

**MARINHA DO BRASIL**  
**DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA**  
**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM**  
**GUERRA ELETRÔNICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RADARES COM BAIXA PROBABILIDADE DE INTERCEPTAÇÃO(LPI): um levantamento de**  
estudos científicos



**PRIMEIRO-TENENTE LUIZ FELIPE DE PAIVA CYPRIANO**

Rio de Janeiro

2021

PRIMEIRO-TENENTE LUIZ FELIPE DE PAIVA CYPRIANO

RADARES COM BAIXA PROBABILIDADE DE INTERCEPTAÇÃO (LPI): um levantamento de estudos científicos

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica.

Orientador:

Capitão-Tenente Willian Sathler Lino Soares.

CIAW  
Rio de Janeiro  
2021

# FOLHA DE APROVAÇÃO

PRIMEIRO-TENENTE LUIZ FELIPE DE PAIVA CYPRIANO

RADARES COM BAIXA PROBABILIDADE DE INTERCEPTAÇÃO (LPI): um levantamento de estudos científicos

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica.

Aprovada em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2021.

Banca Examinadora

CC Paulo Bacchini Munis – CIAW

\_\_\_\_\_

CT Willian Sathler Lino Soares – CIAW

\_\_\_\_\_

Marco Antonio Grivet Mattoso Maia, PhD – PUC Rio

\_\_\_\_\_

CIAW  
Rio de Janeiro  
2021

## RADARES COM BAIXA PROBABILIDADE DE INTERCEPTAÇÃO (LPI): um levantamento de estudos científicos

### Resumo

No contexto mundial atual, em que se encaixa o conceito de Guerra Moderna, há uma crescente necessidade de aperfeiçoamento e desenvolvimento operacional das nações, pois sistemas das mais altas complexidades emaranham o espectro eletromagnético e fazem com que conflitos armados se tornem muito mais letais, estratégicos e tecnológicos. E no contexto da Guerra Eletrônica, os radares que utilizam da técnica “ver e não ser visto”, chamados de radares de baixa probabilidade de interceptação (em inglês, *Low Probability Interception - LPI*) vem ganhando muito espaço. Radares LPI também são descritos como radares “silenciosos” e o conhecimento em torno desse sistema radar ainda possui um vasto campo a ser estudado e desenvolvido. Estudos em sua maioria, muito específicos, abordam técnicas da construção dos sistemas de radar LPI, e como se trata de uma operação sigilosa, em que o fator surpresa é diferencial, não aprofundam em sua aplicação prática. Este trabalho visa, então, contribuir com o levantamento de dados práticos sobre aplicações, evoluções e desenvolvimento dos sistemas de radar LPI nos últimos tempos e como eles impactaram nos sistemas MAGE, que evoluem em paralelo. Para isso, utilizou-se plataformas online de busca de trabalhos acadêmicos em sua mais variada forma, sejam eles artigos, monografias, dissertações, teses ou resumos.

**Palavras-chave:** Radar. LPI. Guerra Eletrônica. MAGE.

## **Abstract**

In the current world context, in which the Modern War concept fits, there is a growing need for improvement and operational development of nations, as systems of the highest complexities entangle the electromagnetic spectrum and make armed conflicts become much more lethal, strategic and technological. And in the context of Electronic Warfare, radars that use the “see and not be seen” technique, called low probability interception radars (in English, Low Probability Interception - LPI) have been gaining a lot of space. LPI radars are also described as “silent” radars and the knowledge around this radar system still has a wide field to be studied and developed. Most studies, very specific, deal with techniques for the construction of LPI radar systems, and as this is a secret operation, in which the surprise factor is different, they do not go into its practical application. This work, then, aims to contribute to the collection of practical data on applications, evolutions and development of LPI radar systems in recent times and how they impacted MAGE systems, which evolve in parallel. For this, online platforms for searching academic papers in their most varied form were used, whether they are articles, monographs, dissertations, theses or abstracts.

**Key-words:** Radar. LPI. Electronic Warfare. MAGE.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sinal de um Radar.....	12
Figura 2.1 - Antena radar LPI espanhol Aries .....	15
Figura 2.2 - Ação do radar LPI na redução de capacidade de interceptação e detecção de um sistema MAGE. ....	16
Figura 2.3 - Pulso radar LPI e radar convencional.....	16
Figura 2.4 - Potência emitida nos lóbulos principal e secundário do radar convencional e LPI.....	17
Figura 2.5 - Gerenciamento de potência de um radar LPI em comparação a um radar pulsado convencional.....	18
Figura 3.1 - Demonstração gráfica da eficácia de detecção para a modulação BPSK.....	26
Figura 3.2 - Trajetória do alvo.....	27
Figura 3.3 - Número de radares de trabalho.....	28
Figura 3.4 - Diagrama de bloco do receptor LPI.....	30
Figura 3.5 - Procedimento de detecção de sinal de radar.....	33
Figura 3.6 - Características do sinal nas modulações FMCW e BPSK.....	34
Figura 3.7 - Visão geral da filtragem paralela e HOS. ....	35

## **LISTAS DE TABELAS**

Tabela 1 - Lista de exemplos de sinais analisados na dissertação .....	25
--	----

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BiLSTM - *Bidirectional Long Short-Term Memory*

BPSK - *Binary Phase Shift Keying*

CNN - *Convolutional Neural Network*

CW - *Continuous Wave*

CWR - *Continuous Wave Radar*

ECCM - *Electronic Counter Counter Measures*

ECM - *Electronic Counter Measures*

ESM - *Electronic Support Measures*

EW - *Electronic Warfare*

FH - *Frequency Hopping*

FMCW - *Frequency Modulation Continuous Wave*

FSK - *Frequency Shift Keying*

GE - Guerra Eletrônica

GSGE - Grupo de Sistemas de Guerra Eletrônica

HOS - *Higher Order Statistics*

IF - *Information Filter*

IMM - *Interacting Multiple Model*

IPqM - Instituto de Pesquisas da Marinha

LPI - *Low Probability Interception*

MAE - Medidas de Ataque Eletrônico

MAGE - Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica

MAR - Míssil Antirradiação

MFIJD - *Multiple Feature Images Joint Decision*

MGE - Medidas de Guerra Eletrônica

MPE - Medidas de Proteção Eletrônica

PR - *Pulsed Radar*

PSK - *Phase Shift Keying*



FRP - Frequência de Repetição de Pulso

RWR - *Radar Warning Receiver*

SRN - *Signal to Noise Ratio*

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
1.1. Guerra Eletrônica.....	10
1.2. Radares.....	11
1.3. Definição do Problema .....	12
1.4. Objetivo Geral.....	13
1.5. Estrutura Capítular .....	14
2. SISTEMAS DE RADAR LPI .....	15
2.1. Características de Sistemas MAGE .....	19
2.2. Baixa probabilidade de interceptação de um sistema de radar .....	20
3. ESTADO DA ARTE.....	23
3.1. Análise de sinais de radar de baixa probabilidade de interceptação (LPI) usando processamento cicloestacionário .....	23
3.2. Método de seleção de radar com base em um filtro de informação aprimorado na rede de radar LPI.....	26
3.3. Anti-jamming e radar LPI com tecnologia de espalhamento de espectro	29
3.4. Quantificar as diferenças nas formas de onda de um radar de baixa probabilidade de interceptação usando filtragem de espelho de quadratura (QMFB)	30
3.5. Algoritmo de detecção de sinais de radar LPI .....	32
3.6. Classificação não-linear autônoma de modulações de sinal de radar LPI	35
4. ANÁLISES E DISCUSSÃO .....	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	39
REFERÊNCIAS.....	40

# 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo contextualiza a atuação de sistemas radar no ambiente da Guerra Eletrônica, abordando uma classe específica de sistema radar: LPI (do inglês, *Low Probability of Interception*), radar esse que será abordado ao longo de todo este trabalho como foco principal. Além disso, serão apresentadas suas características de funcionamento, evidenciado seus parâmetros básicos, como a forma de onda e a modulação utilizada para reduzir a probabilidade de interceptação de seus sinais. Por fim, apresenta o problema encontrado a ser resolvido para gerar o objetivo deste trabalho.

## 1.1. Guerra Eletrônica

No contexto mundial atual, a Guerra Moderna exige um aperfeiçoamento e desenvolvimento operacional constante das forças armadas dos países, pois radares das mais altas complexidades emaranham o ambiente eletromagnético e fazem com que os conflitos armados se tornem muito mais letais, estratégicos e tecnológicos (MING et al, 2016).

A Guerra Eletrônica (GE), em inglês, *Electronic Warfare* (EW), é explicada como o conjunto de ações que objetivam explorar o espectro eletromagnético, de forma a impedir ou reduzir o controle, ou até mesmo o uso desse espectro pelas forças inimigas, assegurando, assim, a própria força (MING et al, 2016). Este é um termo genérico que engloba todas as ações militares, que visam assegurar um uso mais eficaz das emissões eletromagnéticas e eletro-ópticas, impedindo que o inimigo consiga identificar e fazer uso. Todos os sistemas de uso militar de emissão e recepção desta energia, tanto de forma ofensiva ou defensiva, variam amplamente (NETO, 2017).

Podemos classificar as “ações” da guerra eletrônica em quatro tipos: i. detecção (radares, sonares, receptores de alerta antecipado); ii. coleta de informações (Sigint - *Signals Intelligence*, Elint - *Electronic Intelligence*, Comint - *Communications Intelligence*); iii. contramedidas (*chaffs*, *flares*, *anti-jamming*); e iv. interferência intencional (*jamming*, desvio de sinais/dissimulação e armas do tipo *Electromagnetic Pulse*) (NETO, 2017).

Há alguns anos, estudiosos propuseram várias abordagens que tornavam o sistema de reconhecimento automático das fontes de radiação mais inteligente e robusto e mais

parecido com um operador humano. Tais abordagens impulsionaram o desenvolvimento da área de reconhecimento de sinal e as redes móveis sem fio passaram a ser utilizadas nas mais diversas áreas como a militar, de turismo, educação, engenharia, descoberta de desastres ecológicos, emergência médica entre outras. Foi então que a Guerra Eletrônica teve seu início e criou força em seus novos desenvolvimentos (MA et al., 2013).

