



MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM GUERRA ELETRÔNICA

1º Ten Marco Antonio da Silva Junior

**A contraposição do MAGE contra novos sistemas de Guerra Eletrônica na
atualidade: Radar LPI, a maior ameaça ao MAGE.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Rio de Janeiro
2018

1º Ten Marco Antonio da Silva Junior

A contraposição do MAGE contra novos sistemas de Guerra Eletrônica na atualidade: Radar LPI, a maior ameaça ao MAGE.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica
Orientador técnico: SCNS Sérgio Rodrigues Neves
Orientador acadêmico: Prof. Dr. Fernando da Rocha Pantoja

**Rio de Janeiro
2018**

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha amada filha Helena.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por ter me dado saúde e a energia necessária.

Agradeço à dedicação e aconselhamento por parte dos meus orientadores, SCNS Sérgio Rodrigues Neves e Prof. Dr. Fernando da Rocha Pantoja, que conseguiram me nortear no pouco tempo que lhes couberam para concretizar este trabalho. Em especial, agradeço aos meus pais, que sempre me apoiaram e me incentivaram em todos os aspectos da minha vida, dando-me a força necessária para a finalização desta obra

“A persistência é o caminho do êxito (Charles Chaplin).”

Resumo

Este trabalho tem como propósito abordar a questão do constante avanço do MAGE para se contrapor aos sistemas de guerra eletrônica em constante evolução nos dias atuais. Dentre as diversas ameaças estudaremos o Radar LPI, onde é estruturada toda a obra. Logo é esclarecido detalhadamente o modo de operação deste radar e as maiores dificuldades encontradas pelo MAGE para fazer frente à sua grande habilidade, que é de transmitir com probabilidade muito baixa de ser detectado.

.
Palavras- chave: guerra eletrônica, MAGE, RADAR LPI

Abstract

This work aims to address the issue of the constant advance of MAGE to oppose the systems of electronic warfare in constant evolution in the present day. Among the various threats we will study the Radar LPI, where the entire work is structured. Soon it is clarified in detail the mode of operation of this radar and the greatest difficulties encountered by MAGE to deal with its great ability, which is to transmit with very low probability of being detected.

.

Keywords: electronic warfare, MAGE, RADAR LPI

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fragata Européia Multi Missão Marinha Italiana	15
Figura 2 – técnica da compressão de pulsos	16
Figura 3 – Pulso curto(radar de pulso) x Pulso longo(radar LPI)	18
Figura 4 – Relação de potência da onda pulsada com a onda contínua	19
Figura 5 – MAGE	20
Figura 6 – Antena do radar aselsan LPI	21
Figura 7 – Radar LPI num cruzador naval de casco duplo chinês de classe Ganjiang	21
Figura 8 – Diagrama de Blocos de um receptor de MAGE para radares LPI . . .	24
Figura 9 – Comparação de parâmetros nominais entre o Radar PILOT MK2 e o MAGE	25
Figura 10 – Diagrama de blocos do receptor acústico-ótico em 2D	28
Figura 11 – Arquiteturas de receptores	29

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Apresentação do Problema	9
1.2	Justificativa e Relevância	9
1.3	Objetivos	10
1.3.1	Objetivo Geral	10
1.3.2	Objetivos Específicos	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
3	METODOLOGIA	12
3.1	Classificação da Pesquisa	12
3.1.1	Quanto aos fins	12
3.1.2	Quanto aos meios	12
3.2	Limitações do Método	12
3.3	Coleta e Tratamento de Dados	13
4	DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	14
4.1	HISTÓRICO	14
4.2	Radar LPI	16
4.2.1	Técnicas de Análise para detecção dos radares LPI:	22
4.2.2	Classificação dos radares LPI:	22
4.3	Análise da contraposição do MAGE ao radar LPI	22
4.3.1	Tipos de receptor:	23
4.3.2	Analisador de Espectro Acústico-Ótico:	27
4.3.3	Receptor Acústico-ótico em 2-D	27
5	CONCLUSÃO	30
5.1	Considerações Finais	30
5.2	Sugestões para Futuros Trabalhos	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

A função dos equipamentos de MAGE (Medidas de Apoio a Guerra Eletrônica) é a de detectar, realizar medidas e classificar radares através de seus pulsos emitidos no ambiente eletromagnético. Ao longo do tempo os projetistas de radar foram desenvolvendo técnicas para que o MAGE não fosse capaz de realizar sua tarefa. Neste trabalho será abordado um tipo de radar que tenta impedir sua detecção pelos equipamentos de MAGE, tanto no que diz respeito às suas características quanto às propostas de técnicas de sua detecção pelo MAGE. Esse radar é o radar LPI (Low Probability of Intercept – Baixa probabilidade de interceptação).

1.1 Apresentação do Problema

Analisar quais as grandes dificuldades de detecção do Radar LPI e que medidas podem ser tomadas para resolver o problema de detecção. É importante salientar que atualmente os projetos estão em fase de testes, através da observação do Radar LPI em operação e de como o MAGE terá sensibilidade apurada para detectar o mesmo.

Portanto é mister que esforços não sejam medidos para se conseguir projetos de engenharia, estudos e testes continuamente. Também torna-se imprescindível que o usuário final do dispositivo seja capacitado, entenda e reivindique pelas novas capacidades que possam prover maior desempenho para os meios da Marinha do Brasil.

1.2 Justificativa e Relevância

Deseja-se obter vantagem sobre a tecnologia militar do inimigo, tendo à priori informações deste. Pode-se assim, utilizar um equipamento MAGE vislumbrando características inimigas. Então opta-se sobre de que forma utilizar os recursos próprios para ataque e defesa.

E nessa perspectiva, destaca-se de forma contundente o quão necessário é ajustarmos, ou melhor, aumentarmos a capacidade do equipamento nos quesitos supracitados. Deste modo, a probabilidade de sucesso se torna maior perante o inimigo.

Sempre deve-se ter em mente não apenas querer aumentar nossa capacidade de defesa e ataque de forma absoluta. Mas sim perceber que o inimigo também visa o ganho de sua capacidade bélica, e então essa corrida torna-se mais imprescindível ainda.

Poder obter informações sobre os equipamentos e recursos do inimigo, bem como seus parâmetros, tornam maiores as probabilidades de sucesso. À partir dessas

informações, pode-se optar pela forma de defesa, que tipo de armamento utilizar, que derrota tomar ou que tipo de ataque eletrônico efetuar contra o opositor.

