

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

NILSON RODRIGUES DA SILVA

**UM ALGORITMO DE ALARME ANTECIPADO
PARA SISTEMAS MAGE RADAR**

Rio de Janeiro

2002

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

NILSON RODRIGUES DA SILVA

UM ALGORITMO DE ALARME ANTECIPADO

PARA SISTEMAS MAGE RADAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre de Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: José Carlos Araujo dos Santos – Ph.D
Co-Orientador da Tese: Fernando da Rocha Pantoja – Ph.D

Rio de Janeiro

2002

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP; 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre biblioteca deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referencia bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do (s) autor(es) e do(s) orientador(es).

S586 Silva, Nilson Rodrigues da

Um algoritmo de alarme antecipado para sistemas Mage Radar / Nilson Rodrigues da Silva – Rio de Janeiro : Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, 2002.

103 p.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2002.

1 . Mage Radar. 2. Alarme antecipado. 3 . Algoritmo de “Deinterleaving”.

CDD 621.3845

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

NILSON RODRIGUES DA SILVA

UM ALGORITMO DE ALARME ANTECIPADO

PARA SISTEMAS MAGE RADAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: José Carlos Araujo dos Santos – Ph.D.

Co-Orientador da Tese: Fernando da Rocha Pantoja – Ph.D.

Aprovada em 19 de julho de 2002 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof José Carlos Araujo dos Santos – Ph.D. do IME - Presidente

Prof Fernando da Rocha Pantoja – Ph.D. do IPqM

Prof Aristóteles de Souza Carvalho – Ph.D. da EmBrAer

Prof Denise Canazaro Dargam – M.C. do IPqM.

Rio de Janeiro

2002

Aos meus pais Odilon e Maria (“In Memoriam”).

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, em especial à minha mulher Dilma, por suportar a minha ausência, e à minha filha Gabriela, pela renovação diária de minhas energias.

Ao Fernando Simões, pelos trabalhos de diagramação e elaboração das figuras.

Ao Prof. José Carlos Araujo dos Santos, pela atenção dispensada, paciência e excelente atuação como orientador.

Ao meu co-orientador e amigo Fernando da Rocha Pantoja, pelo incentivo constante, objetividade e assistência.

Ao IME, pelo conhecimento científico adquirido.

Ao CIAW, na pessoa de seus comandantes, em especial ao Alte Mendes, por permitir a execução deste trabalho.

E a todos aqueles que de forma direta ou indireta me incentivaram para concluir a dissertação de Mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	09
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS.....	12
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Princípios Básicos das Medidas de Apoio a Guerra Eletrônica	15
1.2 Posicionamento do Trabalho	16
1.3 Objetivos e Organização	16
2 O SISTEMA MAGE E SEUS PROCESSOS FUNCIONAIS	19
2.1 Sistemas MAGE	19
2.2 Descrição Funcional e Considerações	21
2.3 Parâmetros Medidos pelo Receptor MAGE	23
2.3.1 Estatística dos Parâmetros do Pulso.....	24
2.3.2 Considerações sobre medidas em receptores MAGE e radar.....	30
2.3.2.1 Variação do TDC devido à Relação S/R.....	31
2.4 Técnicas de Separação de Pulsos.....	32
2.4.1 Técnicas de Separação por Células	33
2.4.2 Técnicas de Separação por Fatias de Tempo	35
2.4.3 Técnicas de Separação, utilizando a Combinação dos Algoritmos por Células e por Fatias de Tempo	38
3 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR INTERVALO DE REPETIÇÃO DE PULSOS.....	41
3.1 Introdução	41
3.2 Histograma de Diferenças.....	43
3.2.1 Histograma Diferença de Tempo de Chegada (TDif)	43
3.2.2 Histograma de Diferenças Sucessivas (DifSu)	46
3.2.3 Histograma de Diferença Cumulativa (DifCum)	48
3.3 Algoritmo de Busca.....	50

3.3.1	Algoritmo de Busca de Seqüência	50
3.3.2	Algoritmo de Busca Ponderada	52
3.4	Separação de Pulsos Utilizando Histogramas e Técnicas de Busca de Seqüência ("Two Pass")	55
4	PROPOSTA DE UM ALGORITMO DE TODAS AS DIFERENÇAS PARA O "DEINTERLEAVING" DE PULSOS RADAR	56
4.1	Considerações sobre a utilização de Histogramas no Algoritmo	57
4.2	Descrição do Algoritmo	58
4.3	Descrição do Programa Desenvolvido.....	60
4.4	Descrição do Cenário e Implementação do simulador	60
4.4.1	Implementação do Algoritmo	61
4.4.2	Critérios de Escolha das IRP Prováveis	62
4.4.3	Simulação e Testes	62
4.4.3.1	Testes com IRP Constantes com Variação do Tempo de Chegada (Ts).....	64
4.4.3.2	Testes com IRP e Ts Randômicos.....	66
4.5	Análise dos Resultados Obtidos	68
4.6	Proposta de uma Estrutura Adicional (Add On) em um Sistema Mage para Identificação Rápida de Plataformas de Altas Letalidade.....	71
5	CONCLUSÃO	72
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
7	ANEXOS	76
7.1	Anexo 1 – Sistema Mage RDL.....	77
7.1.1	Características do Sistema	77
7.1.2	Princípios de funcionamento do Sistema RDL.....	78
7.2	Anexo 2 - Tópicos para Analise de IRP.....	82
7.2.1	Considerações	82
7.2.2	Categorias de IRP.....	82
7.2.3	IRP Constante	85

7.2.4	IRP com desvio intencional (“ Jittered”)	85
7.2.5	IRP chaveada (“ Dwell e Switch”)	85
7.2.6	IRP variada em sequência fixa (“Staggered”)	86
7.2.7	IRP variada com chaveamento rápido (“Sliding”)	86
7.2.8	IRP com varredura controlada por computador (“Scheduled”)	87
7.2.9	IRP Senoidal (“Wobulated”)	87
7.2.10	Grupos de Pulsos (“PRGI”)	87
7.3	Anexo 3 – Medidas de IRP	88
7.3.1	Limitações na Relação Sinal –Ruído S/R	88
7.3.2	Limitações devidas a Mudanças na Amplitude do Pulso.....	90
7.3.3	Melhora na Medida de IRP	92
7.3.4	Limitações do Oscilador de Referência	93
7.3.5	Limiar Digital	94
7.3.6	Análise de IRP por Computador	95
7.3.7	Técnicas Estatísticas	96
7.4	Anexo 4 – Programa para simulação de todas as diferenças	101
7.4.1	Introdução	101
7.4.2	Listagem do programa	101

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Diagrama em blocos de um sistema MAGE	21
FIG. 2.2	Parâmetros medidos pelo receptor MAGE	22
FIG. 2.3	Fluxograma funcional de um sistema MAGE	24
FIG. 2.4	Superposição parcial ("overlap") de dois pulsos.....	26
FIG. 2.5	Probabilidade de medidas válidas para ADC e FREQUÊNCIA	26
FIG. 2.6	Probabilidade de medidas válidas para LP	27
FIG. 2.7	Probabilidade de erros de medidas de ADC e FREQUÊNCIA	27
FIG. 2.8	Probabilidade de erros de medidas de LP	28
FIG. 2.9	Probabilidade de medidas válidas de TDC.....	28
FIG. 2.10	Probabilidade de erros de medidas de TDC	29
FIG. 2.11	Variação da IRP devido ao ruído em termos da relação S/R.....	31
FIG. 2.12	Histograma de três dimensões	33
FIG. 2.13	Agrupamento de pulsos	33
FIG. 2.14	Taxa de processamento do receptor	36
FIG. 2.15	Arquitetura do receptor	38
FIG. 2.16	Separação tridimensional	39
FIG. 3.1	Trem de pulsos amostrado	41
FIG. 3.2	Histograma de todas as diferenças	44
FIG. 3.3	Histogramas de diferenças sucessivas	45
FIG. 3.4	Histogramas de diferenças cumulativas	47
FIG. 3.5	Seqüências de pulsos	50
FIG. 3.6	Seqüências iniciais	51
FIG. 3.7	Função peso	52
FIG. 4.1	Figura de Simulação	61
FIG. 4.2	Histograma de uma simulação para quatro resoluções.....	69
FIG. 4.3	Histograma de uma simulação para resolução igual a 1.....	69
FIG. 4.4	Processador "Interval Only"	71
FIG. 7.1.1	Controle de seleção de antena	79
FIG. 7.2.1	Categorias de IRP.....	84
FIG. 7.3.1	Variação de IRP devido a ruído	89

FIG. 7.3.2	Erro devido ao desvio (“trigger”) para um limiar fixo	90
FIG. 7.3.3	Mudança no IRP devido a amplitude	91
FIG. 7.3.4	Ambigüidade de uma contagem nas medidas de PRI.....	93
FIG. 7.3.5	Histograma de IRP Gaussiana.....	98
FIG. 7.3.6	Histograma de IRP Senoidal.....	99
FIG. 7.3.7	Histograma IRP “Sliding”.....	99

LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1	Pulsos processados em função da janela de bloqueio.....	37
TAB. 4.1	Matriz de Decisão	54
TAB. 4.2	Resultados dos testes para intervalo de repetição de pulsos constantes e Ts randômico (quatro casas decimais)	62
TAB. 4.3	Resultado dos testes para intervalo de repetição de pulsos constantes e Ts randômico (nº inteiro).....	63
TAB. 4.4	Resultado dos testes para intervalo de repetição de pulsos e TS randômicos.....	65
TAB. 7.2.1	Categorias de PRI.....	83
TAB. 7.3.1	Formas de histograma de IRP típicos.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURAS

ADC	Ângulo de Chegada
BSeq	Busca de Sequência
AP	Amplitude do Pulso
CME	Contra Medidas Eletrônicas
DifCum	Diferenças Cumulativas
DifSu	Diferenças Sucessivas
F	Frequência da portadora
DP	Descritor do Pulso (em inglês PD)
IHM	Interface homem-máquina
IRP	Intervalo de repetição de pulsos
LP	Largura do Pulso
MAA	Míssil Ar Ar
MAS	Míssil Ar Superfície
PDA	Palavra descritora da ameaça (em inglês TWD)
PDP	Palavra descritora do pulso (em inglês PWD)
PPS	Pulso por Segundos
RAA	Receptores de Alarme Antecipado
SGE	Sistema de Guerra Eletrônica
TDC	Tempo de Chegada
T _s	Tempo de chegada do primeiro pulso de uma sequência
UAV	Unidade de Alto Valor (em inglês HVU)

RESUMO

O presente trabalho propõe um algoritmo de alarme antecipado para sistemas MAGE radar.

Inicialmente são apresentados os processos de separação de pulsos, em particular os que utilizam apenas o “Interval Only” para a classificação e identificação das emissões radar.

Os parâmetros dos emissores radar foram analisados estatisticamente em função do tempo de medida, optando-se pelo tempo de chegada de pulsos como parâmetro determinante na escolha do algoritmo. Foi estabelecido um cenário de atuação e foram utilizados critérios para a determinação dos IRP prováveis no cenário escolhido.

O algoritmo escolhido utiliza todas as diferenças de tempo de chegada para a determinação dos IRP prováveis no cenário escolhido.

Para a simulação do cenário, cálculo de todas as diferenças, apresentação dos histogramas e determinação do limiar de escolha dos IRP prováveis foi elaborado em programa de computador em linguagem de alto nível.

Foi ainda, proposta uma estrutura adicional (“ADD ON”) para atender a nível prático o algoritmo escolhido.

O estudo realizado mostra que o algoritmo proposto é uma possível solução para o alerta antecipado na determinação de ameaças letais com um bom tempo de resposta.

ABSTRACT

The present work proposes a de-interleaving algorithm for radar pulses aimed at providing very fast early warning capability to existing MAGE radar systems .

Several processes for the de-interleaving of radar pulses were reviewed and discussed, with special emphasis to processes which are based on the use of the measured time of arrival only for the sorting and classification of radar pulse trains.

The statistics of these time interval only algorithms were presented and it has been shown that these algorithms fully met all the requirements applicable to the foreseen application. A realistic scenario was established and used to ascertain and validate the required performance as well as the proper criteria for the determination of likely threats present at the scenario.

The specific algorithm which was selected is based on all the differences among measured times of arrival for pulses. For accessing its performance against the requirements a simulation tool for the scenario was also devised. Both the algorithm for the de-interleaving process as well as for the simulation of the scenario were implemented using a high level language, in a commercial available software tool (MATLAB).

A hardware implementation for the proposed algorithm was also devised as an “ADD ON” module. Such implementation allows, in a very simple way, the incorporation and integration to existing MAGE radar systems of warning capabilities against threat radars. Moreover, it was shown that the proposed solution is capable of providing early warning capabilities with response times which are orders of magnitude less than the response times of existing MAGE radar systems.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DAS MEDIDAS DE APOIO A GUERRA ELETRÔNICA

A evolução dos Sistemas de Armas com o aprimoramento técnico dos mísseis (aumento da velocidade e avanço nas técnicas de direção e aproximação) tem obrigado os Sistemas de Guerra Eletrônica (SGE) a evoluir e cada vez mais depender dos Sistemas de Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE) para uma resposta rápida e adequada às ameaças. As atividades MAGE radar são realizadas por receptores e sensores altamente elaborados que têm como função detectar o pulso radar e medir seus parâmetros individuais (ângulo de chegada (ADC), frequência (F), largura de pulso (LP), amplitude (A) e tempo de chegada (TDC)), bem como processar extrair do conjunto de pulsos informações de varredura, intervalo de repetição de pulsos (IRP), etc..

Num cenário de guerra, pode-se imaginar a quantidade de redes de comunicações estabelecidas e sinais de radar presentes. A existência de um grande número de emissores independentes faz com que o sistema MAGE receba uma quantidade muito grande de pulsos aleatoriamente embaralhados. Para a caracterização do tipo de ameaça, há necessidade da utilização de sistemas inteligentes para a determinação de assinaturas radar com tempo de processamento e tempo de resposta compatíveis com a reação a ser adotada.

O processo em separar um conjunto de parâmetros em subconjuntos de pulsos pertencentes a uma mesma cadeia é conhecido como filtragem. As possibilidades de filtragem em sistemas MAGE estão nos domínios da frequência, espaço e tempo. A filtragem no domínio da frequência é geralmente chamada de análise espectral do sinal radar. A filtragem espacial é realizada, dividindo-se a cobertura da antena em vários feixes estreitos. A filtragem no domínio do tempo é efetuada pela divisão do sinal em fatias de tempo também chamadas de “janelas de observação”.

No presente estudo, serão abordados com profundidade somente os processos de separação no domínio do tempo.

1.2 – POSICIONAMENTO DO TRABALHO

A Marinha do Brasil está em fase de modernização de seus meios flutuantes, em particular as Fragatas, adquirindo novos equipamentos e modernizando outros que apresentaram um bom desempenho técnico durante sua vida útil.

Dentro desse enfoque e considerando que em um teatro de operações as respostas às ameaças letais tem que ser cada vez mais rápidas, as propostas de modificações e modernização devem atender ao estado da arte da guerra. Para facilitar o posicionamento do trabalho considera-se como cenário provável de atuação do Sistema MAGE a ser proposto um teatro de operações em que os emissores radar estão dispostos além do horizonte, isto é, entre 30 e 300 km.

Considera-se, ainda, que nesse teatro de operações pode ser encontrado um grupo tarefa (hostil) típico com a organização a seguir:

- um HVU (“High Value Unit”), em particular um Navio Aeródromo;
- 1 aeronave de asa fixa c/ capacidade de designação de alvos;
- escoltas (3 Corvetas ou Fragatas) com capacidade de realizar busca combinada e designação de alvos; e
- aeronaves de asa rotativa (embarcadas nos escoltas) com capacidade de designação de alvos.

Assume-se que num determinado instante de tempo somente 5 sistemas radar de designação de alvos (dos 7 sistemas disponíveis no cenário) estarão engajados e ativos na busca radar de alvos. Portanto, o número de ameaças será considerado como cinco emissores radar.

1.3 – OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO

O objetivo deste trabalho é propor um algoritmo de separação de pulso radar (“Deinterleaving”), a ser utilizado nos equipamentos MAGE existentes na MARINHA DO BRASIL, com o propósito de alarme antecipado.

Para tal, foram realizados estudos de vários processos de “Deinterleaving”, em particular, aqueles que utilizam técnicas de separação por intervalo de repetição de pulso.

Dentre as técnicas estudadas, optou-se pela implementação em MATLAB de um algoritmo que utiliza todas as diferenças dos tempos de chegada dos pulsos radar para o cenário considerado.

Para avaliação do algoritmo implementado, desenvolveu-se um simulador de teatro de operações também implementado em MATLAB, capaz de gerar cenários condizentes com as premissas adotadas.

Considera-se o trabalho de alta relevância, tendo em vista que as referências na língua portuguesa são escassas. As informações compiladas foram fruto de pesquisa em várias fontes e a proposta do algoritmo tem aplicação em trabalhos futuros.

A apresentação deste trabalho está dividida em cinco capítulos. O presente capítulo apresenta a necessidade geradora, um cenário de atuação do sistema MAGE, o objetivo e a aplicação do presente trabalho.

O Capítulo 2 trata do Sistema MAGE e seus processos funcionais, bem como das técnicas principais de “Deinterleaving” que utilizam os parâmetros do pulso radar recebidos pelo receptor MAGE. Será apresentado ainda um tratamento estatístico para medidas válidas e medidas de erro dos parâmetros do pulso.

Os processos que envolvem o estudo e a observação dos Intervalos de Repetição de Pulsos (IRP) para o “deinterleaving”, também chamados de técnicas de observação de apenas o intervalo de repetição dos pulsos (“Interval Only”) serão tratados no Capítulo 3. Os métodos utilizados empregam a diferença de tempos de chegada para a determinação de pulsos de uma mesma seqüência .

No Capítulo 4, será estabelecido um cenário, escolhido e proposto para o “deinterleaving” um algoritmo que utiliza todas as diferenças dos tempos de chegada dos pulsos radar para a separação, classificação e identificação dos emissores.

Serão apresentadas ainda uma simulação para o cenário em questão em MATLAB, as técnicas usadas para a determinação das IRP prováveis e uma proposta de arquitetura para atender o algoritmo escolhido, que poderá ser utilizada nos MAGE RDL, CUTLASS, 2AA2 e DEFENSOR. No anexo 7.1 tem-se uma descrição sumária do MAGE RDL, maiores detalhes sobre o sistema tem-se em FERREIRA (2000).

Finalmente, na Conclusão do presente trabalho, tem-se uma apresentação dos resultados obtidos envolvendo os aspectos de suma relevância, sendo propostas sugestões para trabalhos futuros.

2- O SISTEMA MAGE E SEUS PROCESSOS FUNCIONAIS

Neste capítulo são definidas as principais funções e processos gerais de separação de pulsos utilizados por sistemas MAGE. São abordados também os parâmetros do pulso e as considerações estatísticas relativas às medidas desses parâmetros.

2.1 – SISTEMAS MAGE

A função dos sistemas MAGE é procurar, interceptar, localizar, classificar e identificar fontes de radiação eletromagnética. A informação que eles fornecem, para fins militares, é usada para reconhecimento da ameaça e para emprego tático de forças.

Os sistemas MAGE-Radar são divididos em duas categorias: Receptores de Alarme Antecipado e Receptores para Reconhecimento/Vigilância.

(TSUI, 1986)

Os Receptores de Alarme Antecipado (RAA) operam em tempo real e são usados em aeronaves, navios, submarinos e forças terrestres para auto-proteção. Os sistemas de recepção para reconhecimento/vigilância são usados para interceptar, coletar, analisar e localizar sinais radares de modo a permitir:

- a atualização das ameaças constantes do cenário,
- definição do emprego de CME,
- aviso antecipado de aproximação inimiga, e
- fusão com dados de outros sensores.

Os RAA são usados em aeronaves e helicópteros militares para alertar em casos de ataque de mísseis superfície-ar (SAM), mísseis ar-ar (AAM), interceptadores aéreos, e sistemas anti-aéreos de direção de tiro. São também usados para alertar as tripulações de tanques sobre ataques iminentes de armas ou mísseis e podem ser empregados por submarinos, próximos ou na superfície, para alertá-los quando estiverem sendo iluminados por sistemas de armas ou radares aéreos de busca de superfície.

Uma vez alertada para o tipo, direção e prioridades das ameaças, a tripulação pode conduzir manobras evasivas e empregar contramedidas de despistamento, quer sejam estas ativas e/ou passivas (exemplo: “chaff”, “flares”), ou uma combinação dela, de forma apropriada para neutralizar o ataque.

Os RAA são geralmente a forma mais simples de um receptor de MAGE, consistindo de um equipamento não sofisticado de baixa sensibilidade (da ordem de -40dBm), o qual é ajustado para cobrir bandas (usualmente bem inferiores a uma oitava) e características das ameaças esperadas e explorar a vantagem de distância MAGE-Radar para indicar a presença de uma ameaça antecipadamente.

Os receptores MAGE de Reconhecimento/Vigilância, são em geral mais complexos do que os RAA e, geralmente:

- empregam receptores mais sensíveis (em torno de -70 dBm) para interceptar radiações de lóbulos laterais das ameaças;
- possuem DF com maior acurácia (inferior a 1°); e
- medem parâmetros radar adicionais tais como coerência, polarização, forma do pulso, modulação intrapulso; e
- fornecem características estatísticas.

A missão básica do MAGE é fornecer informações ao sistema de comando e controle do navio, de forma a possibilitar a esse sistema uma tomada de decisão quanto a ações a serem empregadas contra a ameaça apresentada, seja de forma automática, no caso de ameaça imediata, ou sob o controle do operador, quando a situação tática o permitir. Para isso, o MAGE procura e intercepta radiações primordialmente do lóbulo principal de radares inimigos, armazena cada sinal interceptado, executa medidas de diversos parâmetros radar e de posição da ameaça (ex.: frequência, largura do pulso, amplitude, ângulo de chegada, tempo de chegada), classifica-os em grupos associados a um determinado emissor, e então combina a assinatura de cada grupo com uma biblioteca de ameaças armazenada, pela qual identifica o tipo de radar envolvido. Após a identificação de um emissor radar, é atribuída uma prioridade a esta ameaça, associada ao sistema de armas ou radar disponível na plataforma.

Além de identificar o sinal interceptado, o sistema MAGE também fornece informação sobre o ângulo de chegada do sinal radar (marcação) e, em algumas situações, sua completa localização (marcação e distância).

O primeiro passo na seqüência de processamento é chamado de separação (“deinterleaving”) e consiste em isolar o trem de pulsos associado a um radar em particular.

O segundo passo depois da separação envolve o processamento para classificar o tipo de radar, sendo estimado um número de parâmetros suficientes para diferenciar tipos diferentes de radares. O sistema MAGE deverá ser eficaz na classificação de radares de diversos tipos

(ex.: varredura circular, setorial, cônica ou permanente), incluindo aqueles que empreguem técnicas de agilidade de frequência e de PRI, além de modulações complexas.

O próximo passo no processo é, uma vez classificado o tipo de radar ameaça, e de posse dos parâmetros dessa ameaça, consultar a biblioteca de radares constante do equipamento MAGE visando identificar a ameaça e, eventualmente, os sistemas de armas disponíveis na plataforma.

2.2 – DESCRIÇÃO FUNCIONAL E CONSIDERAÇÕES

A existência de um grande número de emissores independentes num teatro de operações faz com que seja necessário que os trens de pulsos associados a cada radar sejam separados. Este processamento do MAGE, denominado "deinterleaving", deve ser capaz de manipular altas taxas de pulso e permitir a resposta em tempo real, proporcionando adequado "tempo de reação", inclusive para sistemas de defesa do tipo resposta automática ("close-in").

Assim, o primeiro estágio de um sistema MAGE automático fornece saídas digitais que representam os parâmetros medidos para cada pulso radar recebido. O processo de separação opera sobre estes parâmetros de modo a permitir a identificação da série de pulsos pertencentes a uma mesma cadeia, classificando os emissores existentes no ambiente.

Um processo de "deinterleaving" deve levar em consideração as características esperadas do ambiente radar, as características conhecidas dos sub-sistemas de medidas dos pulsos e todas as fontes de corrupção de dados previsíveis. Isto visa tornar o sistema robusto. Em outras palavras, se o MAGE vier a perder pulsos, continuará podendo proceder a uma classificação adequada e a uma correta identificação do emissor.

Depois de proceder a separação dos pulsos, atribui-se às cadeias formadas e caracterizadas como provenientes de uma mesma ameaça um número de acompanhamento, o qual é passado como referência para o processo de identificação na biblioteca. As entradas para o processo de identificação na biblioteca, referidas sempre ao número do acompanhamento, são: número da ameaça (acompanhamento provisório), frequência do sinal, marcação, amplitude, largura de pulso, intervalo de pulso, agilidade em frequência do sinal, período de varredura e tipo de varredura.

Como saídas desse processo, tem-se a identificação do tipo do radar, seu grau de destruição e o grau de confiança que o equipamento atribui ao processo da identificação. Isto é obtido comparando-se os parâmetros de entrada com os parâmetros de radares conhecidos e

armazenados em uma biblioteca dedicada. Esta saída de dados deverá ser apresentada ao operador do sistema, de modo que ele possa tomar decisões rápidas. Além disso, uma tabela de ameaças é criada a partir dos parâmetros medidos, derivados do emissor, gerando então a conhecida tabela de acompanhamento, cujos acompanhamentos são repassados ao sistema de comando e controle da plataforma.

Um sistema MAGE é composto basicamente de quatro subsistemas principais, como mostrado na FIG. 2.1. O receptor detecta os pulsos radar e mede seus parâmetros individuais, isto é, marcação, frequência, largura de pulso, amplitude e tempo de chegada.

(DARGAM, 1993)

Historicamente, o pré-processador é um circuito dedicado, podendo operar com taxas de aproximadamente 10^6 pulsos por segundo, reduzindo a alta taxa de dados proveniente dos receptores ($\cong 10^5$ a 10^6 pps) para uma taxa compatível com aquela de um processador de uso geral ($\cong 10^4$ pps). Esta redução de dados é obtida agrupando-se os pulsos por parâmetros similares e/ou utilizando técnicas de separação por intervalos de pulsos.

Classificados, os emissores são finalmente identificados por comparação com uma biblioteca, e os resultados são apresentados através de dispositivos de interface homem-máquina (H/M).

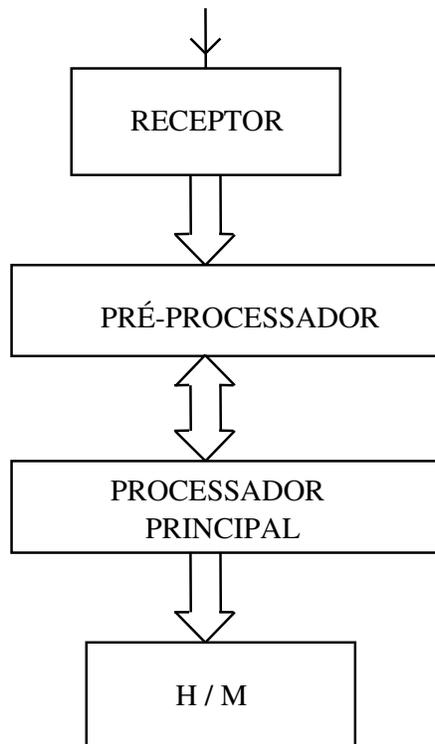


FIG. 2.1 – Diagrama em blocos do sistema MAGE

2.3 - PARÂMETROS MEDIDOS PELO RECEPTOR MAGE

Cada sinal instantâneo interceptado pelo receptor MAGE deve ser caracterizado por um conjunto de parâmetros. Com esta informação, é possível associar um conjunto de sinais pertencentes a um emissor particular e a identificar tal emissor dentre outros emissores cujos sinais tenham sido interceptados. Os parâmetros geralmente medidos pelo receptor de MAGE para um sinal pulsado, representado na FIG. 2.2

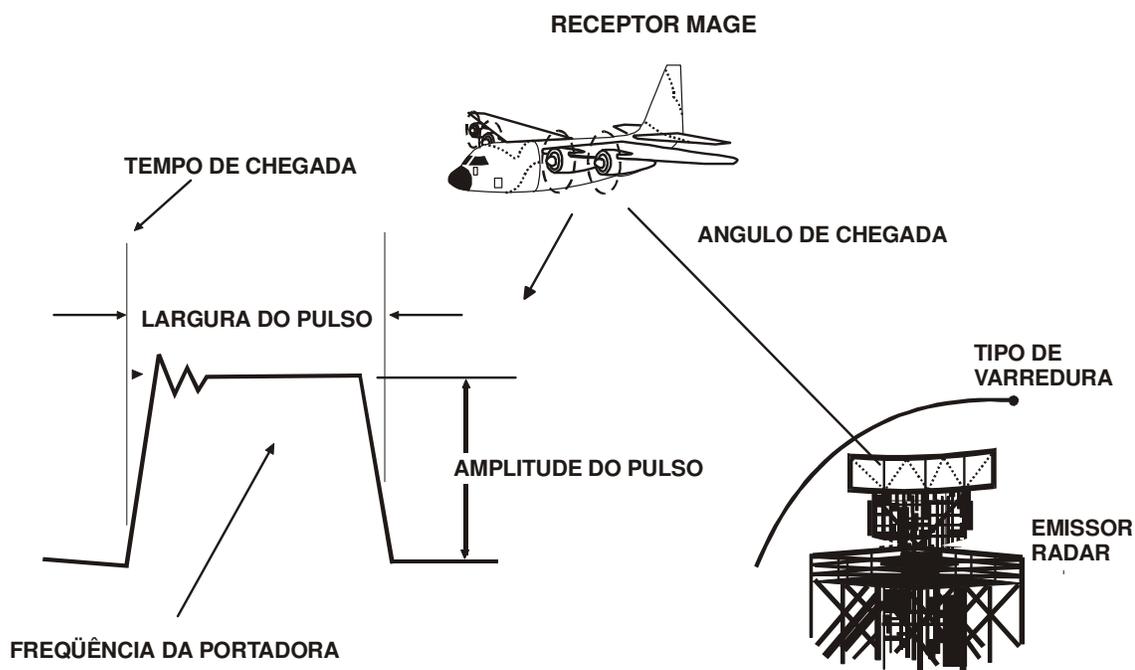


FIG. 2.2 - Parâmetros medidos pelo receptor MAGE.

