São José dos Campos - SP, 2019

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	3
2 O SENSOR ELINT (AMES-C) COMO CONTEMPORIZADOR	4
2.1 O Sistema ELINT na extração de informações.....	4
3 OS RADARES LPI	6
4 A MODULAÇÃO INTRAPULSO	8
4.1 Propósito da modulação intrapulso.....	9
4.2 Modulação do tipo LFM (<i>Linear Frequency Modulation</i>).....	11
4.3 Filtro Casado para modulação LFM.....	14
5 DESCRIÇÃO TEÓRICA DA SIMULAÇÃO DE RADAR LPI CONTRA SENSOR MAGE DA AERONAVE P-3AM	15
6 SIMULAÇÕES	18
7 CONCLUSÃO	20
8 REFERÊNCIAS	21

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Defesa, sendo o mais alto documento condicionante do papel das Forças Armadas, estabelece objetivos e orientações para o preparo e o emprego do setor militar. A Força Aérea Brasileira, como parte integrante deste contexto, e sob a ótica do aprimoramento tecnológico, atravessa um período de intensas mudanças, que exigem modificações abruptas em seu *modus operandi*; característica denotada pela atenção ao risco de que se amplie o desequilíbrio entre as nações caso o macroambiente não seja devidamente interpretado.

A Guerra Moderna, dia a dia mais complexa, e que arraiga cada vez mais 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 inusitadas fontes, emaranham o espectro eletromagnético e são peças determinantes no curso de conflitos armados.

A Força Aérea Brasileira, em consonância com a evolução militar mundial, adquiriu, recentemente, vetores que incrementaram sua capacidade combativa de forma exponencial. Pode-se dizer que este é o caso da aeronave P-3AM, equipada com modernos sensores, dentre os quais possui grande notoriedade o *Advanced Management Eletronic System* (AMES-C), um sensor de GE (Guerra Eletrônica), integrante do rol de Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE). Ele é capaz de interceptar, acompanhar, analisar, identificar e gravar emissões eletromagnéticas na faixa de frequência de 0,5 GHz a 18 GHz. E mais intrinsecamente, atuando no seu modo ELINT (*Electronic Intelligence*), trouxe a potencialidade de análise de modulação intrapulso, principal técnica utilizada pelos mais modernos e letais sistemas radar em voga no cenário mundial, os conhecidos radares LPI (*Low Probability of Intercept*) [1].

A acuracidade da medida de parâmetros intrapulso é, portanto, essencial para a correta tomada de decisões frente os sítios radar, já que as técnicas empregadas conferem notável vantagem operacional aos aparatos que usufruem da potencialidade. Faz-se necessário então que a Força Aérea e em especial a Aviação de Patrulha se insira neste contexto. Este artigo assume o papel introdutório na lida com os radares LPI no âmbito da Força, analisando-os conceitualmente e operacionalmente, com vistas ao enriquecimento doutrinário e à inserção definitiva da Aviação de Patrulha no combate eletrônico moderno. Logo, o foco principal da produção é a investigação da vantagem em distância de detecção que os radares LPI possuem frente ao receptor MAGE da aeronave P-3AM, sensor o qual, em tese, representa a maior capacidade de contraposição operacional neste quesito.

O objetivo deste trabalho é lançar os alicerces do conhecimento da modulação intrapulso, principal técnica dos radares LPI, na Força Aérea Brasileira bem como trazer à tona os riscos que se assumem em ignorar ou descartar tais informações.

2 O SENSOR ELINT (AMES-C) COMO CONTEMPORIZADOR

O propósito inicial de se apresentar o sensor AMES-C da aeronave P-3AM constitui uma ação no sentido de elucidar características de um equipamento que carrega consigo a potencialidade de captura e análise da modulação intrapulso de sinais, ideal para as correlações teórica e operacional, além de constituir balizamento acerca da origem da necessidade do estudo. As características das técnicas de compressão de pulso bem como de que forma sistemas MAGE lidam com a modulação intrapulso são apresentadas de forma generalista no artigo.

O sensor AMES-C como um componente MAGE, amplifica sobremaneira o potencial da aeronave P-3AM frente a todo o rol de missões inerentes à Aviação de Patrulha. Ele utiliza receptores de RF (radiofrequência) para captura e análise de sinais de interesse. Destacando-se missões ELINT, ele se torna de importância vital para uma visão precisa dos níveis de ameaça inimiga, já que é capaz de, em condições pré-estabelecidas, sobrepujar o alcance radar de plataformas hostis e acima de tudo, manter seu caráter passivo, efetuando um profícuo acompanhamento do desenrolar da Ordem de Batalha Eletrônica, sem contudo denunciar a posição do vetor aéreo [1].

