2
Conceitos Radar

Neste capítulo serão tratados os conceitos necessários para se entender um sistema radar. É preciso entender quais são as principais medidas que um radar detecta, quais são os componentes que compõem um sistema radar e como eles funcionam. Entenda-se sistema radar como o radar propriamente dito e os elementos externos que interagem com ele, sendo que o radar é dividido em subelementos para uma melhor análise.

2.1
Medidas Radar

É necessário conhecer as medidas de interesse de um radar. Ele é um equipamento que tem por objetivo localizar objetos, denominados vetores, no espaço. Para tal ele deve ser capaz de medir a posição do vetor e a variação destas medidas. Assim, é utilizado um sistema de coordenadas para o posicionamento dos vetores em relação ao radar. O sistema mais comumente utilizado é o sistema de coordenadas esféricas adicionado da medida de velocidade na direção radial.

As coordenadas esféricas e a velocidade radial são conhecidas como:

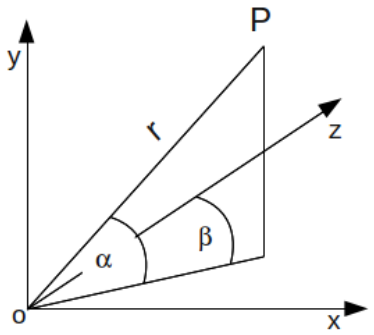

Figura 2.1: Coordenadas esféricas

1. Azimute - medida de abertura angular cujo valor em graus perfaz no plano horizontal, ângulo β ilustrado na Figura 2.1;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

2. Elevação - medida de abertura angular cujo valor em graus mede a separação entre o plano horizontal e uma dada localidade, ângulo α ilustrado na Figura 2.1;

3. Distância - medida de comprimento na direção radial de uma localidade, distância do ponto P a origem ilustrada na Figura 2.1;

4. Velocidade radial - componente da velocidade do objeto na direção do raio.

2.2 Simulador Radar

Existem diversos tipos de radar que podem ser classificados de acordo com a finalidade e funcionalidade. Com respeito a finalidade podem ser citados os radares para controle de trafego aéreo, para busca e vigilância (radares de defesa), de monitoramento de trafego rodoviário, radares de mapeamento de solo e superfície, radares meteorológicos e radares de monitoramento da órbita terrestre.

Com respeito a funcionalidade podem-se dividir em radares pulsados e radares de emissão continua. Os radares pulsados realizam a transmissão do pulso e a recepção em momentos distintos e normalmente com uma determinada frequência de repetição. Existem variações como os que transmitem pulsos em rajadas. E os radares de emissão continua transmitem continuamente um sinal e realizam a recepção simultaneamente. Ainda existem radares que utilizam uma antena com características fixas; os que possuem uma matriz de antenas que podem ter suas características alteradas dinamicamente durante o funcionamento; os que possuem uma antena mas utilizam um movimento na antena para "simular" uma antena maior; e os radares que utilizam duas antenas em localidades diferentes, normalmente uma para transmissão e outra para recepção. O foco deste estudo será nos radares pulsados, que utilizam uma antena ou uma matriz de antenas.

Um simulador de radar precisa simular o comportamento de um radar, dos elementos que interagem e dos efeitos físicos que o meio provoca durante a propagação da onda eletromagnética. Assim, serão analisados os elementos e os subelementos que compõem um radar simplificado que servirá de base para o entendimento do funcionamento de um sistema radar.

Na Figura 2.2 são ilustrados os elementos de um sistema radar. Esses elementos podem ser reunidos em camadas diferentes denominadas: ambiente, *hardware* do radar e *software* do radar. Sendo que a camada *software* contém