Usualmente, os parâmetros medidos pelo MAGE são:

- a frequência da portadora (F);
- a amplitude do pulso (AP);
- a largura do pulso (LP);

- o tempo de chegada do pulso (TDC); e
- o ângulo de chegada do pulso (ADC).

Além destes, em alguns sistemas, a polarização do sinal recebido também é medida. A modulação de frequência intra-pulso é um outro parâmetro que pode ser usado para identificar um emissor particular, além de poder ser usado para determinar a taxa de modulação FM ("chirp") ou a codificação de fase de um radar de compressão de pulso.

O agrupamento dos parâmetros medidos em um pulso interceptado forma uma palavra digital, que descreve este pulso. Tal palavra é chamada de Palavra Descritora do Pulso ("PDW"). As PDW formam um conjunto de vetores no espaço de parâmetros, a esse conjunto para cada emissor chama-se Palavra Descritora da Ameaça ("TWD"). Ao combinar-se vetores de múltiplos pulsos, é possível então isolar aqueles sinais associados com um determinado emissor. A FIG. 2.3 mostra o diagrama funcional de um sistema MAGE, onde pode-se observar as diversos estágios para se chegar à TWD e à determinação da ameaça.

O tempo de chegada do pulso pode ser tomado como o instante em que o início do pulso é recebido. É um parâmetro muito importante no processo de separação dos pulsos.

A largura do pulso é de difícil utilização para a classificação do emissor, uma vez que, múltiplas reflexões distorcem bastante a LP, podendo criar uma longa cauda no pulso, deslocar a posição do mesmo e, em emissões densas, ocasionar a superposição parcial ou total de dois pulsos ("overlapping"). Entretanto, ainda assim, a LP pode ser utilizada como parâmetro adicional no processo de separação dos pulsos.

2.3.1 – ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DO PULSO

As taxas de erros não são funções somente da LP, mas também das IRPs, amplitude dos pulsos, tempo de medidas no receptor e densidade dos pulsos de chegada. Pode ser mostrado que os limiares ("thresholds") de decisão podem ser adaptados para o cenário observado pela monitoragem da taxa média de pulsos, ADC, F, TDC e LP.

(MARDIA, 1987 PAPOULIS, 1991)

Um sistema simples de medidas para ADC, TDC , pode ser feito utilizando-se o tempo de subida ("leading edge") do pulso de chegada. A medida de largura do pulso deve ser feita entre os pontos de 3dB da subida e da descida (" trailing edge") do pulso.

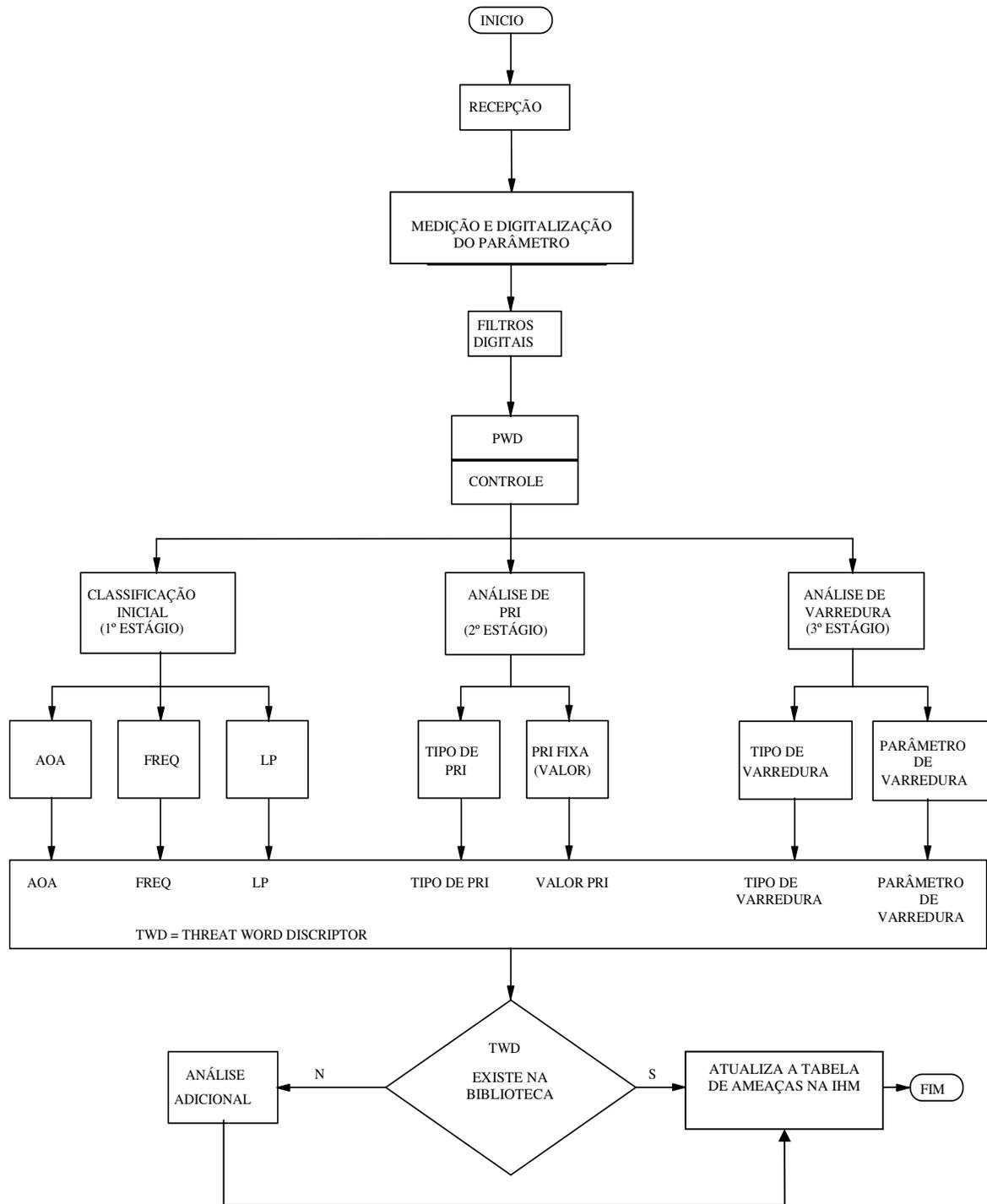


FIG. 2.3 – Fluxograma funcional de um sistema MAGE

A FIG. 2.4 mostra a superposição parcial ("overlap") de dois pulsos radar. A largura $W1$ corresponde ao pulso que se deseja receber e $W2$ é a largura do pulso interferente. Se o número de pulsos é grande, os tempos de subida dos pulsos podem ser tratados como processos de Poisson aleatórios onde um intervalo T finito é dividido em n subintervalos. A probabilidade de que k desses n pontos localizados aleatoriamente irão cair no intervalo $(t_1 - t_2)$ de comprimento $\tau = t_1 - t_2$ é dada pela Distribuição de Poisson:

$$p_k(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} e^{-\lambda\tau} \quad \text{onde, } k=0,1,2,\dots$$

Se for considerada a chegada de dois pulsos consecutivos, isto é, se não ocorreu nenhum evento no intervalo τ , tem-se $k=0$. Fazendo $W2$ o valor médio da largura do pulso de chegada, Tn o tempo de medida e Td o tempo de recuperação entre duas medidas de F, ADC e TDC, obtém-se para medidas válidas:

$$Pm = e^{(-\lambda(Tn+W2))} \quad \text{para: } W2 > Td \quad \text{EQ 2.1}$$

$$Pm = e^{(-\lambda(Tn+Td))} \quad \text{para: } W2 \leq Td \quad \text{EQ 2.2}$$

As medidas de largura do pulso diferem das medidas de F e ADC. Para medidas válidas de largura do pulso o tempo de subida e tempo de descida do pulso não podem sofrer "overlapping".

Considera-se suficiente para não se ter superposição: $W1=W2$.

$$Pm = e^{(-\lambda(W1+W2))} \quad \text{para: } W2 > W1 \text{ e} \quad \text{EQ 2.3}$$

$$Pm = e^{(-2\lambda W2)} \quad \text{para: } W2 \leq W1. \quad \text{EQ 2.4}$$

Os erros de medidas devem levar em conta dois eventos $n=0$ e $n=1$. Assim, tem-se respectivamente para os erros de medidas de F, ADC ou TDC e erros de medidas de LP:

$$Pe = 1 - e^{(-\lambda Tn) - \lambda Tn \cdot \exp(-\lambda Tm)} \quad \text{para: } W2 \leq Td \quad \text{EQ 2.5}$$

$$Pe = 1 - e^{(-\lambda w2) - \lambda w2 \cdot \exp(-\lambda w2)} \quad \text{para: } W2 > Td \quad \text{EQ 2.6}$$

Assim, em função do que foi estabelecido foram traçadas as figuras que se seguem com o auxílio do MATLAB.

A FIG. 2.5 mostra a probabilidade de medidas válidas de frequência e ADC versus densidade de pulsos para diferentes tempos de medidas do receptor. A FIG. 2.6 mostra a probabilidade de medidas válidas de LP para diferentes valores médios de largura do pulso. A FIG. 2.7 mostra a probabilidade de erros de medidas de TDC para diferentes tempos de medidas. A FIG. 2.8 mostra a probabilidade de erros de medidas para diferentes valores médios de largura do pulso. A FIG. 2.9 mostra a probabilidade de erro de medidas de ADC e

freqüência para diferentes tempos de medida. A FIG. 2.10 mostra a probabilidade de erros de medidas de TDC para diferentes tempos de medidas.

Nas figuras apresentadas, o valor médio da largura do pulso no cenário é $W2 = 1 \mu\text{s}$; o pulso medido $W1 = 1, 2, 3, 4, 5 \mu\text{s}$; $Td = 0$ para medidas de ADC e F; e $Td = 200\text{ns}, 400\text{ns}, 600\text{ns}, 800\text{ns}$ e 1000ns para medidas de TDC.

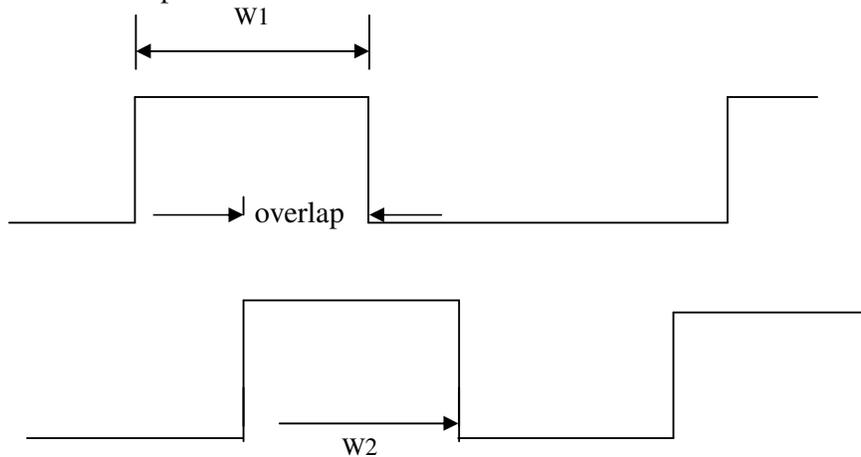


FIG. 2.4 – Superposição parcial ("overlap") de dois pulsos.

PROBABILIDADE DE MEDIDAS VÁLIDAS PARA ADC E FREQUÊNCIA

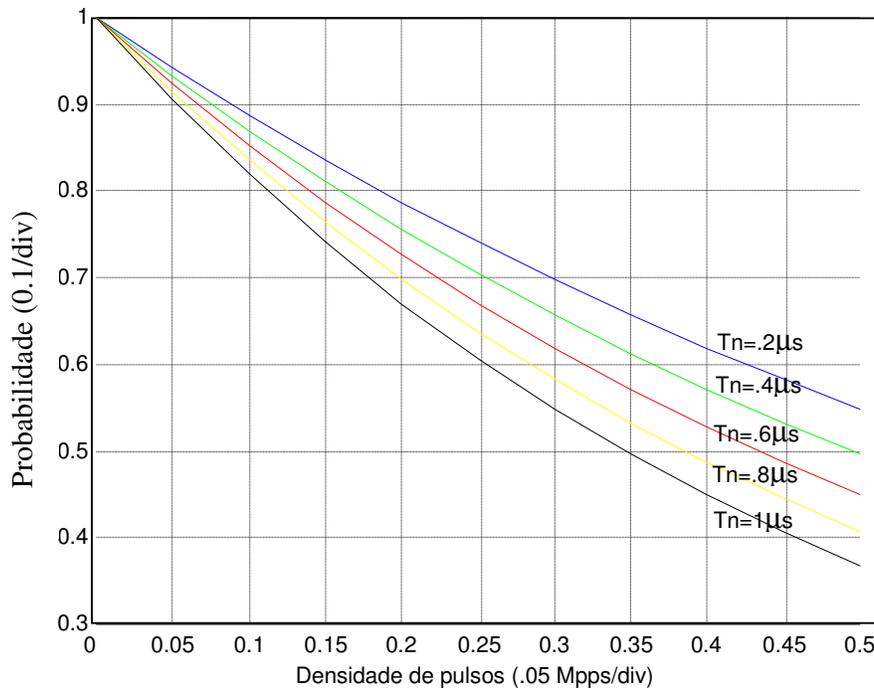


FIG. 2.5 – Probabilidade de medidas válidas para ADC e FREQUÊNCIA.

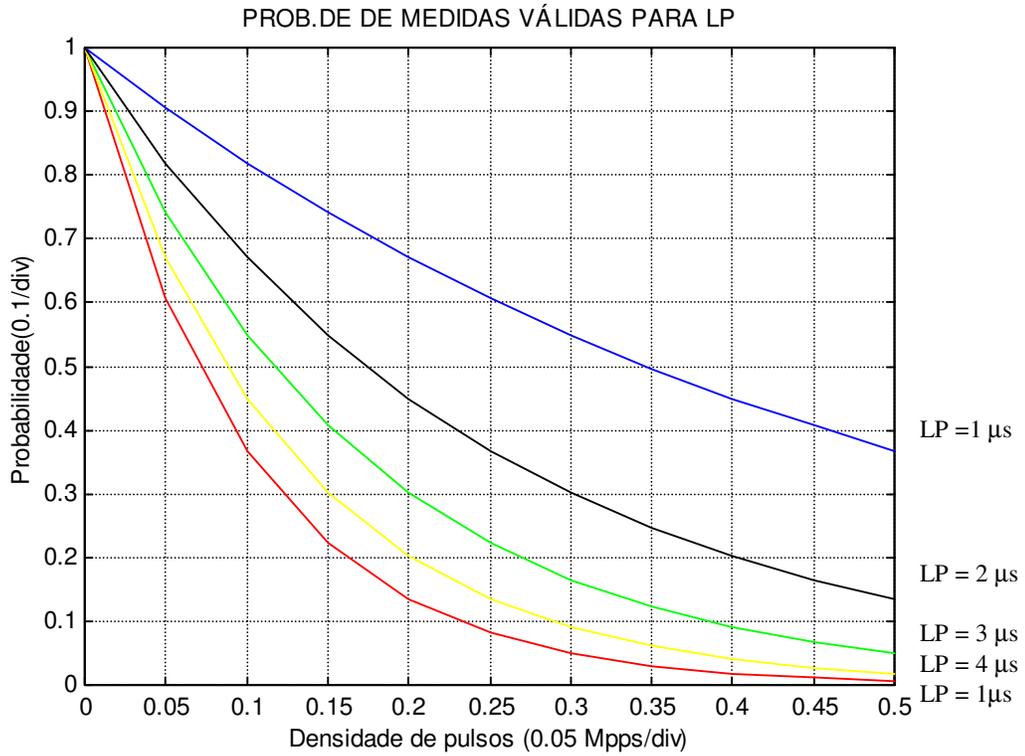


FIG. 2.6 – Probabilidade de medidas válidas para a LP

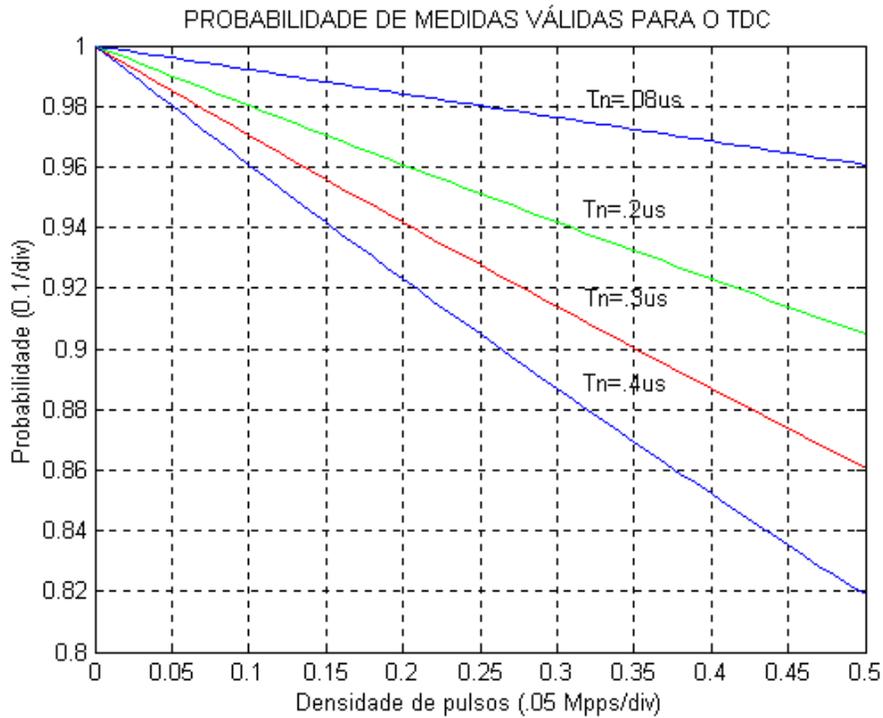


FIG. 2.7 – Probabilidade de medidas válidas de TDC.

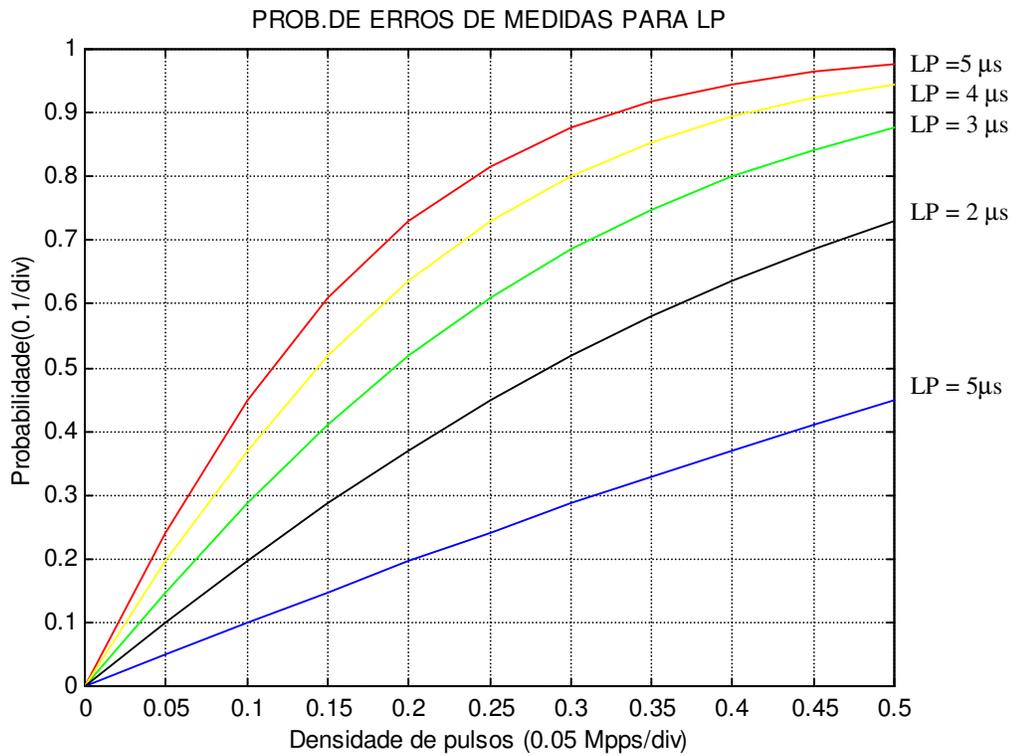


FIG. 2.8 – Probabilidade de erros de medidas para LP

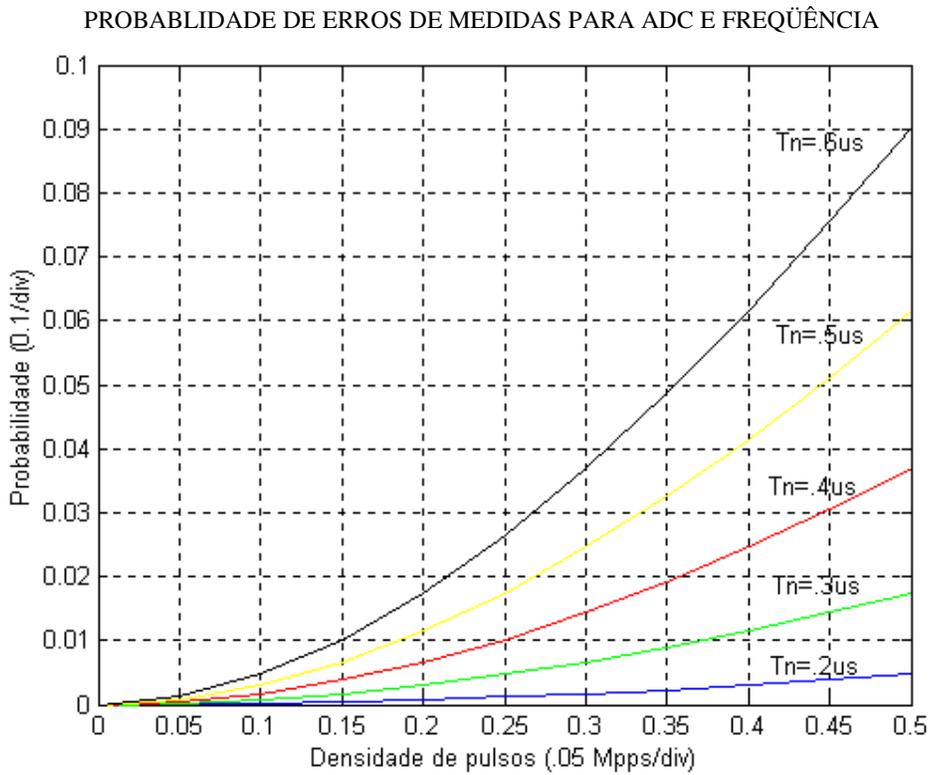


FIG. 2.9 – Probabilidade de erros de medidas válidas para o ADC e frequência

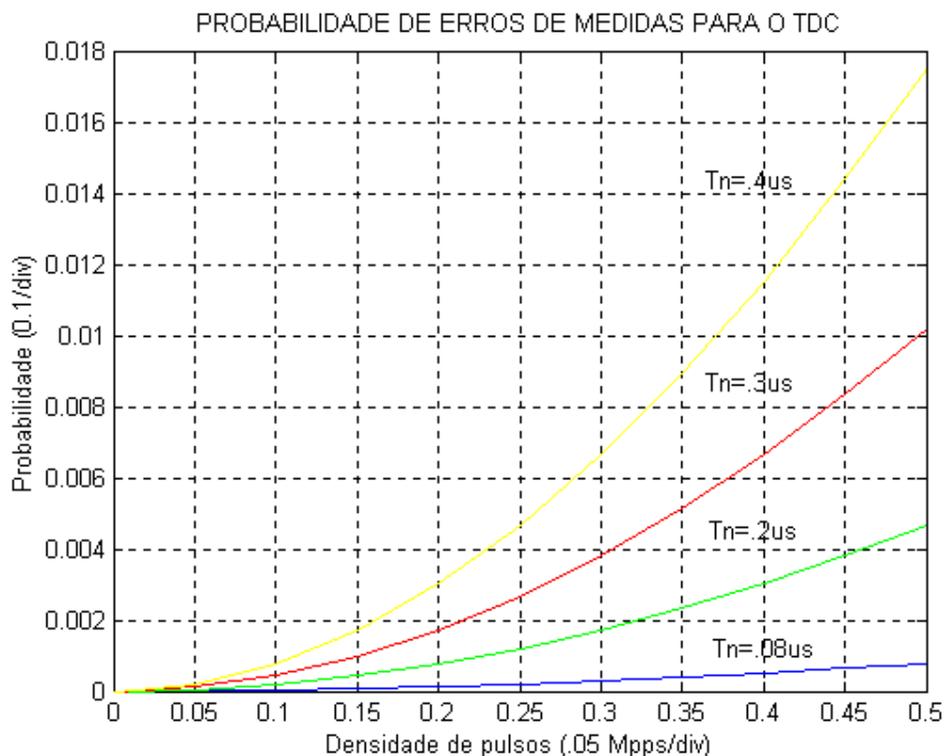


FIG. 2.10 – Probabilidade de erros para medidas de TDC.

2.3.2 – CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIDAS EM RECEPTORES MAGE E RADAR

A medida de tempo de chegada de um pulso radar em um receptor MAGE é similar ao problema encontrado pelo receptor radar para determinar a distância da ameaça, o qual se baseia na medida de diferenças de tempos. Entretanto, existem algumas diferenças:

- o receptor radar é casado (dentro de certos limites) com o pulso que está sendo recebido. O receptor MAGE não é casado com os pulsos que recebe;
- o sistema MAGE pode requerer uma incerteza muito pequena na medição do TDC, pois trabalha com um único pulso, e as precisões associadas devem ser melhores do que 1% da PRI; e
- no radar, o intervalo de tempo de interesse é contado a partir de um tempo conhecido de transmissão de pulso até um tempo não conhecido do retorno do eco da ameaça.
- o parâmetro de interesse em MAGE é normalmente o tempo entre dois pulsos, existindo um grau de incerteza sobre o tempo de ocorrência destes pulsos.

O fato de o receptor MAGE não ser casado com o sinal radar implica, normalmente, em que a largura de banda do receptor MAGE deva ser maior que o recíproco do pulso. Isto reduz a relação S/R e torna o tempo de subida do pulso um fator limitador na medida do tempo.

Outros fatores limitadores dizem respeito às condições de propagação e reflexões multipercursos, que podem ocasionar deformações no pulso.