Dentro do contexto da GE, as Medidas de Guerra Eletrônica (MGE) são ações efetivamente realizadas ao longo de uma operação militar. As MGE são subdivididas em: Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE), em inglês, *Electronic Support Measures* (ESM); Medidas de Ataque Eletrônico (MAE), em inglês, *Electronic Counter Measures* (ECM) e, por último, Medidas de Proteção Eletrônica (MPE), em inglês, *Electronic Counter Counter Measures* (ECCM) (DENK, 2006).

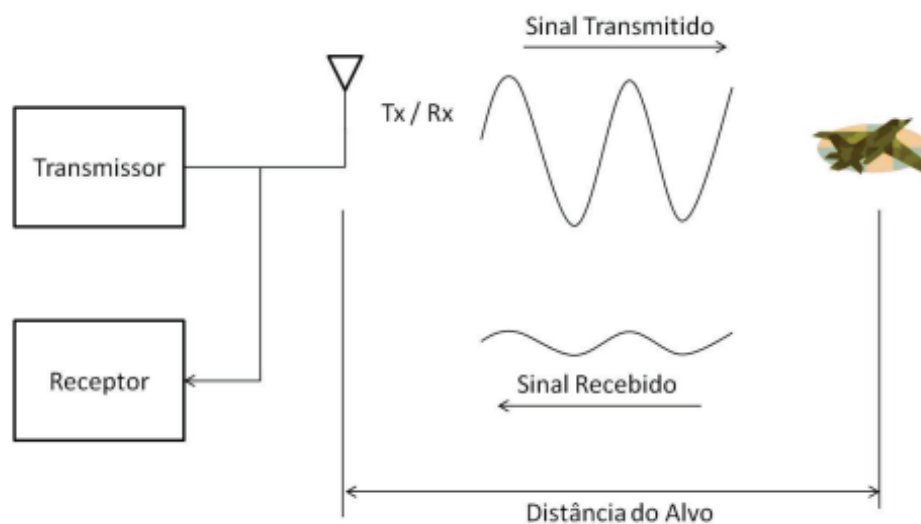
No caso da Marinha do Brasil, de acordo com o site do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), essas medidas e sistemas são controlados pelo Grupo de Sistemas de Guerra Eletrônica (GSGE). Tal grupo é responsável pelo desenvolvimento de receptores e transmissores em microondas, processamento de sinais aplicados à detecção de emissões (análise de antenas) e Medidas de Ataque Eletrônico; simulação e testes de MAGE/MAE/Radar, análise de antenas omnidirecionais para a faixa micro-ondas, reconhecimento de padrões aplicados a imagens na faixa de frequência do infravermelho e distribuição de vídeo radar por IP.

## 1.2. Radares

A sigla radar advém da palavra *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *RAN*ging. Radares são sistemas que utilizam o espectro eletromagnético e que possuem formas de onda específicas e antenas características (dada as pretensões de seu operador) para transmitir energia eletromagnética em uma parte do espaço pré-determinada, a fim de detectar alvos, os quais, daquele volume, refletirão a energia emanada de volta para o equipamento, essa energia que retorna é denominada eco radar. Através da análise do eco radar são processadas informações como distância, posição angular e velocidade relativa do alvo. Sistemas radar podem operar sob condições extremamente desfavoráveis, como em tempestades ou longas distâncias (BURGOS-GARCIA et al., 2000).

Qualquer tipo de sistema radar possui suas partes principais: um transmissor, antena(s) (uma única antena pode realizar as duas funções ou pode existir uma antena separada para transmissão e outra para recepção) e um receptor. O transmissor é o dispositivo que atribui uma forma de onda à energia eletromagnética a ser transmitida, a antena transmite a energia eletromagnética gerada, assim como, recebe a energia que é parcialmente refletida no alvo e a entrega ao receptor, que por sua vez é o responsável por processar o sinal e extrair as informações pertinentes. (RICHTER; PEREIRA, 2020). Essa dinâmica pode ser vista na Figura 1.1.

Figura 1.1: Sinal de um Radar.



Fonte: (POTTER *et al.*, 2010).

A maneira mais comum de classificação dos sistemas radar é a forma de onda ou faixa de frequência que eles utilizam em sua operação. Dessa forma, podem ser classificados como Radars de Onda Contínua (CWR, do inglês, *Continuous Wave Radars*) ou Radars Pulsados (PR, do inglês, *Pulsed Radars*) (SKOLNIK, 1981).

### 1.3. Definição do Problema

Os equipamentos radar tornaram-se uma das principais “armas” das Forças Armadas, sua utilização permite a detecção antecipada de alvos, possibilitando sua

interceptação. Por isso, os estudos acerca desse tema são importantes e válidos, visto que o conhecimento gera o aprimoramento do meio. Existem variados tipos de radar, classificados conforme suas características de funcionamento. Um dos sistemas que estão em maior evidência são os radares do tipo LPI.

O conhecimento sobre radares com baixa probabilidade de interceptação ainda possui um vasto campo a ser desenvolvido, muitas propriedades e conhecimentos precisam ser estudados com maior profundidade a fim de conhecer e entender suas aplicações, como eles trabalham, como podem ser benéficos pra quem os utiliza e quais efeitos podem causar no inimigo.

Estudos, em sua maioria muito específicos, abordam técnicas e aplicações sem muito aprofundamento, visto que são normalmente de classificação secreta. Essa lacuna precisaria ser preenchida para que se tenha um conhecimento mais vasto e preciso a respeito do funcionamento e da aplicação prática dos radares LPI.

#### **1.4. Objetivo Geral**

Os sistemas de radar LPI em GE possuem de uma necessidade contínua de desenvolvimento de características técnicas cada vez mais sofisticadas, a fim de que um sistema consiga fazer frente a outro. Toda evolução tecnológica no sentido de dificultar a detecção do sinal irradiado é, em geral, acompanhada pela evolução tecnológica desse próprio sistema que tenta fazer a interceptação do sinal, para que este não fique para trás, incrementando sua capacidade de detectar sinais radar cada vez mais elaborados.

É de interesse para este trabalho fazer uma correlação com o sistema MAGE, tendo em vista sua relação com a detecção e a análise de sinais radar, tema central deste trabalho. MAGE é um sistema passivo de emprego tático que tem como função a busca, interceptação, identificação e localização de emissores radar, isto é, de sistemas que transmitem energia eletromagnética, a fim de detectar alvos e extrair informações relevantes .

Este trabalho visa, então, contribuir com o levantamento de dados práticos sobre aplicações, evoluções e desenvolvimento dos sistemas de radar LPI nos últimos tempos e como eles impactaram nos sistemas de interceptação do sinal, tratados como sistemas/equipamentos MAGE, que evoluem em contrapartida. Para isso, utilizou-se plataformas

online de busca de trabalhos acadêmicos em sua mais variadas formas, sejam eles artigos, monografias, dissertações, teses ou resumos.

### **1.5. Estrutura Capítular**

Este trabalho é estruturado em seis capítulos. O capítulo 1 se apresenta como a introdução do trabalho e visa contextualizar a GE e a atuação de sistemas radar, apresenta alguns conceitos importantes para entender a atuação dos sistemas de radar LPI que será apresentado posteriormente. Mostra o problema encontrado que motivou a pesquisa e por fim, apresenta o objetivo deste trabalho com a descrição da metodologia de pesquisa desenvolvida. O capítulo 2 é a apresentação dos sistemas de radar LPI como um todo, suas características técnicas, sua aplicação, entre outros. O capítulo 3 apresenta tudo o que está sendo desenvolvido para sistemas de radar LPI que existe na literatura, esta descrição é o coração do trabalho, tendo em vista que contextualiza o que está sendo desenvolvido neste campo de estudo, suas evoluções e lacunas. O capítulo 4 apresenta, por fim, as considerações finais do trabalho.

## 2. SISTEMAS DE RADAR LPI

No contexto de Guerra Eletrônica, os sistemas de radar que utilizam da técnica "ver e não ser visto", chamados de radares de baixa probabilidade de interceptação (em inglês, *Low Probability Interception - LPI*) estão sendo cada vez mais utilizados, pode-se observar na Figura 2.1 o radar LPI Aries da Marinha espanhola. Pode-se definir um radar LPI como aquele que usa uma forma especial de emissão de onda destinada a evitar que sua interceptação seja detectada. O desempenho esperado é que a distância de detecção radar do alvo seja maior que a distância de interceptação de um sistema eletrônico passivo, como pode ser visto na Figura 2.2 (DA SILVA, 2019).

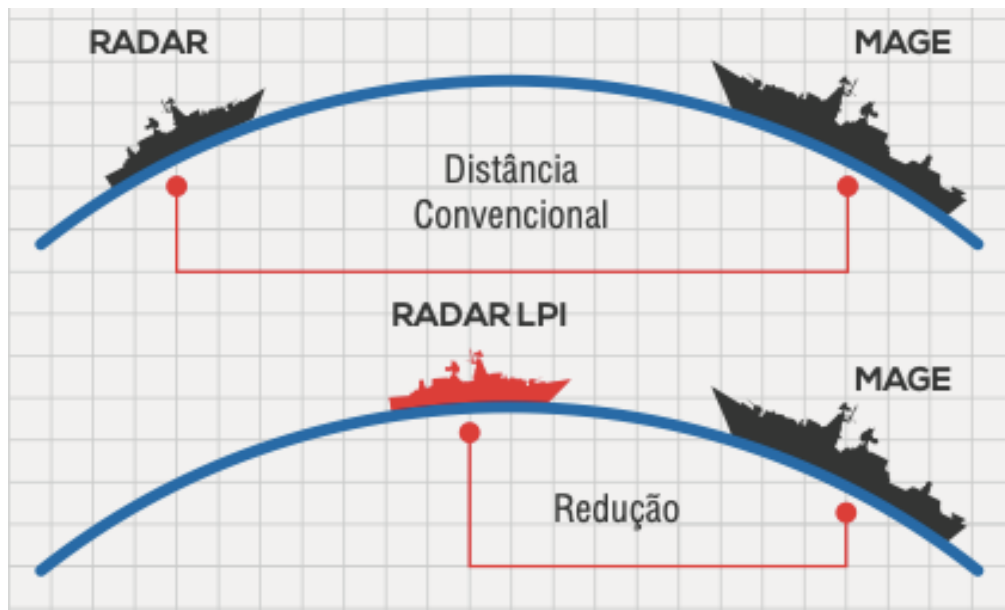
Figura 2.1: Antena radar LPI espanhol Aries



Fonte: (RICHTER; PEREIRA, 2020).