Os parâmetros citados na apresentação do problema devem ser analisados dos pontos de vista qualitativos e quantitativos, e ter em mente que muito do que se vê dentro da engenharia do equipamento é um “cobertor curto”. Alguns quesitos devem piorar para que outros melhorem. Tudo depende do propósito e das possibilidades em um determinado instante.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar a problemática da detecção e classificação dos radares LPI pelos equipamentos de MAGE e apontar temas e opções para sua eficácia frente a tais radares

1.3.1 Objetivo Geral

Abordar as formas de se operar e de se projetar os equipamentos MAGE da Marinha do Brasil no futuro. Então, espera-se conseguir resultados mais eficientes quando se contrapor ao inimigo utilizando o radar LPI. Espera-se provar que as novidades da mais alta tecnologia devem ser implementadas nos cenários de guerra, dentro dos meios da Marinha do Brasil.

Equalizar os métodos e resultados empregados pelo MAGE com o propósito bélico da Marinha do Brasil, sempre levando-se em conta situações onde participem meios navais, terrestres e aéreos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Serão analisados parâmetros que no futuro tornarão o MAGE um equipamento com maior capacidade/desempenho no que tange a detecção do radar LPI.

Estes itens devem ser refinadamente aprimorados, pois cada erro em acurácia ou cada falta de resolução pode ser fator altamente comprometedor para o projeto de engenharia do instrumento como para sua operação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Jim P.Y. Lee; Interception of LPI Radar signals, Defence Research Establishment aborda um estudo profundo e bem analítico da questão da interceptação do Radar LPI, o que com certeza contribuiu para informações mais detalhadas e por vezes de difícil entendimento para esta obra

CMG Marcello Lima de Oliveira; CC João Candido Marques Dias, Low Probability of Intercept, contribuiu grandemente para o entendimento do funcionamento do radar LPI e sobre a dificuldade de detectá-lo. O texto apresentou a questão de forma clara e resumida.

Stimson, G. W., Introduction to Airborne Radar, explanou sobre a operação dos radares, sobre como os parâmetros são obtidos pelo radar. Muito embora o trabalho seja sobre o MAGE foi importantíssima essa leitura, pois é do radar de onde o MAGE extrai as informações principais do oponente.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo abordar a metodologia utilizada no decorrer desta obra, tanto em relação ao fins, quanto em relação ao meios baseando-se em livros e artigos. Busca, ainda, a análise e o conhecimento de conteúdos científicos acerca do tema proposto.

3.1 Classificação da Pesquisa

Esta pesquisa se classificará por duas formas: quanto aos fins e quanto aos meios. As informações serão especificadas de forma não estatística e serão tratadas de forma qualitativa.

3.1.1 Quanto aos fins

Foram lidos artigos e livros sobre o radar LPI e MAGE, e seus entendimentos foram inseridos neste projeto, podendo-se inferir ser um projeto descritivo. Pôde-se então detalhar sobre o funcionamento e algumas técnicas que devem ser trabalhadas para que o estado da arte seja alcançado na evolução do MAGE, assim, inferindo-se ser um trabalho explicativo. Também foram consultados especialistas na operação do equipamento, bem como foi verificada a operação deste, caracterizando uma pesquisa de campo.

3.1.2 Quanto aos meios

Realizou-se uma pesquisa bibliográfica e documental, com material extraído da internet, estudado na biblioteca do CIAW e livros referentes aos radares LPI. Foram absorvidos conhecimentos imprescindíveis do equipamento tratado através de outras teses.

3.2 Limitações do Método

Cálculos detalhados e intensos, bem como verificados não serão explicitados, por ter como foco maior a temática da contraposição do MAGE ao radar LPI.

Alguns testes também não puderam ser realizados, por se necessitar de mão de obra disponível em larga escala horária, para manusear e explicar sobre o funcionamento do equipamento.

O trabalho não pôde ter caráter mais aprofundado em termos de ensaios por se necessitar de mobilização de grande quantidade de militares e equipamentos como por exemplo, aviões, navios, helicópteros, bem como seus tripulantes.

3.3 Coleta e Tratamento de Dados

Foram consultados documentos extraídos da internet, e outros artigos e livros referentes ao assunto por parte dos orientadores.

Os artigos e teses ostensivos na internet são de difícil compreensão, por serem de alto nível de qualificação, mas os livros e site são bastante didáticos e se preocupam bastante com o entendimento do leitor.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

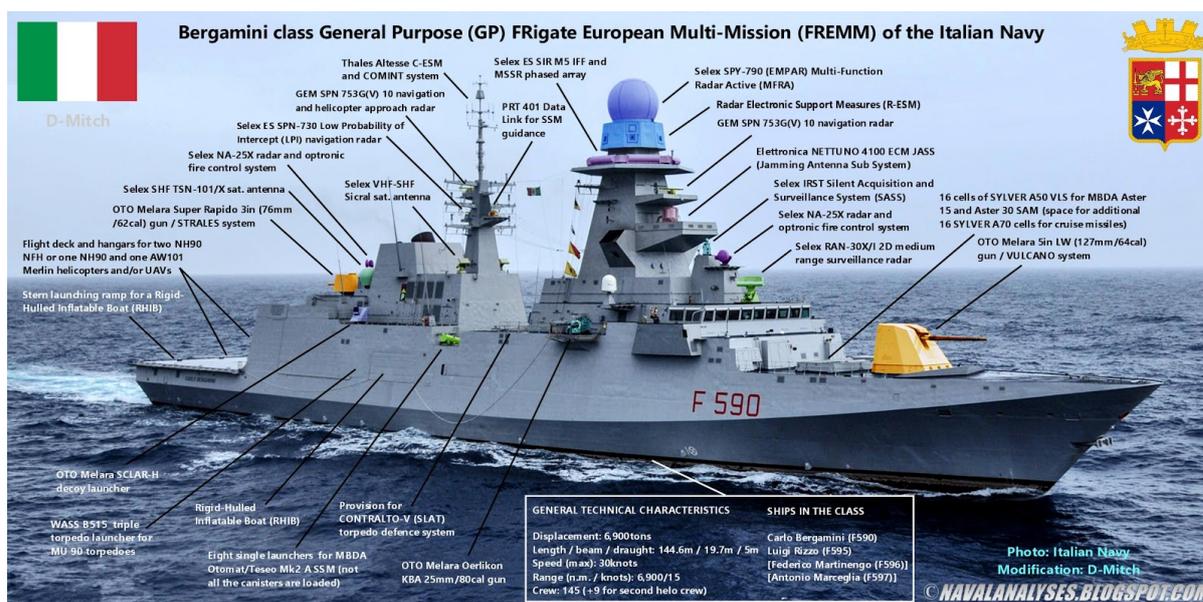
4.1 HISTÓRICO

Primeiro iremos definir rapidamente como é a operação de um radar pulsado convencional só para que possamos ter a noção da dimensão do problema de detecção do radar LPI. Os radares pulsados convencionais foram surgir na Segunda Guerra Mundial e sua essência de operação nada mais é que a transmissão de um pulso estreito de energia, com alta potência de pico, e sua viagem de ida e volta até um alvo, num determinado tempo, que corresponde à distância de detecção.

