

Jorge Henrique Bidinotto
Yuri Cesarino

Princípios de Aviação e Navegação
Capítulo 4 - RADAR

São Carlos
Dezembro de 2017

Lista de ilustrações

Figura 1 – Classificação de Radares	5
Figura 2 – Imagem de Radar	5
Figura 3 – Típica Tela de Radar sem Imagem	6
Figura 4 – Diferentes Modulações de Radares Primários Pulsados	7
Figura 5 – Representação de Radar Primário de Onda Contínua	7
Figura 6 – Funcionamento Básico do Radar Secundário	8
Figura 7 – Radares Mono e Bistático	8
Figura 8 – Tipos de Radar conforme sua Aplicação	9
Figura 9 – Radares 2D e 3D	10
Figura 10 – Radares Terrestre e no Ar	10
Figura 11 – Diferentes Tipos de Radares de Campo de Batalha	11
Figura 12 – Bandas e suas Diferenças	12
Figura 13 – En-Route Radar	12
Figura 14 – Air Surveillance Radar	12
Figura 15 – Precision Approach Radar	13
Figura 16 – Surface Movement Radar	13
Figura 17 – Special Weather Radar	13
Figura 18 – Radar Meteorológico	14
Figura 19 – Cores e seus Significados no Radar Meteorológico	15
Figura 20 – Modo de Operação do SAR	15
Figura 21 – Radar Milimétrico	16
Figura 22 – Lóbulos Secundários	17
Figura 23 – Efeitos na Forma do Pulso	17
Figura 24 – Leitura do Chão com Interferência de Lóbulos Secundários	17
Figura 25 – Sinal Resultante	18
Figura 26 – Objeto Vindo em Direção à Aeronave	18
Figura 27 – Objeto se Aproximando com Baixa Velocidade Relativa	18
Figura 28 – Objeto com Velocidade Relativa Zero	19
Figura 29 – Objetos com Velocidades Relativas Diferentes	19
Figura 30 – Objeto com Trajetória Perpendicular	19
Figura 31 – Comparação Geral dos Casos	20

Sumário

1	Radar	5
1.1	Classificação Quanto ao Tipo	5
1.1.1	Radar com/sem Imagem	5
1.1.2	Radar Primário	6
1.1.2.1	Radar Primário Pulsado	6
1.1.2.2	Radar Primário de Onda Contínua	7
1.1.3	Radar Secundário	7
1.1.4	Radar Monoestático/Bistático	8
1.2	Classificação Quanto à Aplicação	9
1.2.1	Radar de Defesa Aérea ou Early Warning	9
1.2.2	Radar de Campo de Batalha ou Battlespace Management	10
1.2.3	Radar de Controle de Tráfego Aéreo	10
1.2.4	Radar Meteorológico	14
1.3	Tipos Especiais de Radares	15
1.3.1	Synthetic Aperture Radar	15
1.3.2	Millimetric Radar	16
1.4	Lóbulos Secundários	16
1.5	Considerações Finais	20
	Referências	21

1 Radar

1.1 Classificação Quanto ao Tipo

Diversos tipos de radares estão disponíveis na atualidade. A classificação deles depende da quantidade e qualidade da tecnologia envolvida em seu funcionamento, de acordo com o tipo de informação que se deseja. O esquema a seguir ilustra as principais divisões e classificações:

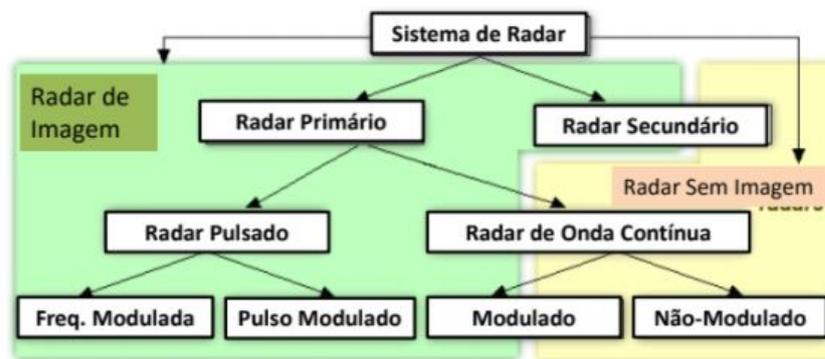


Figura 1 – Classificação de Radares

Observa-se que existe uma primeira classificação, a de presença ou não de imagem, que pode englobar até um mesmo subtipo de radar, isto é, por exemplo, existem radares secundários que possuem imagem e os que não possuem.

1.1.1 Radar com/sem Imagem



Figura 2 – Imagem de Radar

A primeira maneira então de se diferenciar radares é identificar se eles possuem ou não a característica de fornecer imagens. Aqueles que possuem tal característica são

capazes de mapear locais com ao menos duas dimensões, o que é possível por meio da emissão de ondas em duas direções diferentes. O resultado é uma imagem parecida com uma foto, bastante semelhante ao que pode ser visto no aplicativo *Google Earth*, porém sem cores. Esse tipo de imagem geralmente vem de radares instalados em aeronaves de vigilância, que sobrevoam determinados locais para fazer reconhecimento.

Já os radares sem imagem não possuem esse nível de detalhe e estão resumidos a apenas fornecer um ponto, comumente chamado de alvo, e sua localização no espaço. Esse tipo apresenta o clássico *layout* circular, cuja tela é atualizada a cada momento, fornecendo novas posições dos alvos.



Figura 3 – Típica Tela de Radar sem Imagem

1.1.2 Radar Primário

Os radares primários possuem um funcionamento bem intuitivo. Eles são aparelhos que emitem um sinal simples e o recebem de volta após a reflexão desse sinal pelo alvo, sem a existência de código. A partir do tempo que a onda de rádio demora para voltar e sabendo qual é sua velocidade quando emitida, ele consegue indicar a posição desse alvo. Por causa disso, eles podem facilmente sofrer interferência caso haja outro radar ou onda atuando na mesma frequência nas proximidades da antena.

Além disso, tais radares possuem duas subcategorias: os radares pulsados e os de onda contínua.