Figura 2.2: Ação do radar LPI na redução de capacidade de interceptação e detecção de um sistema MAGE.

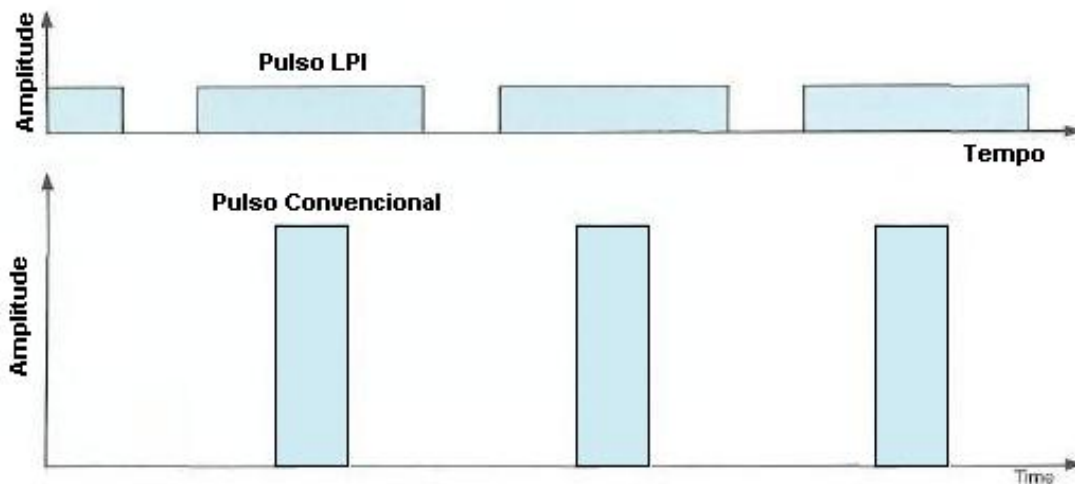


Fonte: (DA SILVA, 2019)

Segundo Da Silva (2019), sistema de radar LPI tem sua detecção por um receptor de interceptação passiva dificultada, devido a diversos fatores, dentre eles:

- Grande largura de banda: Larga faixa da frequência de operação)/grande ciclo de trabalho ativo (Figura 2.3);

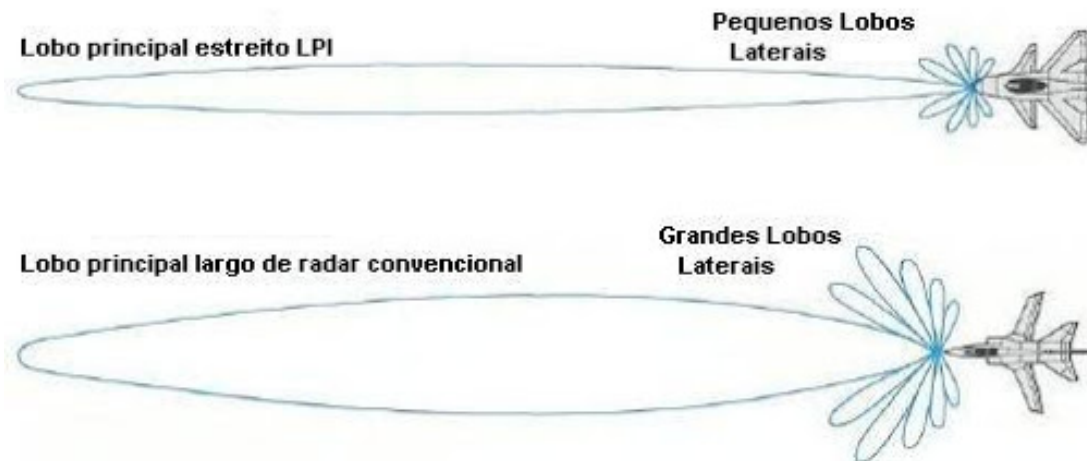
Figura 2.3: Pulso radar LPI e radar convencional.



Fonte: (Sistemas de Armas, 2005).

- Antena com lóbulo secundário de irradiação muito reduzido: À medida que a antena emite menos potência fora do eixo principal, reduz a capacidade de interceptação do sinal (Figura 2.4);

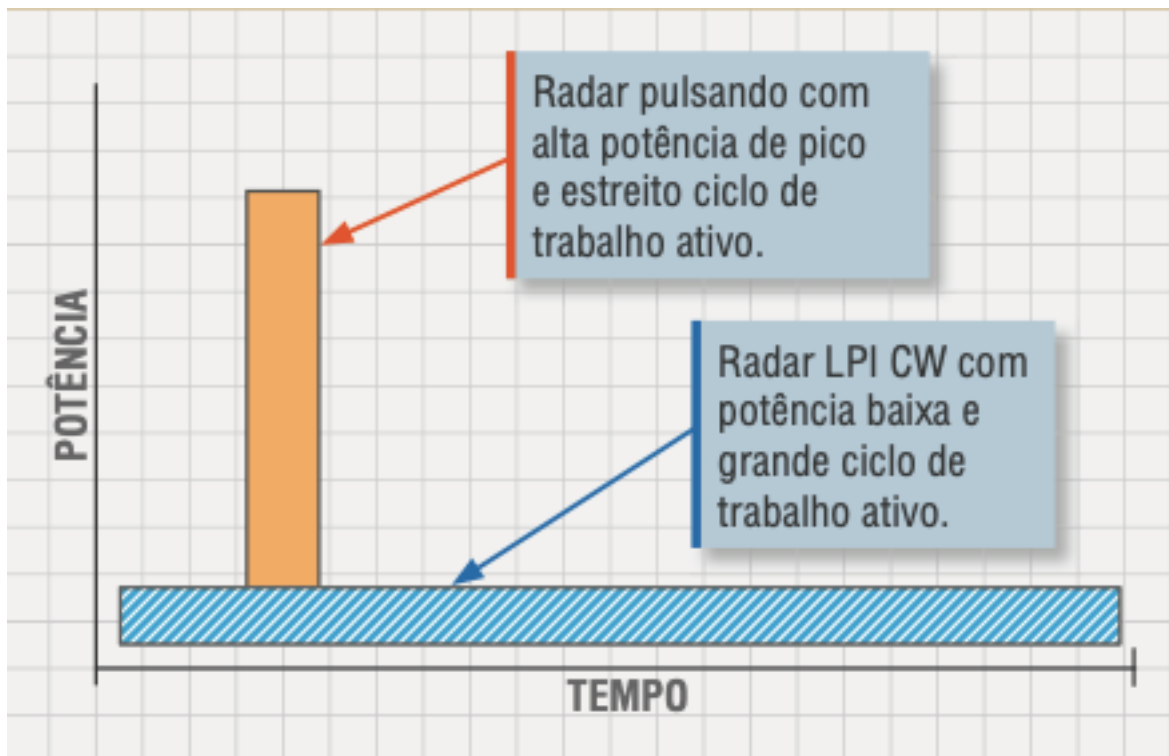
Figura 2.4: Potência emitida nos lóbulos principal e secundário do radar convencional e LPI.



Fonte: (Sistemas de Armas, 2005).

- Padrão irregular de varredura da antena: Os sistemas de interceptação podem usar o tipo e taxa de varredura para detectar e identificar o radar e, conseqüentemente, o meio que está emitindo. Entretanto, mudando-se este padrão aleatoriamente, a interceptação será dificultada;
- Gerenciamento eficaz de potência irradiada: A potência irradiada pelo radar LPI é regulada de acordo com a distância radar-alvo, uma vez que a distância radar-alvo diminui, a potência irradiada também diminui e vice-versa. Isto minimiza a relação sinal-ruído e faz com que a distância do emissor seja calculada de forma incorreta por receptores inimigos (Figura 2.5);

Figura 2.5: Gerenciamento de potência de um radar LPI em comparação a um radar pulsado convencional.



Fonte: (DA SILVA, 2019)

- Frequência da Portadora: Com o uso de frequências próximas às de máxima atenuação atmosférica (22, 60, 118GHZ), o sinal transmitido poderá ser mascarado, limitando assim a interceptação do sinal. Contudo, devido a alta absorção, esta técnica é limitada a apenas radar LPI de curto alcance;
- Alta sensibilidade: Detecção e processamento de sinais de baixa potência, provenientes do eco de um alvo;
- Alto ganho de processamento: O radar consegue restringir e processar de forma eficaz os sinais recebidos, apesar da grande largura de banda no seu receptor;
- Variação de frequência de operação (Agilidade em Frequência): Dificulta a determinação da frequência exata por parte do sistema de interceptação, e, portanto, a identificação do emissor; e
- Configuração monoestática e biestática (transmissor e receptor separados em distância): Para um sistema monoestático, a potência espalhada pelo transmissor é isolada do receptor. No entanto, para minimizar o ataque MAR (Mísseis Antirradiação) e

aumentar a possibilidade de detecção de alvos *stealth*<sup>1</sup> ("invisíveis"), os modelos biestáticos são mais eficientes.