2.3.2.1 – VARIAÇÃO DO TDC DEVIDO À RELAÇÃO S/R

O problema da incerteza do TDC devido ao ruído tem sido analisado minuciosamente em situações de baixa relação S/R. Se é usado um limiar de amplitude fixo e um pulso com “leading edge” linear é aplicado, a variação RMS de TDC medido segundo WILLEY (1993) é dada por:

$$\delta_T = \frac{t_R}{0.8\sqrt{S/R}} \quad \text{para } S/R \gg 1, \text{ onde} \quad \text{EQ 2.7}$$

δ_T = Variação RMS do TDC medido

t_R = tempo de subida do pulso a partir dos pontos de 10% a 90% no “leading edge” do pulso de vídeo.

Observa-se que a inclinação do “leading edge” de um pulso de amplitude A é $0,8 A/T_R$. O fator 0,8 é requerido desde que o tempo de subida T_R seja medido a partir do ponto de 10% até o ponto de 90%.

A relação S/R a ser usada na EQ 2.7 é aquela na saída do receptor e depende do detector utilizado.

A medida do intervalo de repetição de pulso de um radar é a diferença entre os tempos de chegada de dois pulsos consecutivos (para radares de IRP fixa).

Para dois pulsos de chegada, tem-se um desvio (“jitter”):

$$\delta^2 IRP = \delta_2^2 + \delta_1^2$$

onde: δ_1 e δ_2 são o desvio de cada pulso.

$$\delta IRP = \sqrt{2} \frac{t_R}{0.8\sqrt{S/R}}, \quad \text{para } S/R \gg 1 \quad \text{EQ 2.8}$$

Por exemplo: para um “rise time” máximo de 200ns e uma relação sinal ruído de 30db tem-se um desvio rms de 10ns da PRI. Os sistemas MAGE usam receptores com relação sinal ruído acima de 60dB onde o desvio é insignificante.

A FIG. 2.11 ilustra a variação da IRP devido ao ruído em termo da relação S/R .

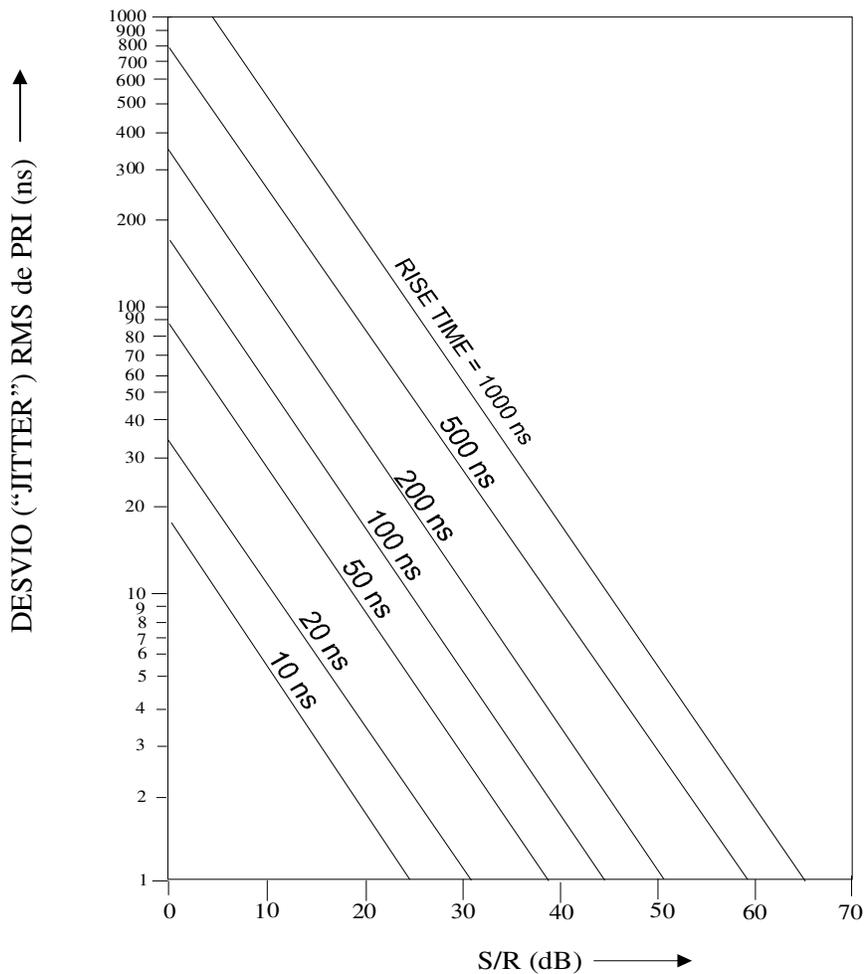


FIG. 2.11 - Variação da IRP devido ao ruído em termos da relação S/R.

2.4 - TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO DE PULSOS

Os algoritmos de separação das emissões radar podem ser classificados em duas classes principais:

- algoritmos que separam os pulsos em células ('pigeon holes');e
- algoritmos que separam os pulsos em fatias de tempo ("time slice").

O primeiro método fornece um meio altamente eficiente de redução de dados quando é possível a medida exata de alguns parâmetros do pulso. O número de passos necessários ao

processamento final de cada pulso é grande, uma vez que cada pulso de chegada é comparado com os parâmetros de cada célula ativa.

O segundo método é usado quando é impossível obter-se uma medida confiável da marcação e frequência do pulso. O número de passos necessários no processamento de cada pulso é reduzido uma vez que os parâmetros de cada pulso são comparados apenas com os parâmetros de outros pulsos na mesma fatia de tempo. Uma combinação dos dois algoritmos pode ser utilizada.

2.4.1 – TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO POR CÉLULAS

O algoritmo de separação por células conta com uma combinação simples dos parâmetros medidos para fornecer resolução suficiente entre emissores separados. A técnica de separação por células usa parâmetros monopulso medidos para separar o trem de pulso que chega no receptor. Os parâmetros usados inicialmente para este propósito são a marcação e a frequência, podendo-se também usar a largura de pulso com tolerâncias adequadas.

(MARDIA, 1987)

O processador cria uma célula para cada trem de pulsos com uma combinação diferente dos parâmetros monopulso. Obviamente, o tamanho mínimo de cada célula determina a habilidade do sistema em classificar emissores com parâmetros medidos similares, sendo ela própria determinada pela precisão do sistema de medidas. Entretanto, o tamanho ótimo da célula é, geralmente, determinado por variações aleatórias ou sistemáticas dos parâmetros do pulso fora do sistema receptor (reflexões, “jitter” natural). Depois do processo inicial de separação, cada célula conterà uma lista de tempos de chegada e amplitudes de todos os pulsos que tenham marcação, frequência e LP similares.

Emissões de radares de frequência fixa podem ser divididas em varias células devido a variações aleatórias ou sistemáticas nos parâmetros do emissor. Isto pode ser evitado escolhendo-se cuidadosamente as tolerâncias para a combinação dos parâmetros.

O “Deinterleaving” por meio de célula oferece um método simples e efetivo na separação dos pulsos de um mesmo emissor e na redução de dados, especialmente quando predominarem emissores de frequência fixa.

O agrupamento por células deve incorporar as medidas dos parâmetros do pulso no mínimo em duas dimensões (frequência x ADC ou frequência x LP) se a taxa de corrupção

de dados for baixa. Uma representação do histograma de vários radares com medidas de F e LP é mostrado na FIG. 2.12.

Uma amostra de N pulsos com parâmetros medidos x, y e z pode ser descrita como um conjunto de sub-grupos:

$$\{\text{pulsos}\} = \sum_{i=1}^n (x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=1}^m \{S_j\} \quad \text{EQ 2.9}$$

Onde S é um sub-grupo da amostra contendo pulsos dentro do valor esperado de variação de cada parâmetro:

$$\{S_j\} = \left\{ \sum_{i=1}^n (|x_i - x_j| < E(x), |y_i - y_j| < E(y), |z_i - z_j| < E(z)) \right\} \quad \text{EQ 2.10}$$

As medidas são digitalizadas e esta quantização leva a um espaço composto de células “secundárias” com dimensões da resolução das medidas. Dentro de uma dada amostra de tempo, qualquer uma dessas células secundárias irá conter um número de pulsos. Um emissor, mesmo estável, irá formar um certo número de células secundárias, dependendo da quantidade da medida. Se o erro de medição é menor que o nível de quantização, então em n dimensões, até 2ⁿ células secundárias adjacentes serão ativadas devido a quantização do resultado (ex: 4 células secundárias em 2 dimensões) . A FIG. 2.13 mostra o agrupamento de pulsos em cada célula.

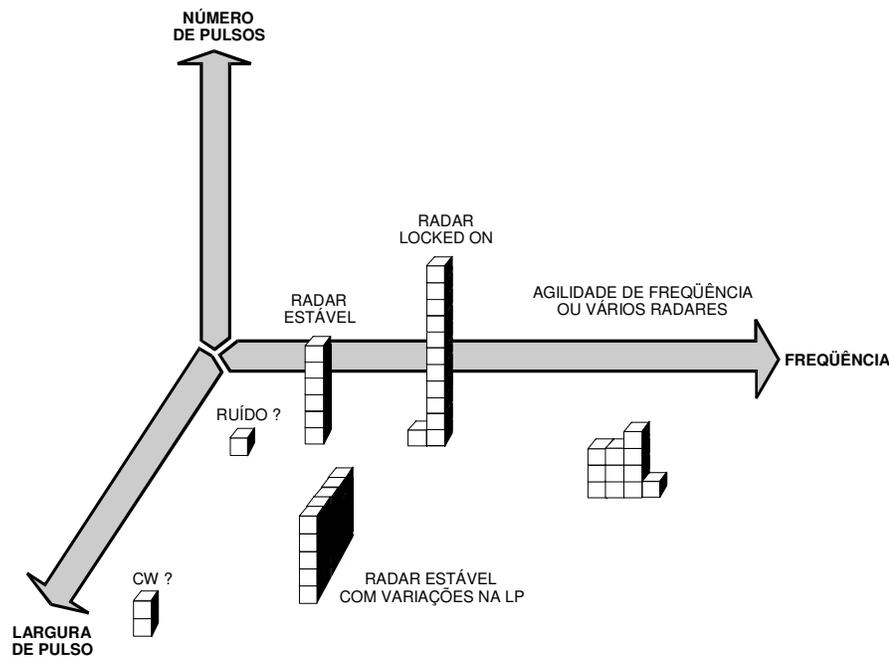


FIG. 2.12 – Histograma de duas dimensões (F e LP)

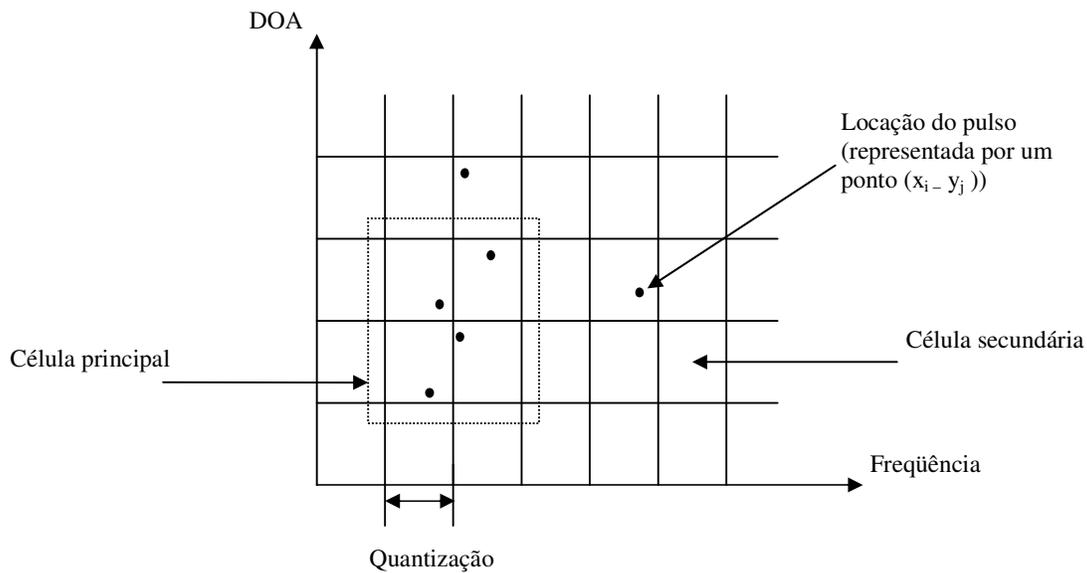


FIG. 2.13 – Agrupamento de pulsos

2.4.2 – TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO POR FATIAS DE TEMPO

A seleção por fatia de tempo ("Time Slice") toma uma amostra de pulsos e procura dentro dessa amostra pulsos similares a fim de formar uma seqüência. O tamanho da amostra inicialmente definido pode ser aumentado sucessivamente, dentro de certos limites, para permitir que todos os pulsos sejam selecionados

Na análise de um ambiente eletromagnético denso, assume-se que a chegada dos pulsos, por ser embaralhada, aleatória e composta de eventos independentes, segue a distribuição de Poisson.

Considere um processo de Poisson onde ocorram pulsos numa taxa de λ pulsos por segundo em um intervalo de tempo τ . A probabilidade de que n pulsos ocorram é dada por:

$$P(n) = (\lambda\tau)^n e^{-\lambda\tau} / n! .$$

O valor esperado do número de pulsos em um intervalo de tempo τ é proporcional ao comprimento do intervalo e é dado por $E(n) = \lambda\tau$.

A função densidade de probabilidade da variável de tempo x que mede o intervalo interno entre um ponto qualquer entre dois pulsos e o próximo pulso é exponencialmente distribuída, sendo dada por $p(x) = \lambda e^{-\lambda x}$.

(PAPOULIS, 1991 SCHLEHER, 1986)

Na análise e processamento dos sinais recebidos, dois tipos de situação podem ser modelados. A primeira situação consiste de um receptor que só pode processar o pulso que chega τ segundos após o pulsos anterior, que pode ou não ter sido processado. Esse processamento é efetuado com um “contador paralisável” com tempo morto ("dead-time") constante.

A segunda situação consiste de um receptor de alta fidelidade que reproduz os trens de pulsos seguidos de um processador de sinal com tempo de processamento τ . Isto faz com que determinados pulsos sejam ignorados enquanto o processador de sinal estiver processando o pulso anterior. Este processo é realizado por um "contador não-paralisável".

A distinção entre o primeiro e o segundo modelo é que o primeiro estende o período em que o sistema permanece bloqueado, mesmo que o pulso seja ou não processado, enquanto o segundo somente bloqueia quando o pulso é processado.

Considere o modelo do contador paralisável. A probabilidade de que um pulso seja contado é a probabilidade de que seu tempo de ocorrência com relação ao pulso anterior exceda o tempo de bloqueio τ . Uma vez que o tempo de ocorrência com relação ao pulso anterior possui uma função densidade exponencial (ex: $p(x) = \lambda e^{-\lambda x}$), a probabilidade é calculada integrando-se τ a ∞ . A probabilidade resultante é dada por $P(\text{contagem}) = e^{-\lambda\tau}$. Observe que está é também a probabilidade de não ocorrência de pulsos no intervalo bloqueado ($P(n=0) = e^{-\lambda\tau}$). A taxa na qual os pulsos são processados é $R_p = \lambda e^{-\lambda\tau}$, enquanto que o tempo esperado entre dois pulsos processados sucessivamente é $E(t_n) = e^{\lambda\tau} / \lambda$.

O tempo esperando entre pulsos processados sucessivamente para o caso mais genético do contador não-paralisável é dado por $E(Y_n + V_n)$, onde: Y_n = tempo de bloqueio aleatório (ou constante); e V_n = tempo entre o fim do intervalo de bloqueio e o próximo pulso processado sucessivamente. Uma vez que os pulsos que chegam obedecem a distribuição de Poisson, Y_n e V_n são independentes e V_n é distribuído exponencialmente ($p_{v_n}(x) = \lambda e^{-\lambda x}$). O tempo esperado entre pulsos processados sucessivamente torna-se então $E(t_n) = E(Y_n) + 1/\lambda$, o qual, para um tempo de bloqueio constante τ , torna-se $E(t_n) = (1 + \lambda\tau)/\lambda$. A taxa resultante para o processamento dos pulsos torna-se $R_{np} = \lambda(1 + \lambda\tau)$.

Na TAB. 1 tem-se um cenário onde pulsos são recebidos numa taxa de pulsos de $\lambda = 50.10^3 \text{ pps}$. Nota-se que para pequenos valores do parâmetro $\lambda\tau$, o número de pulso processados. Considerando o modelo do contador paralísável se aproxima do número de pulsos processados quando se considera o modelo do contador não-paralísável.

Como exemplo, considere uma distribuição de Poisson com uma taxa dada por $\lambda \approx 0,05 \text{Mpps}$, (compatível com o cenário escolhido) e com um intervalo de bloqueio $\tau=200\text{ns}$.

Usando-se a expressão da taxa de pulsos processados pelo modelo paralísável ($R_p = \lambda e^{-\lambda\tau}$) obtém-se o valor 49.502pps. Usando-se a expressão da taxa de pulso processados pelo modelo não-paralísável ($R_{np} = \lambda/(1 + \lambda\tau)$), obtém-se o valor 49.504 pps.

Portanto, tanto o modelo paralísável quanto o não-paralísável fornecem taxas de pulsos processados praticamente idênticas para o cenário em questão.

A FIG. 2.14 mostra a taxa de pulsos processados para os dois processadores: $\lambda\tau \leq 0.1$.

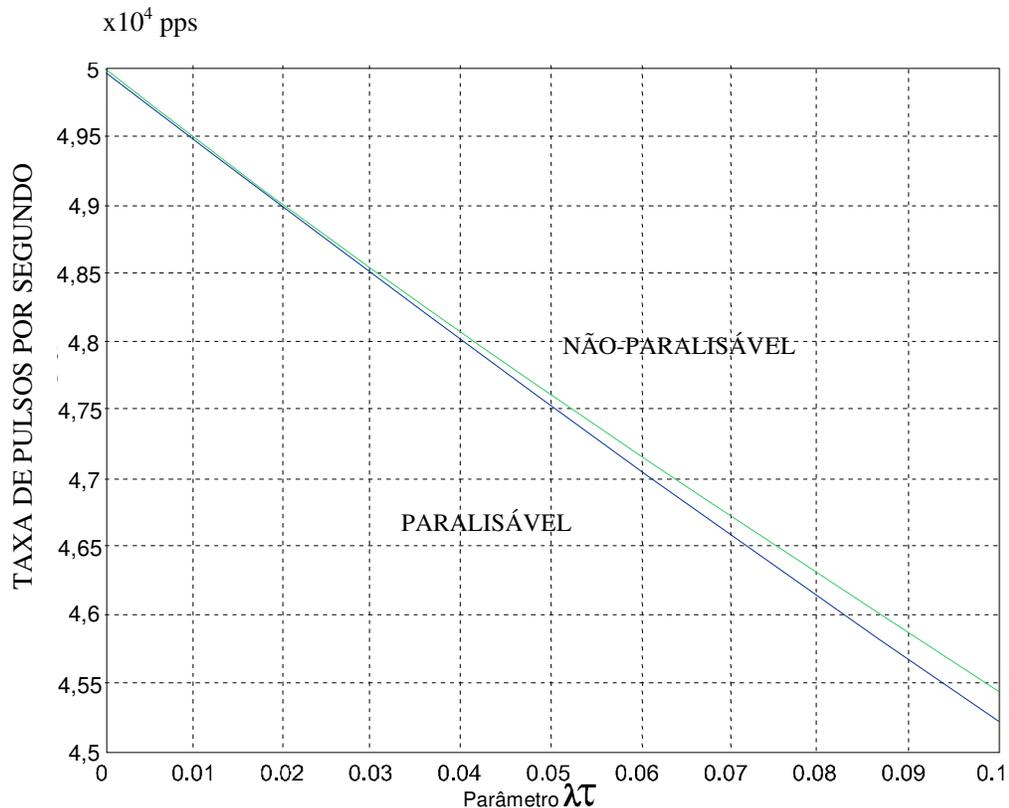


FIG. 2.14 – Taxa de Processamento do Receptor

TAB 2.1 - PULSOS PROCESSADOS EM FUNÇÃO DA JANELA DE BLOQUEIO

Valor Parâmetro	Taxa de processamento	
	Processador paralisável	Processador não paralisável
$\lambda\tau$		
0,25	38.940	40.000
0,5	38.327	33.333
1	18.394	25.000
2	6.767	16.667

LEGENDA:

 $\lambda = 5.10^{-4}$ pps (taxa de pulsos de chegada) τ (janela de bloqueio)

2.4.3-TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO UTILIZANDO A COMBINAÇÃO DOS ALGORITMOS POR CÉLULAS E POR FATIAS DE TEMPO

Na separação de pulsos por células para se fazer uso máximo da informação disponível, todos os parâmetros do pulso devem ser examinados de modo a associar cadeias de dados com emissores isolados. O número de operações de comparação necessárias para esse processo num ambiente denso é alto. Um método para reduzir a carga de processamento é dividir o trem de pulsos de chegada em fatias de tempo. Isto permite o processamento de uma fatia de tempo enquanto que a próxima está sendo coletada, e a quantidade de memória necessária para armazenar medidas anteriores dos parâmetros do pulso é limitada pelo comprimento da fatia de tempo.

Na FIG 2.15 tem-se a arquitetura de um receptor que utiliza a combinação dos dois processos: células e fatias de tempo na separação de pulsos.

O primeiro processador emprega uma técnica de "células" flexíveis e adaptativas de modo a prover uma rápida separação de pulsos similares em grupos(GP's). A separação em grupos de pulso com parâmetros similares é efetuada usando-se o ADC, a FREQ e a LP. Cada grupo pode conter vários radares.

O segundo processador separa os pulsos dentro de cada grupo de acordo com a IRP, a qual resulta da diferença entre dois tempos de chegada. Para cada IRP constante são

encontradas cadeias de pulsos que são registradas e abandonadas reduzindo a taxa de processamento. As IRP não identificadas são separadas e podem ser separadas utilizando-se técnicas mais tolerantes na escolha das IRP e combinação de parâmetros.

Trens de pulsos com agilidade de frequência e de IRP utilizam essas técnicas. Isto é feito com o processador fazendo várias passagens pela fatia de tempo, usando cada vez

O primeiro processo separa em grupo os pulsos com parâmetros similares usando, ADC, FREQ e LP. O segundo processo separa os pulsos, dentro de cada grupo, de acordo com o IRP, o qual resulta do TDC entre os pulsos.

Em alguns sistemas o ADC e a frequência não são suficientes para desembaralhar os emissores. Isto pode ocorrer, por exemplo, com emissores com agilidade em frequência. Além disso, para sistemas de baixa resolução, pode existir um número de emissores distintos que recaia em células parcialmente sobrepostas, devido ao tamanho excessivo da célula observada.

As ambigüidades resultantes devem ser resolvidas em uma etapa adicional de separação. Essa etapa pode ser realizada usando-se um parâmetro primário adicional, como a LP, ou um parâmetro derivado como a IRP, parâmetros esses determinados na primeira etapa do processo. A separação e a classificação tornam-se tridimensional. Um processo tridimensional é visto na FIG. 2.16.

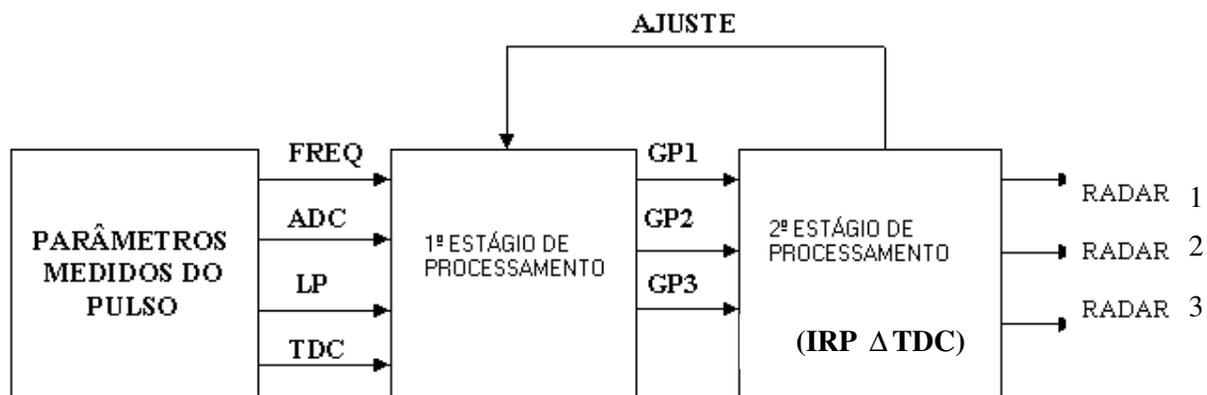


FIGURA 2.15 – Arquitetura do Receptor

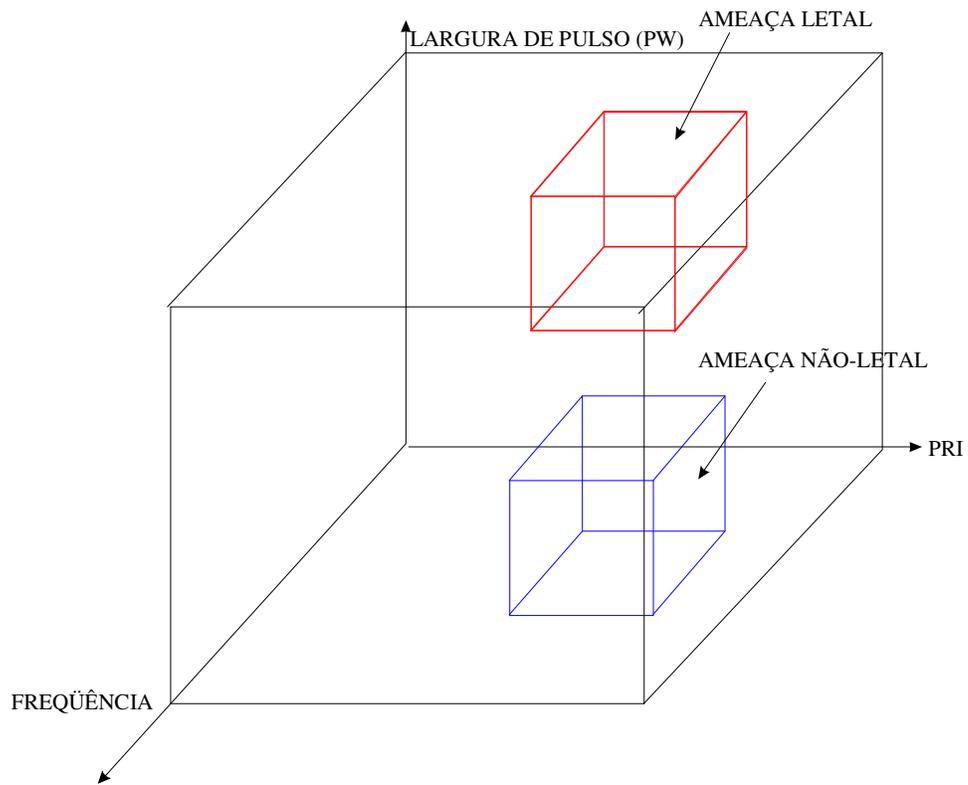


FIG. 2.16 – Separação Tridimensional

3 - PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR INTERVALO DE REPETIÇÃO DE PULSOS

Neste capítulo são apresentadas as técnicas de separação de pulsos radar levando apenas em consideração os Intervalos de Repetição de Pulsos ("Interval – Only Algorithms").

3.1 - INTRODUÇÃO

Genericamente, os processos de separação por diferença de Tempo de Chegada (TDC) são tratados como processos de separação por intervalo de repetição de pulsos. Cada radar pode ser caracterizado por um padrão de Intervalos de Repetição de Pulso (IRP) que se repete a partir de um tempo de chegada do primeiro pulso. No caso mais simples, a IRP é constante e os pulsos são separados por um intervalo de tempo fixo.

A IRP é obtida pela diferença dos TDC dos pulsos de um mesmo grupo.

A IRP pode ser do tipo "staggered", onde várias IRPs formam uma moldura que se repete, ou "jittered", onde a IRP varia em torno de um valor nominal. Os sinais radar "Jittered" têm pulsos separados por um intervalo com uma variação que pode ser randômica por exemplo. Os radares "Staggered" têm uma fatia de tempo contendo vários intervalos diferentes e esta fatia de tempo é repetida continuamente.