1.1.2.1 Radar Primário Pulsado

Como o próprio nome diz, esse tipo de radar funciona por meio de pulsos, isto é, os sinais de rádio que eles emitem é na forma de um pulso, que retorna na mesma forma após alguns instantes. Esses radares podem ser modulados de duas maneiras: modulação por frequência, sendo emitidos pulsos em diferentes frequências ao longo do tempo; ou pela modulação dos próprios pulsos, com a variação do intervalo de repetição dos pulsos (PRI ou *Pulse Repetition Interval*) ou da duração de cada pulso (PW ou *Pulse Width*). Essas modulações são feitas de maneira bastante precisa, com uma pequena margem de erro.

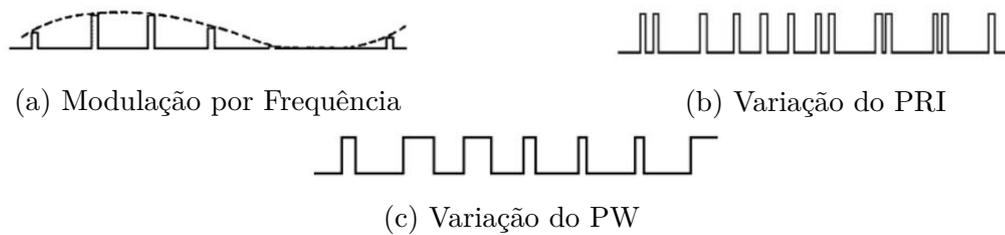


Figura 4 – Diferentes Modulações de Radares Primários Pulsados

1.1.2.2 Radar Primário de Onda Contínua

Quanto aos radares primários de onda contínua, em vez de emitirem pulsos intervalados no tempo, a emissão e o recebimento de sinais é contínuo, na forma de ondas sem interrupção. Em relação à modulação, eles podem ou não apresentar, e ela pode ser também de vários tipos.

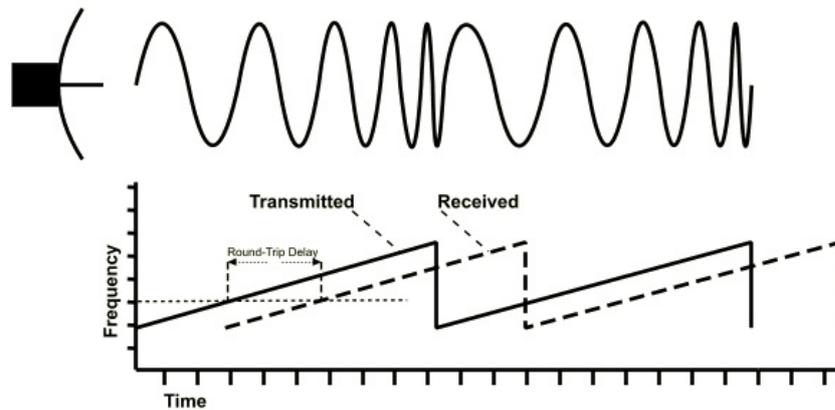


Figura 5 – Representação de Radar Primário de Onda Contínua

1.1.3 Radar Secundário

O funcionamento do radar secundário tem a mesma base do radar primário: um sinal é emitido e depois de refletido ele é recebido pelo radar. Contudo, há uma diferença crucial: no secundário, existe um código, ou seja, o sinal codificado envia e extrai informações do alvo, como se fossem perguntas e respostas. Tanto que, para evitar confusões, quando o sinal é recebido de volta, ele é processado para se ter certeza de que foi o mesmo sinal enviado, já que, caso não seja, o sinal "estranho" pode trazer dados incorretos e prejudicar a apuração de informações pelo radar. No caso específico das aeronaves, essa codificação e decodificação é feita pelo *transponder*, aparelho de comunicação do avião via sinais de rádio com o controle de tráfego aéreo, informando diversos parâmetros importantes do plano de voo, como posição, altitude, identificação, velocidade etc.

O princípio do funcionamento desse tipo de radar está mostrado na Figura 38. A antena do radar transmite o sinal, que é recebido pelo transponder do avião. O avião decodifica esse sinal, recebendo as "perguntas" do radar. Em seguida, o avião codifica o sinal com as "respostas" e transmite de volta para o radar. O processo no radar é análogo, com recebimento e decodificação, para que o processo reinicie e esteja sempre atualizado. A única diferença é que, no caso do radar, além de reenviar o sinal para o avião, a informação decodificada também é passada para uma tela com interface com o controlador de tráfego

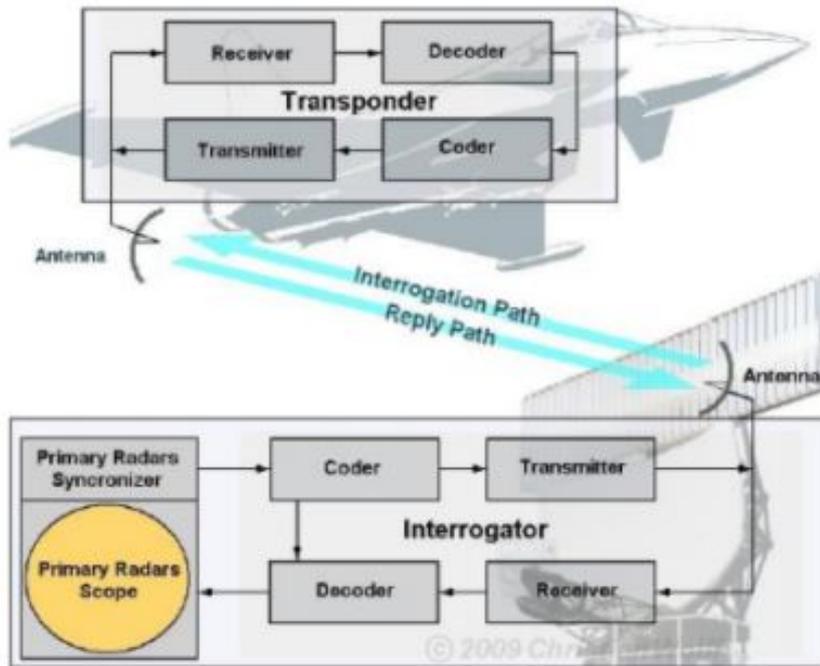


Figura 6 – Funcionamento Básico do Radar Secundário

aéreo, para que aquela informação se transforme de maneira a ser compreendida pelo controlador.