A ideia principal do radar LPI é escapar da interceptação através da incompatibilidade de sua forma de onda com aquelas formas de onda para as quais um equipamento MAGE está sintonizado. Dessa forma, a capacidade de camuflagem depende das características de ambos, do radar LPI e do sistema MAGE, então para entender o funcionamento de um radar LPI, deve-se primeiro entender a natureza dos sistemas MAGE e os tipos de onda compatíveis a eles, suas funções a serem executadas, identificação e localização de emissores amigáveis e hostis, dentre outras características (DE FIGUEIRÊDO, 2019).

## 2.1. Características de Sistemas MAGE

A sensibilidade do interceptador pode ser definida como a potência mínima do sinal que o sistema pode detectar. Como a potência de qualquer sinal cai com o quadrado da distância, claramente a sensibilidade é o fator que ditará o alcance do sistema. Além disso, a precisão do sistema será ditada em função da relação sinal-ruído (SNR), que também é afetada pela sensibilidade (SCHLEHER, 2006).

O alcance dinâmico dos sensores dita todos os níveis de potência que conseguem ser detectados simultaneamente por um receptor MAGE. O ideal seria que o receptor tivesse uma gama dinâmica suficientemente vasta para detectar radares no mínimo e no máximo do alcance requerido, simultaneamente. Quando isso não é possível, os sinais mais baixos podem ser perdidos, mesmo que a potência deles esteja acima do nível de sensibilidade. Portanto, o alcance dinâmico e a sensibilidade devem ser consideradas em conjunto a fim de prever a cobertura de um equipamento MAGE (SCHLEHER, 2006).

Em um clássico cenário de um MAGE, o receptor tem uma vantagem de alcance sobre o radar convencional, pois a onda emitida pelo radar tem que viajar o dobro da distância para detectar o alvo, ou seja, do radar ao alvo e vice-versa. Para o sinal ser interceptado, a onda precisa viajar apenas em uma direção, portanto, os sistemas MAGE têm uma grande vantagem de alcance sobre o receptor de radar. Isso pode ser facilmente visto comparando as

---

<sup>1</sup> Tecnologia que baseia-se, principalmente, na utilização de técnicas para redução da seção reta radar, fazendo com que o objeto seja identificado pelo radar com dimensões menores do que as reais.

seguintes equações de alcance de radar e receptor MAGE, equações (1) e (2), respectivamente (KISHORE; RAO, 2017).

$$P_{radar} = \frac{P_T \cdot G_T^2 \cdot \delta^2 \cdot \sigma_T}{(4\pi)^3 \cdot R_{radar}^4} \quad (1)$$

$$P_{IR} = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \delta^2}{(4\pi)^2 \cdot R_{IR}^2} \quad (2)$$

De (1) e (2), pode-se observar que o sinal recebido pelo radar é inversamente proporcional à quarta potência da distância do radar para o alvo ( $R_{radar}^4$ ). Observa-se, também, que o sinal interceptado pelo receptor é inversamente proporcional ao quadrado da distância do radar ao receptor de interceptação ( $R_{IR}^2$ ). Portanto, o último tem uma vantagem de alcance sobre o radar na interceptação do sinal, que pode ser considerado um fator de vantagem (KISHORE; RAO, 2017).

Já no caso dos radares LPI, os sinais transmitidos são muito fracos e emitidos em uma ampla banda de frequência, o que torna difícil para o MAGE detectar os sinais acima de seu limite. Isso acontece devido à utilização de técnicas diferentes, como gerenciamento de energia e modulação intrapulso complexa, criando um cenário para o interceptador que parece estar recebendo sinal ruidoso o tempo todo (KISHORE; RAO, 2017).

Outro ponto importante de salientar, que não é uma característica própria dos sensores, mas influencia nas mesmas, é a deterioração do sinal do transponder recebido pelo sistema. Isto pode ser causado por uma combinação de vários caminhos (efeito multipath), onde várias cópias do mesmo sinal são recebidas pela reflexão em objetos distintos, interferências causadas por outras emissões (*jamming*) e adulteração maliciosa ou não intencional do sinal (KONG et al., 2018).

## 2.2. Baixa probabilidade de interceptação de um sistema de radar

A principal característica dos radares LPI pode ser descrita pela sensibilidade ( $\delta$ ), definida como a razão entre a potência do sinal necessária na interceptação para aquele

necessário no radar LPI ( $\frac{P_{IR}}{P_{RT}}$ ) e através das equações já apresentadas, pode-se demonstrar que a proporção do intervalo em que o sinal de radar pode ser interceptado até o alcance em que o radar pode detectar um alvo se dá pela equação (3) (SCHRICK; WILEY, 1990).

$$\frac{P_{IR}}{P_{RT}} = \delta = \left( \frac{R_T^2}{R_I} \right)^2 \cdot \frac{4\pi \cdot G_{TE} \cdot G_E \cdot L_E}{\sigma_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot L_R} \quad (3)$$

Onde:

$\sigma$ : Razão de potência necessária no receptor para detectar um sinal para a potência exigida pelo radar para detectar um alvo;

$\sigma_T$ : Seção transversal do radar ao alvo;

$G_{TE}$ : Ganho da antena de transmissão do radar em direção ao receptor;

$G_E$ : Ganho da antena do receptor em direção ao transmissor;

$G_T$ : Ganho da antena de transmissão do radar em direção ao alvo;

$G_R$ : Ganho da antena de recepção do radar em direção ao alvo;

$R_T$ : Alcance do radar;

$R_I$ : Alcance do receptor para interceptar o radar; e

$L_R, L_E$ : Perdas no radar e nos receptores.

A forma desta equação sugere que quanto maior o alcance do radar,  $R_{\text{radar}}$ , maior é a proporção do alcance do receptor em relação ao alcance do radar,  $\frac{R_T^2}{R_I}$ . Também sugere que as mudanças nos outros fatores (em particular  $\delta$ ) alteram a proporção do intervalo em relação à sua raiz quadrada (SCHRICK; WILEY, 1990).

A relação da potência do sinal necessária no receptor é a definição para  $\delta$ . Esses níveis de potência podem ser expressos como o produto da relação sinal-ruído mínima exigida vezes o nível de ruído na largura de banda, ambos presentes na entrada de cada receptor. Essas são as variáveis importantes quando se deseja criar um radar tipo LPI. Pois assim, se consegue dificultar a interceptação de um sistema MAGE (DE FIGUEIRÊDO, 2019).

O sucesso dos radares LPI depende de quão difícil é para um receptor detectar os parâmetros de emissão dos radares. As capacidades de processamento do moderno sistema MAGE estão aumentando, levando a necessidade de requisitos mais específicos do LPI (LIME JR, 2002).

As características demonstradas nas equações matemáticas acima, podem provar onde as mudanças devem ser realizadas nos sistemas de radar para que sua probabilidade de interceptação seja diminuída e ele seja considerado um sistema de radar LPI, ao passo que são os sistemas MAGE aqueles comumente usados a fim de interceptação. Porém a ciência é uma arte dinâmica e contínua, ela avança com o surgimento de novas necessidades encontradas, assim, o estado da arte neste trabalho vai mostrar quais são os desenvolvimentos encontrados na literatura tanto do lado dos sistemas de radar LPI, quanto do lado dos sistemas MAGE.

### **3. ESTADO DA ARTE**

Novos componentes avançados em algoritmos de processamento de sinais foram desenvolvidos pela tecnologia eletrônica moderna. Alguns desses componentes são aplicados em sistemas de radar com formas de onda complexas. Como resultado, o desempenho desses radares melhora significativamente. Os equipamentos de interceptação de sinal (ex:MAGE), os Receptores de Alerta Radar (RWR) e os MAR constituem as ameaças mais importantes à operação de um radar no campo de batalha. Conseqüentemente, os radares, na busca por se modernizar, precisam ter uma menor probabilidade de interceptação a fim de se esconder para sobreviver a um ataque inimigo (JARPA, 2002).

Os radares LPI são especialmente projetados para se opor a equipamentos que visam identificar as características do sistema e determinar a localização do emissor da onda, na tentativa de identificar as características do sistema e localização do emissor da onda. Os receptores do sistema MAGE podem detectar facilmente a alta potência de pico transmitida por radares pulsados convencionais (KONOPKO, 2007).

O uso de modulações CW (onda contínua) e a capacidade de gerenciar a transmissão do nível da potência, limitando a emissão à potência mínima necessária para detectar alvos típicos, no alcance necessário, torna os sinais de radar LPI muito menos detectáveis (LIME JR, 2002).

Porém, ao mesmo tempo que os radares se desenvolvem tecnologicamente e aumentam sua complexidade, os interceptadores também buscam essa evolução para que não se tornem ultrapassados e percam sua função. Por isso, será apresentado nesse capítulo o que está sendo realizado de estudo nesse quesito, tanto em relação aos radares, quanto em relação aos interceptadores. Os subtópicos serão divididos nomeados pelo título de cada estudo desenvolvido e julgado relevante nesse estudo.

#### **3.1. Análise de sinais de radar de baixa probabilidade de interceptação (LPI) usando processamento cicloestacionário**

Em Lime Jr (2002), o autor apresenta sua dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas pela Escola de Pós-graduação Naval da Califórnia. O



objetivo da pesquisa foi implementar em MATLAB® algoritmos cicloestacionários e analisar o processamento de sinais LPI de um sistema MAGE , utilizando esses algoritmos.

A primeira etapa do estudo consistiu em gerar os sinais LPI de forma padronizada. O código utilizado foi denominado "LPI Signal Generator", desenvolvido por Fernando Taboada, que obteve contribuições do autor desta tese para seu desenvolvimento. As modulações geradas foram:

- BPSK<sup>2</sup> – em português, Chaveamento de Mudança de Fase Binária;
- FMCW – em português, Onda Contínua Modulada em Frequência;
- Códigos Polifásicos (P1, P2, P3 P4 e Códigos Frank<sup>3</sup>);
- Códigos Costas<sup>4</sup> (Salto de Frequência – FH);
- FSK/PSK (Modulação por Chaveamento de Fase e Modulação por Chaveamento de Frequência combinadas) com uma distribuição de frequência Costas; e
- FSK/PSK com uma distribuição de frequência de destino correspondente.