(WILLEY, 1993)

As técnicas propostas extraem seqüências de IRP estáveis que são utilizadas para analisar IRP "staggered", IRP "jittered" e a varredura dos sinais radar, variando-se o intervalo de repetição de pulsos.

A determinação da IRP é essencial para separar os pulsos de um dado radar, para conseqüente classificação, identificação e utilização em ações de Contra-Medidas Eletrônicas (CME).

Uma mostra de pulsos para IRP é separada em um grupo de pulsos cujas diferenças de TDC são similares. Este grupo pode conter somente um radar ou vários radares misturados. O tempo de chegada é medido a partir do "leading edge" de cada pulso e é representado como uma palavra digital. O algoritmo de "deinterleaving" realiza computações aritméticas numa amostra suficientemente grande de modo que os padrões de sinal fiquem aparentes.

Um radar de IRP constante I , tempo de partida ("start") t_s e largura de pulso W é representado pela função:

$$f(t) = A \quad \text{quando } t_s + a.I < t < t_s + W + a.I \quad \text{onde } a = \text{inteiro positivo}$$

$$= 0 \quad \text{fora do intervalo} \quad \text{EQ 3.1}$$

No processamento em questão, somente a informação de TDC é necessária (a amplitude e a LP são descartadas). Então, o sinal pode ser representado como uma série de impulsos:

$$s(t) = \sum \delta(t - t_s - aI) \quad \text{EQ 3.2}$$

Para trabalhar-se com a representação de um sinal sob a forma de impulsos é necessário digitalizá-lo.

O intervalo de amostra k ("Sampling Interval - s.i.") é definido como a resolução da medida do TDC e o comprimento da amostra é definido como N intervalos de amostragem. Assim, k é um fator de escala entre os valores inteiros armazenados e o tempo real em segundos. O TDC de cada pulso pode ser representado por uma função delta, ou seja, valor 1 no intervalo de amostragem apropriado e zero nos outros intervalos. Ver FIG. 3.1

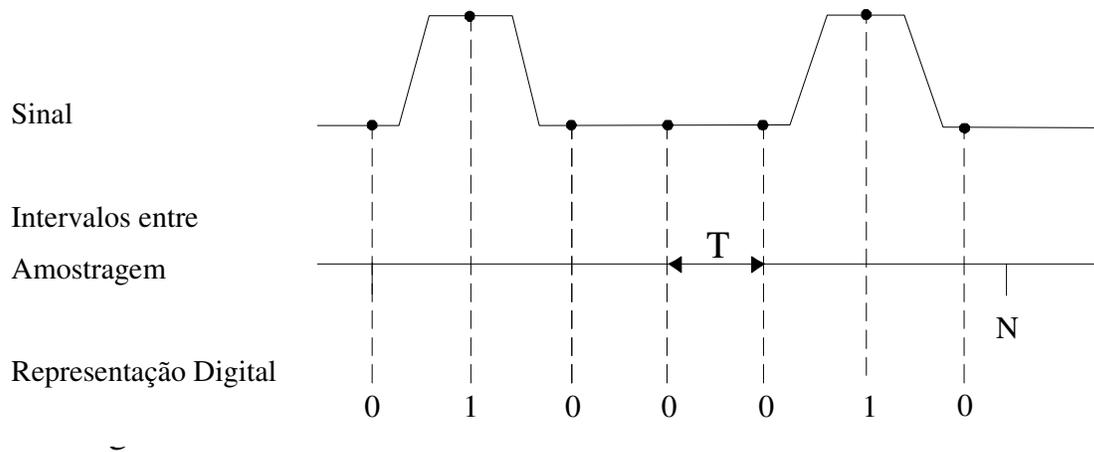


FIG. 3.1 – Trem de Pulsos Amostrado

Cada TDC é medido como um múltiplo inteiro do intervalo de amostragem. Desta forma, a iésima seqüência s_i de um trem de pulsos estável com uma IRP $m_i(s.i)$, um tempo de "start" de $q_i(s.i)$ e $n_i(s.i)$ pulsos na amostra pode ser escrita como:

$$S_i = \sum_{r=0}^N s_i(r.k) \quad \text{EQ 3.3}$$

$$\text{onde } s_i(r.k) = 1 \quad \text{quando } r = a \cdot m_i + q_i \quad \text{para: } 0 \leq a \leq \text{int}\left(\frac{N - q_i}{m_i}\right) = N_i$$

$$s_i(r.k) = 0 \quad \text{em qualquer outro caso}$$

onde a, m, q são números inteiros positivos

A amostra de pulsos a ser classificada consiste de uma série de sinais embaralhados. Na coincidência de eventos, somente um é indicado, então a amostra resultante P é o "OU" lógico das x seqüências individuais e é representada pela função que pode ser escrita como:

$$P = \sum_i^x S_i \quad \text{EQ 3.4}$$

$$\sum_{r=0}^N [s1(r.k), s2(r.k), \dots, sx(r.k)] \quad \text{EQ 3.5}$$

$$\sum_{r=0}^{r=0} p(r.k) \quad \text{EQ 3.6}$$

Desse modo, o algoritmo de separação analisa a amostra e tenta extrair as seqüências individuais.

3.2 – HISTOGRAMA DE DIFERENÇAS

3.2.1 – HISTOGRAMA DE TODAS AS DIFERENÇAS DE TEMPO DE CHEGADA (TDif)

A técnica de separação por IRP mais simples é o Histograma de Diferença de TDC. O histograma é formado subtraindo-se o TDC de cada pulso de todos os pulsos subseqüentes e contando-se o número de pulsos em cada valor de diferença de TDC.

A aplicação desta técnica a uma seqüência de IRP constante faz com que o histograma apresente um pico no intervalo de repetição e nos múltiplos inteiros de IRP. O nível de confiança é determinado pelo comprimento da amostra, ou seja, quanto maior o número de amostras, maior a precisão do histograma. O tempo de processamento cresce proporcionalmente com o quadrado do número de pulsos amostrados. O número de computações é da ordem de $\sum_{i=1}^P i = P^2 / 2$, onde P é o número de pulsos.

Embora uma contagem seja dada no IRP correto, quando estão presentes vários sinais, as contagens também ocorrem em múltiplos, somas e diferença de todas as IRPs, fornecendo alguns resultados ambíguos.

Na FIG. 3.2, pode-se observar o sinal da IRP e o Histograma Diferença de um sinal simples. Nessa figura são representadas 2 seqüências estáveis de IRP de valor I e o

histograma de contagens não nulas em múltiplos de I e em somas e diferenças x com múltiplos de I.

Cada seqüência estável de IRP é identificada pela contagem correta em cada múltiplo da IRP. Deve ser definido um nível de limiar ("threshold") o qual a seqüência é dita estar presente. Para alguns autores a seqüência é considerada presente acima deste nível. Isto permitirá recuperar pulsos perdidos e identificar pulsos interferentes. Se as contagens harmônicas de IRP são menores que o limiar, então o IRP é somente um subintervalo e não forma uma seqüência.

O Histograma Diferença é uma autocorrelação da amostra com o sinal aplicando-se neste um retardo de d(si) na EQ 3.6.

$$Y(d) = \sum_{r=0}^N p(rk) p\{(r-d)k\} \quad \text{EQ 3.7}$$

Assim, para cada retardo, ou seja, para cada célula no histograma, uma contagem é encontrada quando:

$$q_i + km_i = q_j + lm_j + d, \text{ onde:} \quad \text{EQ 3.8}$$

k, l e d são números inteiros e i, j = 1 a x

Desse modo, na IRP do iésimo radar uma contagem mínima de n_i pulsos é encontrada:

$$n_i = ((N - q_i) / m_i) - 1 \text{ quando: } d = m_i; \text{ e } m_i = m_j, q_i = q_j \quad \text{EQ 3.9}$$

A detecção falsa de harmônicos desta IRP pode ser vista quando a EQ 3.8 é satisfeita para $d = h \cdot m_i$:

$$\text{contagem} = (N - q_i) / (h \cdot m_i) - 1 = (n_i/h) - 1 \quad \text{EQ 3.10}$$

O histograma destrói a informação no domínio do tempo, e por isso não identifica os pulsos que formam as seqüências. Porém isto pode ser devidamente levado em conta se o processamento guardar informações de cada um dos pulsos ao fazer cada uma das diferenças. Este aspecto não é do escopo do presente trabalho.

Entretanto, à medida que a densidade de pulsos, aumenta a contagem varia e os limiares de decisão tornam-se críticos. Este método é eficiente quando poucos pulsos são processados com poucos radares, obtendo-se uma resposta rápida. Examinando-se o histograma, pode-se resolver IRPs ágeis ou vários sinais com a mesma IRP. Entretanto, o histograma sozinho não é suficiente quando os dados se tornam corrompidos e quando uma taxa de falso alarme se torna inaceitável.

3.2.2 – HISTOGRAMA DE DIFERENÇAS SUCESSIVAS

Para minimizar os harmônicos e os termos soma e diferença que aparecem no histograma de todas as diferenças, foi desenvolvido um método que remove os termos de PRF mais alta, isto é, de menor PRI. A eficiência é maior, uma vez que não há necessidade de se calcular todas as diferenças entre pulsos de uma amostra, já que as diferenças de ordem superior tendem a ser causadas por harmônicos. Isto pode ser alcançado por um método de diferença sucessiva (DifSu), oposto ao mencionado anteriormente. O algoritmo primeiro gera um histograma de diferenças entre somente os pulsos adjacentes. Esta é a primeira diferença. A contagem em cada intervalo de pulso é comparada com um valor de limiar. Se o radar é detectado, então os seus pulsos podem ser apagados e o algoritmo é reiniciado. Se nenhum radar for detectado, a segunda diferença, isto é, a diferença de TDC entre cada pulso e o próximo não adjacente é calculada e o nível diferença aumenta até ocorrer detecção ou até que os pulsos acabem. Na Fig. 3.3 são representados dois, radares, onde o primeiro identifica a seqüência com a primeira diferença e o segundo com a segunda diferença. Este método da diferença baseia-se na distribuição de probabilidade de pulsos de “interferência” entre os pulsos radar requeridos. Quando existir alta proporção de pulsos separados por z pulsos de interferência, irá aparecer uma alta contagem no $(z + 1)$ ésimio nível diferença.

(MILOJEVIC, 1992)

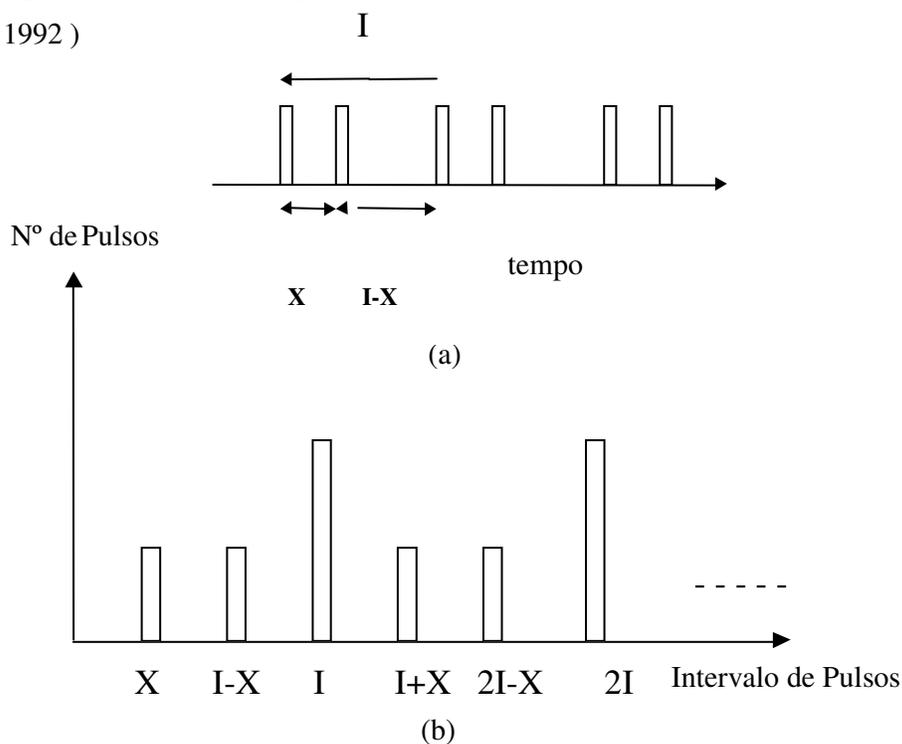
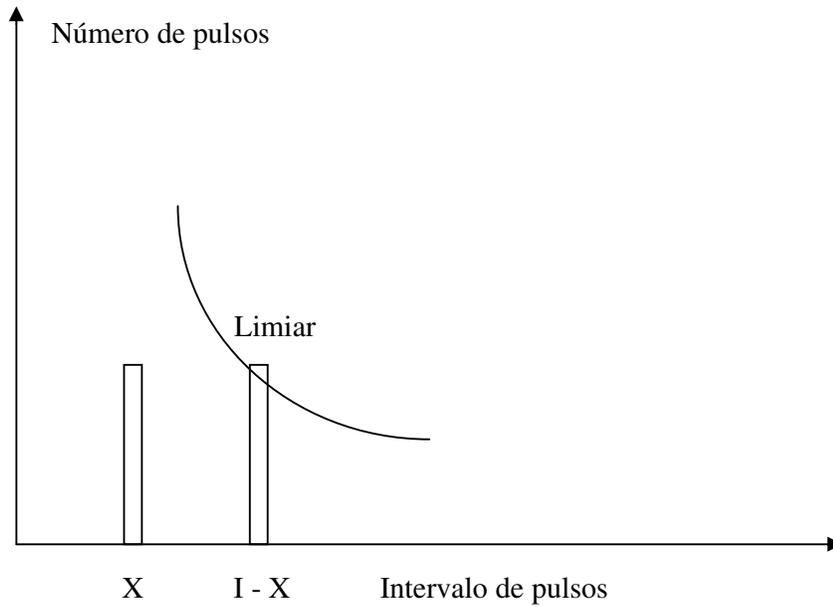
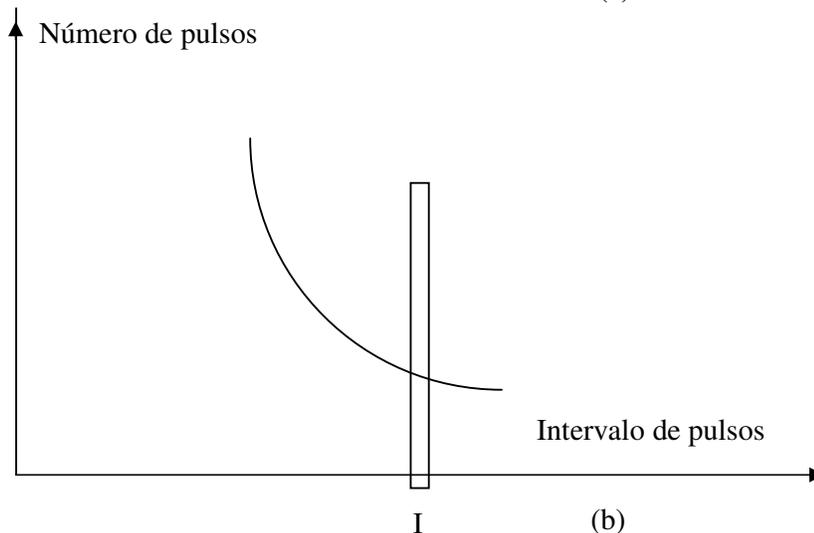


FIG. 3.2 – Histograma de todas as diferenças ilustrando (a) Sinal original e (b) todas as diferenças.

Esta contagem pode ser menor que o número total de intervalos de pulso daquele radar. Um trem de pulsos de PRI I tem $\frac{N}{I}$ pulsos, onde N é o tempo da amostra. A probabilidade de um pulso de interferência cair num intervalo particular é: $p = \frac{I}{N}$. Considerando y pulsos aleatórios de interferência, então o número médio de pulsos em cada intervalo é: $\mu = \frac{y \cdot I}{N}$ e o desvio padrão de acordo com o teorema binomial: $\sigma = \sqrt{yp(1-p)} \approx \sqrt{\mu}$; se $p \ll 1$.



(a)



(b)

FIG 3.3 – Histogramas de diferenças sucessivas: (a) Primeira diferença, (b) Segunda diferença.

O pico da contagem é detectado no número médio de pulsos de interferência. Entretanto, o pico torna-se maior e a contagem cai para os intervalos diferença com o aumento da densidade de pulso.

Este algoritmo pode ser ilustrado exemplificando 2 radares com a mesma PRI de intervalos de amostra I. O tempo de início dos 2 radares é diferente por $T_{s.i.}$ (FIG. 3.1). Desse modo, a primeira diferença gera duas contagens: uma em T e outra em (I - T). O valor dessas contagens sem pulsos perdidos será $\left(\frac{N}{I-T}\right)$. Agora, o valor de limiar é outra vez crítico. Um valor típico seria $\frac{N}{2I}$. Assim, dependendo do valor de T (ou seja, dos tempos de início) um ou dois falsos alarmes ocorrem. Se a segunda diferença é examinada, então uma contagem de $\frac{2N}{I}$ é medida somente no intervalo I. Isto fornece uma resposta clara de 2 radares com intervalo I.

Se existirem p pulsos e x trens de pulsos então o número de computações é da ordem de x.p.

Este método pode ser mais eficiente do que o algoritmo de todas as diferenças (TDif), uma vez que o nível diferença é somente tão grande quanto o necessário e pode ser facilmente recalculado depois que pulsos são removidos da amostra. As saídas espúrias são muito reduzidas. Entretanto, o limiar para detecção é mais difícil de determinar.

3.2.3 - HISTOGRAMA DE DIFERENÇA CUMULATIVA

O histograma de diferença cumulativa (DifCum) compila um nível de cada vez como o DifSu, mas acumula cada nível diferença até que seja excedido um limiar. Desse modo, é tomado somente o nível diferença ótimo. Tem como primeira proposta a indicação das prováveis IRP por TDC. Para minimizar as indicações falsas, os menores intervalos devem ser examinados primeiro.

(MARDIA, 1989)

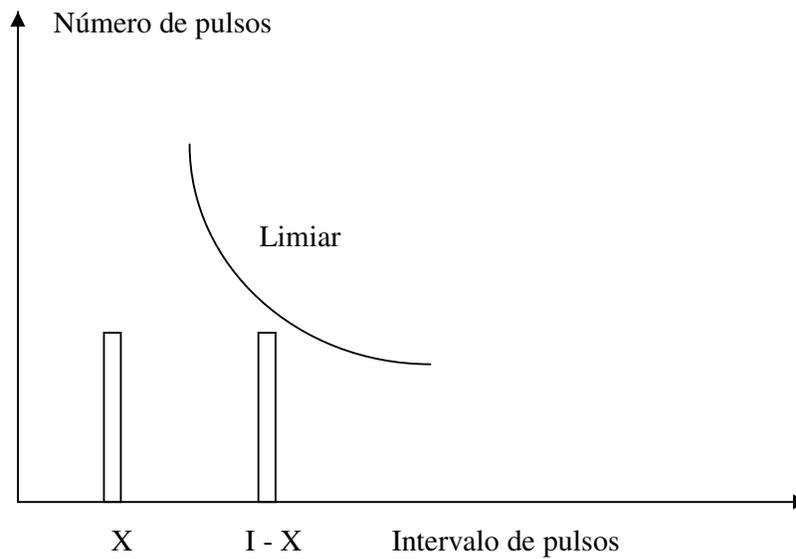
Inicialmente, o que se tem é um histograma de eventos de TDC somente entre eventos adjacentes. A contagem em cada intervalo, e em cada dobro de intervalo, é comparada a um limiar. Se ambas as contagens excedem o limiar, realiza-se uma busca de seqüência na IRP. Se uma seqüência não é identificada, a segunda diferença, isto é, a diferença de TDC entre cada evento e o próximo mais 1 (um) é calculada e a contagem é acumulada. O nível

diferença vai sofrendo acréscimo de mais 1 (um) até ocorrer a classificação de uma seqüência provável (Ver FIG. 3.4).

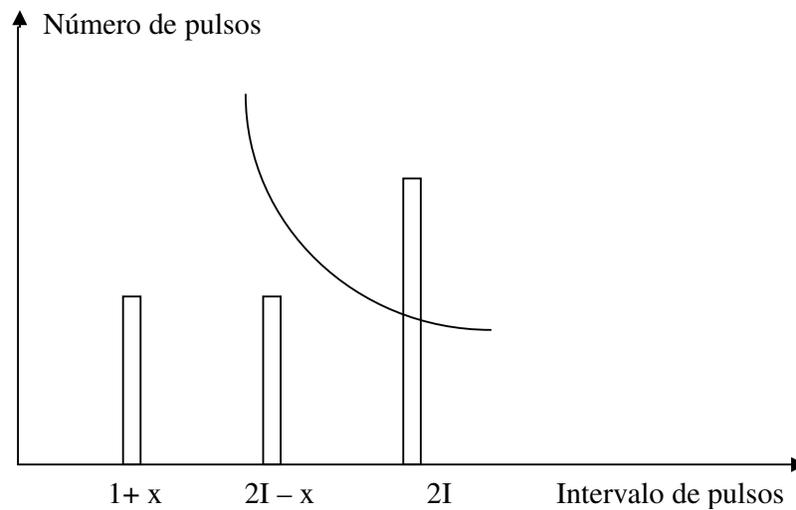
Quando uma seqüência é identificada, os pulsos são removidos da amostra e o histograma é reiniciado, simplificando assim o processamento subsequente.

O número de computação para x níveis de diferença do histograma é da ordem

$$\sum_{i=E-x}^E i \approx [E^2 - (E-x)^2]2 \quad \text{EQ 3.11}$$



(a)



(b)

FIG. 3.4 - Histogramas de diferenças cumulativas: (a) Primeira diferença, (b) Primeira + Segunda diferença.

3.3 – ALGORITMOS DE BUSCA

3.3.1 - ALGORITMO DE BUSCA DE SEQUÊNCIA

O algoritmo de busca de seqüência (Bseq) procura pulsos com PRIs e pontos de início desconhecidos e os extrai da amostra. Para associar os pulsos com uma seqüência, deve-se encontrar a PRI e a fase. O histograma não usa informação seqüencial. O Algoritmo de Busca de Seqüência usa esta informação dando tolerância maior para pulsos de interferência e rejeição de intermodulações, isso às custas de maior processamento.

(MARDIA, 1987 MILOJEVIC, 1992)

Se todos os possíveis intervalos de pulsos em todos os diferentes pontos de início (“start”) são gerados e comparados com os dados da amostra, pode-se casar esses sinais na amostra. O sinal postulado é:

$$S_e = \sum_{r=0}^N S_e(r.k) \quad \text{onde este sinal pode ser multiplicado com a amostra, } p(t) \text{ (EQ 3.6) e}$$

integrado para fornecer a função correlação: EQ 3.12

$$\int_0^T S_e(t).p(t)dt = \sum_{r=0}^N [S_e(rk).(S_1(rk) + S_2(rk)...)] \quad \text{EQ 3.13}$$

Isto produz uma contagem de pulsos igual ao número de soluções para:

$$q_e + jm_e = q_i + km_i \quad \text{para } i = 1 \text{ a } x \quad \text{EQ 3.14}$$

j, k inteiros positivos

Isto posto, a contagem máxima é n_e quando todos os TDCs no trem postulado existirem na amostra.

Considere que a PRI dos sinais possa ser de 1 a N, assim numa PRI de I tem-se N/I pulsos a serem correlatados e o número de computações numa busca para todas as seqüências possíveis é da ordem de:

$$N. \frac{N}{I}. I = N^2$$

Entretanto, se um sinal postulado tem uma PRI que é um múltiplo inteiro de uma PRI que existe dentro da amostra, isto é,

$$q_e = q_i \quad \text{e} \quad m_e = h . m_i \quad \text{h} = 2,3,4....$$

então a equação (3.14) é resolvida por $j = \frac{K}{h}$

A contagem e a seqüência esperadas são encontradas nesse sub-harmônico, ocorrendo detecção de IRP incorretas.

Desse modo, a busca deve iniciar a partir do menor intervalo para prevenir casamentos com sub-harmônicos do sinal. Além disso, a seqüência de pulso detectada deve ser apagada. Num ambiente denso, os pulsos irão se perder das seqüências e por isso deve-se estabelecer um limiar no segundo pulso, terceiro pulso, etc. Quando um trem de pulsos é encontrado, a seqüência de pulsos é apagada para simplificar o “deinterleaving” mais adiante.

Este algoritmo tem a vantagem de buscar somente valores de PRI dentro da amostra. Porém, muitas buscas sem sucesso irão ocorrer, especialmente para determinar a contagem que constitui uma seqüência. Existe também a probabilidade finita de um conjunto randômico de trens de pulsos produzirem um outro trem de pulso aparente.

A Busca irá encontrar sinais com PRIs que são múltiplos inteiros do intervalo de amostra (isto é $m = j.k$). Entretanto, considere o caso onde a PRI é $(I + 0,5)$ S.i (“Sampling Interval”). Os pulsos sucessivos são separados por I , $(I + 1)$, $I...$ e assim por diante. Assim, um casamento deve ser permitido com uma ou outra das 2 posições na amostra, em I ou $(I + 1)$. Entretanto, esse possível erro aumenta com o tempo e o limite do erro torna-se maior, isto é, após vários intervalos uma seqüência a partir de um sinal com PRI de I é bem separada de um sinal com PRI de $(I + 0,5)$.

Agora, as PRIs e fases reais na amostra serão um pequeno sub-conjunto com todas as combinações possíveis. Por isso, a busca deve ser limitada para as fases e PRIs possíveis na amostra.

Uma solução é antecipar a posição do próximo pulso baseado na projeção de uma seqüência curta encontrada na amostra, e calcular a PRI média na seqüência. Como a seqüência é alongada, a PRI pode ser calculada com maior precisão.

Num algoritmo desse tipo, o intervalo entre o primeiro par de pulsos é tomado e as posições dos pulsos subseqüentes são calculadas usando-se este intervalo e checadas na amostra. Como pode haver perdas de pulsos, a projeção é levada em frente até que seja encontrado o próximo pulso. O limite do erro aumenta, e a probabilidade de um casamento incorreto aumenta.

Se não for encontrado casamento suficiente, o intervalo entre o primeiro e o terceiro pulso é calculado e projetado, e assim por diante. Este processo é repetido se vários trens de pulsos ou pulsos de interferência estiverem presentes. A eficiência desta técnica é criticamente dependente da escolha do par de pulsos.

Considere um conjunto de P pulsos aleatórios (onde $P \ll N$) não contendo nenhuma seqüência de pulsos estável. O número de computações requeridas para determinar esta condição é da ordem de:

$$\sum_{i=1}^P i + \sum_{i=1}^{P-1} i + \dots + \sum_{i=1}^2 i = \sum_{i=1}^P i^2 = \frac{P^3}{3}$$

Este método tem a desvantagem de requerer muitas computações se o pulso de início arbitrário escolhido num erro, ou onde estão presentes muitas PRIs, uma vez que toda PRI dentro da amostra pode ser buscada, projetada e correlatada. A projeção da PRI a partir de um único intervalo medido pode levar a uma divergência da PRI real, devido a erros de medição. Isto irá prevenir detecção mesmo se a tolerância do jitter for permitida. Assim, é necessário uma técnica mais robusta.

3.3.2 – ALGORITMO DE BUSCA PONDERADA

As técnicas de busca já mencionadas operam num par de pulsos e extrapolam uma seqüência a partir do par de pulsos. Onde existir um grande número de pulsos, este processo pode ser repetido várias vezes antes de ser encontrada uma correlação significativa, especialmente no caso de radar “staggered”, onde ocorrem vários pares de pulsos sem seqüência (Ver a FIG. 3.5).

