

A IMPORTÂNCIA DA ELETRICAL INTELLIGENCE (ELINT) NA ESTIMAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DE PULSOS ELETROMAGNÉTICOS DETECTADOS POR MEDIDAS DE APOIO A GUERRA ELETRÔNICA (MAGE) COM RECEPTOR DIGITAL NA MARINHA DO BRASIL

Edgard Braz Alves
e6garbraz@icloud.com
MB

José Victor de Pina Correia
jvctor97@gmail.com
MB

Igor Pinheiro de Araújo Costa
costa_igor@id.uff.br
UFF

Marcos dos Santos
marcosdossantos_doutorado_uff@yahoo.com.br
IME

Arthur Pinheiro de Araújo Costa
thurcos91@gmail.com
MB

Resumo: A prontidão para a guerra é necessária a toda grande armada e depende intrinsecamente da evolução tecnológica dos seus equipamentos de Guerra Eletrônica (GE), dentre os quais, as Medidas de Apoio a Guerra Eletrônica (MAGE). Com os avanços tecnológicos de navios e mísseis que utilizam sistemas de navegação radar Low Probability of Detection (LPD) e Low Probability of Interception (LPI), através de Pulse Compression Techniques (PCT), faz-se indubitável a necessidade de MAGE modernas, com a utilização de equipamentos de ELINT aliados a Digital Receivers (DRX), a fim de melhorar o desempenho e estimação dos sinais eletromagnéticos em um ambiente com baixa Signal Noise Ratio (SNR) e possibilitar melhores análises dos parâmetros intrapulso dos sinais radar recebidos. Diante disso, o ponto de inflexão tecnológica, que pode garantir o domínio do cenário de GE em um embate, é a utilização de algoritmos modernos de ELINT. Nesse trabalho, será analisada a aplicação dos

algoritmos de Short Time Fourier Transform (STFT) e Função de Autocorrelação aplicados em MAGE com Receptor Digital, e serão apresentados os resultados dessa aplicação e as incorrências desses resultados diante do desenvolvimento do MAGE MK3, pelo Instituto de Pesquisas da Marinha, que será instalado nas Fragatas Classe Tamandaré.

Palavras Chave: ELINT - MAGE MK3 - PCT - Fragatas Tamandaré - Marinha do Brasil

1. INTRODUÇÃO

A evolução da guerra moderna torna imperativa a necessidade de desenvolvimento tecnológico de um país. A Guerra Eletrônica (GE) se tornou o principal ponto de inflexão no resultado de um combate e, como fator crucial para o eficaz emprego da GE, começaram a ser utilizadas técnicas de Inteligência Eletrônica (ELINT – Electronic intelligence), tanto em apoio ao eficaz emprego da GE por uma força aliada, quanto para reduzir esse emprego por uma força inimiga.

Porquanto que a GE tenha sido empregada pela primeira vez na Batalha de Tsushima (Guerra Russo-Japonesa, 1904-1905), conforme Mardia (1989), equipamentos de ELINT foram empregados, de acordo com Alves (2020), em larga escala, durante a 2ª Guerra Mundial (1939-1945), durante a qual ocorreu a primeira missão ELINT pelo dirigível alemão Graf Zeppelin, que buscava determinar a posição dos radares ingleses que compunham a rede de radares Chain Home. Posteriormente, segundo Bernard (2009), o ELINT foi empregado pelos Estados Unidos, em 1943, quando realizou o mapeamento eletrônico dos radares japoneses sobre as Ilhas Kiska e Ilhas Aleutas, também sendo empregado na orientação do bloqueio dos radares terrestres alemães na Europa, em 1944, e em diversas outras situações, contra radares aerotransportados, navais e equipamentos de submarinos japoneses.

A ELINT pode ser utilizada operacional e estrategicamente, conforme Bernard (2009) e Alves (2020): Operacionalmente a ELINT estuda as características de um sinal eletromagnético em tempo real, ao longo de uma operação, analisando e determinando as características das emissões eletromagnéticas no ambiente, objetivando o auxílio na identificação da origem e da intenção do emissor; enquanto estrategicamente, a ELINT trabalha no auxílio da confecção de uma biblioteca de informações de radares, contendo as emissões detectadas por um MAGE, e permitindo, nesse caso, uma análise posterior dessas emissões em um período maior de tempo, a fim de extrair mais informações e conhecimentos oriundos desses sinais, as quais não seriam possíveis no momento de recepção desses.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Com o contínuo avanço da tecnologia aplicada a GE, com o incremento de equipamentos Low Probability of Interception (LPI), Low Probability of Detection (LPD), e radares de onda contínua modulados em frequência (FM-CW), a detecção, discriminação e correta identificação dos modernos equipamentos de GE se torna impraticável sem o uso de um sistema moderno de ELINT aplicado à GE evidenciando a imprescindível importância desse sistema.

Um caso que discrimina a importância do ELINT foi o documentado pelo South China Morning Post, em um relato um ex-oficial chinês Wang Xiangsui, citado por Steven Stashwick, na revista The Diplomat:

“...vários dias depois [após as manobras do porta-aviões], lançamos o DF-21 e o DF-26, e os mísseis atingiram um navio que navegava ao sul das Ilhas Paracel. Pouco depois disso, um adido militar americano em Genebra reclamou [para nós] e disse que as consequências seriam graves se os mísseis atingissem um porta-aviões americano. Eles veem isso como uma demonstração de força. Mas estamos fazendo isso por causa de sua provocação.” (STASHWICK, 2020, tradução nossa)

Esse caso ocorreu em 26 de agosto de 2020 e de acordo com Stashwick (2020), os lançamentos desses mísseis foram compreendidos como uma mensagem aos Estados Unidos por ter efetuado um sobrevoo da mesma área no qual os mísseis foram lançados no dia anterior.

Dos mísseis lançados o DF-21 é um Míssil Balístico Anti-Navio (Anti-Ship Ballistic Missile - ASBM), que, citado por Stashwick (2020), o Departamento de Defesa dos Estados Unidos acredita já ter entrado em sua fase operacional inicial desde 2010.

Segundo Chandrashekar (2011), o sistema de navegação utilizado pelos ASBM, tal qual o DF-21, são sistemas de navegação radar Over-The-Horizon (OTH) que são sistemas radares FM-CW, que empregam tecnologia LPD os tornando difíceis de serem localizados por um sistema MAGE desprovido de ELINT. Tais características fazem dos mísseis DF-21 uma ameaça concreta a meios navais que não contenham uma ELINT moderna capaz de apoiar o MAGE na estimação e na reação frente a essa arma.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os mísseis, de acordo com Chernij (2007), foram introduzidos nos cenários de guerra a partir da 2ª Guerra Mundial, e desde então, diversos países começaram a desenvolver mísseis mais potentes e tecnológicos tais quais os Tomahawks americanos, os Scuds russos, os Exocets franceses, e os ASBM, tal qual o DF-21 da China. Esse armamento se distingue de outros por sua capacidade de navegar independentemente acompanhando um alvo até por fim atingi-lo.