O referido sistema opera com a faixa de frequência de emissões eletromagnéticas de 0.5 GHz a 18 GHz em seu envelope de operação. Possui ainda uma forte integração com o TMS (*Tactical Management System*), interface recepção bruta/operador, de fundamental importância para a correta tomada de decisão frente a hipotéticas ameaças. Ele por sua vez abarca diversas ferramentas de software que preparam a informação recebida, simplificando a cognição dos dados recebidos.

O AMES-C possui ainda uma característica de extrema relevância. Além de alimentar em tempo real, com os dados obtidos no desenrolar de uma missão, ele é capaz de gravar todas as emissões advindas de uma investida operacional. Com isso, ao fim de uma empreitada, toda a informação obtida pode ser analisada em solo, mais detalhadamente, aumentando a capacidade de planejamento e a consciência situacional acerca do oponente.

2.1 O Sistema ELINT na extração de informações

É fundamental, no cenário da Guerra Eletrônica atual que sistemas ELINT (MAGE) estejam preparados para lidar com numerosas características de sinais de RF [2]. O espectro eletromagnético revela-se progressivamente mais saturado; intervalos ínfimos de separação de parâmetros podem revelar importantes informações sobre as potencialidades do oponente, embasando uma manobra imediata ou até mesmo fornecendo dados para um processo de interferência hostil [3].

Um receptor passivo apresenta-se então como um ininterrupto aliado e exige o mais profícuo aperfeiçoamento de operação, tanto por parte de seus operadores quanto por parte de seus sistemas lógicos e capacidades operativas. Os tempos de paz podem se tornar tão decisivos quanto períodos de combate, já que o processo de coleta de informações é contínuo e pormenorizado, características potencializadas pela extrema evolução tecnológica militar. Os mínimos lapsos temporais de desenvolvimento revelam-se decisivos na atual conjuntura bélica mundial.

Desta forma, em uma imensidão de emissores, é primordial que o sistema MAGE seja capaz de separar parametralmente os sinais captados. Restringindo o escopo de análise referente a um radar, são necessárias as coletas de amplitude, largura de pulso, frequência (portadora e modulação), AOA (*Angle of Arrival*) e características de trem de pulsos, todas estas informações numa hipótese ideal, o que não restringe o prosseguimento da análise na impossibilidade na coleta de alguns deles. Para fins estratégicos todos os parâmetros possuem relevância, no entanto, para fins táticos, frequência e AOA revelam-se mais valorosos, visto que sinalizam, por exemplo, manobras evasivas. Outro pré-requisito de grande relevância é a capacidade do MAGE em realizar a análise temporal do sinal, a qual corresponde a menor largura de pulso de um emissor. Tal fato irá garantir que todo tipo de emissão estará apta a ser devidamente analisada e interpretada [4].

Quando então, pelo menos um dos dados citados for devidamente medido, parte-se para duas novas vertentes no processo: a separação do sinal de interesse dos demais advindos do ambiente bem como uma determinação estatística, conglomerando as informações disponíveis e definindo o tipo da ameaça, tarefa extremamente árdua, visto que as técnicas para ocultamento de emissões, tais como “saltos de frequência” e modulação intrapulso, por exemplo, têm se mostrado bastante efetivas frente aos receptores de GE [4].

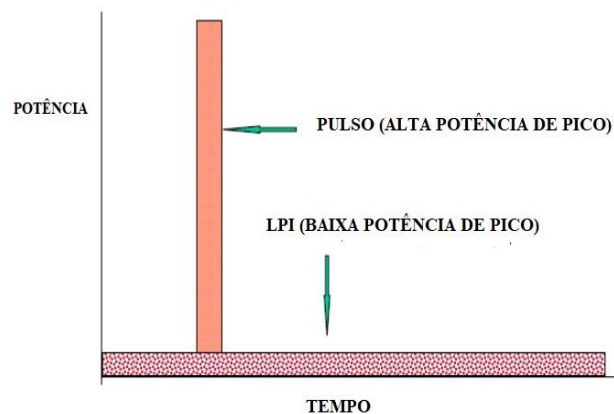
3 OS RADARES LPI

As aplicações em defesa e segurança atuais estão mais vulneráveis às atividades de Guerra Eletrônica. A necessidade por emissões furtivas é cada vez maior o que torna o uso de radares LPI, para o ensejo mundial, uma necessidade tática urgente [2].

Os radares LPI podem ser definidos como aqueles que se utilizam de uma específica forma de onda que pretende rechaçar uma interceptação não cooperativa [2]. Para isso, tais radares utilizam-se de diversas técnicas de forma a dissimular suas emissões ou assinaturas ativas tais como: baixas potências de pico, saltos de frequência, redução de lóbulos secundários e mais especificamente, e que constitui o cerne de suas operações, a modulação intrapulso.