Todavia, nos dias de hoje, com o advento de ondas contínuas (CW) ou de pulsos de longa duração, mas com baixa potência de pico, adversidades foram criadas à maioria dos atuais sistemas de Guerra Eletrônica (GE), que até então foram projetados para interceptar radares pulsados que utilizam altas potências de pico. Além do radar LPI fazer uso de ondas contínuas, uma outra variável foi adicionada à equação: a utilização de baixa potência de pico pelo radar LPI. Com este fator, este radar faz uso de uma grande vantagem, que é a diminuição da Relação Sinal/Ruído, escondendo-se dentro do ruído. Vale destacar também que o MAGE faz uso da potência de pico do sinal para que ele possa detectá-lo e é assim que o mesmo opera, detectando sinais de altas potências de pico. Portanto se a probabilidade de interceptação por parte do radar LPI foi reduzida, resta-nos a questão de como o MAGE irá fazer para se remodelar com o objetivo de fazer frente a esta nova ameaça?

Com o passar dos tempos, os sistemas voltados para o meio bélico se desenvolvem de forma extremamente rápida. A quantidade de dispositivos de comunicação, armamentos, radares, técnicas aumentam de forma que saltam aos olhos e nota-se até a duplicação do número de antenas por década, em um navio, segundo o Prof. Erasmus Miranda, que lecionou os cursos de Eletromagnetismo e de Antenas e Propagação no CapA, CIAW, 2018. A figura 1 abaixo mostra um exemplo da quantidade de dispositivos disponíveis atualmente da fragata europeia multi missão da marinha Italiana.

Figura 1 – Fragata Européia Multi Missão Marinha Italiana

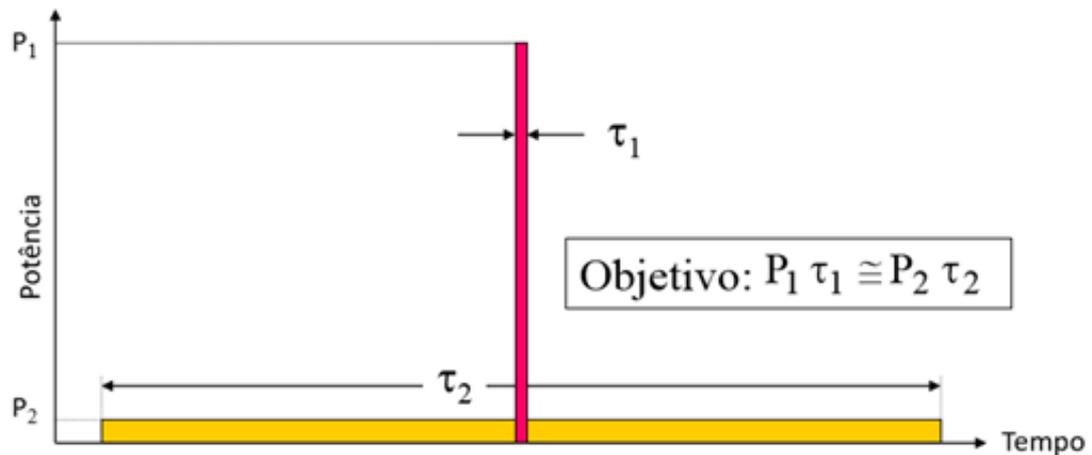


site: https://twitter.com/D__Mitch, acessado em 05MAR2018

Neste contexto, os avanços científicos bélicos de inimigos colocam em risco nossos sistemas, sobretudo no quesito dos avanços de radares, que adotam, por exemplo, as seguintes técnicas:

- Transmissão de pulsos curtos;
- Processamento digital de dados;
- Compressão de pulso (mostrada na figura 2);
- Coerência de fase pulso a pulso;
- Receptor coerente;
- MIT (indicador de alvos móveis) e AMTI (MTI aerotransportado);
- Acompanhamento monopulso;
- Agilidade de frequência;
- Agilidade de polarização;
- Varredura eletrônica (“phased array”);
- Radares de abertura sintética (SAR) e ISAR (SAR invertido);
- Agilidade de PRF; e
- Radares com baixa probabilidade de interceptação pelo inimigo (LPI).

Figura 2 – técnica da compressão de pulsos



Aula de Inteligência de Imagens

4.2 Radar LPI

Como dito anteriormente, iremos nos basear no Radar LPI e projetaremos um raciocínio para como o MAGE fará para se contrapor a esta ameaça. Logo, vamos analisar as principais características dos radares LPI (baixa probabilidade de interceptação) são:

- Antena com lóbulos secundários reduzidos
- Padrões variados de varredura da antena
- Transmissão em banda larga
- Gerenciamento de potência
- Processamento coerente

E outras características importantes como:

- Bandas largas – de 300 MHz a 100 GHz
- Sinal de características desconhecidas
- Baixa potência de pico
- Espectro em um ambiente complexo de ruído de alta interferência e múltiplos sinais - comunicação CW, SAR , ISAR, Comunicação de “spread spectrum”
- A detecção de sinais de radar LPI requer um grande ganho de processamento por causa da natureza de banda larga do radar LPI
- O sinal deve ser observado em um período longo. Durante esse tempo, um pro-

cesso especial deve ser usado para assegurar que o ruído não está sendo adicionado

-O receptor deve proporcionar uma sensibilidade suficiente para detecção de sinais de radar LPI com propriedades de amplo espectro e deve proteger seu circuito contra os pulsos de alta potência de pico, de curta duração dos radares convencionais na mesma banda

-Como a codificação é desconhecida e pode ser complexa, e assumindo que a frequência também é desconhecida, então a detecção coerente não é possível e deve ser executado em primeiro lugar a detecção não coerente

Texto da publicação CIAW-326 sobre radares

Algumas características citadas nos itens são explanadas a seguir, tendo sido extraídas do artigo LPI: Radares Invisíveis Como os Radares LPI (Low Probability of Intercept), CMG Marcello Lima de Oliveira, CC João Candido Marques Dias:

Gerenciamento de Potência Aparentemente

Parece impossível para um radar evitar ser detectado por um alvo antes de conseguir detectá-lo. Contudo, matematicamente, existem faixas numéricas onde isso pode ocorrer. Sugere-se a introdução de sistemas de controle de potência, ou seja, dispositivos que emitem somente a quantidade estritamente necessária de energia para acompanhar um alvo de acordo com a variação da distância. Entretanto, para um radar de busca, é inviável controlar a potência transmitida em função do alcance desejado, pois sua tarefa é detectar alvos em qualquer ponto da escala. Já radares que têm como função adquirir um alvo para posterior engajamento, como nas aeronaves de interceptação, podem incorporar tal recurso. No que tange aos radares de busca, a solução é encontrar artifícios para obter a detecção com a menor potência possível.