Conforme a afirmação do engenheiro Jacques Waldmann, em Chernij (2007), professor do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), citado por Chernij: “O que torna os mísseis diferentes de meros foguetes é sua capacidade de aliar um sistema de propulsão (o foguete ou a turbina) a sistemas que lhes permitem corrigir sua rota”. Os sistemas de correção de rota mais comumente utilizados pelos mísseis, são os sistemas de localização e acompanhamento de alvo via radar.

Segundo Chernij (2007) e Alves (2020), os sistemas de defesa, contra os mísseis, tiveram de acompanhar a evolução tecnológica desses para fazer frente a essas ameaças. Como os mísseis apresentam uma enorme precisão e chance de atingir os seus alvos, o meio de defesa mais eficaz desenvolvido consiste em técnicas de GE tais quais o MAE que recebe do equipamento MAGE informações sobre a ameaça, suas características e um indicativo da técnica de contramedida a ser empregada. Essa técnica de defesa (MAE) confunde o sistema de navegação do míssil, alterando a sua rota a fim de que este erre o alvo.

Para uma melhor noção da ameaça, proporcionada pelos sistemas de localização e acompanhamento de alvo radar, será abordado os tipos de radares modernos que mais ameaçam os navios por serem de difícil detecção e estimação: Os radares LPI e os radares LPD. E será apresentado um MAGE de alta performance, que contém DRX, essencial para aplicar as técnicas de ELINT.

Posteriormente, serão apresentados os resultados de um programa que simula a criação de pulsos codificados em modulações diversas, adicionados a ruído branco e, o uso da autocorrelação e da STFT (ferramentas de ELINT aplicadas) para a extração dos parâmetros dos sinais confeccionados. Serão utilizadas nesse programa as seguintes modulações e codificações: Modulação Linear codificada em Frequência (LFM); código Barker 2, 3, 7, 11 e 13; código Frank 16 e Frank 64.

3.1 Tipos de Radares

3.1.1 Radares *Low Probability of Intercept* (LPI)

Os radares LPI, conforme Oliveira (2007), buscam emitir sinais de difícil interceptação por um MAGE adversário buscando o uso seguro do espectro eletromagnético, o que só é possível por conta da distinção entre o funcionamento do radar e do MAGE.

Segundo Oliveira (2007), enquanto o MAGE intercepta um sinal em função da potência de pico desse, em uma SNR, o radar tem o seu funcionamento determinado pela potência média transmitida (total de energia transmitida/tempo de transmissão). Tal diferença de funcionamento possibilitou a criação dos radares LPI que, através de diversas técnicas, diminuem a potência de pico dos seus sinais enquanto mantém a potência média necessária para a operação do radar.

Existem quatro técnicas utilizadas pelos radares LPI, em Oliveira (2007), para reduzir o pico de potência dos seus sinais e manter a potência média desses: Gerenciamento de Potência; Compressão de pulsos (PCT); redução de lóbulos secundários; e aumento da largura de banda do sinal. Dessas quatro técnicas a que tem sido mais utilizada em radares de navegação de armamentos é a PCT.

3.1.1.1 Técnica de Compressão de Pulsos (PCT)

A PCT, conforme Oliveira (2007), utiliza a capacidade do radar de integrar diversos sinais eletromagnéticos recebidos em um longo período de tempo, diminuindo assim a potência de pico emitida por cada sinal isoladamente.

A compressão de pulsos diminui consideravelmente a possibilidade de interceptação das emissões de um radar por um MAGE, por conta de o MAGE não dispor, ou ter uma capacidade muito pequena, de integrar sinais de longos intervalos de tempo, tratando cada pulso individualmente (OLIVEIRA, 2007).

Conforme Oliveira (2007), os radares que utilizam compressão de pulsos, portanto, dividem a potência média necessária para a sua operação em diversos pulsos emitidos em intervalos diferentes de tempo. Tal capacidade permite também uma diversidade de variações no sinal emitido.

A diferença de detecção, por um MAGE de baixa performance (60dBmi) e desprovido de ELINT, de um radar que utiliza a técnica de compressão de pulsos e de um radar pulsado é apresentada na figura 1 abaixo:

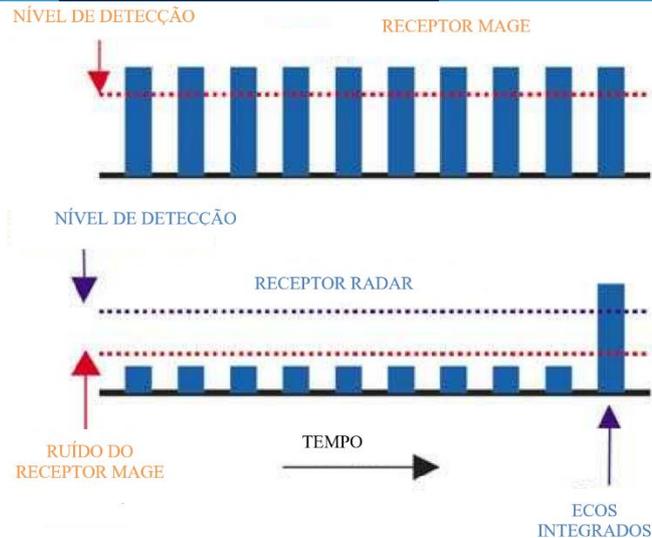


Figura 1: Diferença da detecção, por MAGE de baixa performance (60dBmi) e desprovido de ELINT, de um radar pulsado (figura superior) e de um radar com compressão de pulsos (figura inferior).

Fonte: (DE OLIVEIRA E DIAS, 2007)

Em Said (2013), pulsos curtos e com grande pico de potência, emitidos por radares, oferecem uma boa resolução dos alvos, mas são facilmente detectáveis por MAGE. Enquanto pulsos mais largos e com picos menores de potência são mais difíceis de serem detectados por MAGE, mas tem uma menor resolução dos seus alvos.

Os radares pulsados LPI, para diminuir a amplitude de seus pulsos, começaram a utilizar técnicas de compressão de pulsos (PCT, Pulse Compression Technique), porém, para não diminuir a capacidade de detecção de seus alvos, os radares pulsados LPI começaram a utilizar codificações que permitissem a PCT sem comprometer o alcance de detecção desse radar (SAID, 2013).

Conforme Said (2013), uma das formas de codificação mais simples é a modulação de uma forma de onda conhecida pelo receptor, no qual é feita uma operação de correlação cruzada, em que uma medida de similaridade entre dois sinais é feita através de um atraso aplicado a um deles. Através disso, a forma da onda longa, comprimida por PCT em uma onda curta e codificada, permite uma autocorrelação máxima, com defasagens próximas de zero, possibilitando a completa reconstrução dessa onda no receptor.

Diante disso, o objetivo de um bom PCT é a escolha da codificação ideal que permita uma curta função de autocorrelação.

Dentre as PCTs existentes o programa de simulação de pulsos desse trabalho analisa LFM, o código Barker e o código Frank.

3.1.2 Radares *Low Probability of Detection* (LPD)

Os radares LPD, em Wang (2008), compõem um tipo único de radar que, apesar de estar abrangido dentre o conjunto de radares LPI, se distingue suficientemente dos outros tipos de radares LPI que dividiu os radares LPI em dois tipos: os radares Low Probability of Exploitation (LPE), que compõem todos os tipos de LPI já conhecidos; e os radares LPD, que utilizam uma técnica avançada de compressão de pulsos em combinação com uma alteração de amplitude e fase evitando ter seus sinais interceptados por um MAGE.