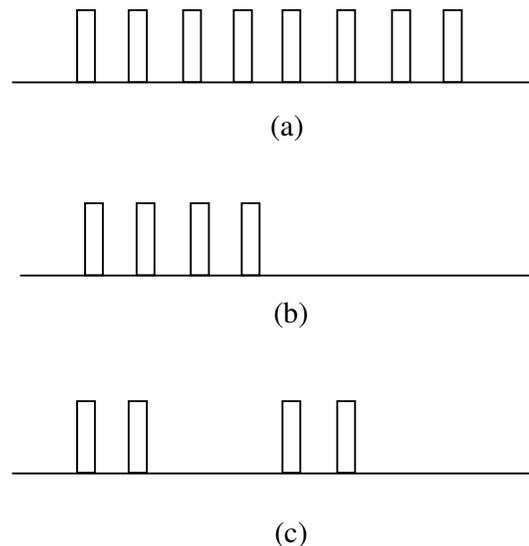


FIG. 3.5 – Seqüências de Pulsos (a) Seqüência, (b) Amostra B, (c) Amostra C

O número de iterações sucessivas pode ser reduzido substancialmente selecionando-se uma seqüência mais longa para iniciar a Busca. Em densidades altas de pulso, uma seqüência longa não corrompida pode não ocorrer. Por isso, qualquer uma de 2 seqüências que contenham 3 pulsos é escolhida. Como referência, a FIG. 3.6 exemplifica a extração de uma seqüência de pulsos a partir dos sinais das FIG. 3.5 (a) e FIG. 3.5 (c).

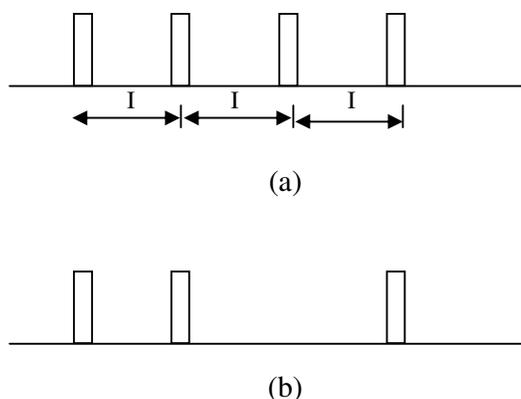


FIG. 3.6 – Seqüências Iniciais extraídas dos sinais da figura 3.4 (a) e (c), respectivamente.

Isto irá rejeitar sub-intervalos de um radar “staggered” ou pares de pulsos randômicos, reduzindo, dessa forma, o tempo de processamento e também prover uma IRP mais precisa para projeção (média sobre a seqüência).

Uma avaliação do encaixe de uma seqüência de pulsos com vários pulsos perdidos é necessária para determinar os limiares de decisão e o nível de confiança. Por exemplo, considere os dois trens de pulsos (b) e (c) na FIG. 3.5. Ambos os trens têm o mesmo número de pulsos se enquadrando no trem de pulso ideal (a). Entretanto, pode ser visto que a seqüência não interrompida (b) é o enquadramento mais provável para a seqüência (a) do que a seqüência quebrada (c). Além disso, a amostra (c) pode se encaixar melhor com um tipo diferente de sinal, por exemplo, uma IRP “staggered”.

Desse modo, é necessário pesar (“ponderar”) o comprimento da seqüência de pulsos tal que uma seqüência de pulsos produza uma contagem maior do que duas seqüências com metade do comprimento. O limiar de decisão deve discriminar entre um trem de pulso aparente causado por superposição de vários trens de pulsos e um trem de pulso real com

pulsos perdidos. O limiar depende da densidade de pulso. A função peso deve tornar a decisão mais confiável.

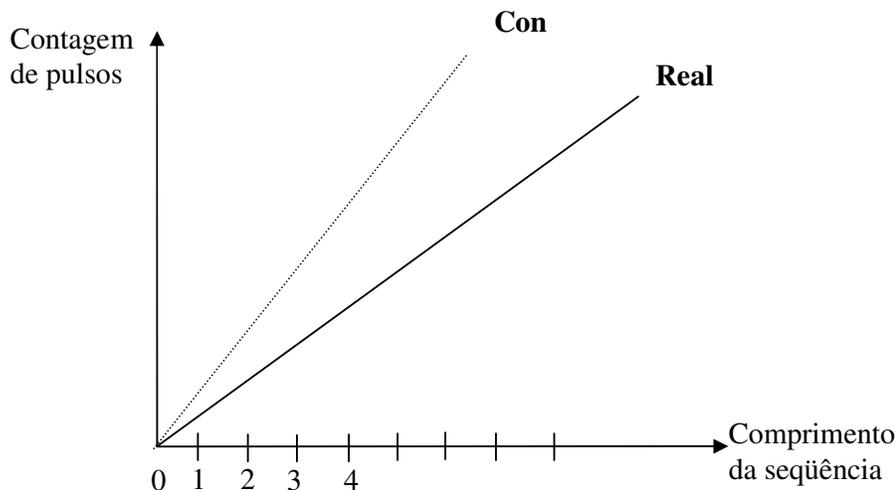


FIG. 3.7 – Função Peso

Uma função peso alternativa que intensifica as seqüências é baseada na probabilidade de ocorrer uma seqüência não interrompida de y pulsos. Se a densidade de pulso média é R pulsos por intervalo de amostra e a PRI é I (s.i), então a probabilidade de uma seqüência de y intervalos ser encontrada é:

$$P(y) = \left(1 - \frac{1}{I}\right)^{Rly} \approx (1 - R)^y \quad \text{se } I \gg 1 \text{ e } R < 1$$

Assim, para cada seqüência de pulsos, este fator alternativo é somado à contagem. Isto intensifica a detecção de seqüências em densidades altas de pulsos.

Quando vários radares estão presentes, o número de pulsos sobrepostos pode tornar-se alto. Sob estas condições, o apagamento de cadeias de pulsos detetadas pode deixar um pequeno resíduo de pulsos mesmo quando cadeias mais longas de IRP continuam existindo e poucos pulsos da seqüência permanecem. Tem sido examinado o método de Lógica Nebulosa.

Quando uma seqüência é detetada, o número de pulsos na seqüência é contado. Quando esta contagem (com peso) é maior que o limiar, os pulsos constituintes não são removidos mas é dado a eles um fator de peso menor. Assim, os pulsos que podem ter sido sobrepostos permanecem disponíveis para detectar radares com IRP mais longas.

Os pulsos nebulosos representam um bloqueio para um outro pulso devido ao tempo morto de medição ou sobreposição da largura do pulso. Esta característica pode ser usada para melhorar o processamento em ambientes de alta densidade, detectando sobreposição de pulso e erros de medição.

3.4 - SEPARAÇÃO DE PULSOS UTILIZANDO HISTOGRAMAS E TÉCNICAS DE BUSCA DE SEQUÊNCIA ("TWO – PASS")

Os métodos de histograma por diferença de IRP separam rapidamente as IRPs. Por outro lado, geram falso alarme e, à exceção do histograma TDif, não identificam todas as seqüências de pulso. As técnicas de Busca de Seqüências são muito precisas, mas relativamente lentas. O método “two pass” combina as vantagens das 2 técnicas, fornecendo um método eficiente de classificação (“sorting”) com alto nível de confiança.

O histograma determina rapidamente os valores prováveis de IRP dentro da amostra. A busca de seqüência provê validação e apagamento das IRP indicadas. Isto é análogo ao que o operador do MAGE faz: quando estima a posição do pulso por inspeção e logo segue com uma análise mais detalhada.

Neste capítulo foram estudados todos os métodos de “deinterleaving” que utilizam as diferenças dos tempos de chegada dos pulsos. A conclusão que se chegou é que todos os processos , a exceção do que utiliza todas as diferenças de TDC, necessitam de uma etapa adicional de processamento (busca, geração da IRP média ,apagamento, etc.).

No próximo capítulo será proposto um algoritmo que utiliza somente todas as diferenças de tempos de chegada para o “deinterleaving” dos pulsos radar.

4 - PROPOSTA DE ALGORITMO DE TODAS AS DIFERENÇAS PARA O “DEINTERLEAVING” DE PULSOS RADAR

No capítulo anterior, foram apresentados os métodos de “deinterleaving” que utilizam as diferenças dos tempos de chegada dos pulsos.

Neste capítulo os métodos “ Interval Only” foram submetidos inicialmente a uma matriz de decisão cujos resultados são apresentados na TAB 4.1, que permitiu a escolha do processo de todas as diferenças (TDIF) . Será proposto a seguir um algoritmo para o “deinterleaving” de sinais radar, com o propósito maior de alerta radar para um cenário de atuação de um sistema MAGE. Serão efetuadas simulações e testes para o cenário proposto usando-se o MATLAB e, finalmente, será proposta uma arquitetura para prover alarme antecipado utilizando o método escolhido.

A diferença de todos os tempos de chegada dos pulsos radar será a base do sistema. Os resultados serão analisados através da observação e cálculos dos histogramas respectivos.

TAB. 4.1 – Matriz de Decisão

Requisitos	TDIF	DIFSU	DIFCUM	BSEQ
Quantidade de parâmetros	3	3	3	1
Densidade de Pulsos	3	3	2	1
No. e características dos emissores	3	3	3	3
Capacidade classificação (limiar)	2	1	3	3
Tempo de resposta	3	1	2	1
Esforço computacional	3	2	1	1
Disponibilidade de Informações (MAGE da MB)	3	3	3	3
Simplicidade	3	2	2	1
Resultado	23	18	19	14

Legenda: 1 (pouco adequado); 2 (adequado); 3 (muito adequado)

4.1 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DE HISTOGRAMAS NO ALGORITMO

Um histograma é obtido dividindo-se a faixa do parâmetro esperado em intervalos (chamados "bins") e contando-se o número de ocorrências do valor do parâmetro dentro de cada bin. Para um processo aleatório, à medida que o tamanho do bin se aproxima de zero e o número de amostras se aproxima de infinito, o histograma se aproxima da curva de Distribuição da Probabilidade do processo.

Quando o numero de amostras é muito grande mas o tamanho do bin é fixo, o nível do histograma num bin particular é proporcional à integral da função densidade de probabilidade ao longo do tamanho do parâmetro incluído naquele bin. Existe um compromisso entre a quantidade de dados disponíveis e o tamanho do bin.

Se o bin é muito pequeno, então o numero médio de ocorrências por bin será muito baixo e o histograma terá grande número de bins vazios entremeados com bins com uma ou duas contagens. Por outro lado, se o bin é muito grande, todas as amostras de dados caem dentro de um ou dois bins e mais uma vez o analista não consegue visualizar a forma da distribuição de probabilidade.

A situação usual requerer a geração de vários histogramas com diferentes tamanhos de bins. O analista então decide qual o tamanho de bin mais apropriado para a qualidade e quantidade de dados disponíveis.

O histograma de todas as diferenças pode ser mostrado como sendo igual a integral sobre cada bin do histograma da autocorrelação de uma função que consiste de impulsos localizados nos TDC dos pulsos. Se os tempos de chegada são denotados por t_n , esta função é:

$$f(t) = \sum \delta(t - t_n) \quad \text{EQ 4.1}$$

onde $\delta(t)$ é o impulso unitário

A autocorrelação de $f(t)$ é

$$\begin{aligned} h(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) f(t-\tau) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sum_n \delta(t - t_n) \right) \left(\sum_k \delta(t - t_k - \tau) \right) dt \end{aligned} \quad \text{EQ 4.2}$$

O integrando da EQ 4.2 assume um valor somente se $t - t_n = 0$ e $t - t_k - \tau = 0$ simultaneamente. Isto ocorre quando $t_n = t_k + \tau$. Assim,

$$h(\tau) = \sum_n \sum_k \delta(t_n - t_k - \tau) \quad \text{EQ 4.3}$$

A integral de $h(\tau)$ de τ_1 a τ_2 é:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} h(\tau) d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sum_n \sum_k \delta(t_n - t_k - \tau) d\tau \quad \text{EQ 4.4}$$

O integrando da EQ 4.4 tem um valor para quaisquer pares de tempos de chegada tal que

$$\tau_1 < t_n - t_k < \tau_2 \quad \text{EQ 4.5}$$

Dessa forma, uma contagem do número de pares de pulsos tal que seus tempos de chegada sejam separados por um intervalo entre τ_1 e τ_2 é igual à integral da função autocorrelação $h(\tau)$ sobre a mesma faixa de valores de retardo.

No histograma, o intervalo entre τ_1 e τ_2 é o tamanho do bin (resolução) no intervalo diferença e o número de ocorrências corresponde ao número de vezes que esse intervalo ocorreu naquela diferença.

A maior complexidade, além da escolha do bin, está na determinação dos critérios que permitam a escolha de um limiar de ocorrências que venha permitir a determinação das IRP prováveis entre todas as diferenças que ocorrem no histograma. Estes aspectos serão tratados oportunamente, no contexto do cenário de interesse.

4.2 – DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

De forma geral, os algoritmos de “deinterleaving” são baseados na análise de vários parâmetros dos pulsos radar recebidos, tais como o TDC, ADC, Amplitude, LP e RF. O algoritmo apresentado a seguir pertence à família de algoritmos de Intervalos de Repetição de Pulsos. (Interval – Only). Este algoritmo usa apenas a informação de TDC para realizar o “deinterleaving”.

O histograma é obtido considerando-se os intervalos TDC entre todos os pares de pulsos (usualmente é especificado um intervalo máximo). São considerados os intervalos do pulso 1 aos pulsos 2, 3, 4, etc., depois os intervalos do pulso 2 aos pulsos 3, 4, 5, etc.

A diferença calculada entre pulsos adjacentes (distância 1) é chamada de primeira diferença. A diferença calculada entre cada pulso e o próximo não adjacente (distância 2) é chamada segunda diferença e assim por diante até a (N-1) diferença onde N é o número de pulsos de chegada. O número total de intervalos, também chamado de número de diferenças de tempo de chegada, é dado pelo número de pares de pulsos num conjunto de N pulsos a saber:

$$N^{\circ} \text{ DIF TDC} = \frac{N(N-1)}{2} \quad \text{EQ 4.7}$$

Assim, tem-se:

Diferenças	N ^o de ocorrências
Primeira diferença -----	(N - 1)
Segunda diferença -----	(N - 2)
Terceira diferença -----	(N - 3)
-----	-----
(N - 1) diferença -----	(N - diferença)

Como pode ser observado, existem (N - 1) intervalos diferença e até (N - diferença) ocorrências.

Fazendo i o número de ocorrências em cada diferença e J a J-ésima diferença tem-se:

Primeira diferença

$$i = 1 \text{ a } N - 1, \text{ TDC}_{i+1} - \text{TDC}_i$$

Segunda diferença

$$i = 1 \text{ a } N - 2, \text{ TDC}_{i+2} - \text{TDC}_i$$

Terceira diferença

$$i = 1 \text{ a } N - 3, \text{ TDC}_{i+3} - \text{TDC}_i$$

J - ésima diferença

$$i = 1 \text{ a } N - J, \text{ TDC}_{i+j} - \text{TDC}_i$$

Finalmente, tem-se para o algoritmo de todas as diferenças:

$$j = 1 \text{ a } N - 1$$

$$i = 1 \text{ a } N - j$$

A posição das diferenças no Histograma vai depender da resolução, e pode ser implementada da seguinte forma:

$$\text{Diferença} = \text{TDC}_{i+j} - \text{TDC}_i$$

$$\text{Posição} = \text{int}(\text{diferença} / \text{resolução})$$

$$\text{Histograma}(\text{posição}) = \text{Histograma}(\text{posição}) + 1$$

End

O processo de separação dos pulsos requer o estabelecimento de alguns critérios. Como por exemplo o de uma janela de tempo de observação dos pulsos de chegada para análise e

separação dos pulsos. Os pulsos de uma mesma seqüência se repetem (IRP constante) a intervalos de tempo constantes e o número de pulsos que se terá na janela de observação será o número inteiro de vezes que a IRP de cada radar couber na janela mais um.

Obtido o Histograma de todas as diferenças, alguns cuidados devem ser tomados para a obtenção da melhor solução. A escolha do bin (resolução) e a escolha de um limiar para a separação das prováveis IRP são de fundamental importância. A largura do bin ótimo pode ser conseguida pelo analista através de simulações variando a resolução do histograma.

Examinando-se os intervalos entre todos os pares de pulso, encontram-se todas as IRP verdadeiras (e seus harmônicos) e os valores de IRP se acumulam em picos no histograma enquanto que outros pares de pulsos têm intervalos distribuídos entre uma variedade de bins do histograma.

4.3 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

O programa desenvolvido engloba dois processos distintos. O primeiro processo é um simulador de cenário. Este simulador gera 5 valores de IRP aleatoriamente, dentro do intervalo de 100 a 1000 μ s, gerando também um tempo de chegada (T_S) para o primeiro pulso de cada IRP gerada. A saída deste primeiro processo (IRP e respectivo T_S) formam o conjunto de dados de entrada para o segundo processo, o qual é o sistema de “deinterleaving” propriamente dito.

No processo de “deinterleaving” são calculados todas as diferenças entre os tempos de chegada de cada pulso, permitindo a implementação de um histograma de todas as diferenças. (Ver FIG. 4.1).

4.4 – DESCRIÇÃO DO CENÁRIO E IMPLEMENTAÇÃO DO SIMULADOR

O cenário provável de atuação para o sistema de Alerta Antecipado do Sistema MAGE a ser proposto é um teatro de operações em que os emissores radar estão dispostos além do horizonte, isto é, entre 30 e 300 km. O que permite se afirmar que cada radar terá um tempo de chegada entre $t_{\min} = 100\mu$ s e $t_{\max} = 1000\mu$ s após sua emissão. O número de ameaças será considerado como cinco emissores radar.

A “janela” de observação do MAGE tem início aleatório e os radares do cenário se encontram em regime permanente. Os emissores radar podem operar continuamente com intervalos de repetição de pulsos variando entre a $IRP_{\text{mín}}$ de $100\mu\text{s}$ e $IRP_{\text{máx}}$ de $1000\mu\text{s}$.

A janela de observação escolhida tem $3000\mu\text{s}$, necessária para conter vários pulsos dos radares existentes no cenário e no mínimo três pulsos da $IRP_{\text{máx}}$ utilizada. Isto garante para o observador e analista que ele terá para todos os casos, com exceção da $IRP_{\text{máx}}$, mais de três pulsos de chegada, que serão suficientes para o “deinterleaving”, e permitem um alerta radar eficaz.

Em que pese a imposição de um processo de simulação para o cenário estabelecido, a proposta inicial será mais geral e posteriormente será particularizada para o caso em questão.

Resumidamente o simulador atenderá às seguintes condições:

- Definir as variáveis: n.º de radares; janelas; e resolução
- Gerar IRP de $100\mu\text{s}$ a $1000\mu\text{s}$
- Gerar T_s (tempo de chegada) para o primeiro pulso de cada radar.

4.4.1 – IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

O algoritmo proposto deverá atender o caso mais geral e finalmente ao cenário estabelecido e obedecerá as seguintes condições:

- Calcular o número de pulsos contidos na janela para cada radar
- Ordenar todos os pulsos de chegada em um vetor (TDC)
- Calcular o comprimento do vetor
- Calcular todas as diferenças entre os TDC dos pulsos
- Gerar um histograma para todas as diferenças
- Estabelecer curva de limiar que permita a identificação das IRPs prováveis
- Indicar as IRPs prováveis detectadas pelo processo algoritmo

O programa deverá ser implementado de modo a permitir que sejam criadas situações em que alguns desses critérios inicialmente estabelecidos no simulador e algoritmo possam vir a ser modificados para validação e otimização do modelo, por exemplo, os critérios de escolha da melhor resolução, fazer diversas simulações para os mesmos dados “radar” de entrada, etc.

Os teste de simulação e os resultados obtidos serão avaliados nos itens 4.4.3 e 4.4.4.

4.4.2 – CRITÉRIOS DE ESCOLHA DOS IRP PROVÁVEIS

Na apresentação do histograma tem-se todas as diferenças e o número de ocorrências em cada diferença em apresentação cartesiana. Entretanto não se tem a priori o conhecimento em que posições, ou melhor, em quais diferenças estão os radares emissores existentes no cenário estabelecido. Para a determinação dessas posições, que em última análise correspondem às IRP prováveis dos emissores, devem ser estabelecidos alguns critérios iniciais.

Escolhida uma janela de observação e análise, deve-se considerar que a IRP de um radar estará contida na janela tantas vezes quanto for verdadeira a expressão a seguir:

$$\text{Janela} / \text{diferença} = \text{n}^\circ \text{ de ocorrências}$$

Os tempos de chegada dos pulsos podem ocorrer em qualquer ponto da janela. Se eles ocorrem no início, pode-se ter um pulso a mais em cada seqüência. Se eles ocorrerem no final da janela, ter-se-á um pulso a menos. Para resolver este problema de ambigüidade utilizar-se-á para o número de ocorrências:

$$\text{N}^\circ \text{ de ocorr} + 1 \leq \text{janela} / \text{diferença} \leq \text{N}^\circ \text{ de ocorr} - 1$$

Portanto, a escolha dos limiares para a determinação das IRPs prováveis é

1 - dado por $X \cdot Y_1 = K$, onde

X = a diferença dos tempos de chegada

Y_1 = (nº de ocorrências na respectiva diferença - 1)

K é uma constante de proporcionalidade função do tamanho da janela de observação escolhida e da resolução do histograma.

2 - dado por $X \cdot Y_2 = K$ onde X e K são definidos acima e Y_2 = (nº de ocorrências + 1)

A resolução do histograma será estabelecida inicialmente como:

- Resolução = número de diferenças / janela

4.4.3 – SIMULAÇÃO E TESTES

Foram realizados testes utilizando o programa de Simulação sob as mais variadas circunstâncias e os resultados serão apresentados em tabelas que se seguem.

Na FIG. 4.1 tem-se a apresentação de um histograma obtido em uma das simulações realizadas. Observando-se a figura tem-se no eixo das abcissas as diferenças dos tempos de chegada e no eixo das ordenadas o número de ocorrências para cada diferença.

Os critérios na escolha do tamanho do bin (resolução) permitirão a determinação de todas as diferenças com maior precisão.

Na determinação do número de ocorrências em cada diferença deve ser escolhido um limiar ótimo que permita a determinação dos IRP do cenário escolhido.

A FIG. 4.1 mostra o traçado do histograma de todas as diferenças para uma simulação e mostra também o traçado do limiar de detecção das IRP.

Na coincidência dos dois traçados tem-se a determinação das IRP prováveis.

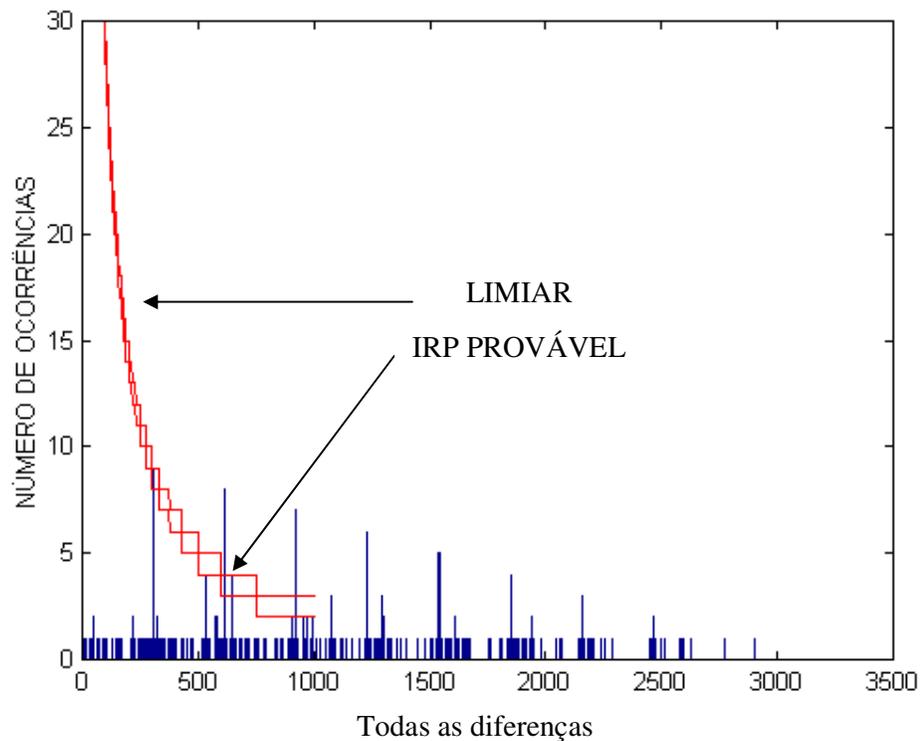


FIG. 4.1 – Histograma de uma simulação

4.4.3.1 – TESTES COM IRPs CONSTANTES COM VARIAÇÃO DO TEMPO DE CHEGADA (Ts)

A TAB 4.2 foi confeccionada simulando-se o modelo sob as seguintes condições: Variando TS, 5 IRPs fixas (955 μ s 308 μ s 646 μ s 537 μ s 902 μ s); Janela fixa, Resolução = 1, Ts com 4 algarismos decimais depois da vírgula e condições de limiar: $\text{fix}(y) + 1 \geq y \leq \text{fix}(y) - 1$.

Observando-se os resultados da TAB4.2 verificou-se que em 50 testes realizados houve um acerto de 80% na identificação de no mínimo de 3 IRP ; acerto de 60% na identificação de no mínimo de 4 IRP; e acerto de 24 % na identificação de todas as IRP.

TAB. 4.2 – Resultado dos testes para intervalo de repetição de pulsos constantes e Ts randômico (quatro casas decimais).

Nº IRP GERADAS	Nº IRP PROVÁVEIS	ACERTO	FALSO ALARME
5	7	5	2
5	6	5	1
5	5	1	4
5	5	3	2
5	2	2	0
5	3	3	0
5	5	4	1
5	8	4	4
5	13	5	8
5	4	3	1
5	5	3	2
5	5	3	2
5	6	4	2
5	11	5	6
5	6	5	1
5	6	4	2
5	7	4	3
5	5	3	2
5	9	4	5
5	7	5	2
5	6	3	3
5	10	5	5
5	4	3	1
5	7	5	2
5	8	4	4
5	6	4	2

5	7	5	2
5	7	4	3
5	8	4	4
5	6	4	2
5	7	5	2
5	5	4	1
5	8	4	4
5	5	4	1
5	8	4	1
5	7	2	5
5	4	3	1
5	7	2	5
5	10	5	5
5	5	4	1
5	7	5	2
5	6	5	1
5	9	4	5
5	5	4	1

A TAB 4.3 foi confeccionada simulando-se o modelo sob as seguinte condições; variando-se Ts (randômico, inteiro), 5 IRPs fixas (os mesmos valores da TAB 4.2), janela fixa = 3000 μ s, resolução = 1 e sob as mesmas condições de limiar da TAB 4.2.

Observando-se os resultados da TAB. 4.3 em 50 testes realizados verificou-se os seguintes resultados: acerto de 82% na identificação de todas as IRP; acerto de 96% na identificação de no mínimo 4 IRP; e 100% na identificação de no mínimo 3 IRP.

TAB. 4.3 – Resultado dos testes para intervalo de repetição de pulsos constantes e Ts randômico (nº inteiro)

Nº IRP GERADAS	Nº IRP PROVÁVEIS	ACERTO	FALSO ALARME
5	5	5	0
5	6	5	1
5	5	5	0
5	7	5	2
5	7	5	2
5	7	5	2
5	6	5	1
5	7	5	2
5	6	3	3
5	6	5	1
5	5	4	1
5	5	5	0

5	7	4	3
5	6	5	1
5	6	4	2
5	7	5	2
5	5	5	0
5	6	5	1
5	7	5	2
5	6	5	1
5	7	5	2
5	8	5	3
5	7	5	2
5	5	4	1
5	5	4	1
5	6	5	1
5	7	5	2
5	5	5	0
5	7	5	2
5	7	5	2
5	4	4	0
5	8	5	3
5	6	5	1
5	7	5	2
5	6	5	1
5	6	5	1
5	5	5	0
5	5	5	0
5	6	5	1
5	5	4	1
5	7	5	2
5	7	5	2
5	5	5	0
5	6	5	1
5	8	5	3
5	5	5	0
5	8	3	5
5	6	5	1
5	6	5	1
5	5	5	0
5	5	5	0

4.4.3.2 – TESTES COM IRPs E Ts RANDÔMICOS

A TAB 4.4 foi confeccionada simulando-se o modelo sob as seguintes condições:
variando-se as IRPs e Ts randomicamente; janela de observação fixa de 3000 μ s, resolução=1;
e condições de limiar : $\text{fix}(y) + 1 \geq y \leq \text{fix}(y) - 1$.

Verificando-se os resultados obtidos na TAB 4.4 observou-se que em 50 testes realizados houve um acerto de 66% na identificação de todas as IRP; um acerto de 86% na identificação de no mínimo de 4 IRP; e acerto de 96% na identificação de no mínimo 3 IRP.

TAB 4.4 – Resultado dos testes para intervalo de repetição de pulsos e TS randômicos.