Compressão de Pulsos

O receptor de interceptação necessita da detecção individual dos pulsos a fim de proceder à sua análise. Consequentemente, possui pouca ou nenhuma capacidade de integração dos sinais, tratando-os isoladamente um do outro. Distintamente, o radar não possui tal limitação. Pode integrar (somar) coerentemente os ecos recebidos em longos intervalos de tempo, reduzindo a necessidade de um elevado pico de potência.

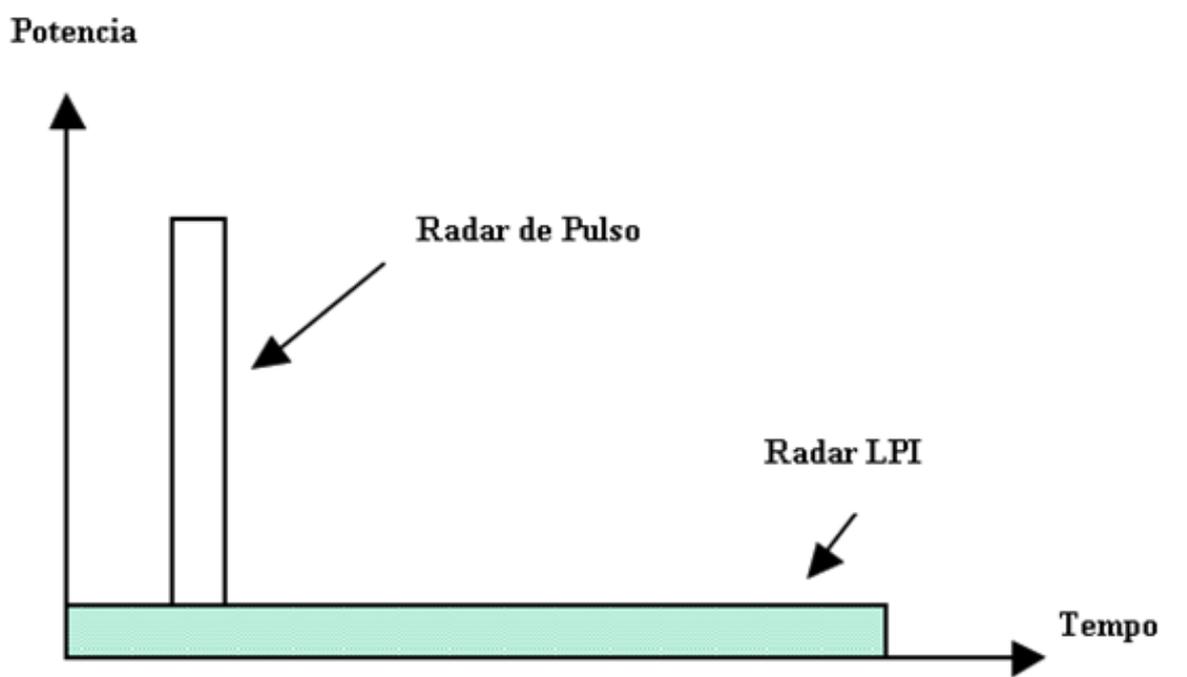
Em termos de comparação, é como se estivéssemos dividindo o processo clássico do radar pulsado em diversas pequenas prestações. Essa capacidade permite, ainda, o desenvolvimento de uma infinidade de variações no sinal transmitido, pois o receptor radar pode ser sincronizado com a transmissão, ao contrário do receptor de interceptação, que não conhece a lógica do transmissor.

Aumento da Largura de Banda

Pulsos de longa duração significam a distribuição da potência ao longo de

um dado período de tempo. De uma forma similar, uma transmissão em banda larga distribui a potência ao longo da faixa de frequência, proporcionando dificuldade similar ao receptor MAGE. Isso ocorre porque o receptor de interceptação precisa ser capaz de separar sinais sobrepostos e muito próximos em frequência. Conseqüentemente, a largura de banda de cada canal do receptor MAGE não pode ser mais larga que o absolutamente necessário para receber e medir tais sinais. Uma possível contramedida seria aumentar a largura de faixa do canal.

Figura 3 – Pulso curto(radar de pulso) x Pulso longo(radar LPI)



retirado do texto LPI: Radares Invisíveis Como os Radares LPI (Low Probability of Intercept) Podem Mudar a Tática

Contudo, como o ruído em um receptor é proporcional ao tamanho da banda recebida, essa ação provocaria uma diminuição da SNR (Relação Sinal/Ruído) do MAGE, diminuindo, assim, a sua sensibilidade de detecção. Uma vantagem adicional da variação da frequência é um aumento da resolução em distância, especialmente quando aplicada junto com ondas contínuas (CW), incapazes de medir distâncias diretamente. Na figura 3 podemos ver uma comparação do pulso curto de um radar convencional e de um radar LPI. Já na figura 4 podemos ver o mesmo gráfico analisando a potência de pico, radares pulsados tem alta e radares LPI baixa potência.

Figura 4 – Relação de potência da onda pulsada com a onda contínua



Redução de Lóbulos Secundários

Antenas radar comuns possuem lóbulos secundários com níveis de potência cerca de 100 vezes menores do que os do lóbulo principal. Ou seja, o emissor se denuncia não só na direção para onde está apontado, mas, também, para qualquer receptor posicionado nos arredores, com sensibilidade suficiente para detectar o nível de potência dos lóbulos secundários da antena. Antenas com lóbulos secundários reduzidos, ou até suprimidos, conseguem uma diminuição de potência da ordem de 10.000 vezes. Assim, reduzem a probabilidade de o radar ser interceptado fora do lóbulo principal.

Ainda, os radares que empregam técnicas para minimizar a probabilidade de detecção, por parte dos equipamentos MAGE e RWR (Radar Warning Receiver), podem ser divididos em:

Low Probability of Identity (LPID): radares que, embora sejam facilmente detectados, criam dificuldades para serem identificados pelo receptor. Em um ambiente eletrônico saturado, a simples interceptação de um sinal não é útil até que ele seja processado e identificado. A introdução de agilidade nos diversos parâmetros de um radar, tais como frequência, FRP (Frequência de Repetição de Pulso) e LP (Largura de Pulso), confunde o processo de classificação do sinal. Isso acontece porque o receptor precisa detectar pulsos individuais e analisá-los um a um, por um período mínimo de tempo, o que não acontece quando os parâmetros são variados rapidamente (agilidade).