De acordo com Oliveira (2007), a tecnologia de radar LPD faz o emprego de ondas contínuas (continuous waves – CW), o que por si só não seriam capazes de medir a distância

de um alvo. Para que as CW consigam ser efetivamente utilizadas por um radar na medição da distância dos alvos à antena desse foram aplicadas diversas tecnologias de modulação às ondas CW tais quais: Modulações de fase, como o Phase-Reversal (Binary-Phased-Shift Keying, BPSK), Quadrature-Phased-Shift Keying (QPSK) e Higher-Level Phase Modulation; e FM-CW.

Conforme Oliveira (2007), os radares FM-CW, também conhecidos como Chirp, são os radares LPD mais utilizados atualmente. Esse tipo de radar diminui consideravelmente a potência de pico transmitida por conta de estar continuamente transmitindo, o que é a característica de ser CW. Como pode-se perceber na figura 2 abaixo, há uma enorme distinção entre a potência de pico de um radar pulsado e de um radar CW:

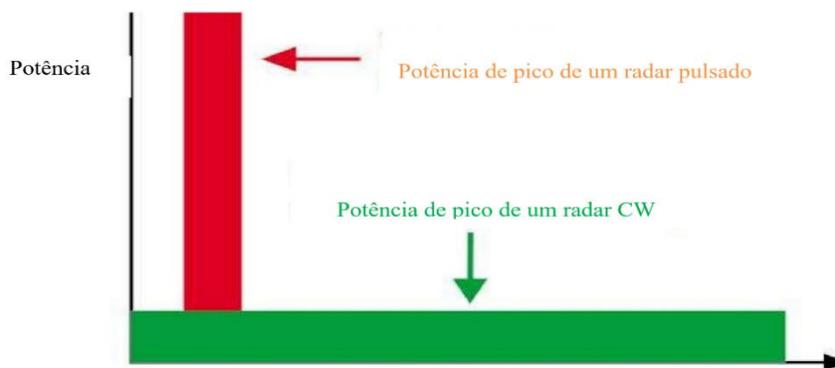


Figura 2: Distinção entre a potência transmitida por um radar pulsado e por um radar CW.

Fonte: (DE OLIVEIRA E DIAS, 2007)

O radar FM-CW, segundo Adamy (2009), realiza uma modulação de frequência por varredura com o objetivo de permitir a medição de distâncias desse radar à um alvo e evitar a interceptação, bloqueio ou detecção de seus sinais por um MAGE ou MAE inimigo. A varredura que o radar FM-CW realiza é relativamente rápida e por uma grande faixa de frequência

3.2 MAGE de alta performance com DRX

Conforme Britto (2005), Oliveira (2007) e Neri (2001), MAGEs que contém um receptor digital (DRX), são capazes de realizar ações de ELINT intrapulso por Software (SW) ou Firmware (FW), conferindo uma rápida conversão de um sinal analógico para um sinal digital (conversão A/D) e um rápido processamento digital do sinal recebido, apresentando um melhor desempenho de recepção de sinais com SNR baixos e possibilitando a recepção de sinais LPD.

A importância da evolução dos MAGEs, em Oliveira (2007), se deu em função do desenvolvimento de parâmetros de codificação intrapulso dos sinais e do desenvolvimento dos sinais LPD que inviabilizavam o emprego efetivo de MAGE que não continham um desempenho adequado para a detecção desses sinais, como podemos observar na tabela 1 abaixo:

Power Output of the Radar	Distance of Radar Detection (km)		Distance of Detection by an Intercepting Receiver (km)		
	100m ² Straight Section	1m ² Straight Section	RWR-40dBmi	ESM-60dBmi	ESM high performance-80dBmi
<i>PILOT MK2</i>					
1W	28	8,8	0,25	2,5	25
0,1W	16	5	0	0,8	8
10 mW	9	2,8	0	0,25	2,5
1 mW	5	1,5	0	0	0,8
10KW Conventional Pulsed Radar	25	7,9	25	250	2.500

Tabela 1: Comparação da recepção de sinais LPD (emitidos pelo radar Pilot MK2) pelo MAGE (ESM) 1ª geração e o MAGE 2ª geração (de alta performance).
Fonte: (DE OLIVEIRA E DIAS, 2007)

De acordo com Neri (2001), o DRX é um dos grandes diferenciais entre os MAGES antigos e os MAGES modernos.

Pode-se ver a estrutura de um MAGE moderno, que contém DRX, na figura 3 abaixo:

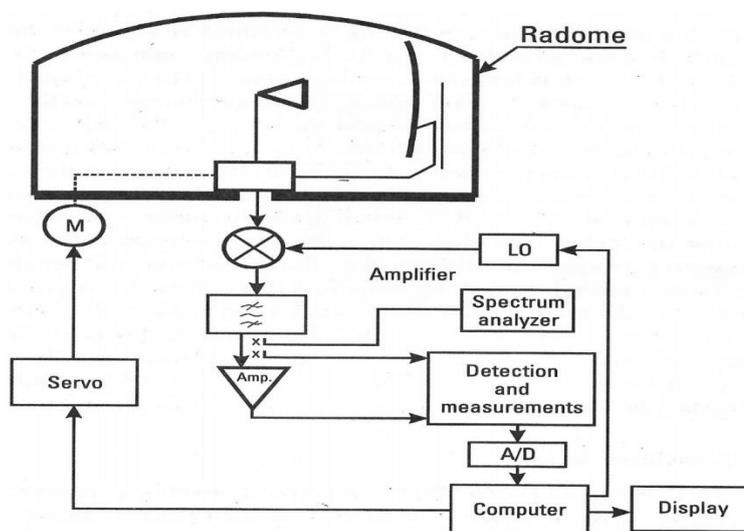


Figura 3: Diagrama de estrutura de um MAGE moderno, com DRX.
Fonte: (NERI, 2001)

Na figura 3, conforme Neri (2001), podemos visualizar os blocos que compõem um DRX: O spectrum analyzer, também conhecido como canalizador, que é composto de filtros digitais e realiza operações de transformadas rápidas de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) após a filtragem dos sinais que recebe; e o detection and measurements e o conversor A/D, que correspondem ao digitalizador, responsável por fazer uma rápida amostragem do sinal, de acordo com a teoria de Shannon, enquanto aumenta o paralelismo do fluxo de dados de forma a reduzir a taxa de variação desse sinal e equiparar a velocidade de processamento do

canalizador, assim como, também é responsável pela conversão do sinal analógico para digital e a conversão do sinal à frequência de banda base.

As suas vantagens, em relação aos receptores dos MAGE antigos (receptores analógicos) , consiste no processamento digital dos sinais que oferece: Estabilidade na operação; maior agilidade de repetição de análises; maior flexibilidade de funcionamento; possibilidade de programações diversas; capacidade de executar uma análise instantânea de um sinal em uma banda larga, através do uso de ferramentas típicas de processamento digital de sinais, tais quais o uso da FFT, que será abordada posteriormente nesse trabalho; facilidade de conseguir separar as componentes de fase e frequência de um sinal das componentes com modulação de fase ou frequência desse, tais quais a QPSK, BPSK e FM-CW.