Uma vez que a matriz de teste de sinal foi concluída, foram realizadas simulações para verificar a implementação de cada algoritmo em MATLAB® e os resultados foram comparados com outras técnicas de processamento de sinal do receptor. Nesta dissertação, tanto a frequência quanto a suavização do tempo são usadas para analisar várias modulações de radar LPI e avaliar a medição dos parâmetros de modulação.

A análise do sinal consistiu em uma descrição teórica breve de cada sinal, e em uma ilustração das propriedades espectrais, usando gráficos. Métodos de suavização de tempo e de frequência foram usados e o método que apresentou a melhor visualização foi escolhido para extração de parâmetros. Os recursos extraídos dos sinais foram apresentados em tabelas comparando os resultados medidos com os dados já existentes dos parâmetros. A lista de sinais modulados e suas características pode ser vista na Tabela 1.

---

<sup>2</sup> Técnica de modulação em fase.

<sup>3</sup> Os códigos Frank pertencem à família dos códigos polifásicos, códigos Chirp e Barker códigos, e foram usados com sucesso na implementação de baixa probabilidade de interceptação (LPI) de sinais de radar. São códigos utilizados para se obter modulação em fase do sinal. O código Frank é quadrafásico e seus pulsos são codificados em variações de 90°

<sup>4</sup> Matriz de modulação de salto em frequência.

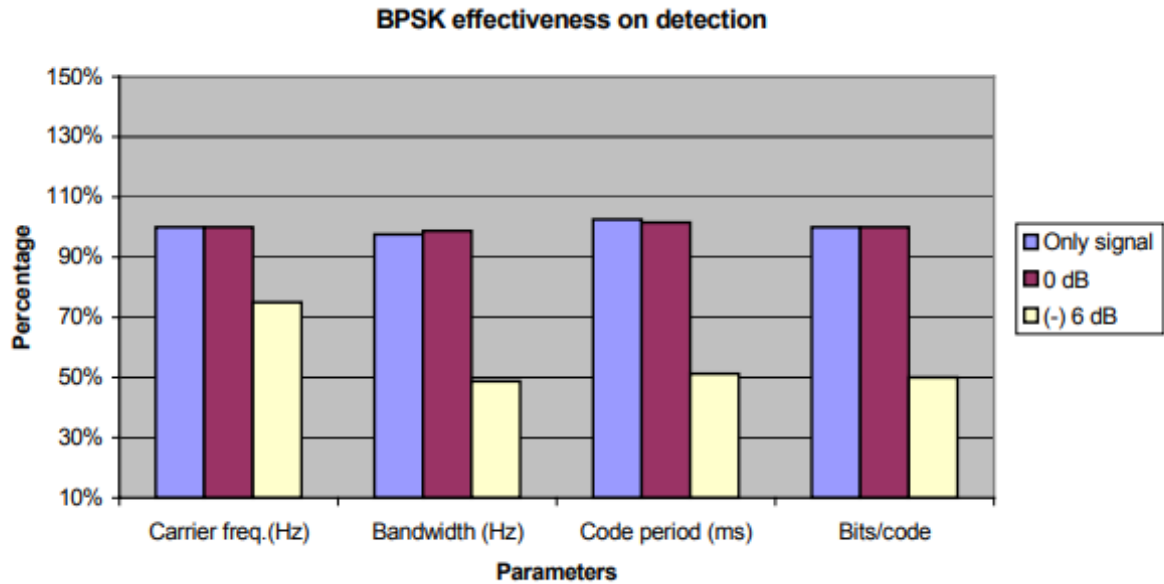
Tabela 1: Lista de exemplos de sinais analisados na dissertação.

NOME DO SINAL	SEQUÊNCIA TRANSPORTADORA OU DE SALTO (kHz)	BW (Hz)	NPBB/ CPP	NÚMERO DE BITS / FASES E MOD. PERÍODO	TIPO DE MOD.
B_1_7_7_1_s.mat	1	1000	1	7	BPSK
F_1_7_250_20_s.mat	1	250	X	20	FMCW
P1_1_7_4_1_s.mat	1	1000	1	16	P1
P2_1_7_16_1_s.mat	1	1000	1	16	P2
P3_1_7_16_1_s.mat	1	1000	1	16	P3
P4_1_7_16_1_s.mat	1	1000	1	16	P4
FR_1_7_16_1_s.mat	1	1000	1	16	FRANK
C_1_15_10_s.mat	4, 7, 1, 6, 5, 2, 3	-	10	1	COSTAS
FSK_PSK_C_1_15_5_1_s.mat	4, 7, 1, 6, 5, 2, 3	1000	1	5	FSK/PSK COSTAS
FSK_PSK_T_15_128_5_s.mat	-	4200	5	128 hops	FSK/PSK TARGET

Fonte: (LIME JR, 2002).

Os sinais BPSK analisados ajudaram na determinação de como fazer medições em sinais mais complexos, como FMCW, por exemplo. A Figura 3.1 mostra a eficácia de detecção do processamento cicloestacionário para todos os casos BPSK, se comparado com os valores originais.

Figura 3.1: Demonstração gráfica da eficácia de detecção para a modulação BPSK.



Fonte: (LIME JR, 2002).

Essa mesma análise foi realizada para todos tipos de modulação da Tabela 1, o FMCW, P1, P2, P3, P4, FRANK, COSTAS, FSK/PSK COSTAS e FSK/PSK TARGET.

Como conclusão do estudo, se teve que os métodos cicloestacionários foram muito eficazes para sinais modulados em fase (BPSK, Frank, P1, P2, P3, P4 e FSK/PSK Costas) e para os sinais FH (Costas) até as relações sinal-ruído de 0dB e -6dB. Os resultados do FMCW mostraram mais variação e erros nos resultados, comparando com as características originais dos sinais. O sinal FSK/PSK também era muito difícil de analisar, mas principalmente devido à sua complexidade e característica pseudo-aleatória. Mesmo assim, é possível verificar que os métodos cicloestacionários são muito eficazes para sinais com largura de banda maior, como é o caso dos radares LPI. A fim de melhorar o tempo de computação, para trabalhos futuros, é recomendada a implementação de um processamento paralelo fazendo o uso de clusters.

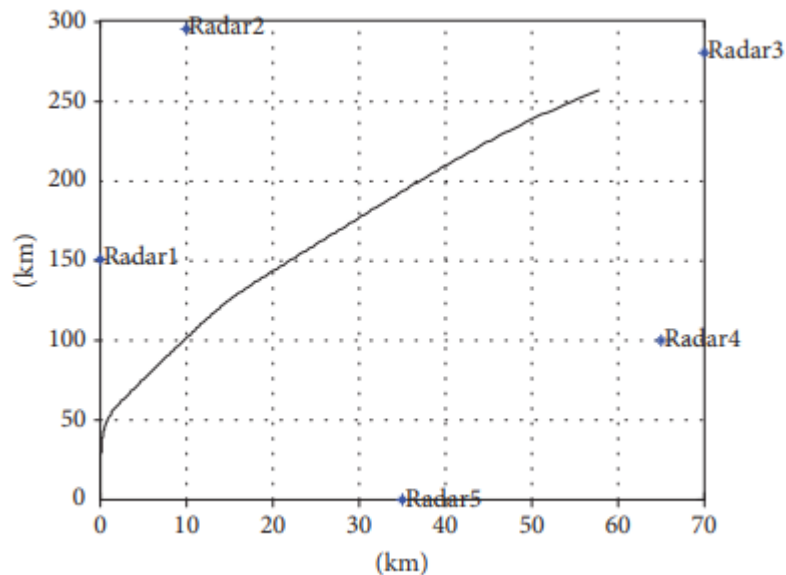
### 3.2. Método de seleção de radar com base em um filtro de informação aprimorado na rede de radar LPI

Em Zhang et al. (2018), os autores submeteram um artigo ao Hindawi International Journal of Antennas and Propagation<sup>5</sup>, em seu volume do ano de 2018, com 6 páginas. Esse artigo se concentrou na exposição de algoritmos de seleção de dados após a detecção do alvo, considerando Radares LPI dispostos em rede (*phased array*).

Um novo método de seleção de dados é apresentado, tendo como base o Modelo de Interação Mútua (IMM). A fim de obter a melhor capacidade de detecção. Esse novo método proposto neste artigo é baseado em interagir com a fusão de informações de vários métodos (IMM-IF).

As simulações de Monte Carlo<sup>6</sup> são realizadas para analisar o desempenho do método de escalonamento de recursos proposto. A Figura 3.2 mostra a trajetória do alvo com seus resultados de medição em 100 s. Todas as posições do radar são mostradas, e podem ser usadas para avaliar o desempenho do LPI quando se usam tais procedimentos.

Figura 3.2: Trajetória do alvo.



Fonte: (ZHANG *et al.*, 2018).

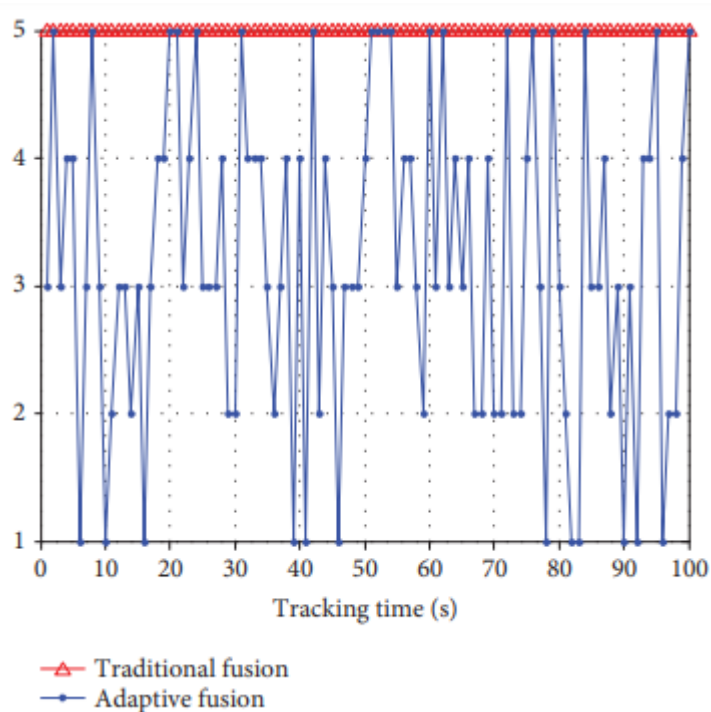
<sup>5</sup> Periódico científico que publica pesquisas sobre design, análise e aplicações de antenas, juntamente com estudos relacionados à propagação de ondas eletromagnéticas através do espaço, ar e outras mídias.