Nº IRP GERADAS	Nº IRP PROVÁVEIS	ACERTO	FALSO ALARME
5	5	4	1
5	89	4	85
5	17	5	12
5	4	2	2
5	6	5	1
5	6	5	1
5	9	5	4
5	58	0	58
5	6	5	1
5	8	5	3
5	89	3	86
5	19	5	14
5	4	3	1
5	7	5	2
5	8	5	3
5	39	5	34
5	8	5	3
5	5	5	0
5	7	5	2
5	5	5	0
5	14	5	9
5	10	5	5
5	5	5	0
5	6	5	1
5	42	4	38
5	18	5	13
5	18	4	14
5	5	5	0
5	7	5	2
5	7	4	3
5	46	5	41
5	19	3	16

5	51	4	47
5	7	5	2
5	12	5	7
5	13	5	8
5	9	5	4
5	17	5	12
5	11	3	8
5	5	5	0
5	32	4	28
5	36	3	33
5	7	5	2
5	5	4	1
5	13	5	8
5	47	4	43
5	6	5	1
5	12	5	7

4.5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

No cenário estabelecido, tem-se IRPs que variam de 100 μ s a 1000 μ s numa janela de observação de 3000 μ s e cinco radares emitindo. Assim, pode-se afirmar que no máximo ter-se-á na janela um total de 150 pulsos, o que corresponde a uma taxa de 0.05 Mpps.

Consultando a FIG 2.7, que fornece a probabilidade de medidas válidas de TDC, para a abcissa correspondente a 0,05Mpps encontra-se um valor percentual de medidas válidas acima de 98% para um intervalo de medida de até 0,4 μ s. Este valor influenciou decisiva e significativamente na escolha do algoritmo proposto dado que o valor apresentado garante que erros devido à perda das medidas de tempo de chegada por “overlap” são estatisticamente desprezíveis, mormente em se considerando que sistemas de medidas atuais empregam intervalos de medidas bem inferiores a 0,4 μ s (mais realista seria um intervalo de medida da ordem de 0,08 μ s).

Considerando o valor de 0,2 μ s como tempo de recuperação de um receptor MAGE e tempo de bloqueio do processador, tem-se para um taxa de 0,05 Mpps e conseqüente $\lambda\tau \approx 0.01$ um número de pulsos processados igual a 49.500 pulsos por segundo tanto para o processador paralisável como para o processador não-paralisável. Este resultado permite se afirmar que não haverá perdas significativas durante o tempo de recuperação do receptor.

Assim sendo, uma estrutura para implementar o algoritmo proposto poderia utilizar tanto um processador não-paralisável como um processador paralisável, fornecendo mais flexibilidade a uma futura aplicação. Análise dos resultados de diversas simulações (apenas 4 foram apresentadas neste trabalho) mostraram que, na pior das hipóteses, 66% de todas as IRPs, 86% de no mínimo 4 IRPs e 96% de 3 IRPs presentes no cenário foram identificadas corretamente.

No primeiro caso apresentado, devido ao valor fracionário (4 casas decimais) dos parâmetros e ao processo de arredondamento utilizado no algoritmo de simulação, resultados discrepantes das outras simulações foram obtidos (dentro de 50 testes, houve identificação correta de 24% das IRPs, 60% de identificação correta de 4 IRPs e 80% de identificação correta de 3 IRPs). Mesmo assim, um razoável grau de acerto foi obtido.

Como pode ser observado nas TAB 4.1, 4.2 e 4.3, para valores randômicos de TS e IRP, ocorreram perdas de IRP com o conseqüente aparecimento de “falso alarme”, às vezes em grande quantidade em relação ao número de emissores presentes no cenário.

Estima-se que as causas mais prováveis desses resultados atípicos são as seguintes:

- Diferenças menores que a resolução;
- Ts ser um submúltiplo ou múltiplo de alguma IRP. Neste caso, tem-se a geração de diferenças adicionais que mascaram o critério de “limiar”, e IRPs prováveis podem ser perdidas, bem como podem aparecer “falso alarme”.
- IRP submúltipla (ou múltipla de outra). Neste caso, a IRP devido ao batimento de diferenças, altera a contagem de ocorrências saindo, pois da tolerância estabelecida pelo “limiar”.

O batimento entre diferenças ocasionando o aparecimento de “falso alarme” deve ser tolerado no presente processo, o que não se pode perder são as IRPs existentes no cenário estabelecido.

Esses resultados não são preocupantes, tendo em vista que a estrutura proposta objetiva fornecer informações de alerta radar prioritariamente.

Objetivando verificar a influência da resolução no resultado do algoritmo proposto, foram feitas simulações para diversas resoluções num mesmo cenário.

Na FIG 4.2 tem-se a representação gráfica de um resultado do algoritmo para 4 resoluções diferentes. Todas as 5 IRPs foram identificadas e houve a ocorrência de 2 “alarmes falsos”.

Como é de se antecipar, pode-se observar que melhores resultados foram obtidos para os menores valores de resolução. O valor escolhido para o algoritmo “piloto” foi a resolução de $1\mu\text{s}$. Na FIG. 4.3, tem-se a representação gráfica mais detalhada da resolução igual a um, com valores de IRP: 308; 537; 646; 902; e $955\mu\text{s}$.

4.6 - PROPOSTA DE UMA ESTRUTURA ADICIONAL (ADD ON) EM UM SISTEMA MAGE PARA IDENTIFICAÇÃO RÁPIDA DE PLATAFORMAS DE ALTA LETALIDADE

Visando a aplicação do algoritmo escolhido apresenta-se a seguir a proposta de uma estrutura adicional a um MAGE moderno para permitir uma identificação rápida de plataformas de alto poder de destruição com custos adicionais razoáveis. Ver a FIG 4.4 .

A região limitada pelo pontilhado azul representa um sistema MAGE utilizado pela MB, que usa múltiplos parâmetros para o “Deinterleaving”. A análise de PRI como parte de um algoritmo de múltiplos parâmetros é realizada em grupos de pulsos previamente armazenados por ADC, RF, LP ou outros parâmetros.

O processo de separação atua em 2 estágios: o primeiro processador divide cada bloco de pulsos de entrada em grupos de pulso, os quais são então processados sequencialmente e divididos em cadeias de pulsos bidimensionais, normalmente ADC e RF.

O uso de histogramas apresenta o problema de determinar os limites dos grupos de histograma. Uma solução possível é aquela em que o mínimo local dos valores médios do histograma são declarados como limite do grupo.

Assim, pulsos com o mesmo ou similar valor de azimute são separados e armazenados em grupos de azimute. Dentro de cada grupo de azimute, é necessário analisar o próximo parâmetro.

Como resultado da análise de PRI, no segundo estágio, dentro de cada grupo de azimute, pulsos com os mesmos valores ou valores similares de PRI são separados em grupos de PRI. Para melhor classificação dos emissores detectados, a frequência da portadora é tomada como o terceiro parâmetro para o “deinterleaving”, o qual significa que dentro de cada grupo de PRI é formado e analisado um histograma de frequência.

Para radares com frequência fixa, o histograma de frequência irá produzir um único pico significativo.

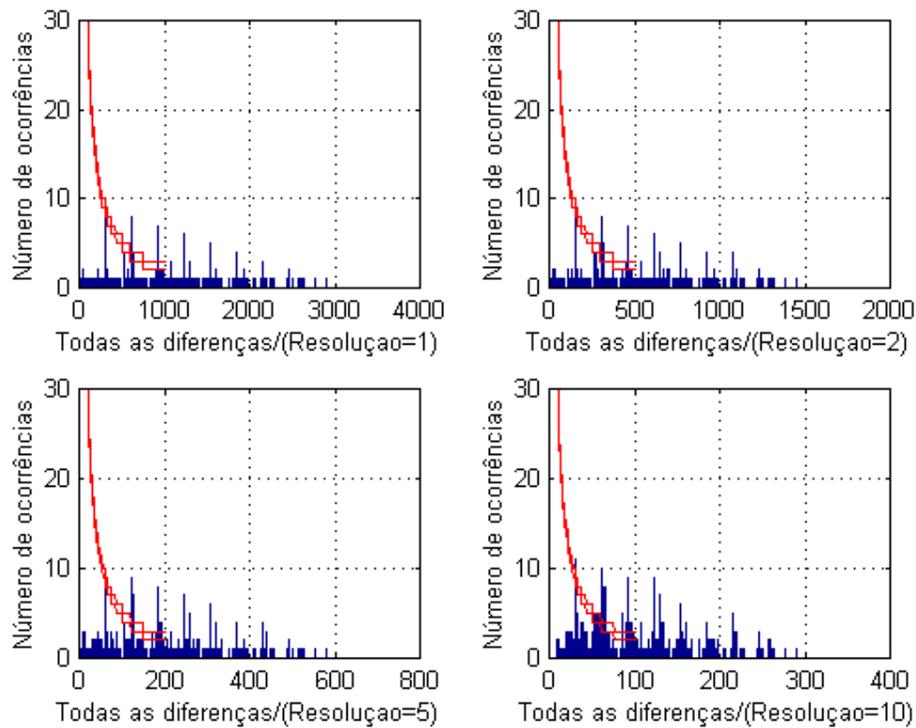


FIG. 4.2 - Histograma de uma simulação para quatro resoluções

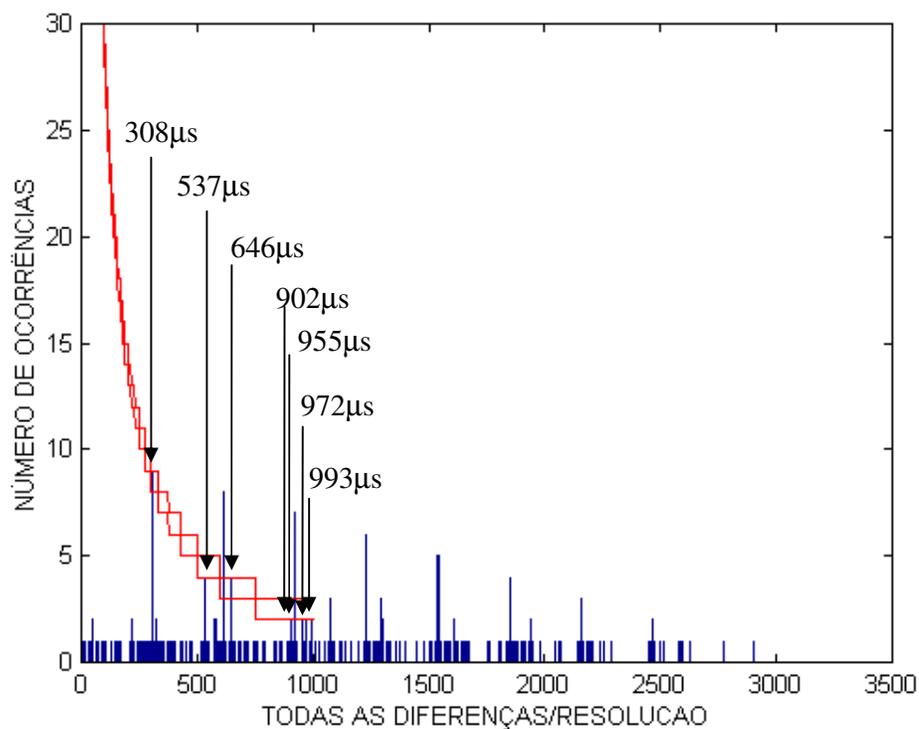


FIG. 4.3 - Histograma de uma simulação para resolução = 1

Entretanto, se vários picos aparecerem no histograma de frequência, poder-se-à concluir que o emissor tem agilidade de frequência. O agrupamento de frequência não é realizado, e o histograma de frequência somente informa se os pulsos de um grupo de PRI pertencem a um radar com agilidade de frequência ou não.

Um grupo de pulsos extraído, caracterizado pelo mesmo valor de azimute, de PRI e de frequência, será assumido corresponder a um único emissor detectado.

Ainda na FIG. 4.4, a região limitada em pelo tracejado vermelho representa uma estrutura “ADD ON” que pode ser utilizada adicionalmente a um MAGE para permitir uma identificação rápida de plataformas de alta letalidade.

Os pulsos são separados utilizando-se apenas o TDC dos pulsos e, em seguida, são classificados em IRPs prováveis. Após a classificação das IRPs prováveis elas são comparadas com uma biblioteca, onde são identificadas as IRPs letais. O alarme é acionado (sonoro e/ou visual) e a plataforma ameaçada guina rapidamente. A identificação rápida da ameaça é a maior vantagem da estrutura proposta.

Uma interface MAGE –“ ADD ON” será utilizada entre o sistema adicional e o MAGE para converter os dados de TDC no formato do sistema de alarme. Calculado o histograma deverá ser apresentado em tela em dois eixos cartesianos . A identificação das IRPs prováveis e uma base de dados de alerta devem ser apresentadas em tela.

As informações do sistema e os dados de entrada e saída devem ser efetuados através de teclas de função.

Enquanto em um MAGE multiparâmetros necessita-se de um tempo (típico) de processamento da ordem de dois segundos (2.000.000 μ s) desde a separação em grupos até a identificação do emissor (possibilidade de alerta com iluminação constante (“lock on”)), tempo esse que pode chegar até 6 s para alguns casos. Na estrutura “ADD ON” proposta, um emissor letal é identificado em 4000 μ s após a chegada do primeiro pulso de chegada. Isto posto tem-se para o MAGE proposto uma vantagem dinâmica da ordem de 2000.000/4000.

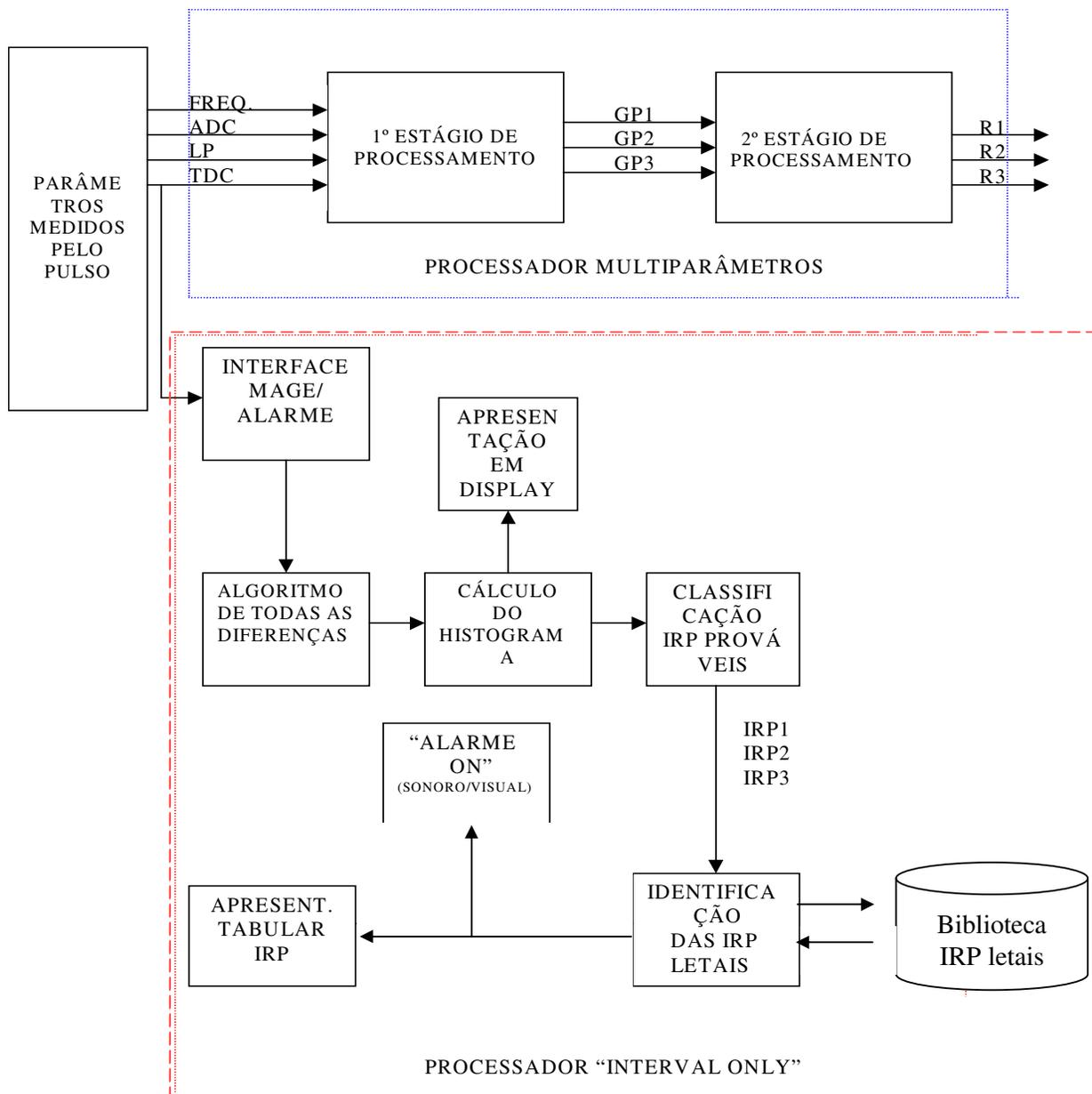


FIG. 4.4 – Estrutura adicional “ADD ON” de Alarme Antecipado

5 - CONCLUSÃO

O presente trabalho tratou com critério os processos de “Deinterleaving” por TDC de pulsos de emissores radar e foi proposto um algoritmo para a separação de pulsos para um cenário estabelecido.

Com este fim, ao longo do trabalho foram detalhados vários aspectos importantes. Foram definidos os sistemas MAGE, seus processos funcionais e as principais técnicas utilizadas no processo de separação de pulsos.

Com relação a estes processos, foram conceituados os principais processos que envolvem as técnicas de “pigeon holes” e “time slice”.

No tocante aos processos de separação que utilizam algoritmos que envolvem o Intervalo de Repetição de Pulsos, foi dada especial ênfase aos processos “Interval Only”.

Neste contexto, foi proposto um algoritmo que emprega todas as diferenças do tempo de chegada dos pulsos radar no processo de separação e identificação dos emissores para o cenário escolhido.

A fim de testar o algoritmo, foi criado um programa em computador, gerado no MATLAB 5.3 e foram estabelecidos critérios de avaliação para a validação do modelo. Foram feitas simulações e testes utilizando o modelo escolhido e os resultados obtidos foram considerados satisfatórios para o que se propõe o trabalho.

Com a finalidade de se operar o modelo na prática, uma estrutura foi proposta compatível com qualquer MAGE, utilizando apenas o TDC dos pulsos de chegada para a identificação de IRPs letais.

Podem-se citar como contribuições básicas do presente trabalho, o estudo detalhado e compilado dos processos de separação de pulsos, a proposta de um algoritmo para o “Deinterleaving” e a proposta de uma estrutura “ADD ON” que pode ser utilizada em qualquer sistema MAGE radar.

Considera-se ainda, o trabalho de alta relevância, tendo em vista que as referências na língua portuguesa são escassas. As informações compiladas foram fruto de pesquisa em várias fontes e a proposta do algoritmo tem aplicação em trabalhos futuros.

O trabalho foi apresentado usando-se apenas uma janela de observação de 3000 μ s. O que se pode fazer futuramente é utilizar duas janelas ou mais de observação e verificar-se a correlação de sinais entre os IRP encontrados, melhorando a confiabilidade dos resultados.

Sugere-se ainda: o estudo de limiares de validação (exemplo, limiares para IRP e múltiplos de IRP simultaneamente); e que o algoritmo seja submetido ao impacto de cenários mais densos, visando a aplicação do subsistema de alarme antecipado “ADD ON” em aeronaves.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DARGAM, Denise. **Tópicos em Medidas de Apoio a Guerra Eletrônica**. Trabalho Técnico – IpqM. 222p. Rio de Janeiro.1993.
- DECCA RADAR LTD., RDL, **Microwave Intercept Equipment** – System Description, vol 1. Surrey: Maio, 1974.
- DECCA RADAR LTD., RDL, **Microwave Intercept Equipment** – Equipment Description, vol 2. Surrey: Maio, 1974.
- DECCA RADAR LTD., RDL, **Microwave Intercept Equipment** – maintenance Information, vol 3. Surrey: Maio, 1974.
- DECCA RADAR LTD., RDL, **Microwave Intercept Equipment** – illustrations for vol 2, Surrey, vol 4. Maio:1974.
- FERREIRA, ILÍDIO F., **Um novo Módulo de Antena para o MAGE RDL**. 2000. 203p. Dissertação de Mestrado - Instituto Militar de Engenharia. 2000.
- FITTS, R.E. **The Strategy of Eletronimagnetic Conflit** – Peninsula Publishing, California, 1980.
- MARDIA,H.K. **New Technics for the Deinterleaving of Repetitive Sequences** - IEE Proceedings F, vol 136, nº 4, August 1989.
- MARDIA, H.K. – **Digital Signal Processing for Radar Recognition in Dense Environments**. 1987. 133p. PhD Thesis - The University of Leeds, England, 1987.
- MILOJEVIC,D.J. E POPOVIC, B. M. **Improved Algorithm for the Deinterleaving of Radar Pulses** - IEE Proceedings F, vol 139, nº 1, February ,1992.
- NERI, F. **Introduction to Electronic defense** - Artech House, Inc. Massachussets, 1991.
- PAPOULIS, A . **Probability Random Variables and Estochastic Process**. McGraw Hill,1991.
- SCHLEHER,D. C., **Introduction to Electronic Warfare**. Artech House, Inc, Massachussets. 1986.
- SKOLNIK, M. I . **Introduction to Radar System**. McGraw Hill. 1962.
- TSUI, J. B. **Microwave Receivers with Electronic Aplications**. Krieger Publishing Company, Florida.1986.

WILEY, R.G. **Electronic Intelligence**: The Analyses of Radar Signals. Artech House, Inc, Massachussets, 1993.

WILEY, R.G. **Electronic Intelligence**: The Interception of Radar Signals. Artech House, Inc, Massachussets, 1993.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO 1 - SISTEMA MAGE RDL

7.1.1 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

O MAGE RDL é um equipamento disponível para emprego em navios ou em instalações de base costeira que fornece informações de marcação verdadeira, frequência, largura de pulso (PW) e frequência de repetição do pulso (PRF) de transmissões radar nas bandas S, C e X. Além da supressão das próprias transmissões radar, o equipamento tem capacidade de rejeição de outras transmissões amigas.

O projeto do equipamento é modular, uma característica que permite outras incorporações ao sistema (como gravadores de dados auxiliares) e facilidade de manutenção.

O RDL é composto das seguintes unidades:

- a) Aerial Unit
- b) Masthead Unit
- c) Bearing Display Unit (BDU)
- d) Analyser Display Unit (ADU)
- e) Control Unit
- f) Band Separation Unit (BSU)
- g) Pre-pulse Mixer Unit
- h) Power Unit
- i) Power Unit 2
- j) Power Unit 3
- l) Automatic Pulse Analyser (APA)

A marcação (direção) de um sinal recebido é mostrada como um traço radial em um tubo de raios catódicos (CRT) da Bearing Display Unit (BDU) que tem ao seu redor uma escala iluminada de posição angular. Todos os sinais recebidos podem ser mostrados coincidentemente, independente de sua frequência. Em modos alternativos a BDU pode mostrar sinais em uma banda de frequência em um setor de azimute selecionado, em somente uma frequência ou por alarmes (ameaças) reconhecidos pelo Automatic Pulse Analyser (APA). Durante o período ativo das próprias transmissões radar o display não apresenta sinal.

A frequência da portadora de um sinal recebido é medida e mostrada em um indicador

numérico de 5 (cinco) dígitos da ADU para uma precisão de ± 40 MHz. Também na ADU um tubo de raios catódicos calibrado mostra a frequência e indica a aquisição de um sinal. A ADU pode ser usada para investigar uma única banda de frequência, ou as bandas podem ser varridas seqüencialmente. Quando um sinal é interceptado a varredura pára na sua frequência até o operador atuar em uma chave de reset. Em um modo alternativo a varredura pode parar por um intervalo predeterminado e depois continuar.

Na ADU, através de uma chave de seleção manual, um único tubo de raios catódicos é usado para apresentar a PRF (frequência de repetição de pulso) ou a PW (largura de pulso) de sinais recebidos. Os sinais recebidos dos canais de medidas de marcação ou de frequência são mostrados junto a escalas calibradas separadas para medidas de PRF e PW.

A largura e o intervalo de repetição (PI) de um pulso recebido são analisados e mostrados automaticamente em 2 (dois) indicadores numéricos de 4 (quatro) dígitos no APA. No APA os parâmetros PW e PI de um sinal de ameaça conhecido podem ser armazenados e usados para iniciar um alarme quando os parâmetros do sinal analisado são coincidentes com os parâmetros armazenados.

As saídas de áudio da BDU, ADU e Control Unit fornecem um meio de estimativa da taxa de varredura dos sinais utilizando um cronômetro externo ao equipamento para determinação do intervalo entre cada interceptação de um mesmo sinal radar. A cronometragem do intervalo entre os traços radiais referentes ao mesmo sinal radar apresentados na BDU também pode ser utilizada para esta finalidade.

7.1.2 - PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO MAGE RDL

Os sinais recebidos por cada antena de marcação são distribuídos via um filtro passa banda (2 a 11,2 GHz), um limitador (100 mw para a máxima potência de saída) e daí para o detector a cristal. O conjunto detector que fica dentro do “header amplifier” produz um trem de pulsos positivo que vai ser aplicado a um amplificador de vídeo, cujo sinal de saída é enviado à BDU.

O modo de análise de frequência é usado para determinar a frequência de portadora de sinais interceptados em um setor de azimute selecionado (antena selecionada pela Coaxial Switch).

O diagrama em blocos básico do equipamento é mostrado na FIG 7.1.1

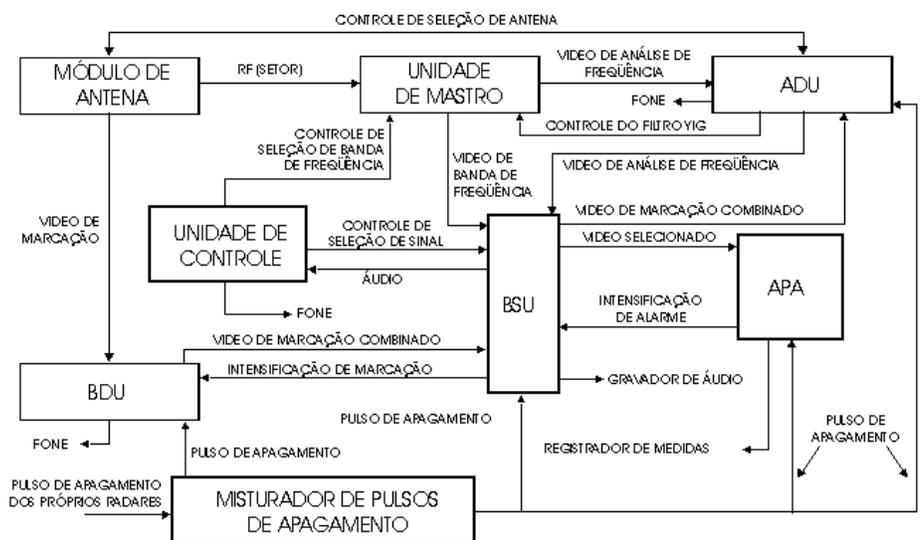


FIG. 7.1.1 – Diagrama em bloco do MAGE RDL

Através de chaves de RF controladas pela Control Unit, o sinal vindo da antena é distribuído para um filtro YIG de rastreamento com dois estágios e entre estes estágios atua o amplificador de RF com TWT. A saída do segundo estágio do YIG é levada via um filtro passa-faixa ao head amplifier (detector+amplificador de vídeo) igual aos utilizados na antena, para que o pulso detectado esteja disponível em uma das duas saídas de vídeo da Masthead Unit para utilização pela ADU.

Os sinais interceptados em um setor de azimuth selecionado podem ser isolados para análise em somente uma banda de frequência específica (S, C ou X), ou não, ao mesmo tempo. Neste modo de operação os sinais não passam pelo filtro YIG de rastreamento e por isso a análise de frequência pela ADU não está disponível. Através das chaves de RF controladas pela Control Unit o sinal pode ser direcionado para os filtros de seleção de banda (triplexer) com as suas saídas chaveadas de acordo com a banda de interesse ou seguir direto para o amplificador de RF com TWT e em seguida para um head amplifier e com isso o sinal detectado fica disponível na outra saída de vídeo da Masthead Unit para que possa ser utilizado pela BSU.