4. RESULTADOS OBTIDOS PELO ELINT

Através do uso do programa descrito anteriormente, das ferramentas da transformada STFT e da função de autocorrelação, foi possível extrair os seguintes resultados tratados nos subcapítulos a seguir.

4.1 Resultados Obtidos a Partir da Análise dos Espectrogramas da STFT

Através dos espectrogramas fornecidos através da aplicação da STFT nos sinais simulados, pôde-se determinar a codificação e modulação utilizada em cada sinal, conforme podemos visualizar na figura 4.

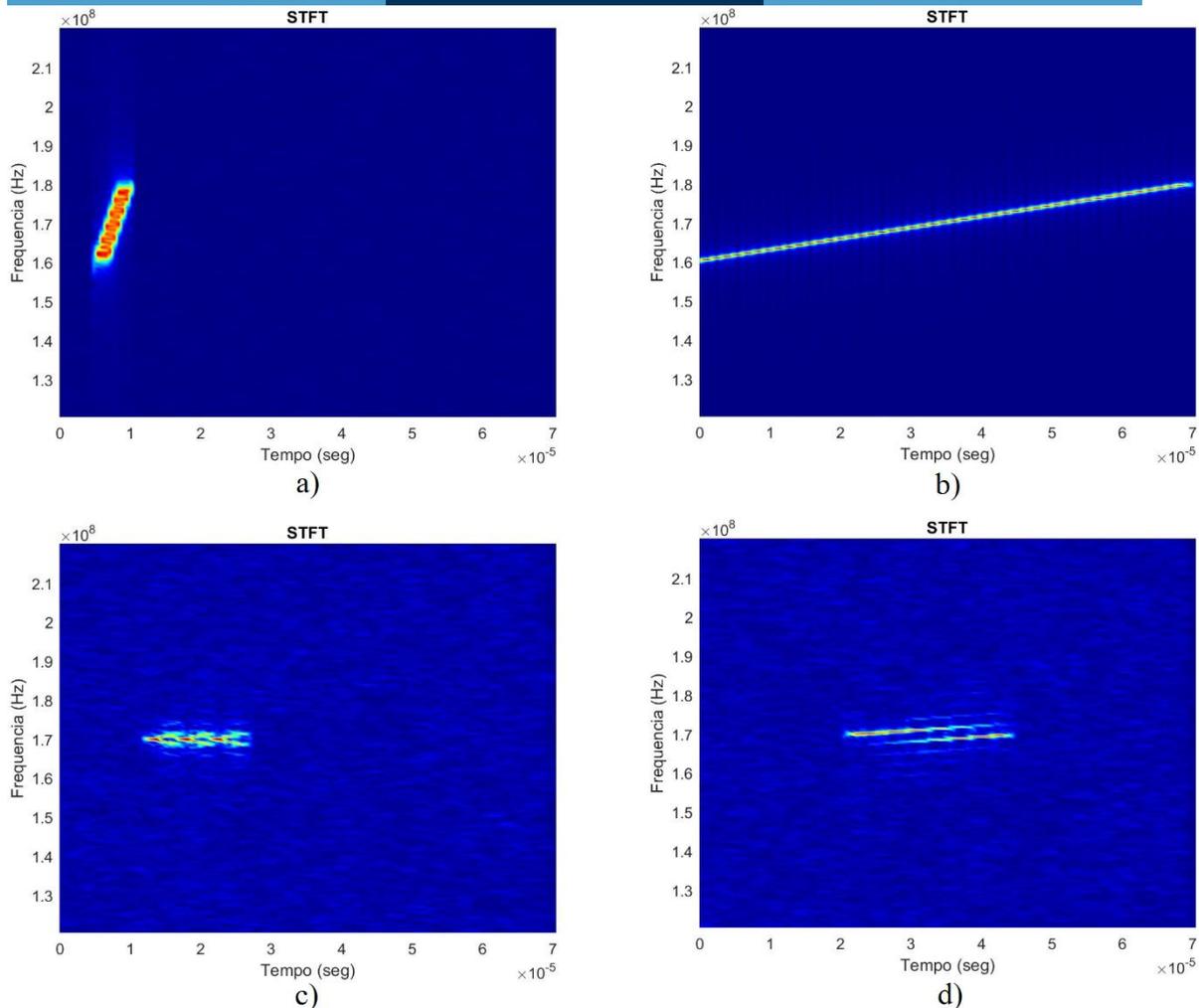


Figura 4: Espectrogramas de sinais de diferentes codificações e modulações

Fonte: (PIRES FILHO E MOREIRA, 2021)

Na figura 4, imagem “a)”, temos o espectrograma de um sinal radar modulado em LFM; na imagem “b)”, o espectrograma de um sinal radar FM-CW; na imagem “c)”, o espectrograma de um sinal radar codificado em Barker 13; e na imagem “d)”, o espectrograma de um sinal radar codificado em Frank 64.

Como pode-se visualizar na figura 4, cada codificação e modulação de um sinal apresenta um gráfico próprio de espectrograma fornecido pela STFT: O pulso em LFM apresenta um tempo de transmissão menor que as demais codificações e modulações visualizadas na figura 4, além de ter a característica de apresentar um crescimento linear de frequência de $1,6 \times 10^8$ Hz a $1,8 \times 10^8$ Hz; o sinal FM-CW apresenta o maior tempo de transmissão dentre os sinais analisados na figura 4 e apresenta a característica de um crescimento linear de frequência durante sua transmissão, característica essa, semelhante à do pulso modulado em LFM; o pulso modulado em Barker, que apresenta a característica de manter a maior parte do sinal concentrado no centro do intervalo de variação de frequência, $1,7 \times 10^8$ Hz, no caso em questão, de apresentar pequenas variações lineares crescentes e decrescentes partindo da frequência central do intervalo de variação, e de retornar a frequência central, e repetir as características mencionadas anteriormente, após um período de tempo, até o final de seu tempo de transmissão; e o pulso modulado em Frank, que apresenta a característica de, partindo da frequência central do intervalo de variação, $1,7 \times 10^8$ Hz, no caso em questão, variar, crescendo linearmente, enquanto, simultaneamente, pouco a pouco, a

potência do sinal começa a ser transmitida em outra linha crescente, paralela, e a uma pequena distância em frequência abaixo da linha inicial de transmissão, até que toda a potência desse sinal se concentre nessa segunda linha no momento que ela alcance a frequência central do intervalo de variação, momento esse que coincidirá com o ponto final do intervalo de tempo de transmissão do sinal nessa codificação.

Como podemos constatar, através da figura 4, cada modulação e codificação apresenta um espectrograma característico que o distingue dos demais.

Essas características únicas visualmente identificáveis podem ser exploradas pelo emprego de técnicas de processamento de imagens, a fim de permitir uma futura identificação automática.

4.2 Resultados Obtidos a Partir da Análise das Funções de Autocorrelação

4.2.1 Identificação dos Tipos de Códigos

A análise gráfica das funções de autocorrelação será feita somente nos sinais radar pulsados simulados por conta de ser difícil de se fazer a distinção, entre os sinais FM-CW e o sinal radar pulsado em LFM, como podemos constatar na figura 5 abaixo.