Tais atributos são comumente alcançados através de ondas contínuas em ciclos de trabalho muito altos. Com tais métodos eles conseguem reduzir suas potências de pico, distribuindo seus pulsos em largas temporais consideravelmente maiores, diminuindo então sua capacidade de ser detectado, 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 que podem incrementar a energia de seus pulsos (aumento de largura de pulso) sem, no entanto, acarretar um *trade-off* em sua célula de resolução. A Figura 1 representa a diferença entre um sinal pulsado de um radar convencional e um sinal de radar LPI:

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



Fonte: O Autor.

As Figuras 2 e 3 apresentam exemplos de radares LPI comercializados por empresas de defesa mundiais:

Figura 2 – Radar de busca aérea THALES 2D.



Fonte: [2].

Figura 3 – Radar SIMRAD BROADBAND 4G.



Fonte: [2].

4 A MODULAÇÃO INTRAPULSO

Desde os primeiros radares concebidos até aproximadamente a década de 80 do século XX, os equipamentos apresentavam conceitos de pulsos radar de curta duração que continham “janelas” de energia eletromagnética não modulada, os conhecidos sinais de RF. Portanto, a amplitude do sinal de RF bem como sua fase e sua frequência foram estimados para ser estáveis nos primórdios, ou seja, para que seus valores não variassem no interior da emissão. Mas isto, no entanto, era uma presunção teórica impossível, já que invariavelmente os pulsos continham suas imperfeições; tanto amplitude quanto frequência possuíam suas taxas de variância, mesmo que fossem mínimas e não impactassem as funcionalidades dos radares da época [3].

As pequenas variações AM (*Amplitude Modulation*) ou FM/PM (*Frequency Modulation/Phase Modulation*) eram então inevitáveis e extremamente difíceis de ser mensuradas. Conquanto, elas não afetavam a performance dos radares mais incipientes. Os projetistas de radares passaram a tratá-las simplesmente como consequências naturais da operação, e não se preocuparam com suas incidências, já que suas existências não alteravam as funcionalidades do equipamento. Tal tendência se estendeu aos projetistas MAGE/ELINT, só que mais gravemente, os quais ignoraram as peculiaridades inerentes ao sinal pulsado.

A tecnologia da área continuou a avançar e somente com o advento da função MTI (*Moving Target Indicator*), principal funcionalidade a qual integrava os radares de vanguarda, o imbróglio veio à tona novamente. Tal funcionalidade era extremamente afetada por modulações indesejadas em amplitude e fase e isso rendeu os mais extremos esforços dos pesquisadores de forma a minimizar tais “imperfeições”. Estavam então escancaradas novas possibilidades de como tratar com o que se parecia “natural” ou “inevitável”; transformar a observação em conhecimento e com isso gerar algum tipo de vantagem operacional.

O processo foi então célere e pouco tempo depois do advento da função MTI, os pesquisadores/desenvolvedores passaram a dimensionar a modulação intencional do pulso e desenvolveram técnicas que viriam a dar suporte aos mais modernos radares da atualidade; as técnicas de compressão de pulsos ou modulação intrapulso. Tal inovação caracterizou radares de baixa potência de pico e que conseguiram alcances similares a radares que empregavam larguras de pulso menores.

O alcance inerente a sensores MAGE/ELINT depende invariavelmente da sua sensibilidade, mas é também proporcional à raiz quadrada da potência de pico do radar a ser interceptado, desde que, em linhas gerais, o receptor esteja sintonizado para a menor largura de pulso disponível. Em decorrência, a capacidade de detectar dos receptores a longas distâncias será muito menor contra radares que empregam a compressão de pulsos, gerando visíveis vantagens táticas aos equipamentos que empregam a compressão [3].

Pelos últimos vinte anos e até os dias atuais, as técnicas intrapulso foram bastante difundidas, no entanto, as particularidades inerentes às novas características a serem inseridas nas PDW (*Pulse Description Word*) foram negligenciadas pelos desenvolvedores MAGE, gerando um lapso temporal de desenvolvimento na relação radar/equipamento de detecção passiva. Tal fato despertou uma intensa campanha das empresas desenvolvimentistas de Guerra Eletrônica na direção de projetos

MAGE/ELINT, de forma a torná-los de pronta-resposta, não ambíguos e confiáveis frente aos novos desafios. A parte de análise de circuitos foi grandemente incrementada para que fossem possíveis as detecções e as análises de modulações em fase, amplitude e frequência. A Figura 4 exemplifica o teor da evolução das técnicas de modulação intrapulso no decorrer dos anos:

Figura 4 - A modulação intrapulso e seus idealizadores através das décadas.