1.1.4 Radar Monoestático/Bistático

Além de toda essa classificação de tipo já mencionada com base no primeiro esquema desse capítulo, ainda existe uma outra maneira de classificar os radares: em monoestáticos ou em bistáticos. A diferença é simples: no caso dos primeiros, a estação que emite e recebe o sinal é a mesma; já dos segundos, existem estações de emissão e outras diferentes de recepção dos sinais emitidos. A razão de se ter estações diferentes para emitir e para receber é que isso combate o problema de dispersão das ondas que não retornam para a origem, aumentando assim a eficiência do radar.

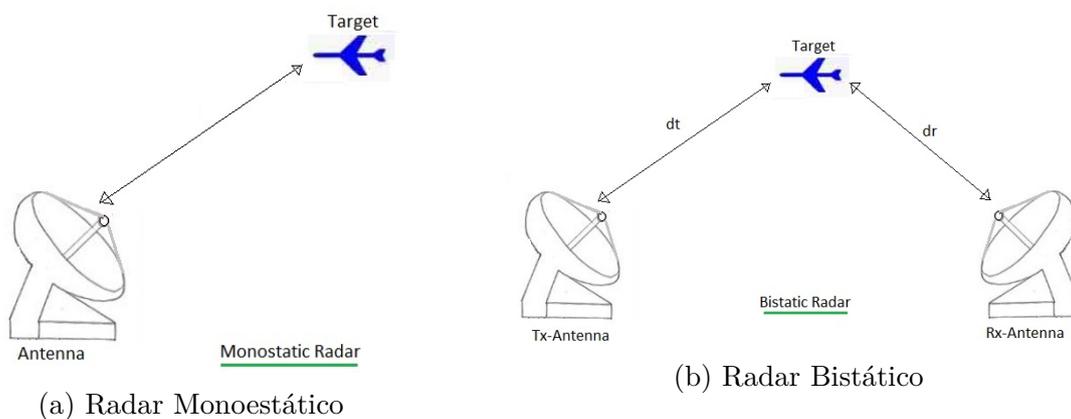


Figura 7 – Radares Mono e Bistático

1.2 Classificação Quanto à Aplicação

Types of Radars

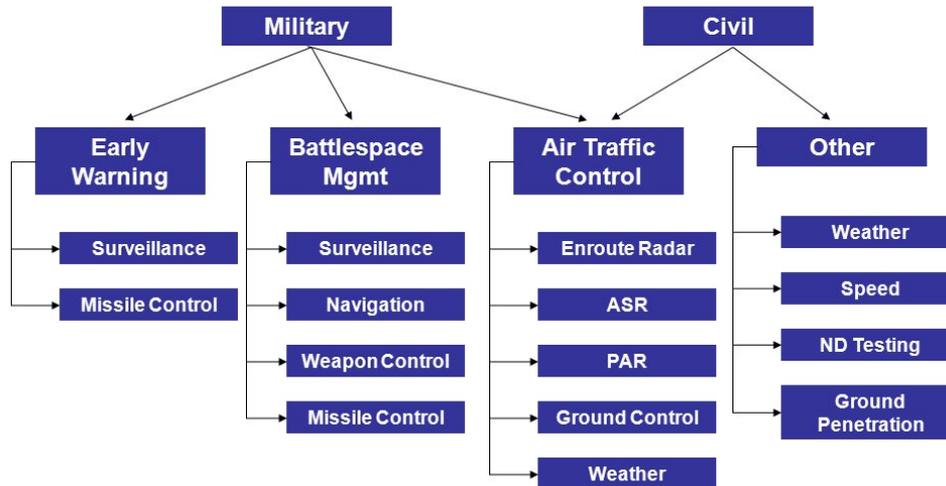


Figura 8 – Tipos de Radar conforme sua Aplicação

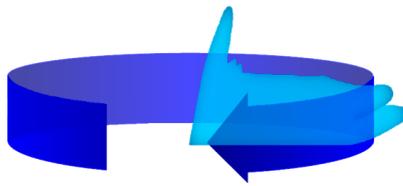
A imagem acima nos fornece uma visão de como os radares também podem ser classificados no que diz respeito ao tipo de missão que eles vão executar. A primeira divisão nesse caso é se o radar vai ser usado para fins militares ou para fins civis. A seguir, serão abordados os principais tipos.

1.2.1 Radar de Defesa Aérea ou Early Warning

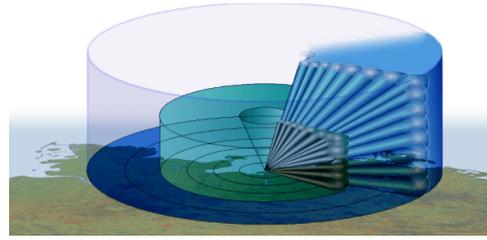
Os radares de defesa aérea ou *Early Warning* são, como o próprio nome diz, utilizados para auxiliar na defesa de territórios, fornecendo ao comando de defesa um aviso antecipado de movimentações, aproximações ou possíveis ataques. São basicamente radares de monitoramento, que vão servir de base para desencadear possíveis ações de defesa contra ataques inimigos. Esse tipo de antecipação pode muitas vezes fazer a diferença, já que ataques surpresa podem ser fatais.

Outra característica importante desse tipo de radar é que eles podem estar instalados tanto em terra, fixados na localidade que se deseja proteger, quanto em ar, a bordo de aeronaves especialmente designadas para monitoramento, podendo, assim, ser mais flexíveis e observar locais onde o acesso por terra é difícil ou onde não é possível e viável a instalação de radares terrestres. Como problemas podem surgir de qualquer lado, a abrangência desse tipo de radar é de 360°, além de possuírem alcance de mais de 300 milhas náuticas de raio. Tais radares podem ser chamados de 2D, caso forneçam apenas direção e distância, ou 3D, quando, além dessas duas informações, informam também a altura do alvo.

Falando de maneira mais específica, os radares de defesa aérea têm como principais funções o já citado *Longe Range Early Warning* (incluindo o *Airborne Early Warning*, AEW), alerta contra mísseis, medição de altura do alvo e interceptação controlada em solo.