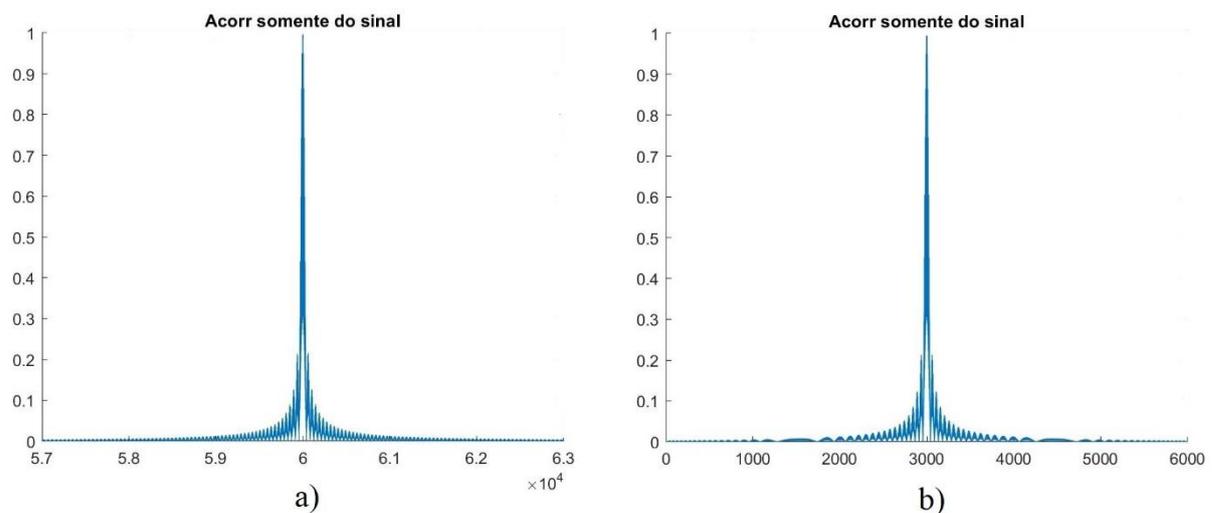


Figura 5: Diferenciação entre o sinal FM-CW e o sinal radar pulsado LFM

Fonte: (PIRES FILHO E MOREIRA, 2021)

No gráfico do item “a)” da figura 5, temos a aproximação, em um intervalo de aproximadamente $6,3 \times 10^4$ amostras, de um sinal FM-CW simulado, e em “b)” da figura 5 temos um sinal pulsado LFM no seu espaço amostral de aproximadamente $6,0 \times 10^3$ amostras.

Conforme podemos constatar, ao analisarmos os gráficos “a)” e “b)” da figura 5, a distinção, entre o sinal radar FM-CW e o sinal radar pulsado LFM, é quase imperceptível, salvo pelo seu espaço amostral que corresponde ao período de tempo em que o sinal existe. Assim, ambos os sinais se distinguem melhor, um do outro, por conta da característica de onda contínua do sinal FM-CW, que apresenta uma duração amostral muito maior que o sinal radar pulsado LFM.

A análise gráfica das funções de autocorrelação dos sinais radar pulsados, no entanto, nos permite a identificação do tipo de código presente em cada pulso, como o apresentado na figura 6 abaixo.

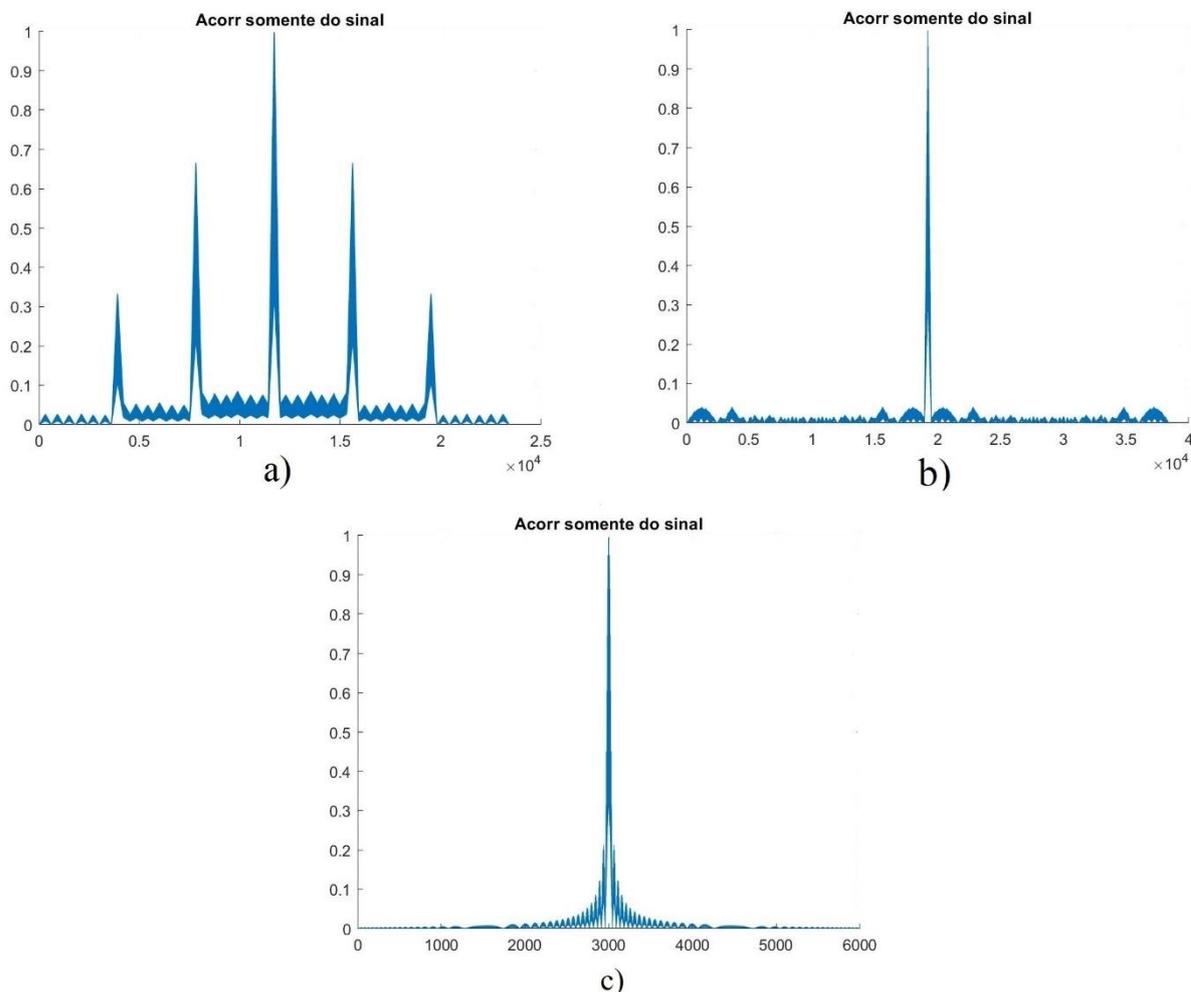


Figura 6: Diferenciação entre codificações de sinais através da análise dos gráficos de autocorrelação

Fonte: (PIRES FILHO E MOREIRA, 2021)

Na figura 6 temos os gráficos das funções de autocorrelação obtidos para 3 tipos diferentes de codificação. As diferenças podem ser percebidas visualmente por conta das características de cada gráfico.