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

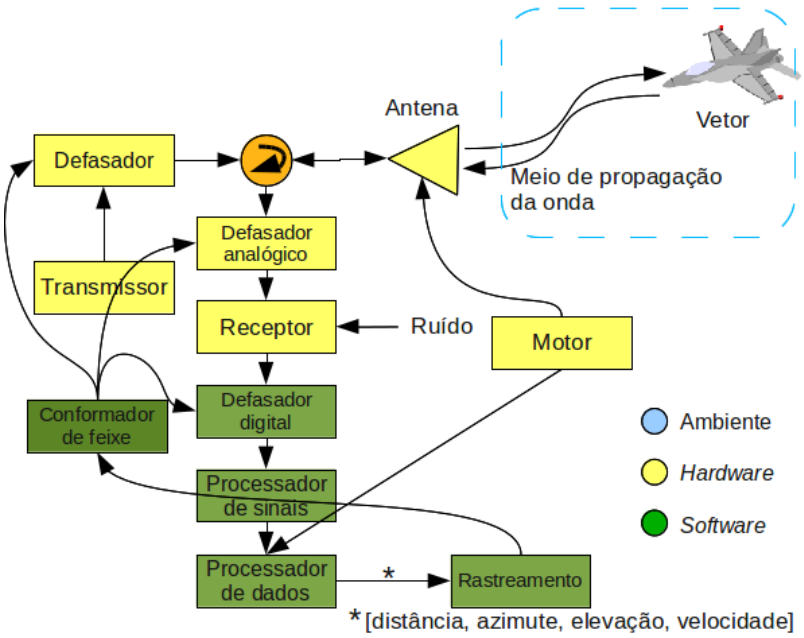

Figura 2.2: Visão de um sistema radar

elementos de controle e de processamento e os de processamento podem ser subdivididos em processamento de sinais e processamento de dados.

A camada de ambiente é composta pelos elementos vetores e pelos efeitos do meio na propagação eletromagnética. A camada de *hardware* comporta os elementos concretos do radar como os módulos de transmissão e recepção, a antena e o motor do radar. Dentro da camada de *software* encontram-se os programas do radar, existem programas de controle como o controlador de feixe e o rastreamento e programas de processamento, mais precisamente os programas de processamento de sinais de processamento de dados. A seguir cada camada será analisada com mais detalhes.

2.2.1 Camada de hardware

Na camada de *hardware* são simulados os elementos concretos do radar. O transmissor é responsável pela geração do pulso a ser transmitido e pela sua modulação. Cada pulso é transmitido em um período conhecido como intervalo de repetição de pulso, IRP, definido em conjunto com a frequência de repetição de pulso, FRP, de acordo com a EQ. 2-1.

$$IRP = \frac{1}{FRP} \tag{2-1}$$

O receptor é responsável pelo processamento analógico do sinal recebido. Ele executa a demodulação do sinal com filtragem e mudança de frequência da portadora. Realiza a conversão do sinal analógico para digital com a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

amostragem e quantização do sinal. Pode realizar a conversão do sinal real para um sinal complexo. Durante o processamento analógico é introduzido o ruído térmico que o equipamento induz (23).

A antena é o elemento que irradia e recebe a energia eletromagnética efetivamente. Sendo responsável pela transformação da energia eletromagnética guiada em energia eletromagnética irradiada. Durante a transmissão uma antena tem a função de concentrar a energia irradiada num feixe direcionado no espaço. Na recepção a antena capta a energia contida do sinal e entrega ao receptor. Portanto a antena em um radar desempenha funções reciprocas porém relacionadas. O mapeamento da energia que está sendo irradiada ou captada em dada direção angular recebe o nome de diagrama de irradiação da antena.

Uma antena, que irradia com a mesma intensidade em todas as direções, é conhecida como antena isotrópica. Entretanto uma antena isotrópica é puramente teórica, na prática as antenas irradiam com diferentes intensidades em diferentes direções. É possível construir uma antena para que ela concentre o seu maior potencial de irradiação em uma determinada direção, que é conhecida como feixe ou lóbulo de irradiação da antena.