(a) Esquema de Radar 2D



(b) Esquema de Radar 3D

Figura 9 – Radares 2D e 3D



(a) Radar de Defesa Aérea Terrestre Fixo



(b) Radar de Defesa Aérea no Ar em Avião

Figura 10 – Radares Terrestre e no Ar

1.2.2 Radar de Campo de Batalha ou Battlespace Management

Radares de campo de batalha são parecidos com os radares terrestres de defesa aérea, mas com duas principais diferenças: eles são móveis, já que o campo de batalha é dinâmico e necessita de flexibilidade; e atuam mais direcionados a ameaças terrestres, apesar de que também podem identificar alvos aéreos, dependendo do tipo.

Por serem móveis, eles são altamente portáteis e obviamente são carregados em veículos terrestres, como caminhões ou tanques. Em geral, são radares primários pulsados, com curto intervalo de repetição e baixa duração de cada pulso.

As principais classificações desse radar são: *Weapon Control Radar*, radares que são apontados para um projétil para traçar sua trajetória; *Multi-Function Radar*, radares com diversas funções no campo de batalha; *Multi-Target Radar*, radares que conseguem monitorar vários alvos ao mesmo tempo; MORTAR, radares que conseguem identificar vários pontos da trajetória de um projétil para prever onde ele vai cair.

1.2.3 Radar de Controle de Tráfego Aéreo

Os radares de controle de tráfego aéreo são os mais comuns na aviação civil e comercial, apesar de também existir controle de tráfego aéreo militar. São radares fixos no solo cujo objetivo é mapear os deslocamentos das aeronaves no céu, ou seja, mapear o tráfego aéreo de determinado local ou região.

Esses radares podem ser encontrados em cinco versões:

- *En-Route Radar* ou ERR, que opera justamente monitorando as aeronaves enquanto elas estão em suas rotas/seus planos de voo em uma região, identificando



(a) Weapon Control Radar em Caminhão



(b) Multi-Function Radar (atrás do canhão, ao fundo)



(c) Multi-Target Radar em Drones



(d) MORTAR em Jipe

Figura 11 – Diferentes Tipos de Radares de Campo de Batalha

e determinando a posição, velocidade e o curso de cada uma, com um alcance de aproximadamente 250 milhas náuticas e operação em banda L;

- *Air Surveillance Radar* ou ASR, que também mapeia e identifica aeronaves como o radar anterior, mas dessa vez em relação às aeronaves próximas de um aeródromo, com um alcance menor de 40 a 60 milhas náuticas para aviões que estejam até 25 mil pés de altitude e operação em banda E;
- *Precision Approach Radar* ou PAR, que atuam no mapeamento de aeronaves quando essas estão em procedimento de aproximação e pouso, especialmente quando as condições climáticas estão ruins e a torre de controle precisa identificar cada avião com precisão, com operação também em banda L;
- *Surface Movement Radar*, que, ao contrário dos anteriores, atua para movimentações em solo, usualmente em aeroportos, e não apenas mapeando aeronaves, mas também todo tipo de veículo terrestre que participa das operações normais de um aeroporto, com emissão de pulsos extremamente curtos em banda J;
- *Special Weather Radar*, radares meteorológicos de solo, instalados nas proximidades de aeroportos ou em regiões de importância para aproximações e operações gerais de aeronaves, para detectar formações meteorológicas que possam impactar na devida segurança em voo daquela localidade, o que pode muitas vezes exigir até mesmo o fechamento do aeródromo, com vários tipos de bandas, mas o mais recomendado é o de banda S.

A diferença de bandas é apenas relacionada ao comprimento de onda e à frequência dos sinais emitidos. A imagem a seguir faz essa diferenciação.

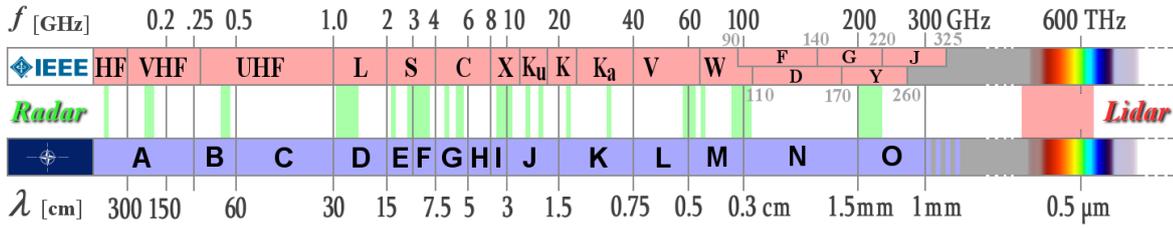


Figura 12 – Bandas e suas Diferenças

A seguir, pode-se observar cada tipo de radar abordado nessa seção e como geralmente suas informações são disponibilizadas.



(a) Típico ERR



(b) Tela Típica do ERR

Figura 13 – En-Route Radar



(a) Típico ASR



(b) Tela Típica do ASR

Figura 14 – Air Surveillance Radar



(a) Típico PAR



(b) Tela Típica do PAR

Figura 15 – Precision Approach Radar



(a) Típico SMR



(b) Tela Típica do SMR

Figura 16 – Surface Movement Radar



(a) Típico SWR



(b) Tela Típica do SWR

Figura 17 – Special Weather Radar

1.2.4 Radar Meteorológico

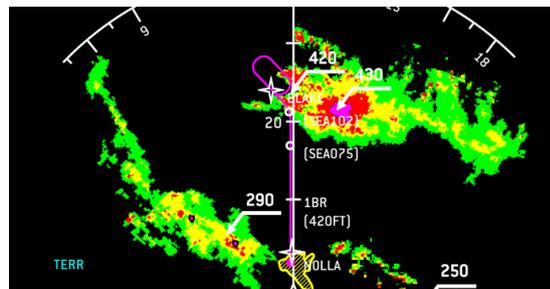
Apesar de radares meteorológicos já terem sido abordados, é importante ressaltar que existem dois tipos desses radares: os em solo (como da seção anterior) e os a bordo da aeronave, que é o propósito desta seção.