<sup>6</sup> Também conhecida como Método de Monte Carlo ou simulação de probabilidade múltipla, é uma técnica matemática usada para estimar os resultados possíveis de um evento incerto.

Para verificar a eficácia da abordagem proposta baseada na expressões matemáticas detalhadas apresentadas no artigo, simulações de computador usando o software MATLAB® são conduzidas para as comparações com os outros métodos.

A compilação de dados de medição é usada em todos os métodos nas simulações. Pode-se ver que os radares trabalham em turnos e o número de trabalho em cada turno é ilustrado na Figura 3.3, pode-se ver que o número turnos de trabalho é inferior a 5, na maioria das vezes.

Figura 3.3: Número de radares de trabalho.



Fonte: (ZHANG *et al.* 2018).

Comparado com os métodos tradicionais, que usam dados de todos os sensores para a compilação de informações, esse método reduz muito o número de sensores trabalhando. Como um resultado, o método proposto obtém maior êxito no quesito baixa interceptação, visto que não necessita do funcionamento de todos os transmissores concomitantemente, o que reduz o tempo de transmissão e consequentemente a energia irradiada.

Neste artigo, apresentamos um novo método de seleção de dados para uma rede de sensores com base no método aprimorado de filtragem de informações do IMM. Durante a

detecção do alvo, o modelo de relação é construído entre o recurso do equipamento e o desempenho de detecção. Em seguida, os radares são selecionados pelo ganho de informação previsto e os parâmetros importantes para compilação de dados são projetados de forma a obter melhor precisão. Os resultados da simulação mostram que o algoritmo proposto fornece ao sistema LPI um excelente desempenho na detecção de alvos.

### 3.3. *Anti-jamming* e radar LPI com tecnologia de espalhamento de espectro

Em Fu et al (2011), os autores submeteram o artigo à revista *Advanced Materials Research*<sup>7</sup>, volume 219-220, do ano de 2011 e ele está nas páginas 57-60 da revista. Neste artigo é proposto um método para aumentar as capacidades anti-bloqueio e baixa probabilidade de interceptação. No método proposto, o sinal emitido é codificado (código PN) no transmissor, por isso não é fácil de interceptar.

Os vários sinais de códigos PN não são fáceis de ser capturados por sensores inimigos, então, por isso, o radar se torna ainda mais seguro, proporcionando, ainda, a possibilidade de aumento da potência de transmissão (maior potência transmitida = maior distância de detecção) e na melhora da relação sinal-ruído no receptor.

Quanto ao receptor, é necessário a presença de uma série de filtros digitais combinados para identificar os códigos PN. A maior parte da energia dos sinais que chegam ao receptor é filtrada após os filtros passa-baixa, (melhora a capacidade *anti-jamming*), de forma que os sinais desejados seguem a sequência de processamento, enquanto os indesejados são descartados.

Os múltiplos códigos PN são transmitidos juntos e há interferência mútua entre eles, portanto, torna-se difícil capturar os sinais dos radares que se utilizam desse método. O autor questiona, então, por que vários códigos PN podem ser transmitidos juntos e sua interação não gera influência um ao outro durante a recepção do eco radar. Isso acontece devido à autocorrelação e correlação cruzada dos códigos, que torna possível separar os códigos PN no receptor através de filtros combinados, não deixando ocorrer essa interferência mútua no receptor do radar LPI.

---

<sup>7</sup> Revista suíça que endossa as últimas tendências do mundo acadêmico.

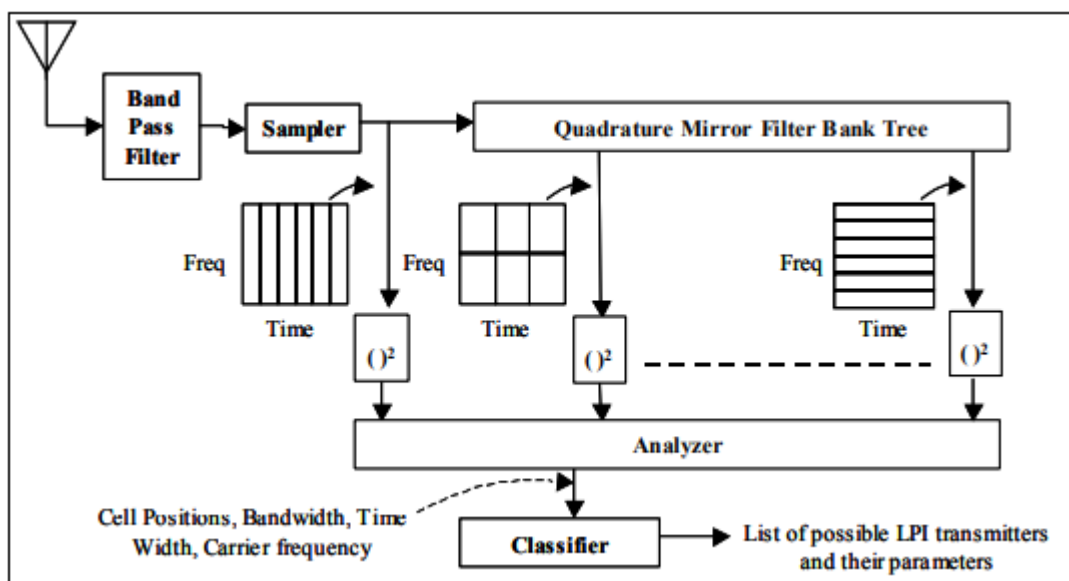
No método proposto, o espectro do sinal de emissão do radar é mais amplo, dessa maneira, diminui a relação entre potência média e potência de pico, reduzindo, proporcionalmente, a faixa dinâmica do receptor, de modo que facilita a recepção do sinal.

### 3.4. Quantificar as diferenças nas formas de onda de um radar de baixa probabilidade de interceptação usando filtragem de espelho de quadratura (QMFB)

Em Jarpa (2002), o autor apresenta sua dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Escola de Pós-graduação Naval da Califórnia. O objetivo da pesquisa foi desenvolver uma simulação de um método para decompor um sinal de radar LPI baseado no processamento *Quadrature Mirror Filter Bank* (QMFB) em árvore e ortogonal para decompor a forma de onda de chegada no radar de interceptação.

Informações detalhadas sobre os sinais LPI foram então extraídas e processadas. O receptor para essa abordagem é mostrado na Figura 3.4. Neste diagrama de blocos, uma forma de onda recebida é filtrada e amostrada. A árvore do QMFB é então alimentada com a sequência digital, onde é então decomposta e as matrizes são geradas em cada camada. Os resultados são, então, elevados ao quadrado para produzir coeficientes que representam a energia em cada parte da forma de onda.

Figura 3.4: Diagrama de bloco do receptor LPI.



Fonte: (JARPA, 2002).

A primeira fase desta dissertação envolveu fazer uma pesquisa bibliográfica para chegar a uma boa compreensão sobre o tema de sinais do radar LPI, QMFB, processamento de sinal e Codificação MATLAB®. Isso foi descoberto por meio de diferentes livros, artigos e cursos de bases de dados como IEEE.

A próxima fase foi definir o processamento de sinal QMFB e desenvolver um novo programa para examinar os sinais de radar LPI. Com o novo programa em MATLAB®, sinais de teste foram usados para verificar se o sinal funcionava corretamente. Em seguida, uma lista de diferentes sinais LPI foi analisada com o programa, o qual exibiu gráficos de saída de tempo-frequência, a partir dos quais é possível extrair os diferentes parâmetros dos sinais LPI.

Uma lista de sinais de radar LPI diferentes e bem conhecidos foi processada com a árvore QMFB e as camadas de saída foram exibidas e analisadas em um procedimento de extração de dados para estimar os parâmetros do sinal, como largura de banda, frequência da portadora e duração do pulso.

A arquitetura geral do QMFB, conforme mostrado na Figura 3.4 mostrou-se uma boa alternativa para sistema MAGE, particularmente para detectar LPI. A extração de características fornece uma boa estimativa de posição do radar LPI, frequência da portadora e tempo de duração dos sinais, embora sejam apenas estimativas. A árvore QMFB é demonstrada como uma boa ferramenta para processar qualquer radar LPI básico sinal e pode ser usado em qualquer outro tipo de sinal para fazer a extração de recursos e que forma obter uma melhor compreensão das características de um sinal.

Como recomendação, o autor conclui que a árvore QMFB deve ser aprimorada para obter uma melhor resolução na detecção de fases do sinal interceptado, sendo possível também combinar alguns dos conceitos apresentados aqui com outros métodos, visando melhorias.

Por fim, classifica o MATLAB® como o uma ferramenta muito útil para desenvolver os códigos para trabalhar com a estrutura em árvore do QMFB, mas ressalta o tempo considerável para processar os sinais, principalmente quando os sinais carregados são longos. Consequentemente, alguns esforços devem ser focados no desenvolvimento de um código mais eficiente que leve menos tempo para fazer o processamento.



### 3.5. Algoritmo de detecção de sinais de radar LPI

Em Konopko (2007), o autor submeteu o artigo ao evento Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)<sup>8</sup>, do ano de 2007 e ele está na página 186 do evento.