Name	Inventor	Year	Type
Barker Code	R.H. Barker	1953	Phase Codes
Complementary Code	M.J.E. Golay	1961	Complementary Phase Codes
Huffman Code	D.A. Huffman	1962	Phase Code
Frank Code	R.L. Frank, S.A. Zadoff	1962	Chirplike Phase Codes
Zadoff-Chu Code	S.A. Zadoff	1963	Chirplike Phase Codes
Gold Code	R. Gold	1967	Phased Code based on binary sequence
Minimum peaksidelobe code	J. Lindner, N. Cohen et al.	1975	Phased Code based on binary sequence
Walti Code	R. Sivaswamy	1978	Subcomplementary Code
P1 and P2 Codes	B.L. Lewis, F.F. Kretschmer	1981	Phase Codes
Frank Polyphase Codes	B.L. Lewis, F.F. Kretschmer	1983	Polyphase Codes
Costas Array	J.P. Costas	1984	Frequency Codes
Quadratic congruential coding	J.R. Bellegarda, E.L. Titlebaum	1988	Frequency Codes
Polyphase Barker Codes	L. Bomer, M. Autweiler	1989	Phase Codes
Generalized P4 Code	F.F. Kretschmer, K. Gerlach	1992	Phase Codes
Biphase Perfect Code	S.W. Golomb	1992	Biphase Codes
Ipatov	V.P. Ipatov	1992	Codes with minimal peak response loss
P(n,k)	T. Felhauer	1994	Phase Codes
Px Code	P.B. Rapajic, R.A. Kennedy	1998	Phase Codes
PONS based Complementary code	P. Zulch, M. Wicks, et al.	2002	Complementary Codes
Orthogonal Codes	N. Levanon, E. Mozeson	2003	Train of Orthogonal Coded Pulses
Multicarrier Phase Coded Pulse	N. Levanon, E. Mozeson	2002	Multicarrier Phase Radar Signals

Fonte: [5].

4.1 Propósito da 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, dentre eles: detecção em si, distância, velocidade, entre outros aspectos.

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 e c a velocidade de propagação da luz no vácuo, a distância R do radar até o alvo pode ser calculada por (1):

$$R = \frac{cT}{2} \quad (1)$$

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 cuidadosamente empregar a definição. Tendo em vista a possibilidade de chegada do primeiro pulso refletido antes da 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):

$$IRP = \frac{2(R_{max})}{c} \quad (2)$$

Além do aspecto anteriormente citado, deve-se inculir 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 se descortina pela possibilidade de sobreposição de ecos de dois pulsos subsequentes. Se tal fato ocorrer, o radar não será capaz de distinguir alvos diferentes, portanto, tendo em vista a largura de pulso (τ), a resolução mínima em distância fica definida por (3):

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

Por (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 por (4), em que E_p é a energia do pulso e P_p é a potência de pico do radar [6]:

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

Desta forma, ao se aprimorar 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 cenário ELINT. Somente por estes aspectos básicos de projeto de um radar, fica evidenciada o quanto é minuciosa a análise do objetivo de um sistema. Sempre existem os prós e os contras, e nunca há uma idealidade incontestável. Há de se abrir mão de certas condições ótimas para angariar outros tipos de vantagens no combate. Os pormenores revelam novas tendências o que tornam análise e projeto tarefas bastante complexas.

Neste contexto, desenvolveu-se a modulação intrapulso, uma alternativa frente ao desenvolvimento de receptores passivos com maior capacidade. Também conhecidas como técnicas de compressão de pulso, 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 maximização do alcance do radar e a busca por resolução em frequência (velocidade de resolução).

Primeiramente, quanto à resolução em distância, fora constatado, na verdade, que a largura de pulso que seria relevante no processo seria a referente ao eco recebido pelo receptor do radar quando se busca boa resolução neste quesito; característica essencial a um radar confiável e de boa performance. Portanto, foram concebidas técnicas de modulação de forma a se conseguir aumentar a largura do pulso, distribuindo a energia no domínio do tempo, conseqüentemente, diminuindo a potência de pico. Este é o princípio básico da técnica de compressão de pulso, onde ambos, resolução em distância e alcance seriam contemplados. O sinal então estaria apto a trafegar com menor vulnerabilidade a interceptações.

Já a resolução em frequência refere-se ao aspecto de distinção de alvos em movimento, desde que eles possam ser detectados por efeito Doppler, ou seja, possuam velocidade radial em relação ao receptor do radar. A frequência Doppler (f_d) pode ser

obtida por (5), em que V_r é a velocidade radial do alvo e λ é o comprimento de onda da emissão:

$$fd = \frac{\pm 2V_r}{\lambda} \quad (5)$$

No entanto, a busca tanto de resolução em frequência quanto de resolução em distância acaba gerando um aspecto conhecido como “problema da ambiguidade”, onde invariavelmente o projeto de um radar deve se basear nessa dicotomia. Um diagrama de ambiguidade pode ser gerado levando em consideração tais observâncias, onde ele se revela em uma representação tridimensional de variação da frequência Doppler, variação do tempo e a amplitude correspondente. De forma ideal, tal diagrama deve revelar impulsos, baseados no quão próximos estão os alvos bem como baseados em suas velocidades. Tais características revelam picos no diagrama, desta forma os alvos podem ser distinguidos.