Não apenas é importante saber como as formações meteorológicas estão ao redor dos aeroportos, mas também como elas estão durante a rota da aeronave, por todos os pontos que ela vai passar. Ter essa antecedência é essencial para que os pilotos possam evitar tempestades, regiões com fortes ventos, regiões com forte formação de gelo, entre outras formações indesejadas, realizando desvios de rota para garantir a segurança em voo. Apesar dos aviões modernos estarem cada vez mais imunes aos efeitos adversos do clima, a recomendação de segurança é sempre evitar formações perigosas, principalmente nuvens do tipo *Cumulonimbus*, que são nuvens de tamanho gigantesco (tanto horizontal quanto verticalmente) e que são indutoras de tempestades. Esse tipo de informação pode muitas vezes salvar vidas, a exemplo da tragédia do voo 447 da Air France em 2009, quando um Airbus A330 adentrou uma região de clima bastante instável no Atlântico e sofreu uma série de problemas. Os pilotos não conseguiram a recuperação da aeronave, que se chocou contra o mar a mais de 600 km de Fernando de Noronha.

Dessa forma, as aeronaves contam atualmente com esse tipo de sistema, que fornece a situação meteorológica à frente da rota, se estendendo de 30 a 80 milhas náuticas, dependendo da angulação dos feixes emitidos (quanto mais estreita, mais longe a visão do radar). Essa distância é suficiente para que os pilotos possam realizar desvios na rota, caso identifiquem formações adversas. Por isso, são colocados no radome das aeronaves, sendo o item mais à frente em um avião. Atuam geralmente entre 8 e 12.5 GHz e detectam gotículas de água, de maneira que quanto mais gotículas, mais intensa e densa é a região de precipitação. Isso é convertido para os pilotos em uma tela com várias cores, sendo preto a ausência de formações, verde formações leves, amarelo e vermelho formações médias e magenta formações pesadas.



(a) Radar Meteorológico no Radome de um Avião



(b) Tela do Radar Meteorológico a Bordo de Aeronave

Weather Mode Color	Intensity	Approximate Precipitation Rate (in/hr.)
Black	< 23 dBZ	< .01.
Green	23 dBZ to < 32 dBZ	.01 - 0.1.
Yellow	32 dBZ to < 41 dBZ	0.1 - 0.5
Red	41 dBZ to < 50 dBZ	0.5 - 2
Magenta	50 dBZ and greater	> 2

Figura 19 – Cores e seus Significados no Radar Meteorológico

1.3 Tipos Especiais de Radares

1.3.1 Synthetic Aperture Radar

O *Synthetic Aperture Radar* ou SAR, Radar de Abertura Sintética, é um tipo especial de radar utilizado para mapear detalhadamente o solo, a partir de aeronaves que tenham o dispositivo instalado. Como o avião se move, é possível realizar essa leitura do terreno de vários ângulos diferentes e mapeando-se vários pontos juntos. Isso faz com que o radar tenha uma abertura aumentada artificialmente, como se ele possuísse uma antena muito maior do que ele realmente tem. Por razões óbvias, em geral o alcance desse radar não é grande, em torno de 25 milhas náuticas.

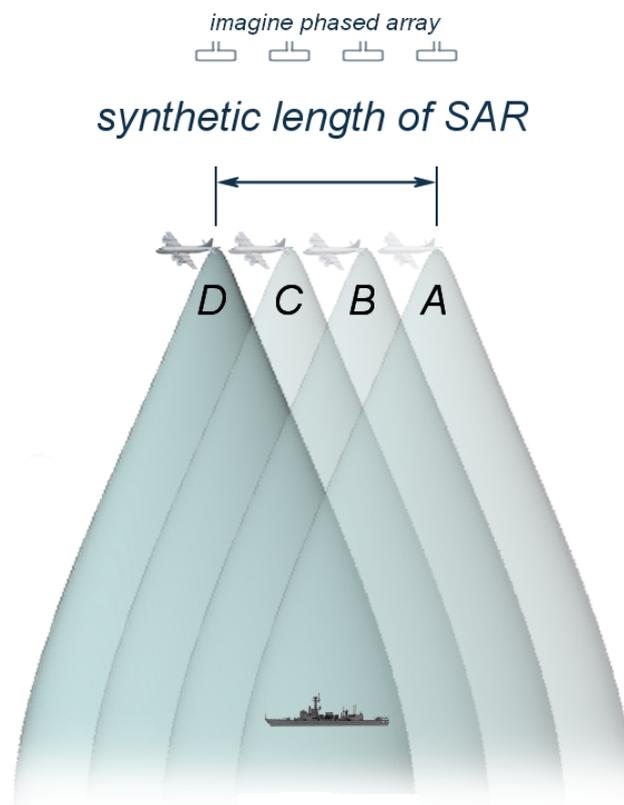


Figura 20 – Modo de Operação do SAR

Graças a esse artifício sintético, a imagem capturada é bem mais detalhada do que de outros radares que também possuem essa função, sendo que, dependendo da angulação

capturada, imagens em 3D também podem ser obtidas. Importante citar que o uso desse radar está restrito a alvos estáticos.

1.3.2 Millimetric Radar

Os *Millimetric Radars*, literalmente Radares Milimétricos, são radares que operam a frequências altíssimas, chegando a 300 GHz (quase infravermelho), resultando em um comprimento de onda em torno de 1 mm.

O grande destaque desse radar é que, com esse valor de frequência, o sinal por ele emitido quase não sofre interferência de fatores externos, como fumaça, vapor d'água, aerossóis ou nuvens. Sua desvantagem, por outro lado, é que eles estão bastante sujeitos à atenuação atmosférica, ou seja, o sinal é facilmente absorvido pela atmosfera. Além disso, para sua operação, antenas de pequeno comprimento já são suficientes, porém a potência requerida é bastante alta, para alcançar os valores necessários de frequência.