No gráfico do item “a)” da figura 6, tem-se a função de autocorrelação obtida para um sinal radar com codificação Barker. Este gráfico se distingue dos demais pela presença de 5 lóbulos principais, sendo um central, e 4 laterais, igualmente espaçados entre si.

No gráfico do item “b)” da figura 6, tem-se a função de autocorrelação obtida para um sinal radar com codificação Frank. Este gráfico se distingue dos demais por possuir lóbulos secundários com formato semelhante a degraus, ou seja, esses lóbulos tem tendência crescente e decrescente. Essa forma de onda pode ser denominada “stepped waveform”.

No gráfico do item “c)” da figura 6, tem-se a função de autocorrelação de um sinal radar LFM. Este gráfico se distingue dos demais por apresentar um único pico central, ou seja, a potência se inicia com um valor mínimo, atinge seu valor máximo no centro do gráfico, e decresce até seu valor mínimo novamente.

4.2.2 Identificação dos Tamanhos (N) da Codificação Barker

Ratificando as características dos códigos Barker e de suas autocorrelações, conseguimos diferenciar os tamanhos da codificação Barker de um sinal radar, por meio da análise dos seus gráficos de autocorrelação. Como podemos verificar na figura 7 abaixo.

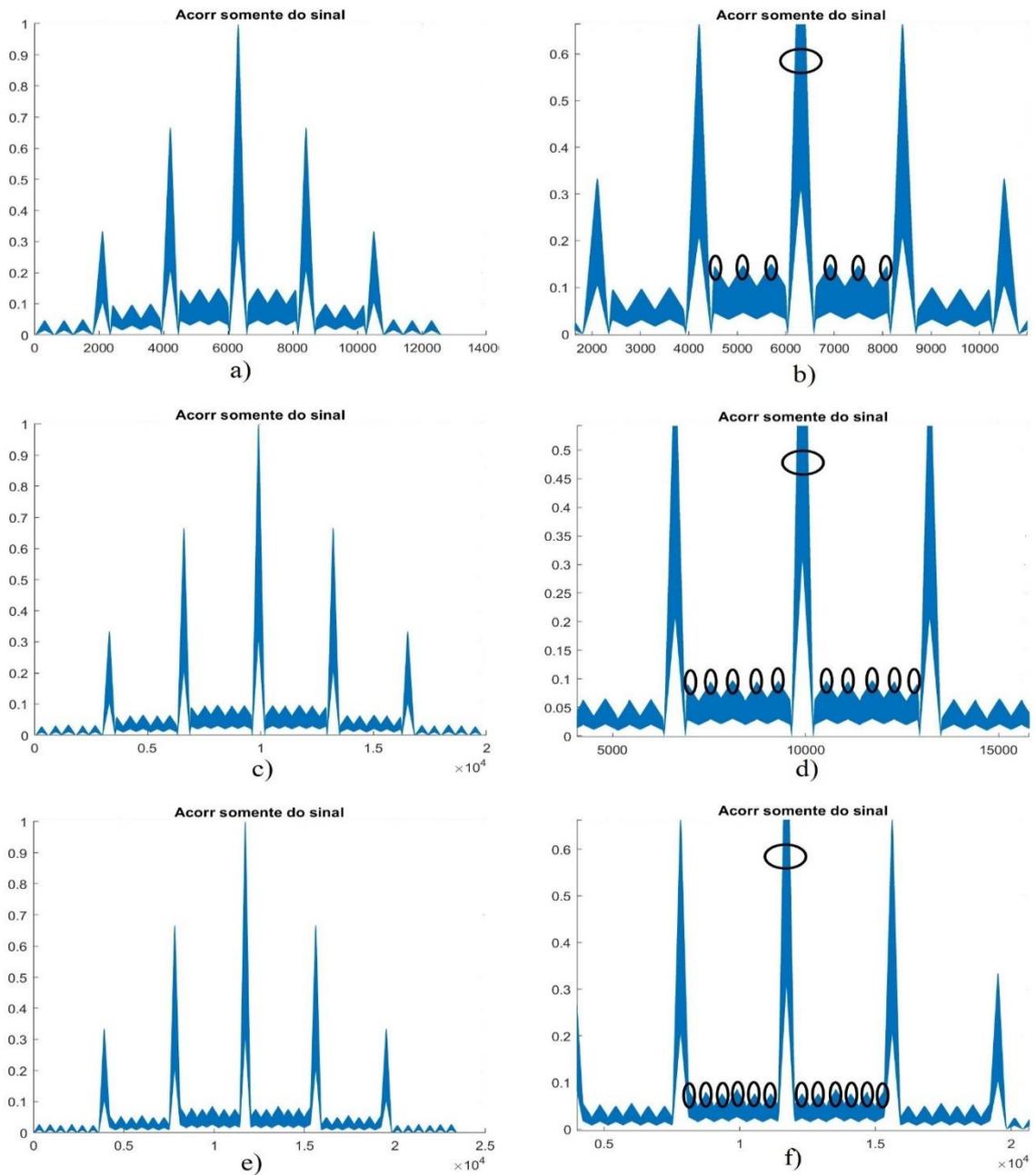


Figura 7: Diferenciação entre codificações Barker de diferentes tamanhos de sinais através da análise dos gráficos de autocorrelação

Fonte: (PIRES FILHO E MOREIRA, 2021)

As imagens “a)”, “c)” e “e)” da figura 7 apresentam os gráficos de autocorrelação de pulsos radar codificados, respectivamente, em Barker 7, 11 e 13.

As imagens “b)”, “d)” e “f)” da figura 7 apresentam os gráficos ampliados de autocorrelação de pulsos radar codificados, respectivamente, em Barker 7, 11 e 13, e, além disso, ilustram, por meio de elipses, os picos, cuja contagem, identifica o tamanho N da codificação Barker.

Portanto, conclui-se que, a partir da contagem do lóbulo principal e dos lóbulos secundários que o circundam, identifica-se o tamanho N da codificação Barker.