Os sinais interceptados pelas antenas de marcação, detectados e amplificados são enviados

para a BDU que possui os oito canais de entrada necessários para a determinação das direções da origem das emissões. Os pulsos aplicados às entradas da ADU são enviados a um atenuador chaveado que permite ao operador determinar as amplitudes relativas de sinais que estão excedendo a faixa dinâmica da BDU. As saídas da chave atenuadora são aplicadas ao atenuador controlado por tensão usado para garantir que os circuitos do display não são sobrecarregados por transmissores de alta potência próximos, ou durante o período de transmissão dos próprios radares.

A rejeição de transmissões radares amigas pode ser feita em até três frequências diferentes e começa ativando-se, separadamente para cada frequência o circuito de rejeição através da chave Tune no painel frontal da ADU. O sistema de análise de pulso manual é um osciloscópio no qual os sinais de vídeo recebidos pela BDU ou ADU (sistema de análise de frequência) podem ser selecionados pela chave Input Selector para serem mostrados. O combinador de vídeo da BDU envia o sinal à ADU diretamente ou através da BSU, de acordo com a configuração do RDL instalada e a seleção do sinal do sistema de análise de frequência é feita a partir do pulso retirado do estágio de amplificação do circuito amplificador de vídeo, alargador de pulso e detector de limiar. O alargador de pulso tem por finalidade fornecer um pulso alargado padronizado para as medidas de PRF, onde uma série de pulsos recebidos são apresentados no display de acordo com o intervalo entre eles, e então a PRP pode ser verificada. O pulso alargado chega as placas de deflexão Y do CRT que possui dois feixes independentes proporcionando duas escalas de medidas simultâneas para PRF ou PW através de um relé situado no amplificador Y e controlado pela chave Mode de seleção de PRF/PW. O pulso alargado também é utilizado pelo amplificador de áudio para gerar um sinal audível correspondente ao pulso do radar interceptado e que pode ser ouvido através de um fone conectado ao painel frontal da ADU com controle de volume.

As duas varreduras simultâneas para medidas de PRP e PW são na verdade bases de tempo que em conjunto com os sinais recebidos são mostrados na face do CRT para a realização das medidas. A precisão das medidas de PRF e PW é determinada pelas formas de onda de base de tempo e para garantir que a calibração está correta, dois sinais de teste de PW e PRF conhecidas estão inseridos no sistema de análise de pulso manual. Estes sinais de teste são gerados pelo circuito oscilador de frequência de áudio e calibrador a partir de um oscilador controlado a cristal de 80 kHz que após sucessivas divisões gera os sinais com PRF de 5 kHz e 3125 Hz com PW de 1 μ s e 10 μ s respectivamente. O sinal para o teste é selecionado através da chave Calibration que

também atua na chave eletrônica da saída do amplificador logarítmico bloqueando os sinais interceptados e enviando para os circuitos alargador de pulso de vídeo e amplificador de áudio, e amplificador Y, o sinal de calibração selecionado.

Maiores detalhes sobre os princípios de funcionamento do MAGE RDL podem ser obtidos na literatura. (DECCA RADAR, VOL. 1, 2, 3 e 4. 1974)

7.2 ANEXO 2 - TÓPICOS PARA ANÁLISE DE IRP

7.2.1- CONSIDERAÇÕES

Muitas das variações na IRP de um radar são utilizadas para resolver problemas de ambigüidades em distância e/ou velocidade. Outras são usadas para minimizar o tempo gasto em busca ou para evitar os efeitos de alguns tipos de bloqueio (“Jamming”).

É comum se falar da IRP de um radar mesmo quando o intervalo não é repetido. Neste caso, o termo IRP é usado para significar o tempo a partir do tempo de subida (“leading edge”) de um pulso radar até o tempo de subida do próximo pulso radar. Para sistemas radar que usam grupos com vários pulsos proximamente espaçados, o termo IRP se refere do tempo a partir do “leading edge” do primeiro pulso dentro do grupo até o primeiro pulso dentro do próximo grupo. A este tipo de IRP dá-se o nome de intervalo de repetição de grupo de pulsos (“pulse group repetition interval”) (ou PGRI).

Um problema que prejudica a análise de IRP é o número de pulsos perdidos, que faz com que o valor processado seja diferente da IRP verdadeira do Radar, fazendo com que seja necessário a utilização de técnicas e algoritmos de análise bastante robustos.

7.2.2 - CATEGORIAS DE IRP

Existe um número razoável de tipos de IRP. A TAB. 7.2.1 lista as categorias de IRP e para cada uma dessas categorias são enfatizados aspectos diferentes de variações de intervalos de repetição. Conforme indicado na Tabela 7.2.1, cada categoria de IRP está associada com funções radar diferentes.

7.2.3 - IRP CONSTANTE

Um radar tem uma IRP quase constante se as variações da amplitude do pulso forem menores que 1% da IRP média. Tais variações são consideradas casuais de modo que geralmente não são usadas. Se as variações excederem 1% da IRP média, essas variações podem servir para alguma função particular. A FIG. 7.2.1(a) representa uma IRP fixa.

TAB. 7.2.1 – Categorias de IRP

TIPO	FUNÇÃO TÍPICA	COMENTÁRIOS
Constante	Radares de busca ou acompanhamento	Variações tipicamente < 1% do valor médio de IRP. IRP constantes são estáveis e associadas com sistemas Doppler MTI.
Jittered	Reduz o efeito de alguns tipos de Jamming	Grandes variações – até 30% da IRP média.
Dwell e Switch	Resolve ambigüidade em distância e/ou velocidade, especialmente em radares Doppler	Rajadas de pulsos com várias IRP estáveis chaveadas de uma rajada para a próxima.
Stagger	Elimina velocidades cegas em Sistemas MTI	Várias IRP estáveis chaveadas pulso a pulso num padrão periódico (normalmente até 8 níveis).
Sliding	Fornecer cobertura constante de altitude durante varredura em elevação ou evita eclipse	IRP máxima em elevação mínima usualmente menor que 6 vezes a IRP mínima em elevação máxima.
Scheduled	Usada em varredura eletrônica, função múltipla (busca e acompanhamento) e sistemas controlado por computador.	Numerosos padrões complexos (alguns periódicos) podem se adaptar a situação do alvo.
Senoidal (wobulated)	Guiagem de míssil, evita eclipse	Variações quase senoidais até 5% da IRP média. Taxas de até 50 Hz ou mais.
Grupos de pulsos (grouped)	Melhora a resolução em distância ou em velocidade	Também usada para IFF e “beacon Interrogation”, guiagem de míssil.

A FIG 7.2.1 ilustra as categorias de IRP apresentadas na TAB 7.2.1.

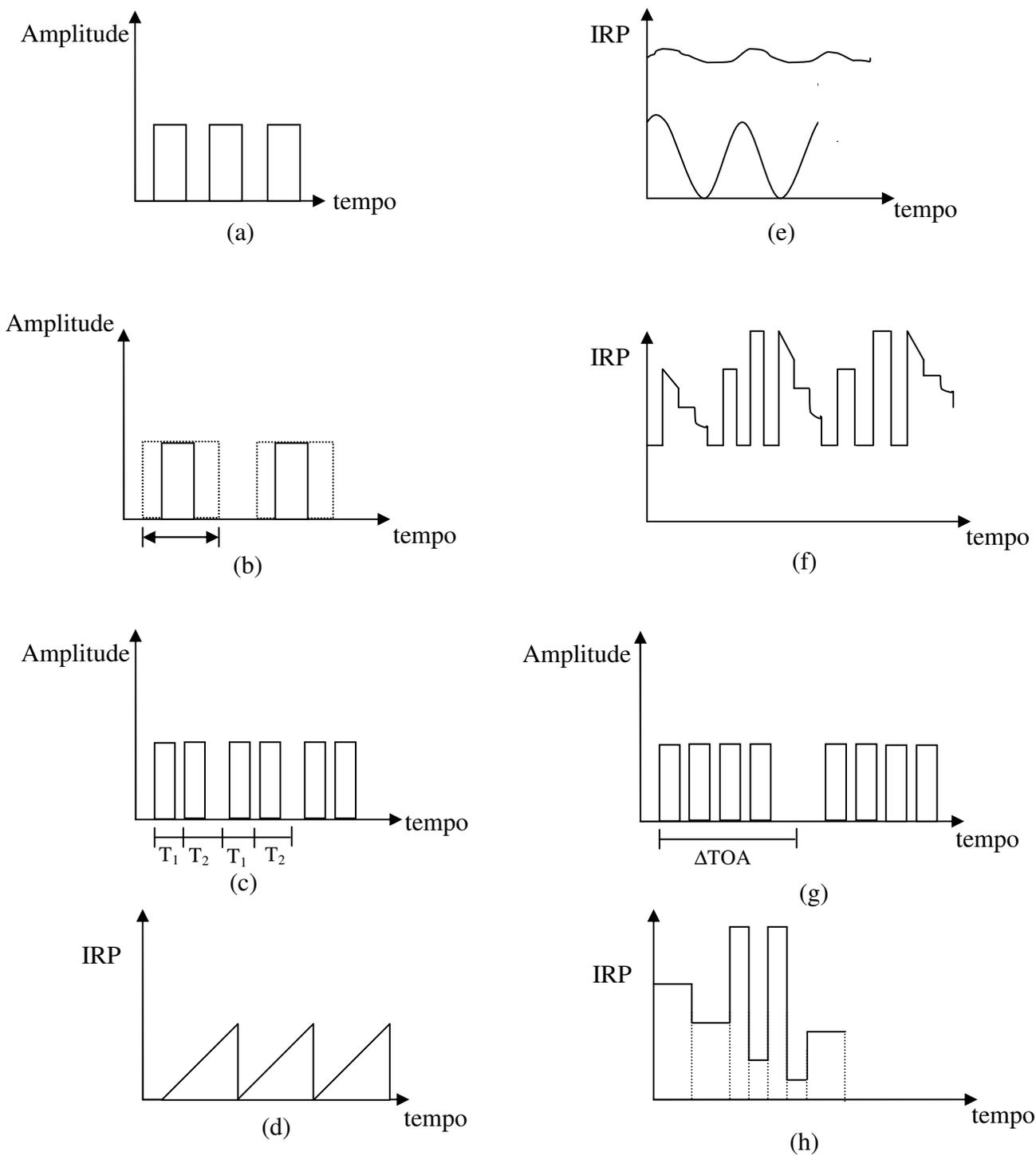


FIG. 7.2.1 – Categorias de IRP

Para sinais radar com sinal de IRP constante, o parâmetro de interesse está restrito à IRP média.

Medir IRP individuais com precisão é difícil, pois requer uma alta relação S/R e um método para evitar alterações na medida de amplitude do pulso a cada varredura do radar.

É usual que radares de IRP constante tenham valores de IRP diferentes que podem ser selecionadas, normalmente, pelo operador.

7.2.4 – IRP COM DESVIO INTENCIONAL (“JITTERED”)

Variações intencionais de IRP são usadas para uma variedade de propósitos radar conforme indicado na TAB.7.2.1. O “jitter” intencional (grandes variações aleatórias de IRP) é usado em CCME contra alguns tipos de contramedidas. A quantidade e o tipo de desvio pode também ajudar a identificar o tipo de radar. O parâmetro de interesse está também restrito à IRP média. Geralmente, intervalos individuais devem ser medidos com uma precisão de 1% de forma a dar boa representação de forma de onda “jitter” e sua característica.

7.2.5 – IRP CHAVEADAS (“DWELL E SWITCH”)

Neste tipo de radar, pode-se selecionar vários IRP diferentes. Entretanto, o chaveamento entre elas é automático de modo a desempenhar certas funções radar. Assim como em radares com IRP constante e IRP “jitter”, o parâmetro de interesse está restrito à IRP média apesar de incluir informação adicional sobre quantas IRP são usadas, quais os padrões de chaveamento observados, e quanto tempo o emissor leva transmitindo cada IRP fixa (isto é, o “dwell time”). Esta técnica pode ser usada para resolver ambigüidades em distância (em radares Doppler com pulso curto), ambigüidades em velocidade, ou para eliminar distâncias ou velocidades cegas. Alguns radares de acompanhamento com IRP curtas podem ajustar a IRP para manter o retorno da ameaça num tempo mais ou menos fixo depois do pulso transmitido. As IRP no intervalo de 100 a 125 μ s são geralmente usadas para eliminar eclipse ou para resolver ambigüidades em distância.

A seqüência de IRP periódica indica eliminação de ambigüidade em distância ou propósitos similares.

Uma seqüência de IRP que não é periódica mas tem um padrão indica um processo que se adapta à posição da ameaça. Uma seqüência aparentemente aleatória pode ser relacionada com CCME.

7.2.6 – IRP VARIADAS EM SEQUÊNCIA FIXA (“STAGGERED”)

A IRP “Staggered” consiste no uso de duas ou mais IRP selecionadas numa seqüência fixa. A seqüência deve conter mais que um dos vários intervalos antes de se repetir. A seqüência é descrita pelo número de posições ou intervalos usados na construção da seqüência e o número de intervalos diferentes usados.

Uma seqüência “staggered” comum consiste de IRP longas se alternando com IRP curtas. Neste caso têm-se 2 intervalos e 2 posições. Uma seqüência usando os mesmos 2 intervalos mas com uma seqüência: longa, longa, curta tem 2 intervalos e 3 posições. Geralmente, a IRP “staggered” é usada para eliminar velocidades cegas em radares MTI. Os intervalos devem ser medidos com precisão suficiente para notar a presença de “stagger”. Isto normalmente requer precisões entre 0,1 a 1,0%.

7.2.7 - IRP VARIADAS SEGUIDAS DE CHAVEAMENTO RÁPIDO (“SLIDING”)

O IRP “sliding” é caracterizado por variações (crescente ou decrescentes) seguido por chaveamento rápido de um limite extremo ao outro. Isto pode ser feito para eliminar eclipse (distâncias cegas), como em alguns esquemas de IRP “dwell-switch”, mas a variação é contínua. Pode também ser usada para otimizar a varredura em elevação fornecendo uma constante cobertura de altitude. Nesta aplicação o padrão da “sliding” é usualmente periódico. Uma outra aplicação é manter uma relação S/R constante para um sistema radar com propósito de mapeamento (contribuição de ruído proveniente unicamente da janela de observação).

A razão da IRP mínima para a IRP máxima é aproximadamente igual a razão entre o alcance mínimo e o alcance máximo. (e.g., cita-se a razão 17 e a razão típica 6).

7.2.8 – IRP DEVIDA A VARREDURA CONTROLADA POR COMPUTADOR (“SCHEDULED”)

IRP “scheduled” ocorrem em radares de varredura eletrônica controlada por computador que misturam as funções de busca e acompanhamento em 3 dimensões. As variações de IRP podem incluir características dos outros tipos já apresentados. O número de padrões de PRI irá depender do número de ameaças que estão sendo acompanhadas e suas localizações. Se não houver ameaça presente, pode ocorrer uma busca periódica tipo com cobertura constante de altitude.

7.2.9 - IRP SENOIDAL (“WOBULATED”)

A modulação periódica de IRP é aproximadamente uma variação senoidal, dentro de limites menores do que a IRP “sliding”. Ela também pode ser usada para evitar eclipse ou ambigüidade em distância, porém é mais frequentemente usada em conjunto com sistemas de acompanhamento de varredura cônica de guiagem de míssil. Se um radar de varredura cônica está acompanhando uma ameaça, o eixo principal da antena está apontado para a ameaça.

Se o míssil está fixo ao longo do feixe, a modulação em amplitude da varredura cônica desaparece quando o míssil está direcionado para ameaça. Como o míssil precisa de um sinal senoidal de referência vindo do radar de varredura cônica, isto é feito modulando senoidalmente a IRP do radar, em sincronismo com a varredura cônica.

Normalmente a variação de IRP é da ordem de 5% para taxas de até 50 Hz.

7.2.10 - GRUPOS DE PULSOS (PRGI)

Neste tipo de radares são transmitidos grupos aproximadamente espaçados separados por tempos mais longos entre os grupos de pulsos. Esses intervalos mais longos são conhecidos como “Pulse Group Repetition Intervals” (PGRI) e podem ser categorizados como uma IRP qualquer. O PRGI pode ser usado para funções básicas radar tais como o aumento da resolução em velocidade e distância (a resolução em distância é ajustada pela duração de um único pulso dentro do grupo enquanto que a resolução Doppler é ajustada pela duração de todo o grupo). Os grupos de pulso podem também ser usados para eliminar velocidades cegas em sistemas MTI. Aplicações com grupos de pulso radar geralmente fazem uso de um grupo fixo de pulsos.

7.3 ANEXO 3 - MEDIDAS DE IRP

A medida de tempo de chegada (TDC) de um pulso radar em um receptor MAGE é similar ao problema encarado pelo receptor radar para determinar a distância da ameaça. Entretanto, existem algumas diferenças:

1- O receptor radar é casado (dentro de certos limites) com o pulso que está sendo recebido. O receptor MAGE não é casado com os pulsos que recebe.

2- Análises de sistema MAGE podem requerer uma incerteza muito pequena na medição do TDC pois trabalham com um único pulso e as precisões associadas devem ser melhores do que 1% da IRP.

3- No radar, o intervalo de tempo de interesse é contado a partir de um tempo conhecido de transmissão de pulso até um tempo não conhecido do retorno do eco da ameaça. O parâmetro de interesse em MAGE é normalmente o tempo entre dois pulsos, existindo incerteza sobre o tempo de ocorrência destes pulsos.

O fato do receptor MAGE não ser casado com o sinal radar significa, normalmente, que a largura de banda do receptor MAGE é maior que o recíproco do pulso. Isto reduz a relação S/R e torna o tempo de subida do pulso um fator limitador na medida do tempo.

Outros fatores limitadores dizem respeito às condições de propagação, reflexões multipercurso (“multipath”) que ocasionam deformações no pulso.

7.3.1 - LIMITAÇÕES NA RELAÇÃO SINAL –RUÍDO S/R

O problema da incerteza do TDC devido ao ruído tem sido analisado minuciosamente em situações de alta relação S/R. Se é usado um limiar de amplitude fixo e um pulso com tempo de subida (“leading edge”) linear é aplicado, a variação RMS de TDC medido é:

$$\delta_T = \frac{t_R}{0.8\sqrt{S/R}}, \text{ para } S/R \gg 1, \text{ onde} \quad \text{EQ 7.3.1}$$

δ_T = Variação RMS do TDC medido

t_R = tempo de subida do pulso a partir dos pontos de 10% a 90% no “leading edge” do pulso de vídeo.

Observa-se que a inclinação do “leading edge” de um pulso de amplitude A é $0,8 \frac{A}{T_R}$. O fator 0,8 é requerido desde que o tempo de subida T_R seja medido a partir do ponto de 10% até o ponto de 90%.

A relação S/R a ser usada na equação (1) é a S/R na saída do receptor e dependendo do tipo de detetor usado.

A medida do intervalo de recepção de pulso é a diferença entre os tempos de chegada de 2 pulsos.

A FIG. 7.3.1 ilustra a variação da IRP devido ao ruído, parametrizada em termos da relação S/R.

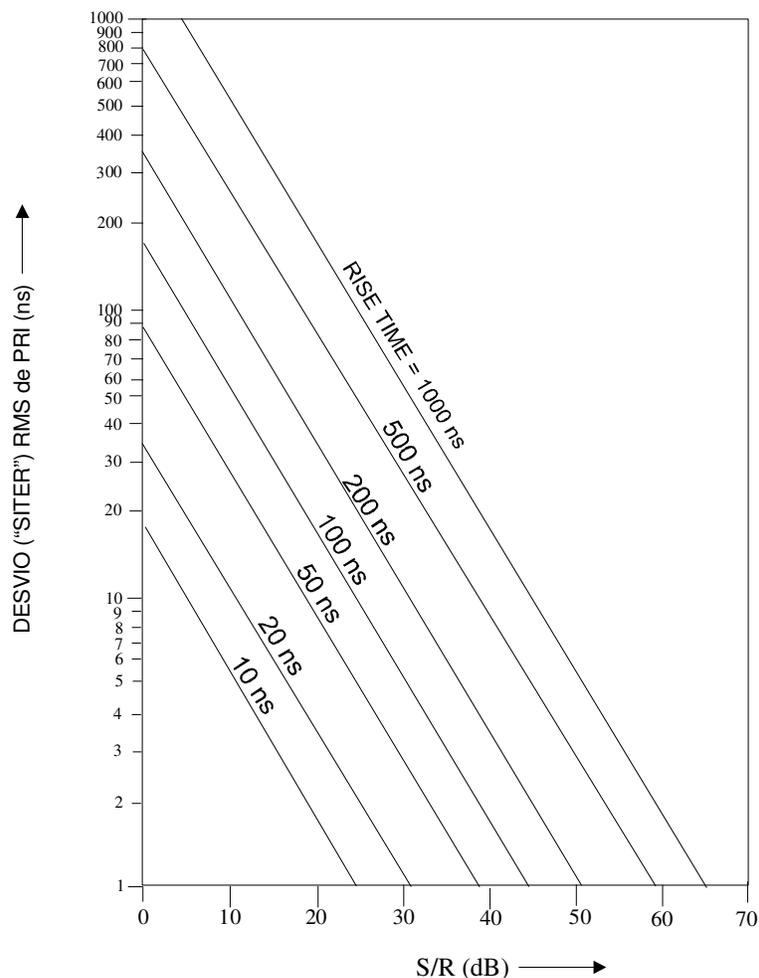


FIG. 7.3.1 – Variação de PRI devido a ruído

7.3.2 - LIMITAÇÕES DEVIDAS A MUDANÇAS NA AMPLITUDE DO PULSO.

O movimento do feixe do radar causa variações de amplitude pulso a pulso. Se o TDC de um pulso é determinado por um limiar de amplitude fixa, o tempo de subida não nulo combinado com a variação de amplitude causa erros. Se a amplitude está aumentando, cada pulso sucessivo atravessa o limiar um pouco mais cedo. Se a amplitude está decrescendo, ocorre o contrário, conforme situação mostrada na FIG. 7.3.2

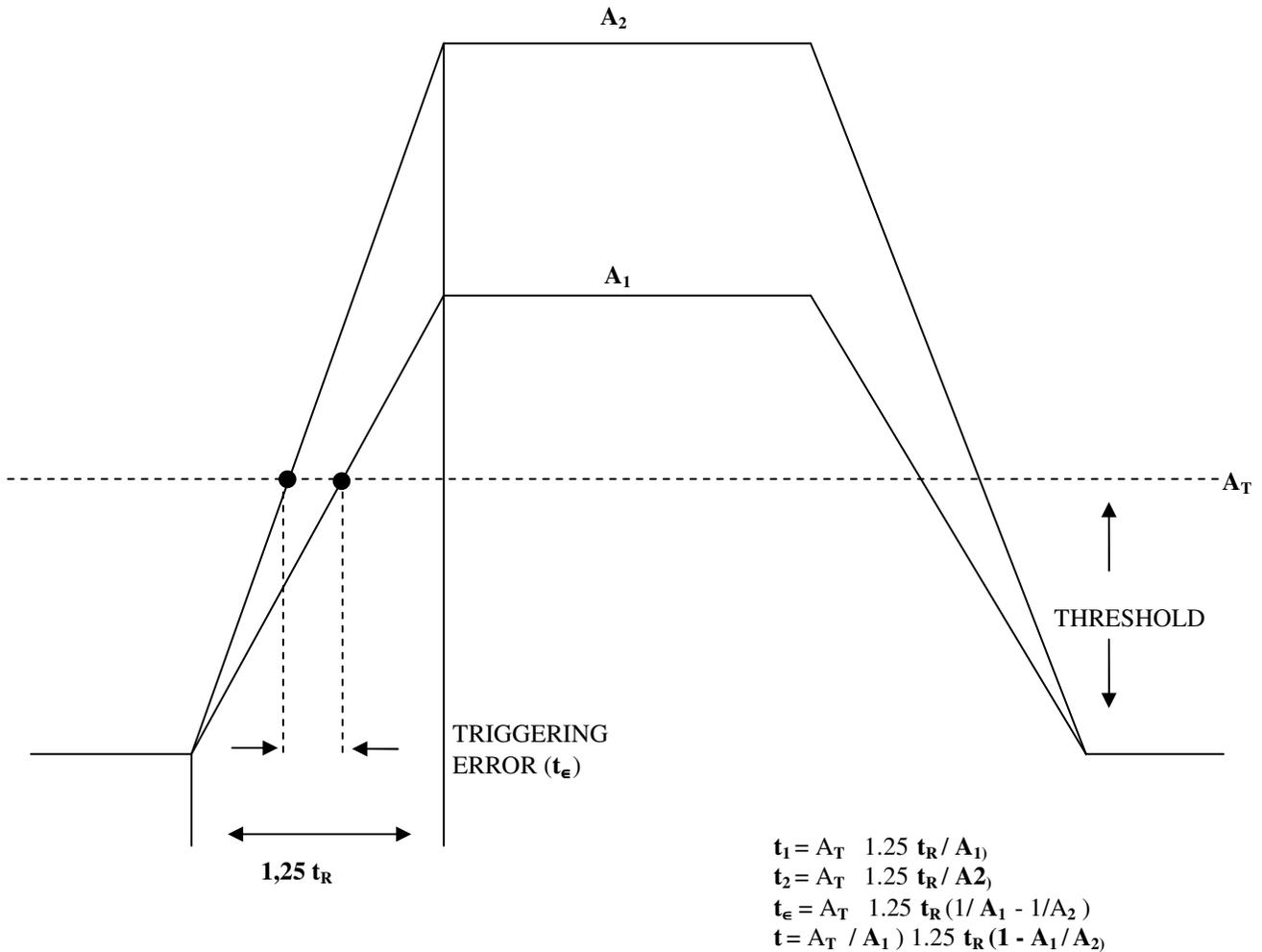


FIG. 7.3.2 – Erro devido ao desvio para um limiar fixo.

A mudança no intervalo de pulso devido à mudança na amplitude do pulso é:

$$t_{\epsilon} = \left(\frac{A_T}{A_1} \right) (1.25 t_R) \left(1 - \frac{A_1}{A_2} \right) \text{ onde:} \quad \text{EQ 7.3.2}$$

t_{ϵ} = mudança no intervalo de pulso devido ao “threshold” de amplitude fixa.

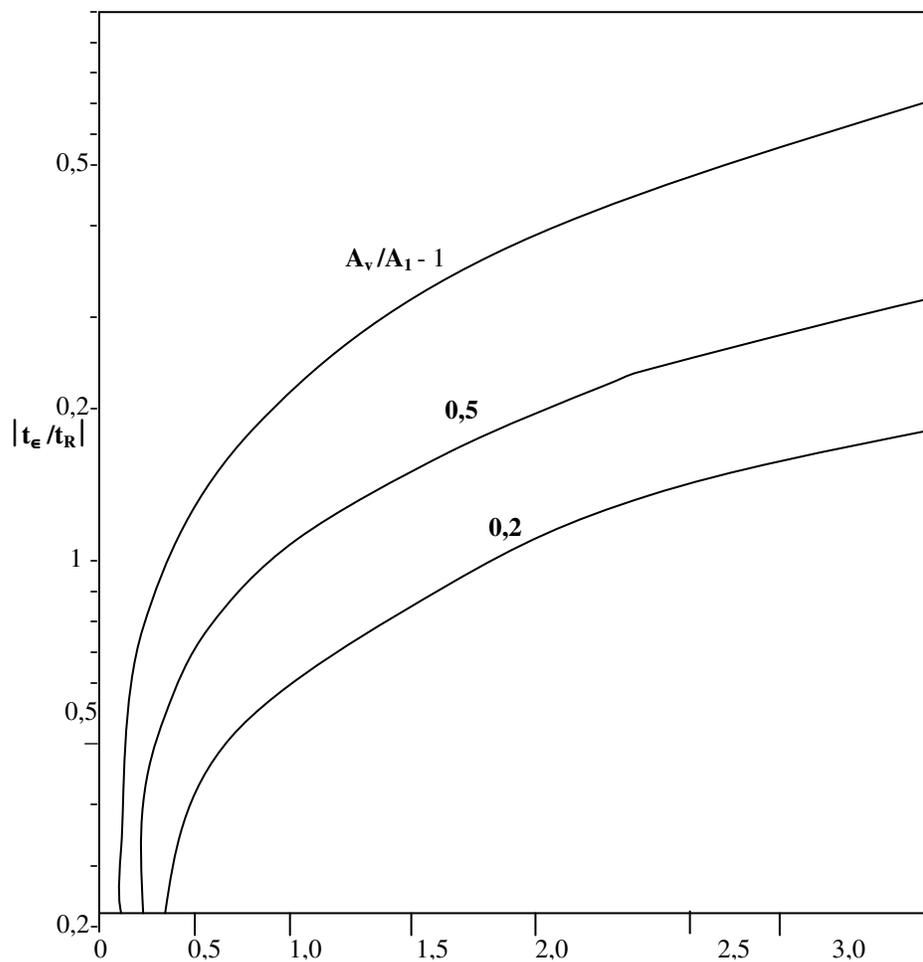
A_T = amplitude do “threshold”

A_1, A_2 = amplitude dos pulsos no inicio e no fim do intervalo de pulso

t_R = tempo de subida do pulso (de 10% a 90%)

A FIG. 7.3.3 representa um gráfico de t_{ϵ}/t_R para taxas de amplitude pulso a pulso em dB

para valores de A_T/A_1 .