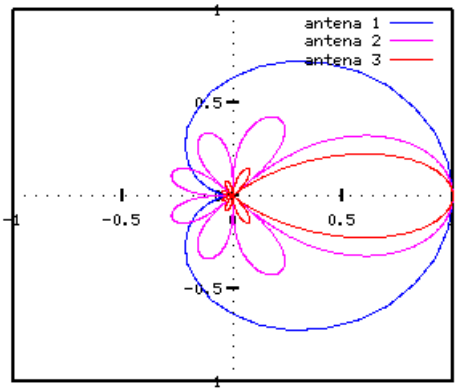

Figura 2.3: Diagrama de irradiação

Em radares é desejável utilizar uma antena de feixe estreito, uma vez que deseja-se utilizar toda a energia em uma determinada direção. Na Figura 2.3 são exibidos os diagramas de irradiação de três antenas, note que a antena 3 possui o feixe mais estreito. Na Figura 2.3 no diagrama da antena 2, por exemplo, é possível observar a existência de um lóbulo principal, o maior na horizontal, e de lóbulos secundários; é altamente desejável que os lóbulos secundários sejam os menores possíveis em relação ao principal com o objetivo de se evitar o recebimento de sinais relevantes por esses lóbulos secundários que podem provocar cálculos de medidas erradas.

O motor, quando existente, realiza o giro da antena do radar informando qual a direção do lóbulo principal de irradiação da antena, sendo necessário

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

para a correta simulação das reflexões dos pulsos de transmissão pelos vetores posicionados no espaço simulado.

2.2.2 Camada de ambiente

Na camada de ambiente são simulados os elementos externos que interagem com radar e os efeitos do meio na propagação da onda eletromagnética. Para se obter um sinal de reflexão o com características realistas é necessário simular os comportamentos dos vetores, um avião por exemplo, se deslocando no espaço, o efeito da reflexão nestes vetores do pulso transmitido, a integração de todas as reflexões da transmissão atual e também de transmissões anteriores.

Na realidade o vetor é o objeto de interesse que se deseja detectar a sua posição e velocidade. Este pode ser um avião, um carro, um helicóptero, um navio ou uma pessoa. O conceito de vetor pode ser estendido para os objetos que se deseja estudar os efeitos na reflexão do pulso radar, como por exemplo um prédio ou um obstáculo natural como um monte. Os pulsos refletidos também são conhecidos como eco do radar. As principais características de um vetor são a sua posição, velocidade, aceleração e área de reflexão.

Neste estudo foram modelados vetores de reflexões determinísticas como um avião ou um carro, onde a reflexão ocorre na fuselagem. Não foram realizados estudos de reflexão no rotor e pás de um helicóptero por exemplo, nem estudos de reflexões probabilísticas.

Após o pulso ser irradiado pela antena, ele se propaga pelo meio até atingir um obstáculo. Nessa trajetória até a colisão existem diversos fenômenos que podem ser modelados como a difração, reflexão, refração, absorção e dispersão da onda. Um efeito bastante interessante e pertinente ao escopo de radares é o efeito de multi percurso que ocorre com duas ou mais reflexões do pulso irradiado. Outro efeito, pertinente a radares marítimos, é o efeito da reflexão nas ondas do mar.

Neste estudo os fenômenos modelados foram a dispersão e a reflexão da onda. A dispersão da onda contribuiu com a diminuição da energia do pulso que é proporcional a distância percorrida. A reflexão ocorre quando a onda colide com um obstáculo, no caso um vetor de interesse, e a área do vetor é diretamente proporcional á intensidade de energia refletida.

2.2.3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

Camada de software

Na camada de *software* encontram-se os componentes do radar que podem ser divididos em componentes de processamento e de controle. Existem programas que podem atuar no processamento e no controle ao mesmo tempo, é o caso do rastreamento que, dependendo da finalidade do radar, pode atuar no controle da direção do feixe.

Componentes de processamento

Os componentes de processamento são artefatos de código que atuam passivamente. Eles recebem um sinal ou um dado e processam a informação. Eles podem ser divididos em componentes de processamento de sinais que recebem uma grande quantidade de sinais e extraem os dados úteis, relativos a reflexões de pulsos transmitidos; e componentes de processamento de dados que recebem os dados referentes a uma reflexão e transformam estes em informação sobre o posicionamento do vetor.

O processador de sinais realiza o processamento digital de sinal como correlação, transformadas matemáticas e detecção de limiares. Tem a finalidade de coletar os sinais de reflexão com informação útil para o cálculo dos parâmetros desejáveis do vetor de interesse.