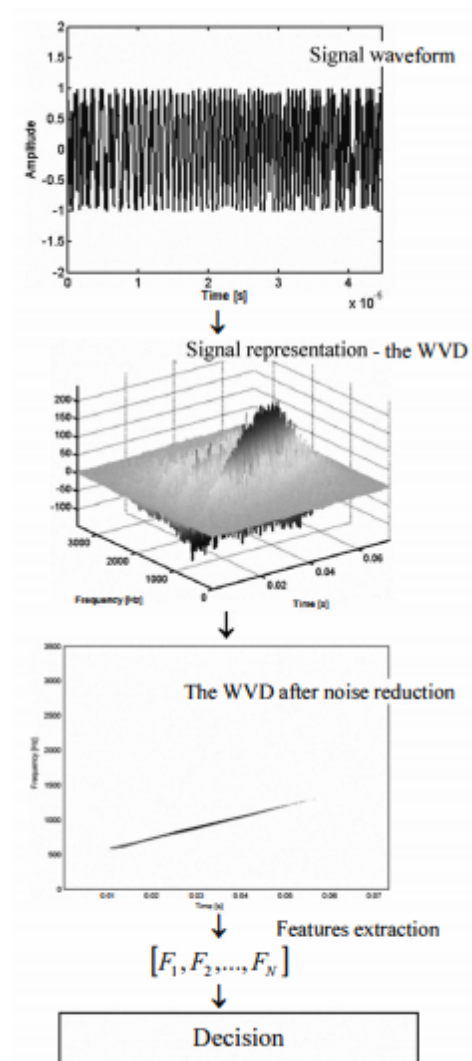
No artigo, o autor expressa que os radares LPI estão sob estudo ativo no últimos anos e mostra que, contrário aos sinais de radares comuns, os radares LPI normalmente usam baixa potência, banda larga e sinais de onda contínua (CW) que são difíceis de interceptar e identificar.

Mostra também que o sucesso de um radar LPI é medido por quão difícil é para o receptor detectar a emissão dos parâmetros do radar. Então conclui que um algoritmo de detecção de sinal de radar LPI para ser bem sucedido, requer não apenas a seleção adequada de um sinal, mas também procedimentos de redução de ruído e um vetor de extração de características do sinal adequado para subsidiar uma boa decisão final. As quatro etapas necessárias para um procedimento de reconhecimento de sinal de radar são mostradas na Figura 3.5, são elas, a detecção do sinal, representação do sinal, redução de ruído e extração de parâmetros.

---

<sup>8</sup> Conferência sobre processamento de sinais organizada pela IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers* - organização técnica-profissional para o avanço da tecnologia).

Figura 3.5: Procedimento de detecção de sinal de radar.



Fonte: (KONOPKO, 2007).

Para análise da eficiência dos métodos apresentados foi feita uma modulação triangular em frequência de onda contínua (FMCW) e chaveamento de mudança de fase binária (BPSK).

As características do sinal de código FMCW são:

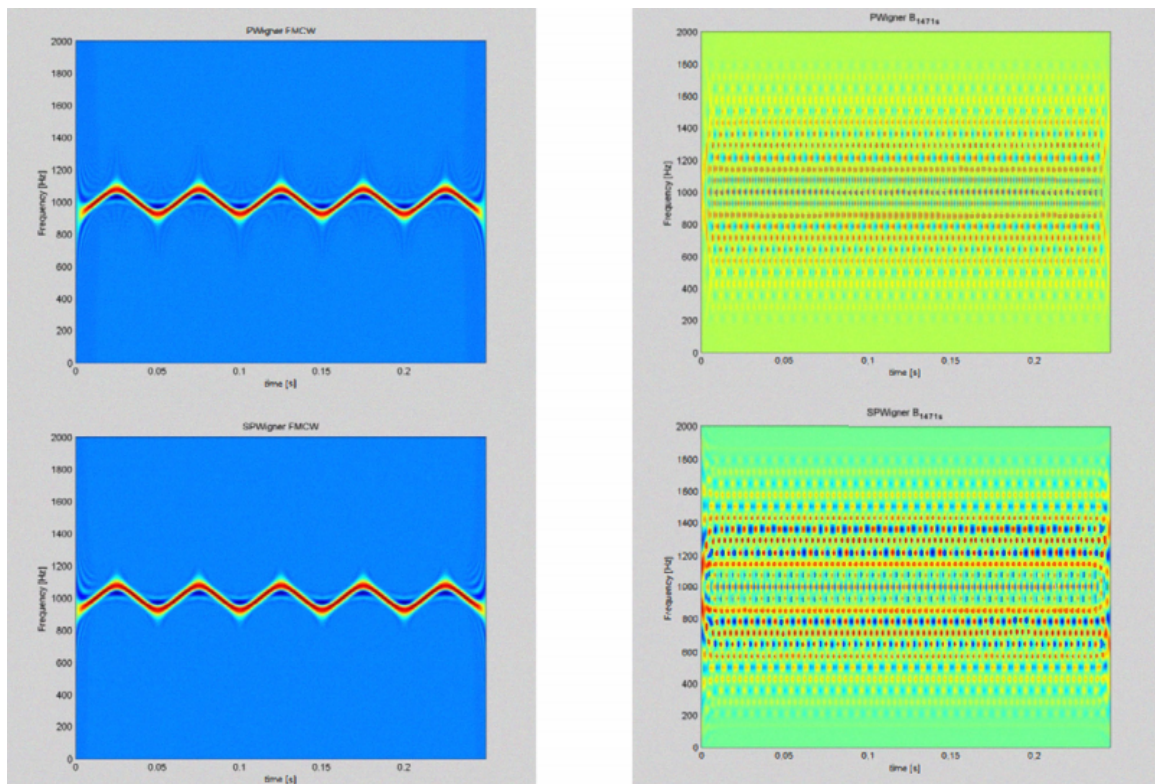
- Frequência da portadora - 1000 Hz;
- Frequência de amostragem - 4000 Hz;
- Largura de banda de modulação - 250 Hz; e
- Período de modulação - 20 ms.

E as características do sinal de código BPSK são:

- Frequência da portadora - 1000 Hz;
- Frequência de amostragem - 4000 Hz;
- Número de bits do código Barker - 7; e
- Número de períodos de portadora por bit do código Barker - 1.

Essas características estão representadas na Figura 3.6.

Figura 3.6: Características do sinal nas modulações FMCW e BPSK.



Fonte: (KONOPKO, 2007).

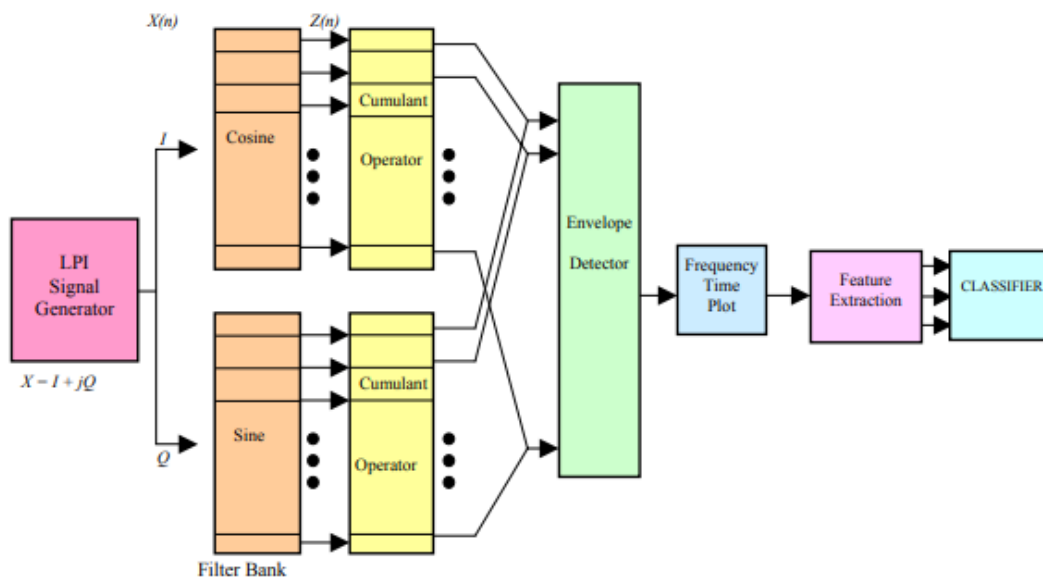
Assim, neste artigo, um algoritmo de detecção do sinal de radar LPI foi desenvolvido e é baseado em uma representação bidimensional e principalmente redução de ruído. Os resultados da simulação revelam um bom desempenho do algoritmo em condições de valores relativamente pequenos de acordo com a relação sinal-ruído.

### 3.6. Classificação não-linear autônoma de modulações de sinal de radar LPI

Em Taboada (2002), o autor apresenta sua dissertação para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Engenharia pela Escola de Pós-graduação Naval da Califórnia. O objetivo da pesquisa foi documentar o uso de matrizes de filtros paralelos e Estatísticas de Ordem Superior (HOS) como uma abordagem técnica eficaz para detectar e classificar sinais de radar LPI onde a forma de onda do sinal é desconhecida.

O processamento HOS é uma abordagem de tempo-frequência para a detecção de sinais LPI (Figura 3.7). O objetivo das matrizes de filtros paralelos é separar o sinal de entrada em pequenas bandas de frequência, fornecendo uma descrição completa do sinal desconhecido.

Figura 3.7: Visão geral da filtragem paralela e HOS.



Fonte: (TABOADA, 2002).

Então, cada sinal de sub-banda é tratado individualmente por um estimador de terceira ordem, a fim de suprimir o ruído e preservar a fase do sinal durante o processo de correlação. Finalmente, a matriz resultante é inserida em um módulo de extração de características cujo resultado das características do sinal são usadas para determinar que tipo de modulação foi detectada.