4.2.3 Robustez da SNR de Um Sinal Através do Uso de Autocorrelação

Conforme as características da ferramenta de autocorrelação, podemos constatar a robustez que a função de autocorrelação confere na identificação de um sinal na figura 8:

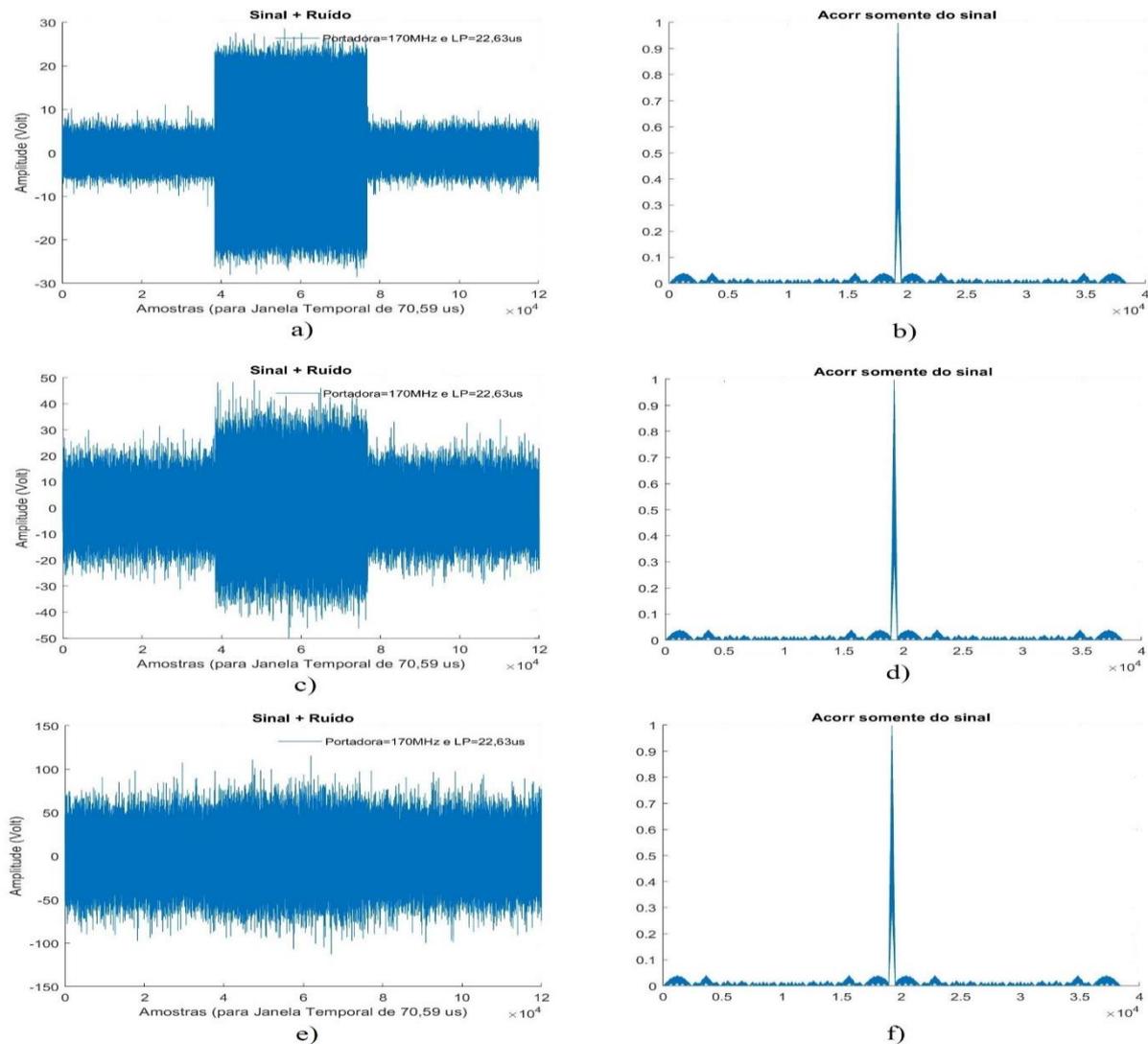


Figura 8: Identificação de um sinal com baixa SNR através da ferramenta de autocorrelação

Fonte: (PIRES FILHO E MOREIRA, 2021)

Na figura 8 “a)”, “c)” e “e)”, temos os gráficos dos sinais modulados em Frank 64 com SNR, respectivamente, de 10 dB, 0 dB, e -10 dB. Nos gráficos “b)”, “d)” e “f)”, temos as respectivas funções de autocorrelação dos sinais “a)”, “c)” e “e)”, da figura 8. Como podemos constatar, o sinal, na imagem “e)”, é imperceptível, ou seja, a detecção não é possível no domínio do tempo. Entretanto, esse mesmo sinal é facilmente detectado por meio de sua função de autocorrelação, conforme identificado na imagem “f)”.

A detecção do sinal em um ambiente ruidoso, por meio da função de autocorrelação, é possível devido às propriedades características da função de autocorrelação, no qual o ruído branco é excluído dos resultados fornecidos por essa função.

5 CONCLUSÕES BASEADAS NOS RESULTADOS OBTIDOS

Com base nos resultados obtidos e na análise dos gráficos gerados foram possíveis quatro conclusões.

A primeira conclusão é obtida por meio da análise dos espectrogramas dos sinais. Nessa análise é possível identificar o tipo de codificação intrapulso presente, ou seja, é possível identificar uma codificação Barker, Frank, modulação LFM, FM-CW, ou um sinal sem codificação.

A segunda conclusão é obtida por meio da análise dos gráficos das funções de autocorrelação. A partir dessa análise é possível distinguir os códigos Barker 7, Barker 11 e Barker 13.

A terceira conclusão é obtida por meio da análise dos gráficos das funções de autocorrelação. Foi possível diferenciar cada tipo de codificação utilizada no sinal radar.

A quarta e última conclusão é obtida também por meio da análise dos gráficos das funções de autocorrelação. Pode-se visualizar a robustez dos algoritmos de análise de sinais radar propostos nesse trabalho, em um ambiente ruidoso, e com valores baixos de SNR com o emprego da ferramenta de autocorrelação.

6 REPERCURSÕES DA TECNOLOGIA DO ELINT

Em face a essas novas ameaças o Instituto de Pesquisas da Marinha (IPQM) está desenvolvendo o MAGE MK3. Um MAGE de 2ª geração que conta com DRX e com algoritmos modernos de ELINT, dentre os quais a função de autocorrelação e o STFT apresentados nesse trabalho.

O sistema de ELINT do MAGE MK3 dotado de DRX melhorará a capacidade de estimar as informações contidas nos sinais radar LPI e LPD além de trazer diversas outras vantagens em relação ao seu antecessor, o MAGE DEFENSOR.

O MAGE MK3 está previsto a ser instalado nas próximas Fragatas Classe Tamandaré (FCT) e no Navio Doca Multipropósito Bahia (NDM Bahia), de acordo com Alves (2020).

Podemos visualizar, na figura 9, o croqui do MAGE MK3 a ser instalado nas novas FCT.

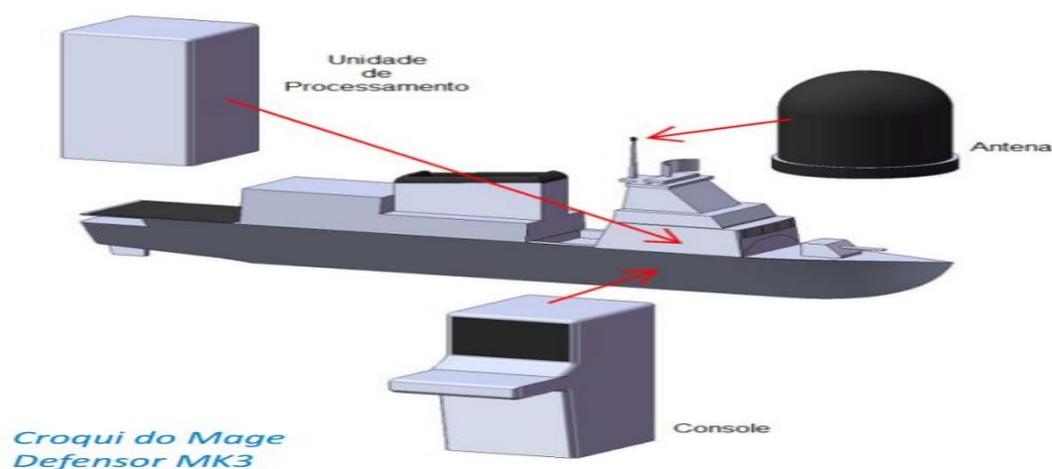


Figura 9: MAGE MK3 a ser instalado nas FCT

Fonte: (GRAAN, 2018)