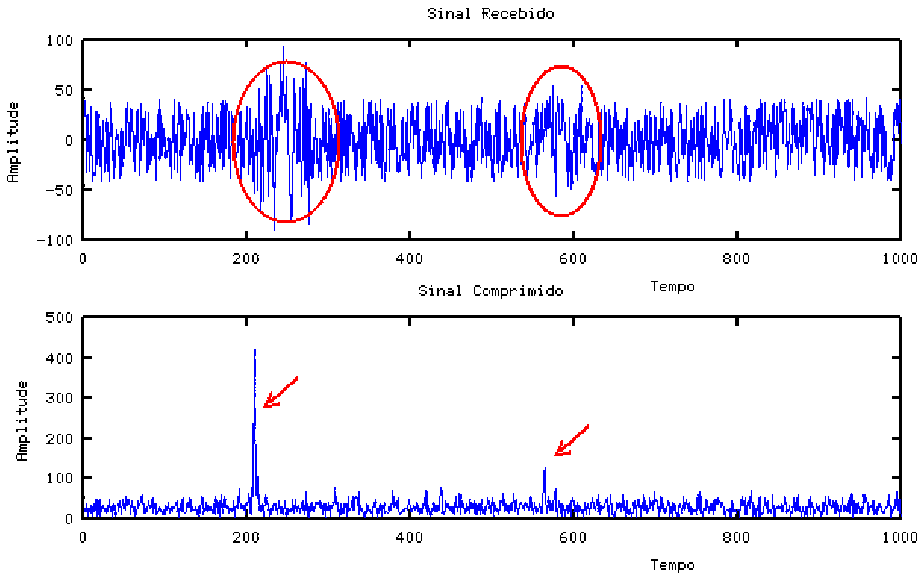

Figura 2.4: Sinal recebido X Sinal comprimido

O processamento digital inicia-se com a compressão de pulso que é a correlação do sinal recebido com o pulso transmitido, comprimindo assim a energia do pulso refletido que se encontra em uma determinada faixa do sinal recebido para uma faixa mais estreita com a finalidade de sobressaltar o sinal de interesse em relação ao ruido. Na Figura 2.4 é exibido um sinal recebido com

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

dois pulsos refletidos em destaque e o absoluto do mesmo sinal após realizada a compressão de pulso, em destaque.

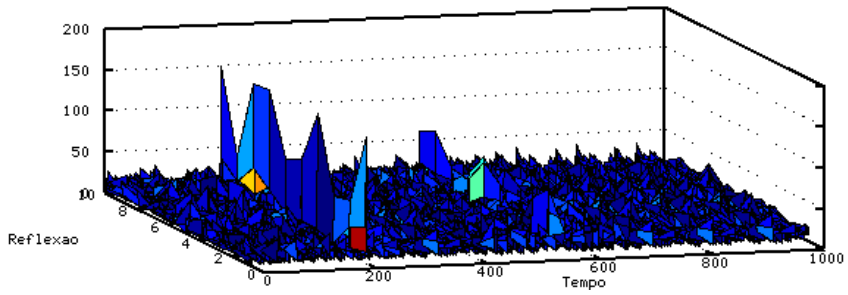

Figura 2.5: Sinais recebidos acumulados

Após a compressão de pulso os picos de energia que ultrapassem um determinado nível são coletados para futuro processamento. Esse nível de detecção pode ser determinado no domínio do tempo, entretanto existem análises mais robustas como a mudança de domínio através do uso de transformadas matemáticas. Para o uso de transformadas matemáticas é necessário o acumulo de sinais recebidos. Na Figura 2.5 é exibida uma matriz com dez sinais; as amostras, para a aplicação da transformada, são coletadas no sentido do eixo das reflexões em um ponto fixo no eixo do tempo.

No gráfico superior da Figura 2.6 são exibidas as amostras coletadas no índice 208 do eixo do tempo da Figura 2.5. Observe a mudança de fase do sinal provocada pela velocidade do vetor que o refletiu. No gráfico inferior é exibido o sinal após a transformada no domínio da frequência. Observe o pico de sinal correspondente a frequência da mudança de fase causa pela velocidade, esta é a frequência correspondente ao efeito doppler. Na Figura 2.7 é exibida a mesma análise para o índice 400 do eixo do tempo da Figura 2.5, onde somente ruído é encontrado, a falta de coerência da fase do ruído não revela nada de interessante no domínio da frequência.