Contudo, em condições reais, tais picos não se revelam com facilidade. Na verdade, o que se constata é uma dispersão do sinal nos eixos da frequência e do tempo.

Analisando então a intersecção do eixo da frequência com o eixo das abscissas, o primeiro ponto de frequência nula se dá pela Equação (6):

$$f_{zero} = \pm \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

Comparando-se então, equações (3) e (6), pode-se constatar que aumentando a largura de pulso a resolução em frequência fica otimizada, ao contrário da resolução em distância, que ficará deteriorada e vice-versa. Neste interim, surgiram as técnicas de compressão de pulso, de forma a sanar estes tipos de problemas. Modulando-se no interior do pulso, a frequência e a fase, há o desacoplamento dos conceitos de largura de pulso (τ) e de largura de banda (BW), fazendo com que se consiga incrementar tanto resolução em distância quanto o alcance simultaneamente, evitando-se o *trade-off* anteriormente citado. Desta forma, com os efeitos da modulação, a intersecção do eixo das frequências com o eixo das abscissas se dá pela Equação (7):

$$f_{zero} = \pm \frac{1}{BW} \quad (7)$$

4.2 Modulação do tipo LFM (*Linear Frequency Modulation*)

A técnica do tipo LFM constitui-se basicamente de uma modulação linear na frequência portadora do pulso. Esta técnica foi escolhida para integrar o artigo por ser uma das mais usadas por radares LPI.

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 (8):

$$x(t) = a(t) \cdot \cos \left[2\pi f_0 t + \frac{\pi BW}{\tau} t^2 \right] \quad (8)$$

Sua representação complexa pode ser dada pela equação (9) e a expressão do envelope complexo do sinal pode ser dada por (10), sendo e o número de Euler e j a unidade imaginária:

$$\tilde{x}(t) = a(t) e^{j \frac{\pi BW t^2}{\tau}} e^{j 2\pi f_0 t} \quad (9)$$

$$U(t) = a(t) e^{j \frac{\pi BW t^2}{\tau}} \quad (10)$$

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, portanto, adota-se uma função bastante difundida em estudos de radar denominada *rect*, para representação de pulsos retangulares ideais. A relação é dada por (11):

$$U(t) = \text{rect} \left(\frac{t}{\tau} \right) e^{j \frac{\pi BW t^2}{\tau}} \quad (11)$$

Efetuando-se a Transformada de Fourier do sinal chega-se a (12), no domínio da frequência:

$$U(f) = \sqrt{\frac{\tau}{2BW}} e^{-j \frac{\pi BW}{\tau} f^2} [Z(x_2) - Z(x_1)] \quad (12)$$

Em que $Z(x)$ é a integral complexa de Fresnel, tal que se chega a (13), (14) e (15):

$$Z(x) = \int_0^x e^{j \frac{\pi z^2}{2}} dz \quad (13)$$

$$x_2 = -2f \sqrt{\frac{\tau}{2BW}} + \sqrt{\frac{\tau BW}{2}} \quad (14)$$

$$x_1 = -2f \sqrt{\frac{\tau}{2BW}} - \sqrt{\frac{\tau BW}{2}} \quad (15)$$

Utilizando a partir de agora o princípio da fase estacionária, em que ω é a velocidade angular do pulso e assumindo que o integrando é altamente oscilatório, tem-se (16):

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) e^{j\varphi(t,\omega)} dt \quad (16)$$

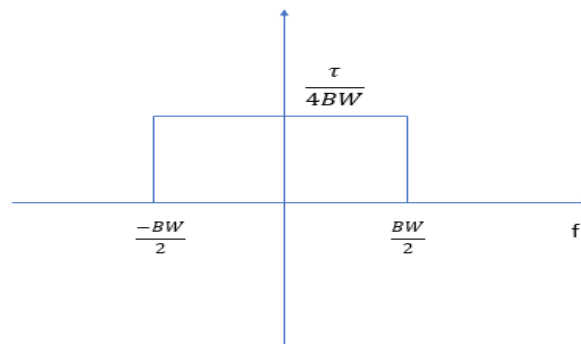
Em que $\varphi(t, \omega) = [\phi(t) - \omega t]$.

Para o caso de modulação LFM, tal que o ponto estacionário $t = t_0$ e a primeira derivada seja um ponto nulo, têm-se para valores $-BW/2 \leq f \leq BW/2$, (17):

$$U(f) \approx j \sqrt{\frac{\tau}{BW}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \cdot e^{-j\frac{\tau f^2}{2BW}} \quad (17)$$

A Figura 5 revela o espectro de amplitude de um pulso LFM:

Figura 5 - O espectro de amplitude $|U(f)|^2$ de um pulso LFM.