Low Probability of Intercept (LPI): buscam transmitir sinais tão fracos que os receptores MAGE não possuem sensibilidade para recebê-lo. Tal tarefa, porém, não é

simples. Com mais ou menos sucesso, esses radares tentam garantir o uso seguro do espectro eletromagnético, usando a combinação de uma série de artifícios.

Com base em grande parte dessas características supracitadas, este trabalho trata dos avanços nos equipamentos MAGE para se contrapor a tais técnicas. Um equipamento MAGE pode ser identificado na figura 5. Percebe-se a localidade do gabinete e do display do operador, e a antena fica em um dos pontos mais altos do mastro principal.

Figura 5 – MAGE



https://www.marinha.mil.br/ipqm/grupo_guerra_eletronica, acessado em 26ABR

Figura 6 – Antena do radar aselsan LPI



<http://www.microwavejournal.com/articles/print/484-robust-antenna-solutions-for-maritime-surveillance-radar> acessado em 27 de maio de 2018

Figura 7 – Radar LPI num cruzador naval de casco duplo chinês de classe Ganjiang



http://210.65.127.128/eng/csistdup/products/product.aspx?product_Id=107&catalog=36

4.2.1 Técnicas de Análise para detecção dos radares LPI:

Para identificar os parâmetros do emissor, inicialmente a análise de Fourier deve ser utilizada. A partir daí, técnicas de processamento de sinal mais complexas têm sido usadas, como a transformada de Fourier de curto tempo (STFT), técnicas nos espaços chamadas tempo-frequência e frequência-frequência, têm sido usadas para identificar os diferentes esquemas de modulação. Essas técnicas incluem a distribuição de Wigner Ville (WVD), a distribuição de Choi-Williams, Quadrature Mirror Filtro Bank (QMFB), e a análise Ciclo-Estacionária (CP). Como o escopo desse trabalho é tratar de questões mais práticas associadas aos MAGE para mitigar os efeitos dos radares LPI, tais teorias matemáticas não serão descritas.

Livro: Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar – Phillip E. Pace

4.2.2 Classificação dos radares LPI:

O processo de detecção é seguido pela tarefa de classificação. Classificação requer ordenação do sinal em grupos com parâmetros semelhantes. Parâmetros, tais como:

- Tipo de radar LPI
- Frequência da portadora (utiliza-se a análise Ciclo-Estacionária (CP))
- Largura de banda de modulação
- O período de modulação (utiliza-se a técnica de wigner ville - WVD)
- Período de Código
- Tempo e ângulo de chegada

Embora estejam sendo desenvolvidos equipamentos capazes de detectar os radares LPI e LPID, a grande dificuldade reside no fato de que um sistema de interceptação moderno deverá ser capaz de operar tanto na presença de pulsos estreitos de alta potência como na de pulsos longos com baixa potência.

4.3 Análise da contraposição do MAGE ao radar LPI

Neste trabalho não será possível contemplar todas as técnicas e todos os receptores que possam atuar para mitigar os efeitos dos radares LPI, mas serão apresentadas algumas cruciais, como se segue:

Os LPI têm uma duração de sinal muito mais longa e são provavelmente da ordem de 10 us ou mais. Baixa potência de pico também é usada com frequência ou modulação de fase. Sinais de largura de banda maior que 10 MHz podem não ser necessários, a menos que seja necessária uma resolução de alcance muito alta. Isto implica que os sinais de larguras de banda relativamente estreitas e ciclos de trabalho altos sejam eficazes para aplicações de LPI.

Em termos de exigência do receptor, temos que para a detecção do sinal de radar LPI, um sistema receptor deve ter uma sensibilidade de aproximadamente -100 dBm e uma faixa dinâmica correspondentemente maior.

O receptor de radar LPI faz uso do ganho de integração coerente de filtros combinados e ganho de integração incoerente, integrando um número de pulsos. Por outro lado, os receptores EW atuais são projetados para detectar pulsos de radar convencionais que são de curta duração e em uma ampla faixa de frequência. Como resultado, o receptor de radar tem uma vantagem sobre um receptor EW pelo fator de largura de banda de tempo. Esse fator de largura de banda de tempo é muito grande para os atuais receptores EW. Um projetista de radar tentará que maximizá-lo empregando formas de onda de sinal LPI. Não há dúvida de que o projetista do receptor EW responderá minimizando a largura de banda de tempo para corresponder a essas formas de onda

Serão apresentadas algumas arquiteturas em potencial para aumentar a capacidade de um sistema do MAGE (ou ESM - Electronic Support Measure) no navio.

No sistema ESM multi-band , a saída de uma antena omni é alimentada a um receptor IFM para a determinação da frequência. Ele também é alimentado para outros detectores de vídeo de cristal, onde outros parâmetros, como PW(onda pulsada), amplitude de pulso e TOA(tempo de chegada), são medidos. O DF(marcação) é medido usando um sistema de comparação de amplitude de 8 portas composto por receptores de vídeo de cristal com pré-amplificação de RF.

A melhoria na capacidade geral é realizada pela adição de receptores de radar LPI. O canalizador auxiliar, como mostrado na figura 8, é outro sistema adicional que é usado principalmente para detectar sinais com ciclo de alto rendimento localizados nas proximidades.