Juntamente com o MAGE MK3, em Alves (2020), o IPQM também está em projeto de desenvolvimento do MAGE MK4, que contará com todas as funcionalidades do MAGE MK3, mas será desenvolvido para a instalação em submarinos. O MAGE MK4 está previsto a ser instalado nos Submarinos Classe Tupi (SCT) e no futuro Submarino Nuclear Brasileiro (SN-BR), segundo o Diretor da Diretoria Geral de Material da Marinha (DGMM), em uma entrevista concedida a Luiz Padilha na revista digital Defesa Aérea & Naval, em 23 novembro de 2017, em Caroli (2017).

O SN-BR pode ser visualizado na figura 10 a seguir.

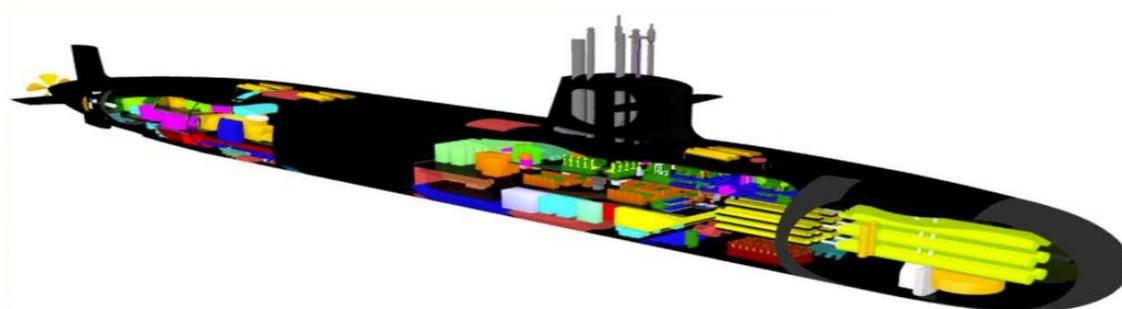


Figura 10: SN-BR

Fonte: (GALANTE, A., 2018)

7 CONCLUSÃO

A utilização de um MAGE moderno se faz cada vez mais imperativo a Marinha do Brasil em vista das novas ameaças atuais, no qual se utilizam radares LPD e LPI em sistemas de navegação de mísseis como o ASBM e em sistemas modernos de navegação de aeronaves e navios.

Com a incorporação dos MAGE MK3 e MK4, que conferem com um sistema moderno de algoritmos de ELINT, a esquadra da MB será capaz de se antepor a qualquer ameaça moderna e estará à altura, em nível de tecnologia de GE, das esquadras das principais potências mundiais e conferindo, a MB, uma posição de destaque diante da comunidade global.

REFERÊNCIAS

- ADAMY, D. L. **Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare**. Londres: Ed. Artech House, jan. 2009. 348 p.
- ALVES, E. B. **MAGE MK3: O futuro da Guerra Eletrônica na MB**. Rio de Janeiro: Ed. Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, ago. 2020. 15 p
- BERNARD, R. L. **Electronic Intelligence (ELINT) at NSA**. Maryland, USA: Ed. Center for Cryptologic History National Security Agency, 2009. 18 p
- BRITTO, R. M. de. **O Parâmetro Amplitude no “Deinterleaving” de Pulsos Radar**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, abr. 2005. 100 p.
- CAROLI, L. H. DAN entrevista o Diretor Geral do Material da Marinha – “Força de Submarinos”. Entrevista concedida a Luiz Padilha. **Defesa Aérea & Naval**. Rio de Janeiro, 23 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.defesaareanaval.com.br/entrevistas/dan-entrevista-o-diretor-geral-do-material-da-marinha-forca-de-submarinos/amp>>. Acesso em: 04 de abr. de 2021.
- CHANDRASHEKAR, S. et al. **China's Anti-ship Ballistic Missile Game Changer in the Pacific Ocean**. 5. Ed. India, Bangalore: National Institute of Advanced Studies, nov. 2011. 49 p.
- CHERNIJ, C. Mísseis, os mensageiros nada amistosos. **Aventuras na História**, Mar. 2007. Disponível em: <<https://aventurasnahistoria.uol.com.br/noticias/acervo/misseis-mensageiros-nada-amistosos-435192.phtml>>. Acesso em: 10 jan. 2021.
- GALANTE, A. O PROSUB E O SUBMARINO NUCLEAR BRASILEIRO SN-BR. **Poder Naval**. Rio de Janeiro, 20 fev. 2018. Disponível em: <<http://www.naval.com.br/blog/2018/02/20/o-prosub-e-o-submarino-nuclear-brasileiro-sn-br/>>. Acesso em: 04 de abr. de 2021.
- GRAAN. NDM BAHIA: BRASIL ATUALIZA RADARES DE NAVEGAÇÃO E GUERRA ELETRÔNICA. **Estratégia Global**. 19 de dez. de 2018. Disponível em: <<https://estrategiaglobal.blog.br/2018/12/ndm-bahia-brasil-atualiza-radares-de-navegacao-e-guerra-eletronica-2.html>>. Acesso em: 02 de ago. de 2020.
- MARDIA, H.K. **New technique for the deinterleaving of repetitive sequences**, IEE Proc. Part F, 1989. 149 p.
- NERI, F. **Introduction to Electronic Defense Systems**. 2ª Ed. Londres: Ed. Artech House, ago. 2001. 622 p.
- OLIVEIRA, M. L. de; Dias, J. C. M. LPI: Invisible Radars. **Passadiço**. P. 40-45, 2007. Disponível em: <http://www.mycity-military.com/uploads2/160003_1133182428_10-Pag40.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- PIRES FILHO, J. C.; e MOREIRA, R. da S. **testeCodificacao3.m**. Rio de Janeiro: IPQM, abr. 2021.
- SAID, H. A.; et al. **Design and Realization of Digital Pulse Compression in Pulsed Radars Based on Linear Frequency Modulation (LFM) Waveforms Using FPGA**. In: **International Conference on Advanced Information and Communication Technology for Education**, ago. 2013. p. 827-832.
- STASHWICK, S. Chinese Ballistic Missiles Fired into South China Sea Claimed to Hit Target Ship. **The Diplomat**, nov. 2020. Disponível em: <<https://thediplomat.com/2020/11/chinese-ballistic-missiles-fired-into-south-china-sea-claimed-to-hit-target-ship/>>. Acesso em: 11 jan. 2021.
- WANG, F. et al. Target tracking while jamming by airborne radar for low probability of detection. **Sensors**, Suíça, Basel, 1 set. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327410402_Target_Tracking_While_Jamming_by_Airborne_Radar_for_Low_Probability_of_Detection>. Acesso em: 14 jan. 2021.