Após a transformação matemática a detecção de nível é aplicada. Para a delineação do limiar também existem diferentes técnicas, sendo a mais simples a determinação de um limiar fixo conhecida como limiar de *threshold* (29) ,observada na Figura 2.8, e a exemplo de outra técnica existe a comparação entre o somatório dos níveis mais altos do sinal com o somatório dos níveis mais baixos, conhecida como *CFAR* (27).

O processador de dados tem a finalidade de calcular os parâmetros desejáveis do vetor de interesse. Neste estudo os parâmetros possíveis de serem calculados são os de posição angular, azimute, elevação e distância e o de velocidade.

Para a cálculo da distância utiliza-se a medida de tempo entre o pulso transmitido e a recepção da reflexão desse pulso que é diretamente proporcional

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

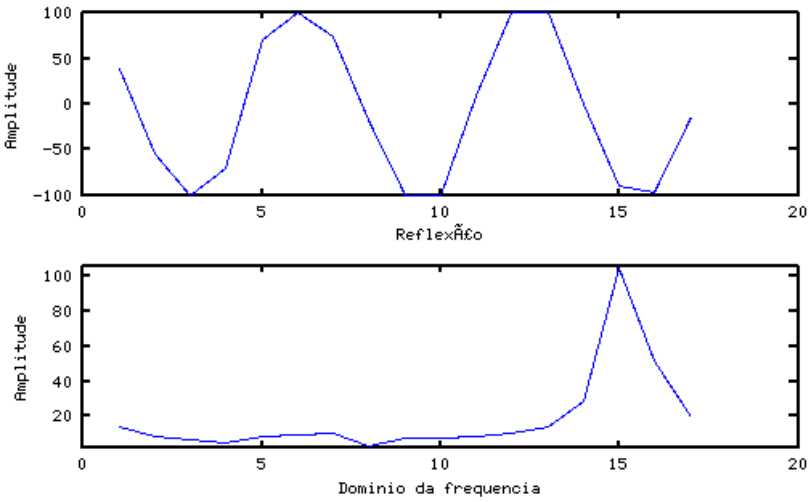

Figura 2.6: Amostras de reflexões consecutivas

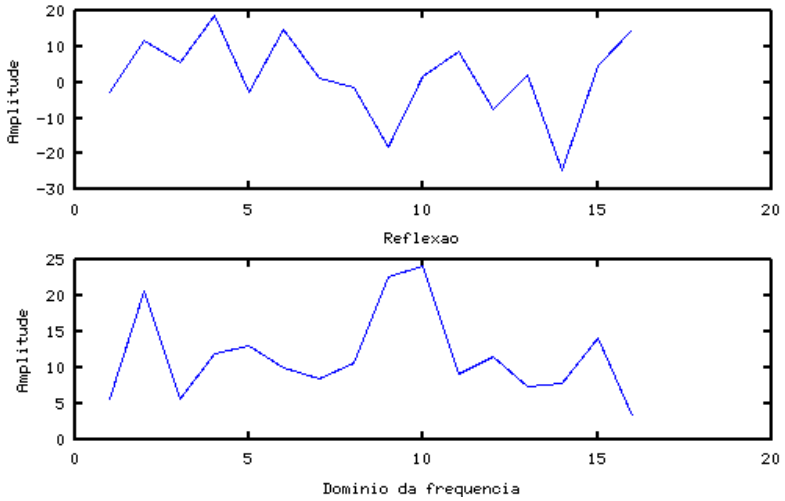

Figura 2.7: Amostras de ruído

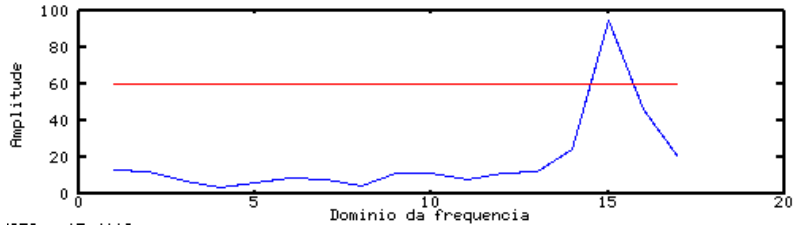

Figura 2.8: Detecção de threshold

à distância do vetor que refletiu o pulso. Na Figura 2.9 os intervalos de tempo T_1 e T_2 são proporcionais às distâncias dos vetores ao radar conforme a equação 2-2.