Fonte: O Autor.

Portanto, este aspecto apresenta grande diferença em relação à análise de espectro de um sinal sem modulação intrapulso, o qual tem sua largura de banda descrito por (18):

$$BW = 1/\tau \quad (18)$$

De posse de todas as considerações, podem-se inferir então 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 ΔR_{LFM} é regida por (19):

$$\Delta R_{LFM} = \frac{c}{2BW} \quad (19)$$

4.3 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.

A resposta do filtro casado para a modulação LFM possui vantagens em relação a resposta de um filtro casado para um pulso não modulado, dentre as quais, por ser alvo deste estudo, destaca-se o fator de processamento que gera vantagem sobre os radares comuns. É o 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 [4]. 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 o alvo deste trabalho.

5 DESCRIÇÃO TEÓRICA DA SIMULAÇÃO DE RADAR LPI CONTRA SENSOR MAGE DA AERONAVE P-3AM

A proposta da simulação reside na mensuração do fator vantagem MAGE frente a um hipotético radar LPI, onde serão investigadas condições variantes.

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 máxima distância de detecção radar. Para efeito da simulação, a vantagem MAGE ($V_{MAGE(\%)}$) foi equacionada em termos de porcentagem, tal qual (20), em que R_{MAGE} é a distância máxima de detecção MAGE e R_{MAXRAD} é a distância máxima de detecção radar:

$$V_{MAGE(\%)} = \frac{R_{MAGE} - R_{MAXRAD}}{R_{MAXRAD}} \quad (20)$$

A equação radar utilizada segue a notação (21) 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, onde foram admitidos os ganhos de transmissão e recepção iguais, λ é o comprimento de onda da emissão, σ é a seção reta radar do alvo, BW é a largura de banda LFM, τ é a largura de pulso e L_R são as perdas totais do radar:

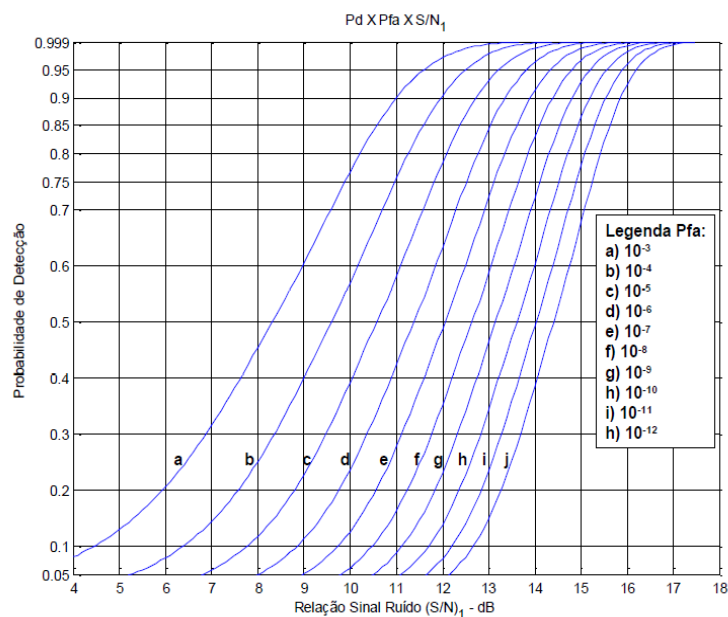
$$(S/N)_{Pdfarad} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma BW \tau}{(4\pi)^3 (R_{MAXRAD})^4 L_R} \quad (21)$$

A equação do sensor passivo por sua vez, seguiu a notação (22), onde $(S/N)_{Pdfamage}$ 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:

$$(S/N)_{Pdfamage} = \frac{P_t G G_M \sigma \lambda^2}{(4\pi)^2 (R_{MAGE})^2 L_M} \quad (22)$$

Para o estabelecimento de valores sinal-ruído do radar, foi utilizada a Figura abaixo para o caso 5 de Swerling, supondo uma aeronave de grande porte tal qual o P-3AM, aproximadamente não flutuante nos valores de seção reta radar [5]:

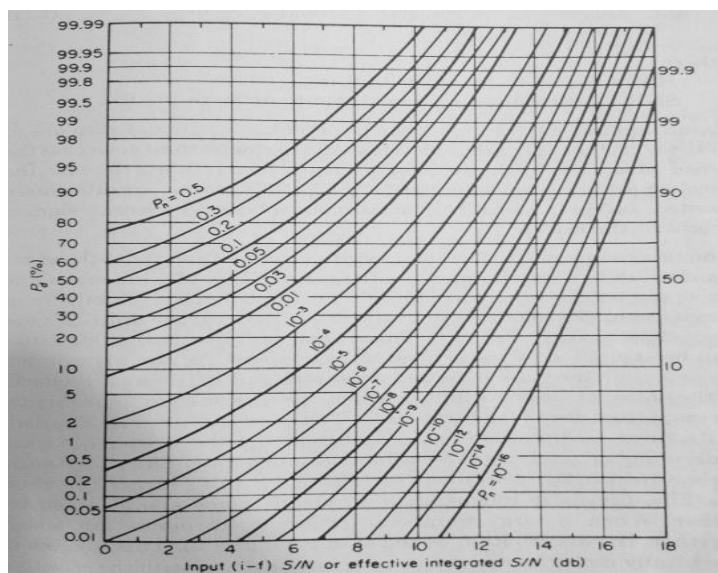
Figura 6 – Caso de Swerling 5 (alvos pouco flutuantes).



Fonte: [7].

Já para a obtenção dos valores de sinal-ruído atinentes à recepção MAGE, foram utilizadas as Figuras 7 e 8 para a obtenção dos valores reais, com base em determinadas probabilidades de detecção (P_d) e probabilidades de incidência de falsos alarmes (P_{fa}):

Figura 7 - Valores de P_d/P_{fa} para determinadas relações sinal-ruído MAGE (integração de um único pulso).



Fonte: [6].

Figura 8 - Número de pulsos (M) necessários por integração do MAGE, para determinadas P_d/P_{fa} .

M	Predetection SNR (dB)	$P_{d,i}$ *	$P_{FA,i}$ **
1	13.5	0.9	10^{-6}
2	11.5	0.95	10^{-3}
5	9.1	0.98	6.3×10^{-2}
10	8.2	0.99	0.25
20	7.5	0.995	0.5

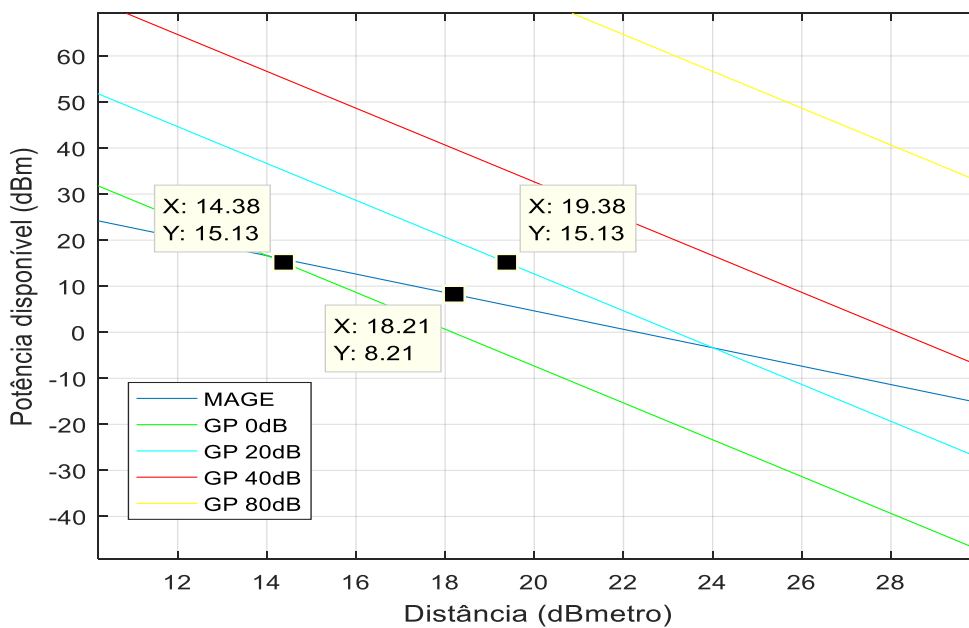
Fonte: [6].

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 LPI e em um equipamento MAGE convencional moderno. Já os dados de seção reta radar foram baseados em uma aeronave de grande porte, esteira de turbulência categoria “B”. Tais ações tem o intuito de fortalecer a Inteligência Operacional.

6 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 a vantagem MAGE [8]. A Figura 9 elucida o aspecto, onde 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).

Figura 9 – Impacto inicial de um ganho de processamento sobre a vantagem MAGE.



Fonte: O Autor.