4.3.1 Tipos de receptor:

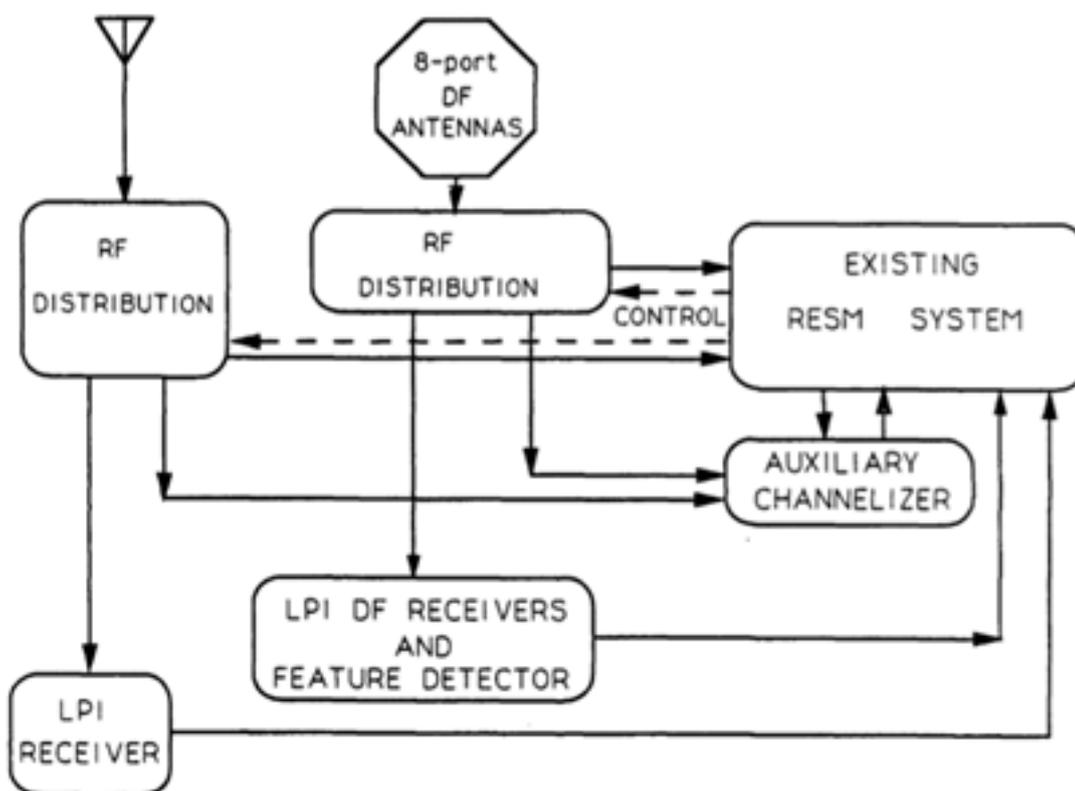
Receptor de banda estreita com detector

A sensibilidade dos receptores EW pode ser bastante aumentada usando-se uma largura de banda de vídeo e RF mais restrita. O receptor canalizado faz com

que uma ampla faixa de frequência instantânea seja coberta. O canalizador pode ser implementado por um receptor de banco de filtros, canalizador acústico-ótico ou receptores de microondas. Para fins de discussão, o banco de filtros ou o canalizador acústico-ótico são usados. Se a largura de banda de vídeo for reduzida para 0,1 MHz, a largura de banda de ruído efetiva (B_i) é de 0,9 MHz e uma melhoria na sensibilidade de 13,3 dB é obtida.

Para melhorar ainda mais a sensibilidade, tanto a figura de ruído quanto a perda de transmissão devem ser minimizadas no omni-channel. Se o valor do ruído puder ser reduzido de 7 dB para 4 dB e a perda de 15 dB para 2 dB, a sensibilidade do sistema será - 97 dBmi com uma relação sinal / ruído de saída de 12 dB. A antena omnidirecional também foi assumida como tendo um ganho de 0 dBi.

Figura 8 – Diagrama de Blocos de um receptor de MAGE para radares LPI



extraído do livro Interception of LPI radar Signals, Jim PY Lee

Usando esta arquitetura de sistema com uma estreita largura de banda de vídeo, a sensibilidade do sistema é melhorada para a detecção de sinais LPI. Ao mesmo tempo, a resposta a pulsos curtos convencionais também será bastante reduzida. Idealmente, a largura do filtro de vídeo deve corresponder à do sinal de interesse do LPI. Se a largura de pulso de um sinal pulsado convencional for 0,1 ps e sua potência

de pico for 30 dB maior que um sinal LPI de 10 ps de duração, a potência de saída do sinal pulsado será reduzida por um fator de 20 dB em comparação com o sinal pulsado. Como resultado, o requisito de faixa dinâmica de saída para detectar sinais convencionais e LPI será reduzido.

Se este sistema for usado para detectar o radar de aeronave, ele pode detectar o feixe principal sem dificuldade. No entanto, na presença de outros sinais pulsados de alta potência, ainda é uma tarefa muito difícil escolher o radar do LPI. Uma maneira é comparar os sinais detectados no canalizador com aqueles medidos pelo sistema principal do Mage. Se um sinal não for detectado pelo sistema principal do Mage, mas detectado no canalizador, será considerado um sinal LPI.

Outra técnica é usar vários filtros de vídeo anexados a cada canal com diferentes larguras de banda de vídeo. Por exemplo, se três larguras de banda de vídeo de 1, 0,1 e 0,01 MHz são usadas para detectar um sinal LPI com uma duração mínima de 100 ps entre um número de sinais pulsados convencionais com uma largura de pulso máxima de 1 ps., assumindo que o sinal está localizado no centro de um canal e para o sinal LPI, a relação sinal-ruído dos três detectores de vídeo aumenta em aproximadamente uma etapa de 5 dB à medida que a largura de banda de vídeo é reduzida por um fator de dez. Por outro lado, a relação sinal-ruído de saída diminui em aproximadamente 5 dB para um pulso de radar convencional. Uma comparação relativa dos três níveis de saída dará alguma indicação sobre se o sinal é de longa ou curta duração e, portanto, indiretamente, dando a natureza do sinal.

Figura 9 – Comparação de parâmetros nominais entre o Radar PILOT MK2 e o MAGE

POTENCIA DE SAÍDA DO RADAR	Distância de detecção do radar (Km)		Distância de detecção do interceptador (Km)		
	Seção reta de 100m ²	Seção reta de 1m ²	RWR -40dBmi	MAGE -60 dBmi	MAGE de alta sensibilidade -80dBmi
PILOT MK2					
1W	28	8,8	0,25	2,5	25
0,1W	16	5	0	0,8	8
10mW	9	2,8	0	0,25	2,5
1mW	5	1,5	0	0	0,8
Radar Pulsado Convencional 10kW	25	7,9	25	250	2500

Uma confirmação final é realizada pelo uso do detector. Os filtros de vídeo podem ser implementados diretamente usando filtros de vídeo analógicos em paralelo ou digitalizando a saída do detector de vídeo e, em seguida, filtrando digitalmente os dados com três larguras de banda de vídeo diferentes.

Para um melhor entendimento de como a sensibilidade é alterada modificando parâmetros como distância e potência, basta analisarmos a tabela acima da figura 9, onde comparamos a sensibilidade do MAGE a um tipo de radar LPI (PILOT MK2) e a um radar convencional.

Outra técnica possível é apenas limitar o nível do sinal de potência de entrada, ao canalizador pelo uso de limitadores seletivos de frequência ou apenas limitadores regulares, de modo que o nível de sinal dos sinais fortes pulsados seja grandemente atenuado. Dependendo do tipo de limitador usado, vários produtos de intermodulação podem ser gerados. A ideia por trás deste esquema é primeiro limitar a potência de pico dos sinais pulsados convencionais ao canalizador, de modo que a relação de potência diferencial dos sinais fortes pulsados convencionais para os sinais LPI será grandemente reduzida. O uso de um filtro de vídeo estreito reduzirá ainda mais o sinal de saída de um pulso convencional para abaixo do limite.