Então, o objetivo da pesquisa foi projetar um esquema de processador de sinais capaz de detectar e classificar sinais de radar LPI com base no uso combinado de matrizes de filtros paralelos e HOS.

De acordo com o autor, a eficiência do método proposto varia com a modulação utilizada no sinal do radar LPI. Este processamento de sinal demonstrou alta eficiência na detecção e identificação todos os parâmetros para sinais BPSK e FMCW. A detecção e identificação do sinal codificado polifásico são satisfatórias, embora alguns dos parâmetros não possam ser completamente distinguidos. Este método também exibe uma boa discriminação entre os diferentes sinais codificados como Frank, P1, P2, P3 e P4.

É também afirmado na dissertação que esta técnica por si só não é suficiente para processar a multiplicidade de formas de onda LPI disponíveis, mas o uso combinado desta técnica com outras poderão fornecer a resposta esperada.

## 4. ANÁLISES E DISCUSSÃO

A fim de contribuir com o levantamento de dados práticos sobre aplicações, evoluções e desenvolvimento dos sistemas de radar LPI nos últimos tempos, foi realizada uma pesquisa em plataformas online de busca de trabalhos acadêmicos em suas mais variadas formas, sendo eles artigos, monografias, dissertações e teses.

Foram analisados cerca de 30 trabalhos dentre as categorias citadas, 6 deles foram considerados pelo autor desse trabalho como os mais impactantes e responsáveis pelas maiores evoluções nesse contexto. A maior parte dos trabalhos de alto impacto vem da Escola de Pós-graduação Naval da Califórnia e o que pode ser visto é que vários autores se tornaram mestres no assunto, desenvolvendo suas dissertações nessa escola.

O primeiro grande ponto que pôde ser verificado é que todos os estudos mostrados nesse trabalho se correlacionam de alguma maneira no método desenvolvido e que todos os métodos dizem respeito a aprimoramentos de sistemas MAGE, que evoluem em contrapartida do desenvolvimento de sistemas de radar LPI. Isso pode acontecer devido a não exposição dos desenvolvimentos realizados nos radares, para que não se tornem alvos fáceis, visto que seu papel é dificultar sua interceptação.

As pesquisas variam entre decifrar as características dos sinais fazendo o uso de imagens, frequência, moduladores de sinal, algoritmos desenvolvidos em MATLAB® , filtros de informação e códigos PN. Em alguns estudos, além do método proposto, o autor ainda intenciona que haja a interação do mesmo com outros métodos já conhecidos para que se obtenha melhor resultado de verificação de dados. O programa MATLAB® é usado em praticamente todos os trabalhos para análise de recursos, sendo diversificado, apenas, o algoritmo utilizado.

Outro ponto importante que foi visto é que mesmo usando vários métodos combinados e fragmentando os dados dos sinais de radar, ainda assim é difícil decifrar e correlacionar os recursos obtidos pelos interceptadores. Isso leva a concluir que ainda que se tenha evoluções tecnológicas em ambos os sistemas, os sistemas de radar LPI ainda estão um passo ou mais à frente dos sistemas MAGE.

Mesmo que não se tenha encontrado trabalhos que dizem respeito à evolução apenas dos radares LPI, pode-se concluir que os recursos utilizados por estes ainda são muito robustos no papel que pretendem desempenhar.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste trabalho, foi realizada um levantamento bibliográfico sobre o desenvolvimento de tecnologias em radares LPI e pôde-se concluir que se existem publicações que dizem respeito ao tema, são de difícil acesso pois, muito provavelmente, são publicações de caráter secreto. O que foi visto foram estudos do lado oposto, que se concentram em desenvolver métodos para decifrar os sinais dos radares LPI e fazer com que eles possam ser minimamente interceptáveis a ponto de encontrarem do meio que o utiliza.

Este trabalho permite estabelecer um ponto de partida no desenvolvimento de trabalhos referentes ao desenvolvimento de técnicas para melhorar as ações dos radares LPI. É possível, também, em um estudo posterior, considerar a análise de cenários completos, levando em conta ao mesmo tempo o comportamento do sinal radar LPI, sinais de radares pulsados convencionais e outros sinais de radares comuns, com o comportamento de equipamentos de interceptação.



## REFERÊNCIAS

BURGOS-GARCIA, M. Radar sensor using low probability of interception SS-FH signals. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, v. 15, n. 4, p. 23-28, 2000.

CARVALHO, Cibele Figueira; CHAMMAS, Maria Cristina; CERRI, Giovanni Guido. Princípios físicos do Doppler em ultra-sonografia. **Ciência Rural**, v. 38, n. 3, p. 872-879, 2008. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782008000300047&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782008000300047&script=sci_arttext&tlng=pt). Acesso em: 7 mar. 2021.

DA SILVA, Maximiliano Barbosa. Radar de baixa probabilidade de interceptação. **Revista Passadiço**, Niterói, RJ, ano 32, n. 36, p. 12-15, 2019. Disponível em: [https://www.marinha.mil.br/caaml/sites/www.marinha.mil.br.caaml/files/flipping\\_book/revista\\_passadio\\_2019/files/downloads/Passadiço\\_Digital.pdf](https://www.marinha.mil.br/caaml/sites/www.marinha.mil.br.caaml/files/flipping_book/revista_passadio_2019/files/downloads/Passadiço_Digital.pdf). Acesso em: 13 abr. 2021.

DENK, Aytug. **Detection and jamming low probability of intercept (LPI) radars**. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2006. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA456960.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2021.

DE FIGUEIREDO, Rafael Serra. **Abordagens para análise e extração de características de radares LPI**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www02.smt.ufrj.br/~eduardo/teses/rafael-serra-mestrado.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

FU, Lian Qing *et al.* Anti-jamming and LPI radar with spread spectrum technology. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications Ltd, 2011. p. 57-60.

INSTITUTO DE PESQUISAS DA MARINHA. **Grupo de Sistemas de Guerra Eletrônica**. 2021. Disponível em: [https://www.marinha.mil.br/ipqm/grupo\\_guerra\\_eletronica](https://www.marinha.mil.br/ipqm/grupo_guerra_eletronica). Acesso em: 04 fev. 2021.

JARPA, Pedro. **Quantifying the differences in low probability of intercept radar waveforms using quadrature mirror filtering**. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2002. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA407033.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2021.

KISHORE, Thokala Ravi; RAO, K. Deergha. Automatic intrapulse modulation classification of advanced LPI radar waveforms. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 53, n. 2, p. 901-914, 2017.

KONG, Seung-Hyun *et al.* Automatic LPI radar waveform recognition using CNN. **Ieee Access**, v. 6, p. 4207-4219, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8244276>. Acesso em: 25 fev. 2021.

KONOPKO, Krzysztof. A detection algorithm of LPI radar signals. In: **Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications SPA 2007**. IEEE, 2007. p. 103-108.

LIME JR, Antonio F. **Analysis of low probability of intercept (LPI) radar signals using cyclostationary processing**. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2002. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA407011.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2021.

MA, Jie *et al.* Robust radar waveform recognition algorithm based on random projections and sparse classification. **IET Radar, Sonar & Navigation**, v. 8, n. 4, p. 290-296, 2013. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rsn.2013.0088>. Acesso em: 13 fev 2021.

MA, Zhiyuan *et al.* LPI radar waveform recognition based on features from multiple images. **Sensors**, v. 20, n. 2, p. 526, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/2/526>. Acesso em: 13 fev. 2021.

NETO, R. B. G. Guerra cibernética / guerra eletrônica – conceitos, desafios e espaços de interação. **Revista Política Hoje**, v. 26, n. 1, pp. 201-217, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/9180>. Acesso em: 04 mar. 2021.

POTTER, Lee C. *et al.* Sparsity and compressed sensing in radar imaging. **Proceedings of the IEEE**, v. 98, n. 6, p. 1006-1020, 2010.

RICHTER, Renan Miranda; PEREIRA, Thiago de Souza Mansur. Análise de desempenho de radares LPI (Low Probability of Intercept) frente a sensores passivos aeroembarcados de guerra eletrônica. **Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa**, n. 21, p. 33-39, 2020. Disponível em: <https://revistaeletronica.fab.mil.br/index.php/spectrum/article/view/74/68>. Acesso em: 18 fev. 2021.

SCHLEHER, D. C. LPI radar: fact or fiction. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, v. 21, n. 5, p. 3-6, 2006.

SCHRICK, Gerd; WILEY, Richard G. Interception of LPI radar signals. In: **IEEE international conference on radar**. IEEE, 1990. p. 108-111.

SISTEMAS DE ARMAS. **ASSINATURA ELETROMAGNÉTICA**. 2021. Disponível em: <http://sistemasdearmas.com.br/ge/furt07emcon.html>. Acesso em: 10 fev. 2021.

SKOLNIK, Merrill Ivan *et al.* **Introduction to radar systems**. New York: McGraw-hill, 1962. Disponível em: [https://helitavia.com/skolnik/Skolnik\\_chapter\\_1.pdf](https://helitavia.com/skolnik/Skolnik_chapter_1.pdf). Acesso em: 20 jan. 2021.

TABOADA, Fernando L. **Detection and classification of low probability of intercept radar signals using parallel filter arrays and higher order statistics**. NAVAL

POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2002. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA407164.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021.

VANHOY, Garrett; SCHUCKER, Thomas; BOSE, Tamal. Classification of LPI radar signals using spectral correlation and support vector machines. **Analog integrated circuits and signal processing**, v. 91, n. 2, p. 305-313, 2017.

ZHANG, Zhenkai *et al.* Radar Selection Method Based on an Improved Information Filter in the LPI Radar Network. **International Journal of Antennas and Propagation**, v. 2018, 2018. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2018/6104849/>. Acesso em: 06 mar. 2021.

ZHANG, Ming; LIU, Lutao; DIAO, Ming. LPI radar waveform recognition based on time-frequency distribution. **Sensors**, v. 16, n. 10, p. 1682, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/10/1682/htm>. Acesso em: 08 mar. 2021.