Os dados obtidos foram explicitados pelo Quadro 1:

Quadro 1 – 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%

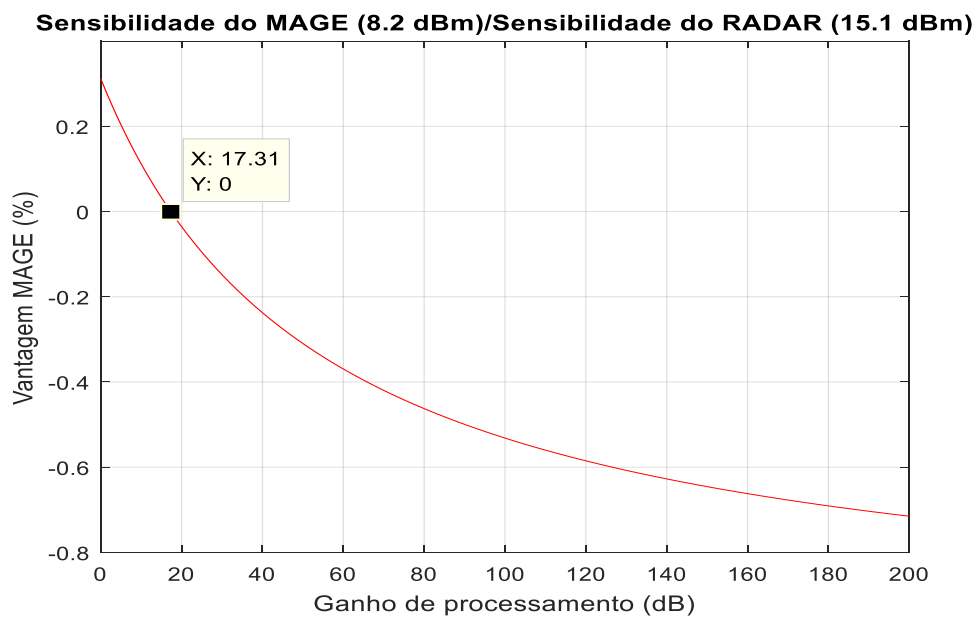
Fonte: O Autor.

Infere-se pelo quadro analítico 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, um equipamento MAGE pode detectá-lo a 252NM. No entanto, observa-se uma inversão de teor onde 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 [6].

Prosseguindo com a averiguação em distância, foi gerada também a Figura 10 para a determinação exata do ganho de processamento que anularia a vantagem MAGE:

Figura 10 - Ganho de processamento correspondente a vantagem MAGE nula.



Fonte: O Autor.

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 e estaria propício a uma detecção hostil.

7 CONCLUSÃO

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

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 podem forçar drasticamente a forma 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, já sendo plenamente comercializados [9]. A atividade de Inteligência de Sinais é de vital importância para o não sucumbimento dos vetores frente a tão veemente ameaça, já que somente com ela, pode-se dimensionar o fator de risco neste caso.

Desta forma, fica evidenciado que o fator planejamento de missão deve estar perfeitamente alinhado à atividade de Inteligência Operacional. A partir da aquisição das aeronaves P-3AM, as bibliotecas de missão podem ser amplamente abastecidas. Além disso, há de se vislumbrar possibilidades de atenuação das potencialidades dos referidos radares. Surge então como alternativa a redução dos parâmetros concernentes a aeronave que transporta o sensor, como por exemplo, a redução da seção reta radar. Assim, poderá ser iniciado um processo de contraposição efetivo. Outra forma seria a prospecção de redes de sensores (*Swarm Intelligence*) que propositalmente estariam no alcance dos radares e transmitiriam a informação em cascata [10].

O limiar para equívocos na lida contra radares LPI é bastante reduzido, portanto, 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. No entanto, a aquisição das aeronaves P-3AM representa um grande salto operacional na Guerra Moderna já que fornece condições para que se vislumbrem táticas e estratégias contra um advento de tão alta letalidade em um Teatro de Operações.

8 REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Ministério de Defesa **AMES-C Operator's Manual P-3BR**: Primeiro Esquadrão do Sétimo Grupo de Aviação. Salvador, 2012.
- [2] HEINBACH, K.; PAINTER, R.; PACE, P. E. **Commercially available Low Probability of Intercept radars and non-cooperative ELINT receivers capabilities**. Naval Postgraduate School. Estados Unidos da América, 2014.
- [3] NERI, F. **Introduction to electronic defense systems**. New York: Artech House, 2001.
- [4] SCHELERER, D. C. **Introduction to electronic warfare**. London: Artech House, 1986.
- [5] ANTONIK, P.; WICKS, M.C. **Waveform diversity**: past, present and future. OTAN. Itália, 2009.
- [6] GOZDE, Ç. **Feature based modulation recognition for intrapulse modulation**. 2006. 161f. Thesis (Applied Sciences) - Middle East Technical University, India.
- [7] WILEY, R. G. **ELINT**: the interception and analysis of radar signals. Washington: Artech House, 2006.
- [8] LEVANON, N.; MOZESON, E. **Radar signals**. London: Wiley-Interscience, 2004.
- [9] MAHAFZA, B. R. **Radar systems analysis and design using MATLAB**. London: Chapman & Hall/CRC, 2000.
- [10] RICHARDS, M. A. **Fundamentals of radar signal processing**. Boca Raton: The McGraw-Hill Companies, 2005.