Um outro fator importante para discriminar pulsos convencionais de sinais LPI, é explorar a propriedade de que um sinal LPI é de duração muito maior do que um sinal pulsado convencional.

Receptor Acusto-ótico com Detector

O requisito de receptor de ter um número relativamente grande de canais estreitos com uma largura de banda de vídeo estreita para a detecção de sinais LPI pode ser facilmente atingido pelo uso de um receptor acústico-ótico integrado no tempo. A estreita largura de banda de vídeo e um número relativamente grande de canais pode ser implementado de forma relativamente fácil usando uma matriz fotodetectora integradora de tempo.

Para maximizar a sensibilidade do receptor de entrada, os parâmetros do receptor devem ser projetados para corresponder ao período de integração com a duração do sinal e o tamanho do intervalo de frequência com a largura espectral total do sinal. Um receptor acústico operando em um modo de integração é essencialmente um detector. Um radar LPI transmitirá uma potência de pico muito menor do que um radar convencional. No entanto, a energia total ou potência média será praticamente a mesma. Como resultado, os níveis de potência de saída do receptor acústico-ótico serão praticamente os mesmos quando os dois tipos de radar forem interceptados.

4.3.2 Analisador de Espectro Acústico-Ótico:

Para um radar de aeronave, o analisador de espectro ótico-acústico pode discriminá-lo monitorando-se a localização da frequência de pico detectada do sinal durante vários períodos de integração. A localização do pico do sinal irá se mover para frente e para trás com a taxa de frequência e amplitude do sinal do radar da aeronave.

Quando a aeronave estiver operando em outros modos para a faixa de operação mais curta, a varredura na frequência será maior. Isso causará alguma degradação na sensibilidade do receptor acústico-ótico a esse tipo de sinal. No entanto, a discriminação do radar da aeronave de outros radares convencionais pode ser facilmente realizada com o método descrito.

O tempo efetivo de integração (largura de banda de vídeo) do analisador de espectro ótico-acústico pode ser ajustado para corresponder à duração do sinal interceptado para a máxima sensibilidade. Isso pode ser feito alterando-se o período de integração na matriz de fotodetectores ou alterando o número de amostras integradas digitalmente.

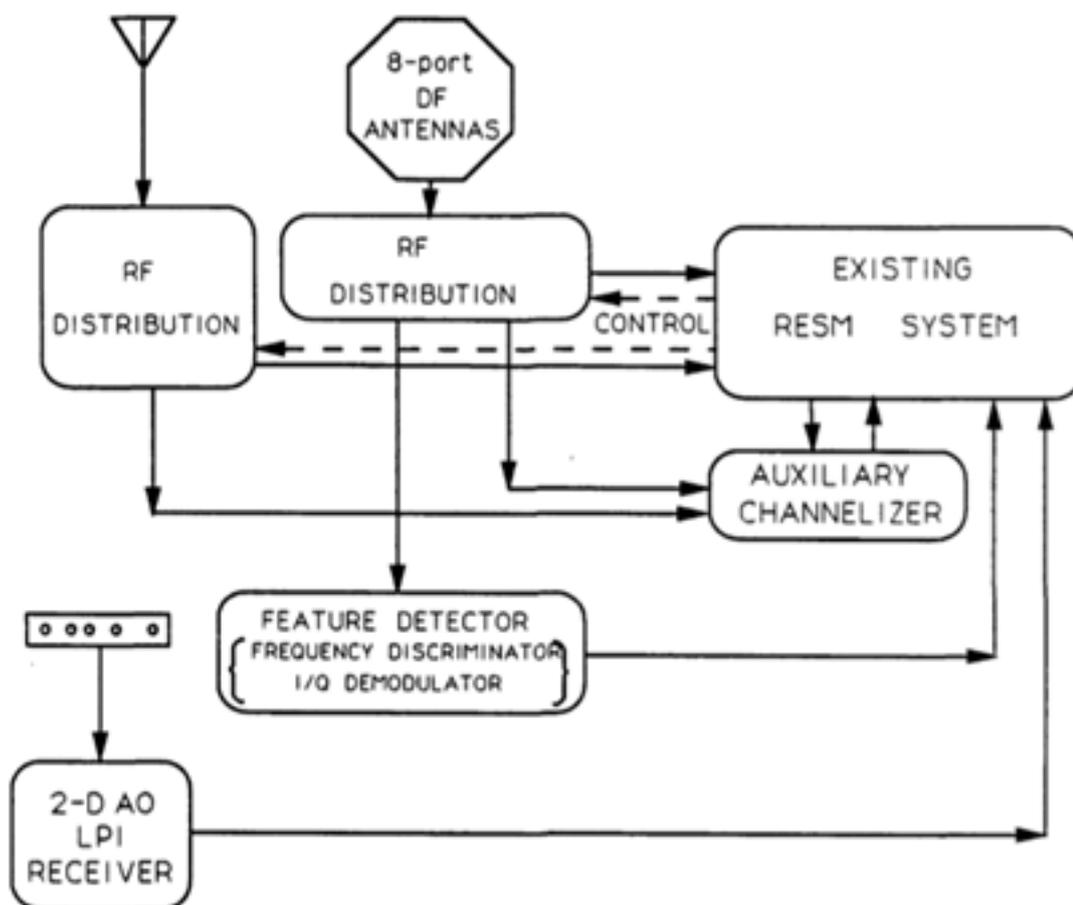
Um diagrama de blocos do potencial sistema Mage é mostrado na figura 8, onde o analisador de espectro ótico-acústico é empregado no omni-canal. Ele é usado como um detector de atividade de sinal LPI e informações de frequência também podem ser obtidas. Uma vez que a frequência do sinal é mensurada, um conjunto de oito receptores de banda estreita, pode ser usado para medir o lóbulo. A estrutura de frequência fina do sinal pode ser extraída pelo uso de um discriminador de frequência ou de um demodulador digital.