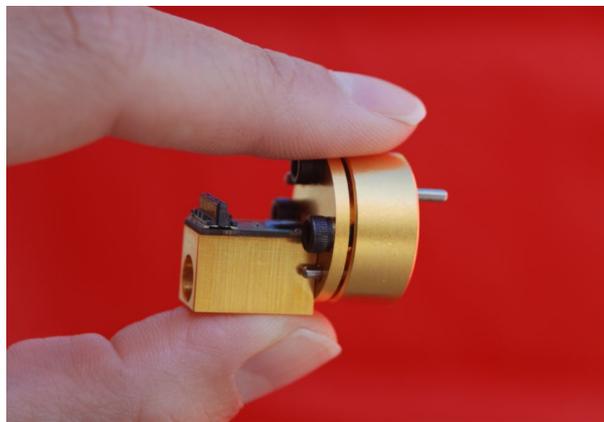


Figura 21 – Radar Milimétrico

1.4 Lóbulos Secundários

Radares, como qualquer máquina ou item projetado pelo ser humano, possuem imperfeições e não atuam com 100% de eficiência. Por causa disso, quando da emissão dos sinais pelo transmissor, além do lóbulo principal, acabam surgindo outros lóbulos residuais, chamados de lóbulos secundários. Esses lóbulos também podem ser recebidos pela unidade receptora, causando interferência e imprecisões na informação emitida originalmente. Em inglês, esses lóbulos são conhecidos como *side lobes*.

Como esses lóbulos não retornam como um sinal direto e sim secundário, eles estão sujeitos ao efeito Doppler, que é a mudança da percepção de frequência e comprimento de onda de um sinal para elementos em movimento. Nesse caso, a aeronave está em movimento.

A primeira questão a ser analisada quanto a isso é que a forma do pulso depende do ângulo de incidência do sinal, como pode ser visto na Figura 55(a). Outro fator que influencia nessa forma é a velocidade relativa da aeronave e o objeto, como na Figura 55(b).

Por causa disso tudo, os lóbulos secundários vão sempre gerar uma leitura do chão que tem o formato da Figura 56.

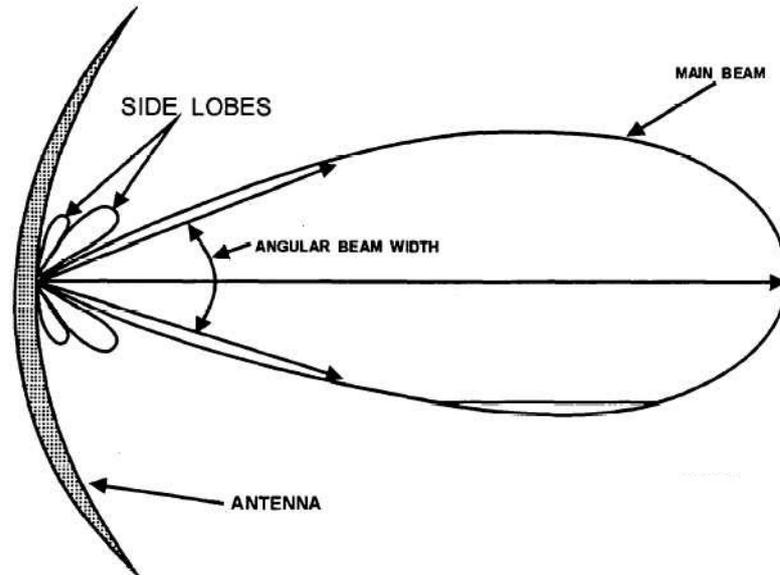
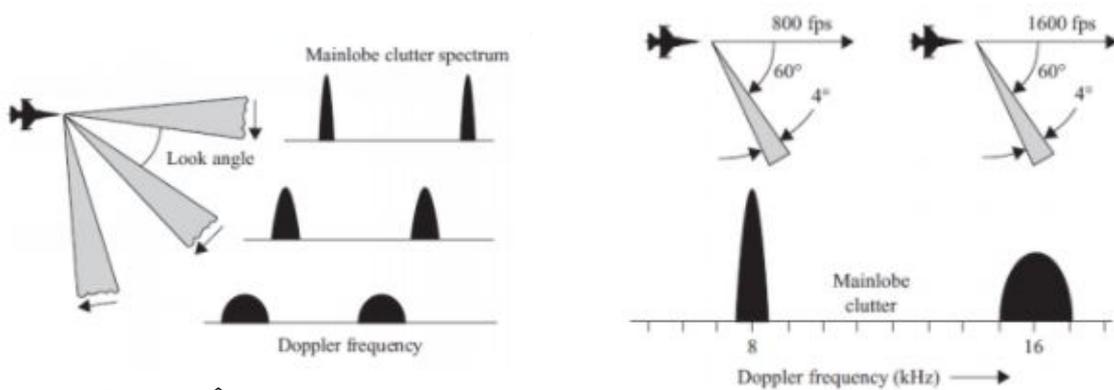


Figura 22 – Lóbulos Secundários



(a) Efeito do Ângulo de Incidência

(b) Efeito da Velocidade

Figura 23 – Efeitos na Forma do Pulso

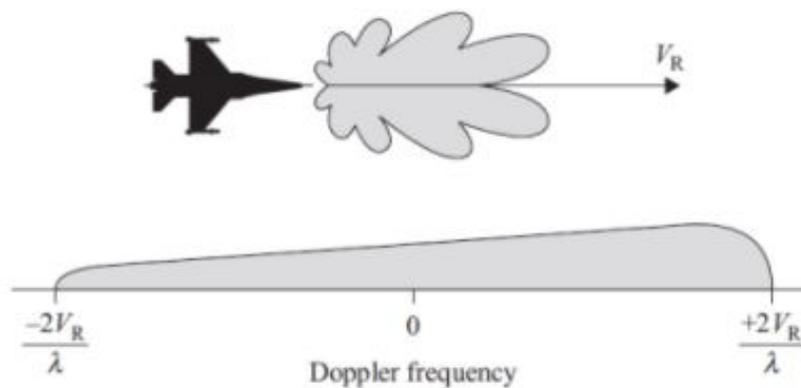


Figura 24 – Leitura do Chão com Interferência de Lóbulos Secundários

A esse sinal alterado pelos lóbulos secundários, adiciona-se o retorno da altura sem o efeito Doppler (que é mais forte) e o retorno do chão devido ao lóbulo principal. Assim, o sinal resultante é como o seguinte:

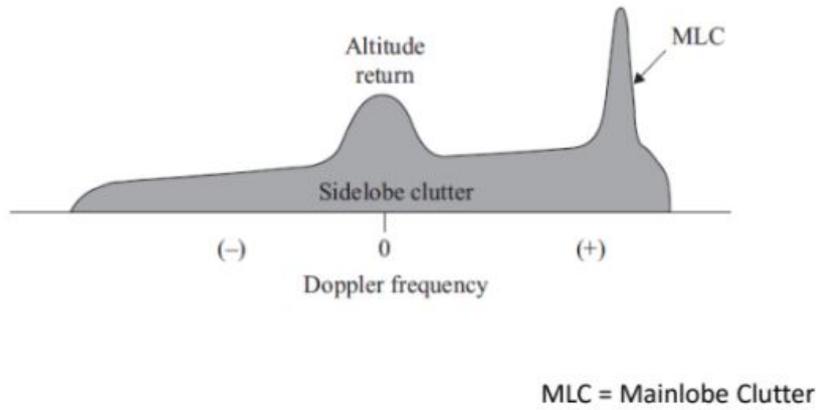


Figura 25 – Sinal Resultante

Dessa forma, a detecção de alvos por aeronaves deve ser estudada a partir de alguns casos particulares, para se garantir o completo entendimento de cada um. As imagens a seguir ilustram esses casos.