Razão da amplitude (dB) ou $\pm 20 \text{ Log } (A_1/A_2)$

FIG.7.3.3- Mudança no intervalo de pulso devido à mudança na amplitude do pulso.

Para pulsos com amplitudes próximas a amplitude de “threshold”, mesmo 1dB de variação de amplitude pulso a pulso produz um “jitter” aparente acima de 15% do tempo de subida.

Uma redução desta variação na IRP devida a mudanças na amplitude do pulso pode ser realizada usando-se circuitos de “threshold” mais sofisticados.

Mesmo que o circuito de limiar seja efetivo, por exemplo, na escolha de um ponto de amplitude fixa na subida do pulso, variações pulso a pulso devido a problemas de multipercurso e anomalias no transmissor contribuem para o “jitter”.

7.3.3 - MELHORA NA MEDIDA DE IRP

O “jitter” devido ao ruído é proporcional ao tempo de subida conforme mostrado. Da mesma forma o “jitter” devido à variação de amplitude e limiares imperfeitos é também proporcional ao tempo de subida. Entretanto, a relação S/R melhora quando se reduz a banda do receptor, que conseqüentemente reduz o “jitter” e aumenta o tempo de subida. Se relação S/R é alta, o “jitter” devido ao ruído será desprezível e deverá ser usada uma largura de banda suficiente para passar o pulso transmitido sem aumentar seu tempo de subida.

Em processamento de sinal de vídeo para análise de IRP, é freqüente o uso de filtros passa alta, passa baixa e notch. O filtro passa baixa é ajustado para uma largura de banda mínima tal que o tempo de subida do pulso não seja afetado. Os filtros passa alta e notch são usados para eliminar partes da banda de freqüência onde existir interferência não relacionada ao sinal de interesse.

Dispositivos não lineares, tais como “clippers” de amplitude e “slicers”, são usados para remover partes indesejáveis do “range” dinâmico do sinal para evitar saturação e problemas similares em amplificadores, thresholds, e outros estágios de processamento. Da mesma forma, se a varredura da antena produz pulsos de amplitude muito alta e outros de amplitude mais baixa, a amplitude pode ser limitada em algum nível para evitar saturar o amplificador ou circuitos de limiar.

7.3.4 - LIMITAÇÕES DO OSCILADOR DE REFERÊNCIA

Em sistemas digitais de medição de IRP existe um oscilador de referência usado para gerar uma escala de tempo discreta contra a qual o tempo entre pulsos radar é medido. Existem 2 tipos de limitações: a primeira é devida à instabilidade do oscilador que introduz imprecisões e “drift” nos valores de IRP medidos. A Segunda é o erro de quantização devido a não coerência entre os tempos de chegada do pulso e o oscilador de referência.

Muito freqüentemente o erro mais importante é a quantização que ocorre quando da contagem do número de ciclos do oscilador de referência entre os pulsos radar.

IRP de trens de pulsos idealmente estáveis medidas por contagem de ciclos de um oscilador de referência diferem de uma contagem conforme apresentado na figura 5.

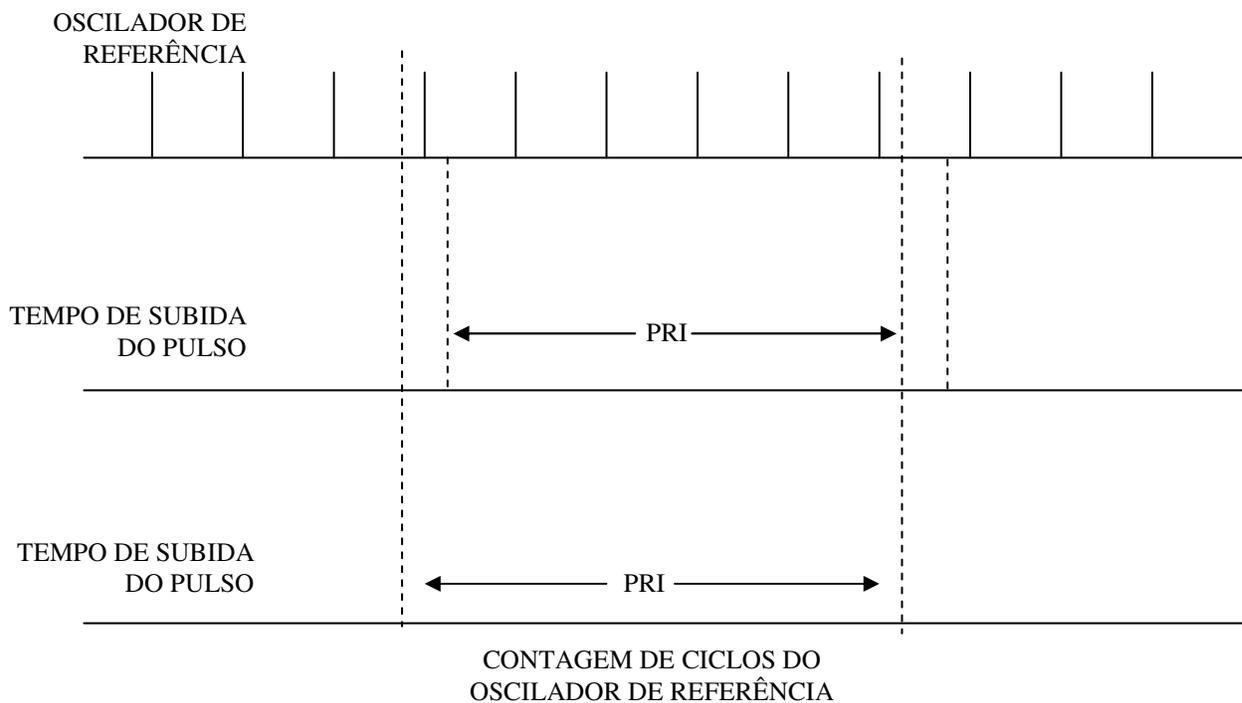


FIG. 7.3.4 – Ambigüidade de uma contagem nas medidas de IRP.

O caso 1 difere do caso 2 somente pela fase relativa dos pulsos radar e dos marcos de tempo do oscilador de referência. O intervalo de tempo entre os pulsos radar é 5 ou 6 contagens de referência. Para um dado intervalo de pulso estável e uma referência estável, o cálculo pode alterar apenas uma contagem. Por outro lado, se um único intervalo de pulso é medido, não se sabe se a contagem aumenta de um ou decresce de um para uma relação de fase diferente. Por isso, valores digitais de IRP têm um range de ambigüidade de +1 a -1 contagem mesmo que o erro de quantização seja quanto muito somente igual a uma contagem.

Circuitos para medir o tempo entre o pulso radar e a primeira marca de tempo do oscilador de referência corrigem a IRP medida. Realmente, não é necessário recorrer a técnicas extras. A taxa de contagem dos circuitos digitais excede 100 MHz e as limitações devidas a relação S/R disponível e às flutuações de amplitude são tais que um tempo de resolução menor que 10ns não é necessário.

7.3.5 - LIMIAR DIGITAL

Uso de limiares para determinar o tempo de chegada TDC de um pulso é o método usual. Entretanto, conversores A/D de alta velocidade tornaram possível o uso de vários algoritmos de processamento digital de sinal para definir o TDC. A taxa de conversão (fs) do A/D e o erro de quantização são fatores importantes na precisão com que o TDC pode ser determinado. A taxa de conversão mínima necessária para reconstruir o sinal é determinada pela largura da banda de vídeo (ou tempo de subida do sinal).

O erro de quantização do conversor A/D deve também ser considerado. O número de bits de amplitude obtido do conversor decresce à medida que a largura de banda do sinal (e a taxa de conversão) aumenta. Isto é causado por uma janela de tempo de duração finita na qual o conversor A/D adquire o nível do sinal.

O número mínimo de bits de informação de amplitude necessário pode ser estimado ajustando o ruído de quantização do conversor igual ao nível de ruído presente no receptor MAGE.

Pode se mostrar que para uma dada relação S/R do receptor MAGE o conversor A/D deve ter no mínimo um número de bits de resolução B tal que,

$$B \geq \frac{\left(\frac{S}{R}\right) - 10.8}{3} \quad \text{EQ 7.3.3}$$

No caso de altas taxas de amostragem é requerida uma área de armazenamento muito grande ou deve-se usar algum limiar de tempo real para reduzir a quantidade de dados armazenados. No último caso, somente algoritmos simples de limiar são práticos. Se recursos computacionais estão disponíveis, o cálculo da localização do centróide do pulso pode ser considerado como uma medida do TDC.

7.3.6 - ANÁLISE DE IRP POR COMPUTADOR

O hardware disponível para medir o TDC de pulsos individuais (ou, equivalentemente, o tempo a partir do pulso anterior) em uma base pulso a pulso é usualmente feito usando contadores e base de tempo de cristal de quartzo de alta qualidade. Os valores digitais de TDC resultantes podem ser armazenados e analisados (em tempo não real) usando-se uma variedade de técnicas baseadas em computador.

Como exemplo do tipo de refinamento que pode ser introduzido, considere o problema da estimação de IRP para uma seqüência de N pulsos. A IRP média é usualmente estimada calculando o tempo entre o primeiro e o último pulso e dividindo pelo número de intervalos de pulsos:

$$\overline{\text{PRI}} = \frac{t_n - t_1}{N - 1} \quad \text{EQ 7.3.4}$$

Entretanto, não são usados os TDC reais dos pulsos intermediários do trem de pulsos. Um melhor método seria encontrar o intervalo de pulso que minimiza o erro quadrático entre os TDC observados e os TDC do trem de pulsos ideal. Os TDC para um trem de pulso ideal seria

$$T_{o,n} = nI_o + \phi_o \quad \text{EQ 7.3.5}$$

onde:

$T_{o,n}$ = Tempo de chegada do enésimo pulso do trem de pulsos ideal.

n = número de pulsos observados (inteiros entre 0 e N)

ϕ_o = Tempo entre o primeiro pulso ideal e o primeiro pulso do Trem de pulsos real.

I_o = intervalos entre pulsos do trem de pulsos ideal.

O erro quadrático é:

$$\epsilon^2 = \sum_{n=0}^N (t_n - t_{o,n})^2 \quad \text{EQ 7.3.6}$$

Substituindo a EQ 7.3.5 na EQ 7.3.6 , diferenciando ϵ^2 em relação a I_o e ϕ_o , ajustando os resultados iguais a zero e calculando têm-se os valores:

$$I_o = 2 \left[\sum_{n=1}^N nt_n - N \sum_{n=1}^N t_n \right] \frac{6}{(N)(N+1)(N+2)} \quad \text{EQ 7.3.7}$$

$$\phi_o = \frac{1}{N+1} \left[\left(1 - \frac{3N}{N+2} \right) \sum_{n=1}^N t_n - \frac{6}{N+2} \sum_{n=1}^N nt_n \right] \quad \text{EQ 7.3.8}$$

Se o primeiro pulso do trem de pulso ideal coincidir com o primeiro pulso real, ϕ_o é zero e a equação (6) se reduz a

$$\epsilon^2 = (t_n - nI_o)^2 \quad \text{EQ 7.3.9}$$

neste caso, a PRI ótima é

$$I_o = nt_n \frac{6}{(N)(N+1)(2N+1)} \quad \text{EQ 7.3.10}$$

Existem muitos procedimentos similares usados para melhorar a estimação da PRI. Por exemplo, uma função peso baseada na amplitude do pulso ou na relação S/R pode ser incorporada de modo que os TDC com maiores relações S/R influenciem mais do que aqueles com menores S/R .

7.3.7 - TÉCNICAS ESTATÍSTICAS

A seqüência de tempo de chegada TDC pode ser analisada através de histogramas bem como pela análise do desvio médio padrão. Histogramas e estatísticas, como o erro médio padrão, não são afetados pela ordem dos dados. Isto significa que tais estatísticas não são usadas para analisar variações de PRI na qual a seqüência de intervalos é importante. A variação de estatísticas com o tempo pode ser usada mas isto depende em computá-las para diferentes segmentos de dados, incluindo segmentos sobrepostos. Por exemplo, para analisar “drift”, a PRI média pode ser calculada para vários segmentos de dados separados no tempo.

Os histogramas ajudam na determinação de toda a estatística de uma seqüência de IRP. Um histograma é obtido dividindo-se o range do parâmetro esperando em intervalos (chamados bins) e contando-se o número de ocorrências do valor do parâmetro dentro de cada bin. Para um processo aleatório, à medida que o tamanho do bin se aproxima de zero e o número de amostras se aproxima de infinito, o histograma se aproxima da Distribuição da Probabilidade do processo aleatório. Se o numero de amostras é muito grande mas o tamanho do bin é fixo, o nível do histograma num bin particular é proporcional à integral da função densidade de probabilidade sobre o range do parâmetro incluído naquele bin. Existe um compromisso entre a quantidade de dados disponíveis e o tamanho do bin. Se o bin é muito pequeno, então o numero médio de ocorrências por bin será muito baixo e o histograma terá grande número de bins vazios entremeados com bins com uma de duas contagens. Por outro lado, se o bin é muito grande, todas as amostras de dados caem dentro de um ou dois bins e mais uma vez o analista não consegue “ver” a forma da distribuição de probabilidade.

A situação usual requerer a geração de vários histogramas com diferentes tamanhos de bins. O analista então decide qual o tamanho de bin mais apropriado para a qualidade e quantidade de dado disponível.

As FIG. 7.3.5, 7.3.6 e 7.3.7 mostram histogramas para uma IRP com intervalos com distribuição “gaussiana”, “jitter”, “senoidal” e “sliding” respectivamente.

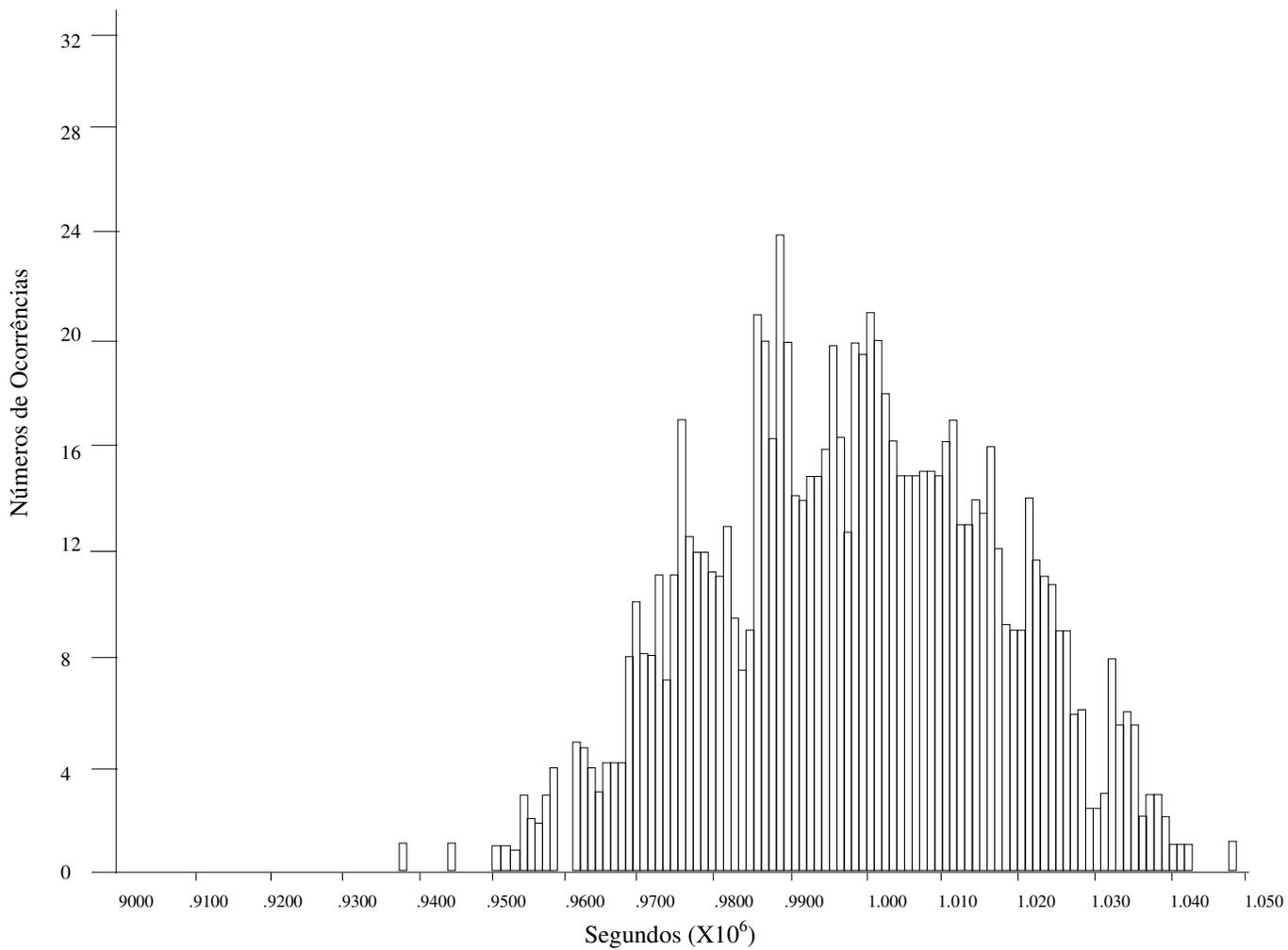


FIG.7.3.5 – Histograma de Intervalo de Repetição do Pulso, IRP “Gaussiana “

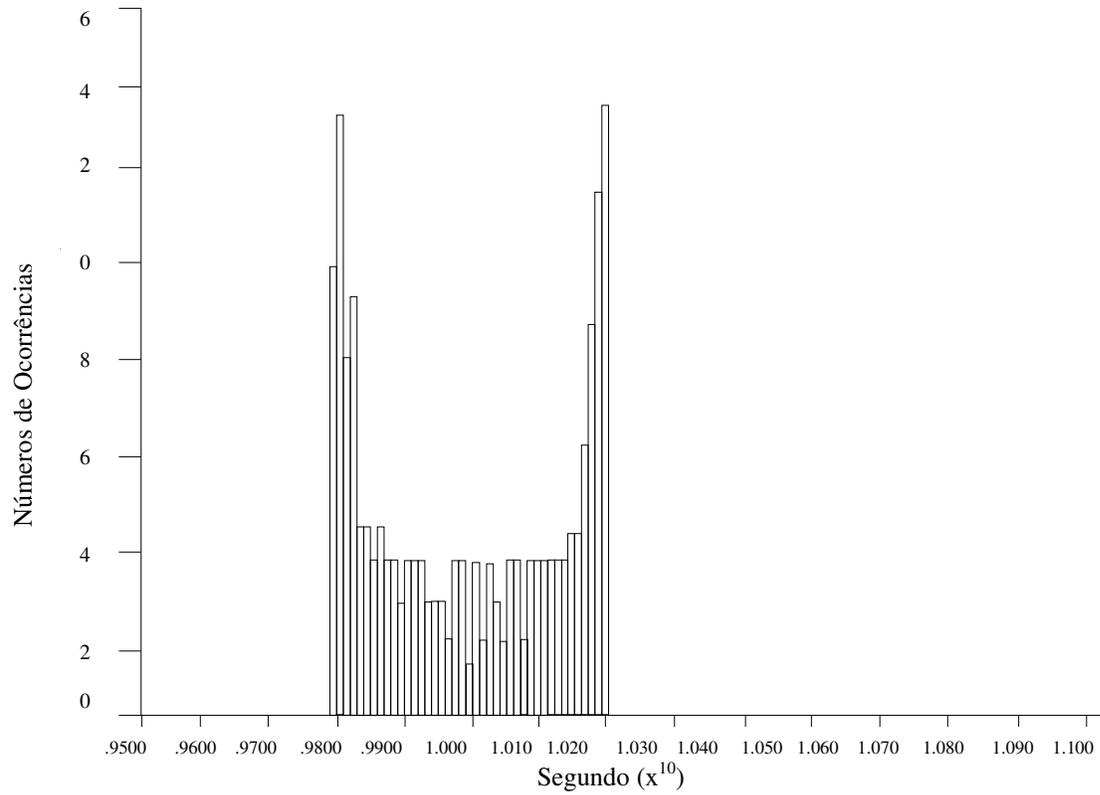


FIG. 7.3.6- Histograma de Intervalo de Pulso, IRP Senoidal

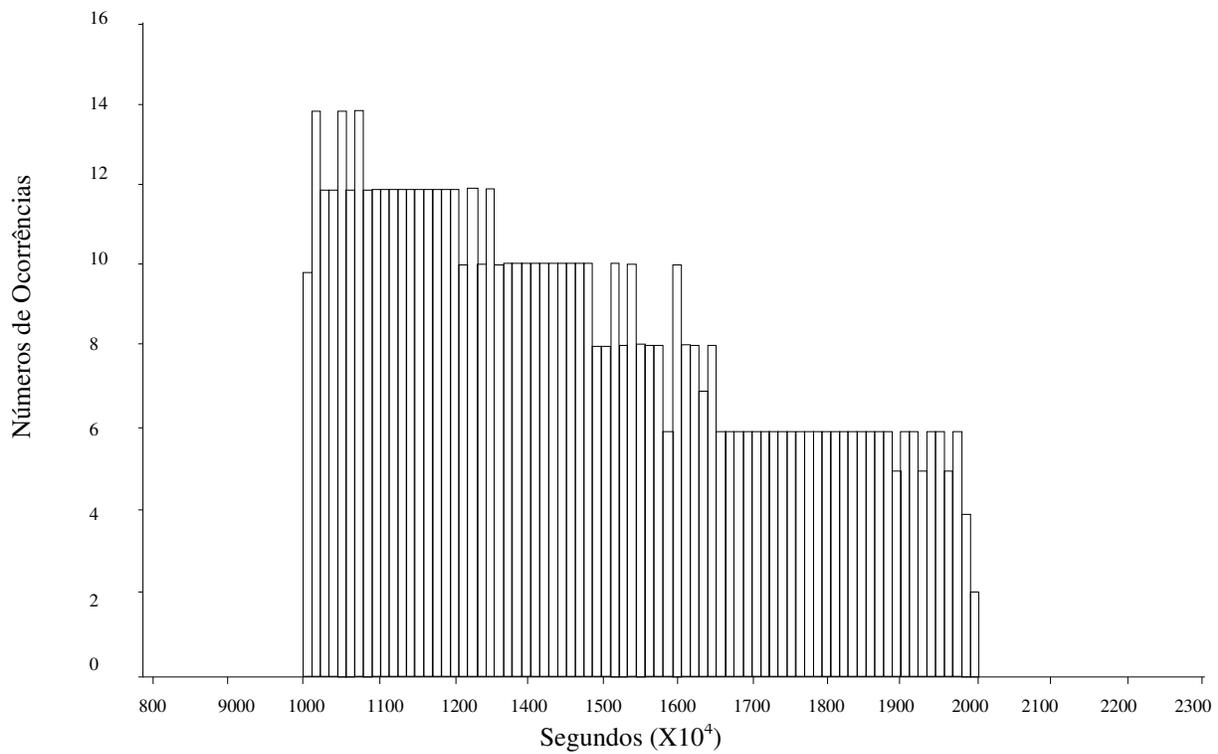


FIG.7.3.7 – Histograma de Intervalo de Pulso, IRP Sliding

A aparência de escala do Histograma de IRP “sliding” é causada por um grande número de pequenos intervalos de pulsos presentes numa longa amostra de dados além de um baixo número de eventos por (“ bin”). A TAB. 7.3.1 lista a forma do histograma associada com vários tipos de IRP.

TAB. 7.3.1 – Formas de Histogramas de IRP Típicos

Tipo do sinal	Distribuição					
	Sprikes	Plano	Bell	Convexo	Trapezoidal	Rampa
Stagger ou jitter	X					
Scheduled	X					
Chaveado	X					
Aleatório gaussiano			X			
Aleatório uniforme		X				
Aleatório não uniforme					X	
Senoidal				X		
Sliding						X

7.4 ANEXO 4 - PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DE TODAS AS DIFERENÇAS

7.4.1 – INTRODUÇÃO

O programa foi desenvolvido em duas etapas:

Inicialmente o programa simula IRP de 100 μ s a 1000 μ s, bem como o tempo de chegada para o primeiro pulso de cada IRP gerada.

Na segunda etapa do programa são calculadas todas as diferenças de tempo de chegada do pulso; é gerado um histograma contendo todas as diferenças e finalmente são calculados e apresentados as IRP prováveis função de um limiar de reconhecimento estabelecido.

O programa determina também a ocorrência de pulsos justapostos, isto é, grava tempos reais de diferenças que caem dentro de um mesmo “bin” ou intervalo de resolução.

7.4.2 – LISTAGEM DO PROGRAMA

```
%  
% Programa para simulação de todas as diferenças para N pulsos de chegada  
% Cenário com cinco radares; distância Mage radar (30000<rmage<300000);  
% Tempos de chegada do primeiro pulso de cada radar (100 $\mu$ s < ts < 1000 $\mu$ s)  
%  
  
clear all  
Nradar=5;  
Janela=3000; %em  $\mu$ s  
Resolução=1; %em  $\mu$ s  
  
%Geração de IRPs de 100 $\mu$ s a 1000 $\mu$ s  
irp=(100+900*rand(1,Nradar));  
%irp=vetor intervalo de tempo de chegada  
irp=[327.5 490.7 858.4 266.5 557.3]  
  
%Escolha de tempos de início para os 1ºs pulsos de cada radar até 1000 $\mu$ s  
ts=(irp.*rand(1, Nradar));  
%ts=vetor tempo de chegada  
%ts+[147 159 326 235 424]
```

```

%cálculo do número de pulsos contidos na janela para cada radar
for i=1:Nradar
    n5 (i)=fix((janela-ts(i))/irp(i));
end

%Geração do vetor tdc com todos tempos de chegada dos pulsos dos radares
index=0;
for i=1:Nradar
    for j=0:n5(i)
        index=index+1;
        tdc(index)=ts(i)+j.*irp(i);
    end
end

%Ordenação dos pulsos de chegada
xtdc=sort(tdc); %Esta ordenação não é necessária
Npulsos=length(xtdc); %Número de pulsos (igual a 'index')

%Impressão de alguns resultados
n5
ts
sort(irp)
%xtdc

%Geração do Histograma
N=fix(janela/resolucao);
for i=1:N
    histogr(i)=0;
end

Npulsossuperpostos=0;
for j=1:Npulsos-1
    for i=1:Npulsos-j
        difer=(xtdc(i+j)-xtdc(i));
        posicao=round(difer/resolucao);
        if posicao<resolucao
            Npulsossuperpostos=Npulsossuperpostos+1;
        else
            histogr(posicao)=histogr(posicao)+1;
        end
    end
end

if Npulsossuperpostos>1
    Npulsossuperpostos
end

```

```
x=100/resolucao:1:1000/resolucao;  
y=janela./x-1;
```

```
bar(histogr)  
hold('on')  
plot(x,fix(y), 'b', x,y, 'r',x,fix(y)+1, 'b')  
hold('off')
```

```
%Rotina para imprimir as IRPs prováveis  
cont=0;  
for i=1:900/resolucao+1  
    index=x(i);  
    if histogr(index)>=fix(y(i))-0.1 & histogr(index)<=fix(y(i))+1.1 & histogr(index)>1.1  
        cont=cont+1;  
        ProvIRP(cont)=index;  
    end  
end  
ProvIRP  
  
%'Fim do Programa'
```