4.3.3 Receptor Acústico-ótico em 2-D

A característica especial do receptor acústico óptico 2-D sobre o analisador de espectro ótico-acústico é que o lóbulo principal, bem como o espectro do sinal, são medidos. Ambos os sinais convencionais e LPI também aparecerão na saída, a menos que alguma limitação seja realizada na extremidade frontal para limitar os sinais de alta potência pulsados. Quando um sinal LPI longo e fraco e um sinal forte de interferência curto são aplicados a um amplificador limitador, resultarão produtos de intermodulação. O sinal LPI também será interrompido e suprimido durante a presença do sinal forte. A partir da medição feita em um receptor acústico óptico 2-D, o lóbulo principal do LPI é considerado ligeiramente afetado pela presença do sinal forte. Isso se deve ao fato de que todos os canais são correspondidos e a fase do sinal em cada canal é afetada pela mesma quantidade. Como resultado, as diferenças de fase originais entre os canais são preservadas e, portanto, não afetam a medição resultante do feixe principal. O

o sinal LPI será suprimido durante a presença do sinal de interferência e o espectro será ligeiramente afetado também. A degradação em termos de perda de sensibilidade dependerá da quantidade de tempo que o sinal LPI é interrompido e o efeito deve ser pequeno. A figura 10 mostra o diagrama de blocos do receptor acústico-ótico em 2-D.

Figura 10 – Diagrama de blocos do receptor acústico-ótico em 2D



extraído do livro *Interception of LPI radar Signals*, Jim PY Lee

Existem outros tipos de receptores de interceptação que não foram analisados neste trabalho. Alguns destes receptores passivos podem ser usados para detectar as emissões do emissor LPI em distâncias consideráveis. Na figura 11 são apresentadas três arquiteturas de receptores capazes de detectar vários tipos de formas de onda de emissor de LPI. Porém suas capacidades não serão elucidadas neste trabalho, ficando para sugestão ler o livro *Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar* – Phillip E. Pace.

Figura 11 – Arquiteturas de receptores

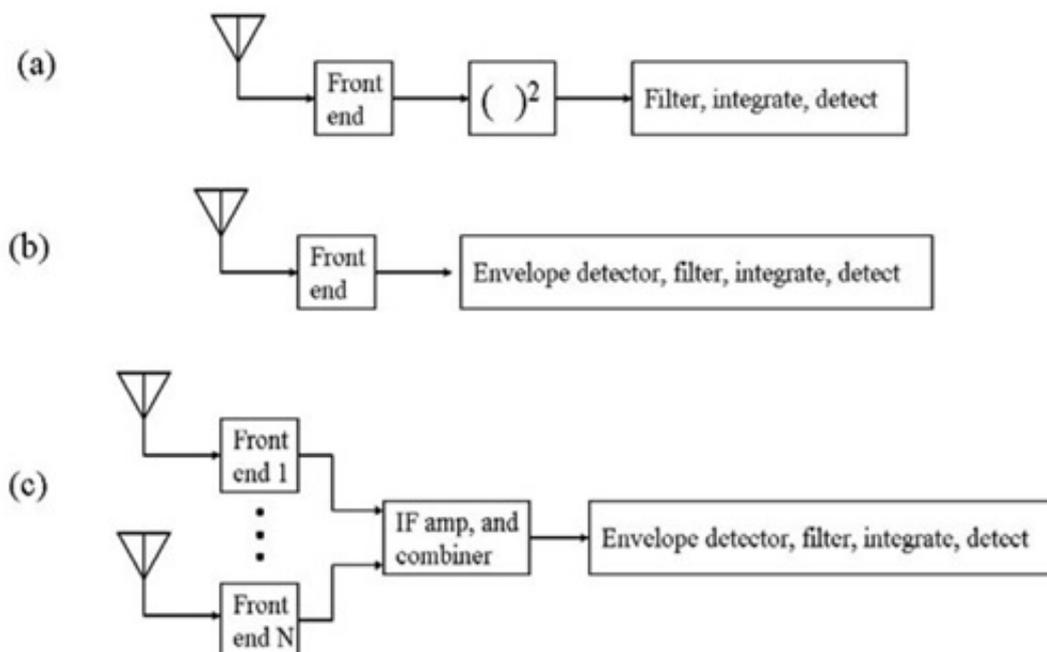


Figura 11 - Diagrama de blocos de arquitetura de receptores, considerando:

- a) Receptor Square Law
- b) Wide Band Cristal Video (Banda Larga)
- c) Canalizado

(livro Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar – Phillip E. Pace)

5 CONCLUSÃO.

5.1 Considerações Finais

Nesta obra foi realizada uma análise teórica sobre quais são as possíveis formas do MAGE se contrapor aos radares LPI. Vale lembrar que as discussões aqui abordadas estão em testes nos dias de hoje.

É de suma importância que profundos estudos e testes sejam desenvolvidos e analisados. Conclui-se que, no cenário atual de Guerra Eletrônica, o detentor da tecnologia MAGE detector do Radar LPI é que irá se sobressair.

Portanto sempre estivemos diante de uma corrida armamentista na Guerra Eletrônica e a Marinha do Brasil não pode abrir mão da obtenção desta tecnologia.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Uma hipótese é reunir diversos manuais de equipamentos MAGE diferentes e verificar o que se pode juntar de cada um de forma a conseguir um único MAGE otimizado. Então verificar do ponto de vista da engenharia e da operacionalidade. Também é mister que seja verificado financeiramente e ergonomicamente.

Nesta ocasião um laboratório é bastante pertinente para testes, principalmente para o pessoal técnico em eletrônica e físicos que possam confirmar a eficiência, antes de embarcar o equipamento.

É válido que contatos com Marinhas amigas sejam realizados a ponto de se “explorar” sobre técnicas, medidas empregadas e estudos de alto nível que tenham angariado eficiência no MAGE. Atualmente o IPqM (Instituto de pesquisas da Marinha), vem unindo e absorvendo conhecimentos com a França, realizando testes de detecção do radar LPI.

REFERÊNCIAS

Jim P.Y. Lee; Interception of LPI Radar signals, Defence Research Establishment, Ottawa, Canadá, 1991

Phillip E. Pace; Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar, Norwood, 2009

CMG Marcello Lima de Oliveira; CC João Candido Marques Dias, Low Probability of Intercept, CAAML, 2007

Mitch; Naval Analyses.2018. Disponível em:<https://twitter.com/D__Mitch>. Acesso em: 05/03/2018.

Stimson, G. W., Introduction to Airborne Radar, 2nd Edition, SciTech Publishing, Inc., Mendham, NJ, 1998.

Marinha do Brasil; Grupo de Sistemas de Guerra Eletrônica. 2018. Disponível em:<https://www.marinha.mil.br/ipqm/grupo_guerra_eletronica>. Acesso em: 25/04/2018.

Ankara; Robust Antenna Solutions For Maritime Surveillance Radar. 2012. Disponível em:<<http://www.microwavejournal.com/articles/print/484-robust-antenna-solutions-for-maritime-surveillance-radar>>, Turquia. Acesso em: 27/05/2018.

NCSIST; The Low Probability of Intercept (LPI) Navigation Radar. 2018. Disponível em:<http://210.65.127.128/eng/csistdup/products/product.aspx?product_Id=107&catalog=36>, Acesso em: 27/05/2018.