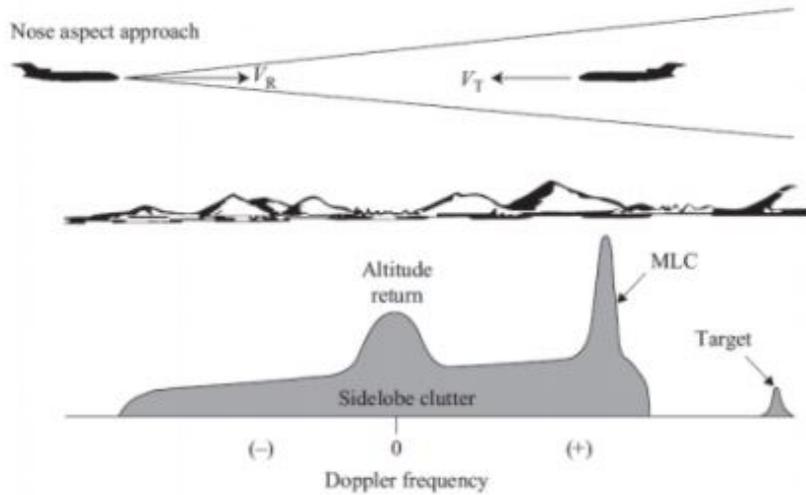


Figura 26 – Objeto Vindo em Direção à Aeronave

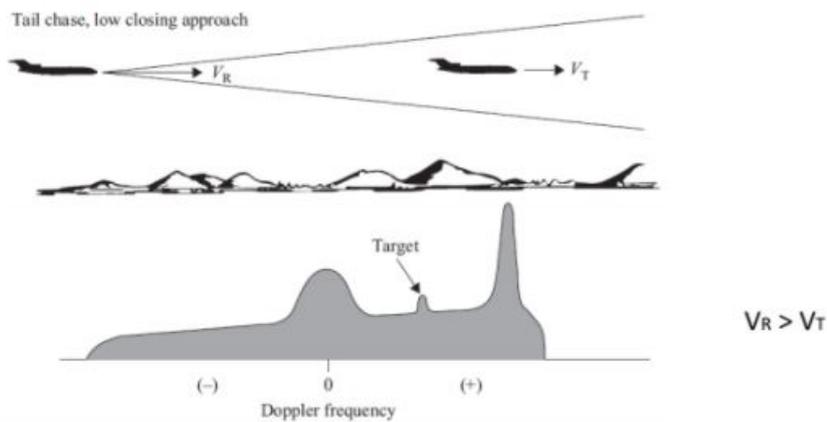


Figura 27 – Objeto se Aproximando com Baixa Velocidade Relativa

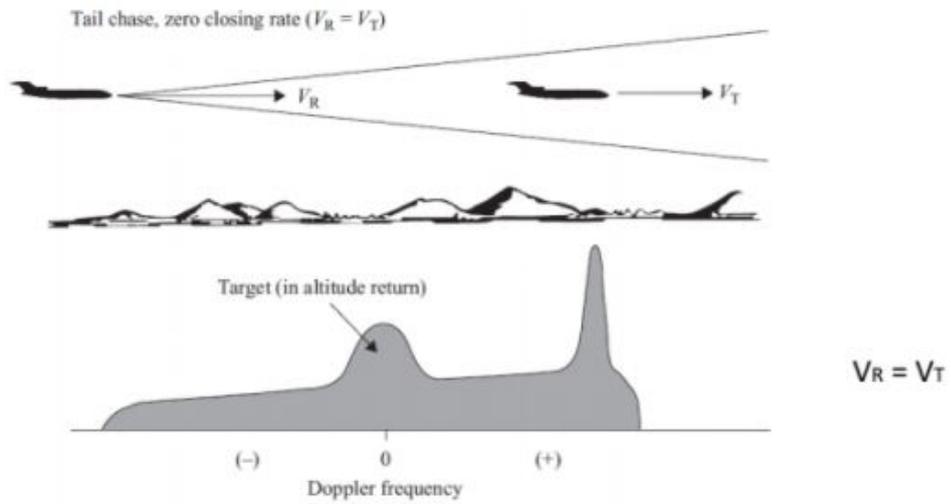


Figura 28 – Objeto com Velocidade Relativa Zero

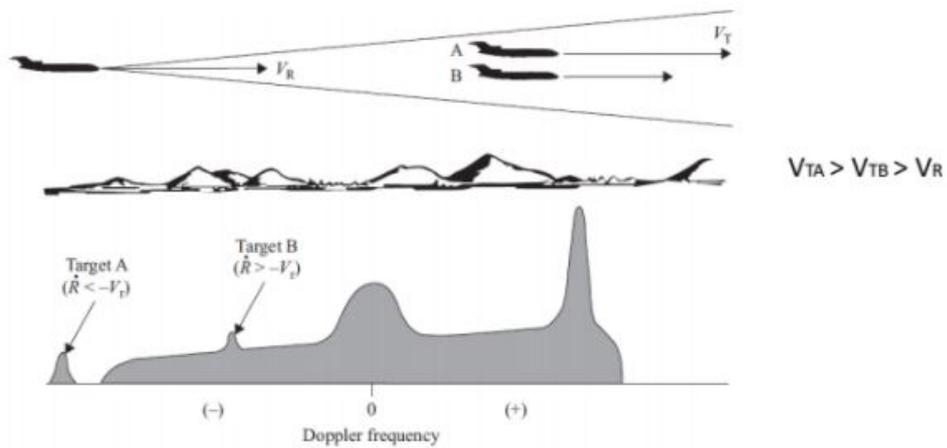


Figura 29 – Objetos com Velocidades Relativas Diferentes

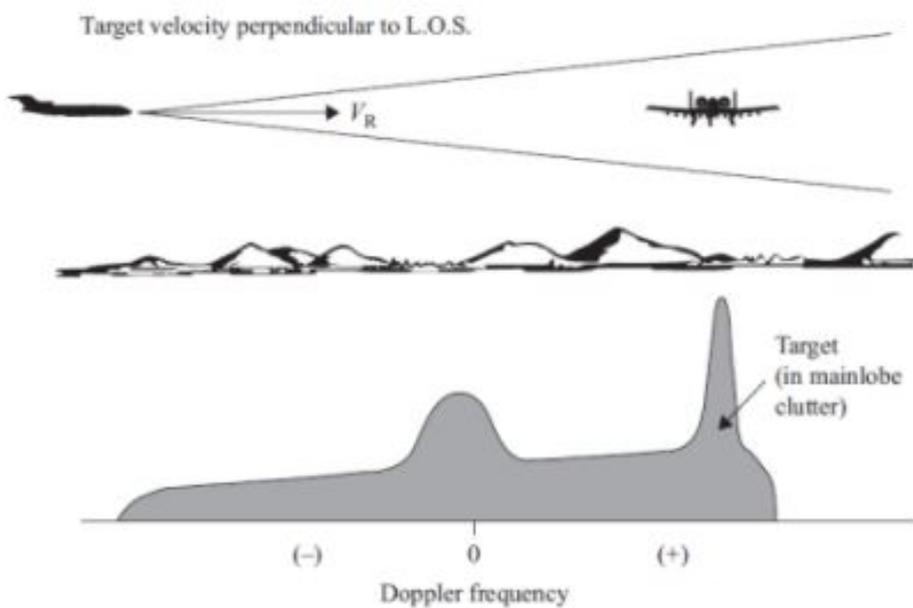


Figura 30 – Objeto com Trajetória Perpendicular

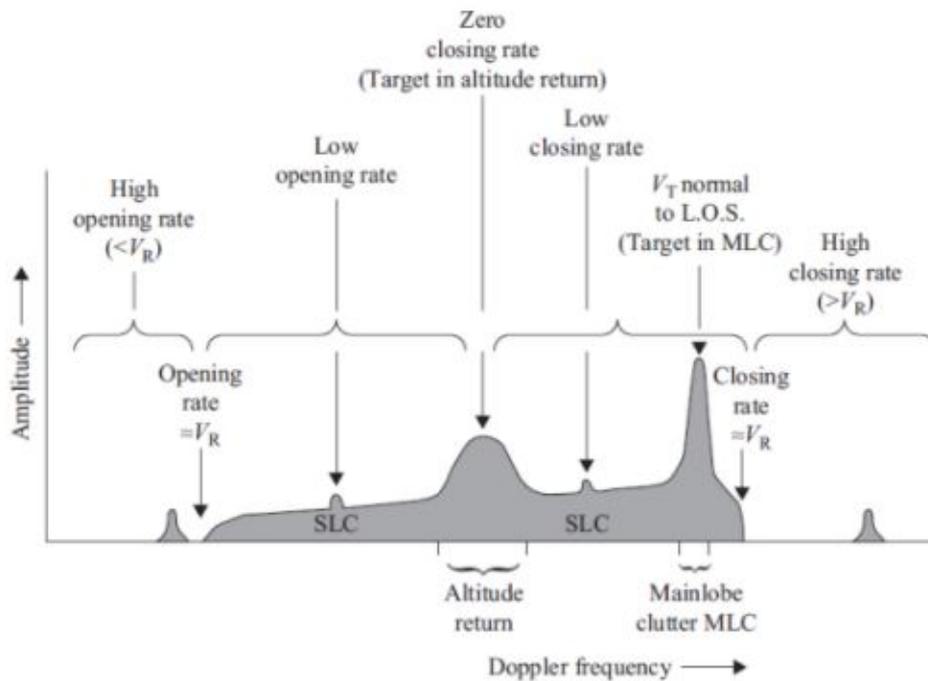


Figura 31 – Comparação Geral dos Casos

1.5 Considerações Finais

Ao longo de todo esse conteúdo, foi possível averiguar que, para o projeto de um radar montado em uma aeronave, alguns detalhes devem ser considerados. Tais detalhes estão destacados nos tópicos a seguir:

- Tamanho da antena (consequentemente o tamanho do comprimento de onda);
- Efeitos aeroelásticos da antena;
- Vibração da antena com a aeronave em funcionamento;
- Compatibilidade eletromagnética;
- Efeitos aerodinâmicos causados pela antena.

Referências

1. *Advanced Avionics Handbook*: US Department of Transportation - Federal Aviation Administration, 2009.
2. *Instrument Flying Handbook*: US Department of Transportation - Federal Aviation Administration, 2012.
3. Mahafza, Bassem R. *Radar Signal Analysis and Processing Using Matlab*. Boca Raton, 2009.
4. McShea, Robert E. *Test and Evaluation of Aircraft Avionics and Weapon Systems*, 2nd Edition. Edison, 2014.
5. Moir, I. *Civil Avionics Systems*, 2nd Edition. Chichester, 2013.
6. Moir, I. *Military Avionics Systems*. Chichester, 2006.
7. Kayton, M. e Fried, W. *Avionics Navigation Systems*, 2nd Edition. Nova York, 1997.