$$distancia_n = tempo_n * \frac{velocidade_{luz}}{2} \tag{2-2}$$

$$frequencia_{doppler} = -2 * \frac{velocidade_{vetor}}{\lambda} \tag{2-3}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

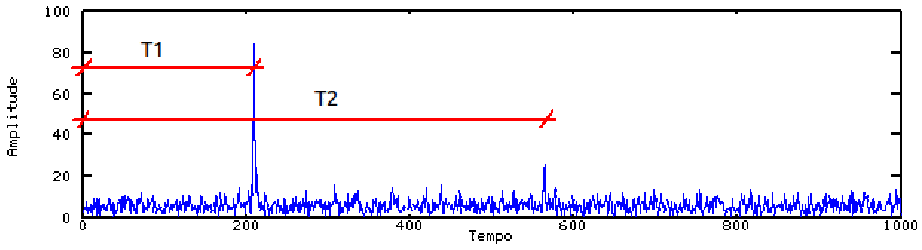

Figura 2.9: Tempo de recepção é proporcional a distância do vetor

No cálculo da velocidade utilizamos o efeito doppler 2-3 onde a velocidade do vetor induz uma alteração da frequência da onda eletromagnética refletida. Entretanto a medida dessa alteração de frequência em uma única reflexão normalmente não é possível devido à amostragem do sinal mas é possível calcular essa mudança de frequência pela diferença de fase entre sinais refletidos consecutivos, conforme ilustrado no primeiro gráfico da Figura 2.6.

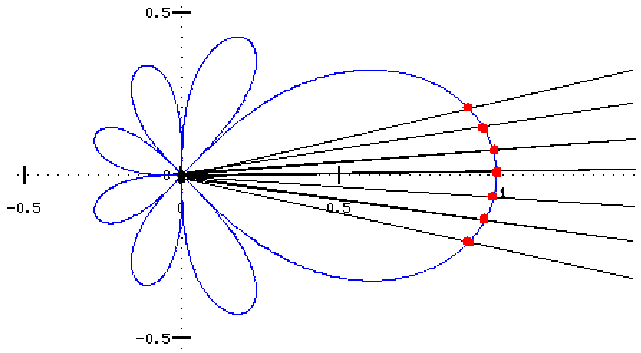

Figura 2.10: Influência do diagrama da antena na amplitude de reflexões recebidas

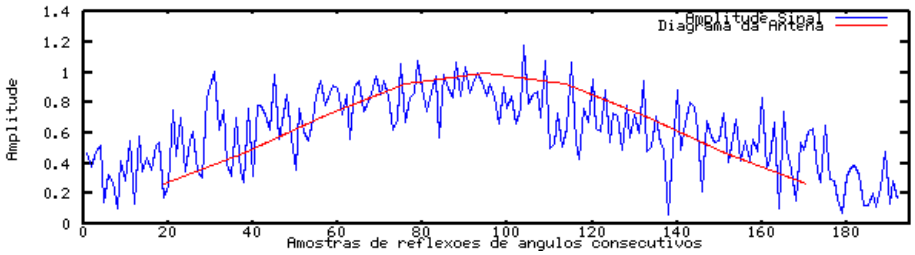

Figura 2.11: Influência do diagrama da antena na amplitude de reflexões recebidas

Para o cálculo das posições angulares existem duas técnicas a mono pulso e a interferométrica (02). Na técnica do mono pulso é necessário que antena esteja girando no sentido da medida angular desejada e que sejam comparados os níveis dos sinais refletidos que tendem a descrever o formato do diagrama

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

de irradiação da antena, por exemplo na Figura 2.10 temos o diagrama de irradiação de uma antena e cada raio representa uma recepção de um pulso refletido por um vetor. O ponto em que o raio intercepta o diagrama da antena é proporcional à amplitude do sinal. Na Figura 2.11 é exibido o histórico da amplitude das reflexões. A região de maior amplitude determina a direção angular. Para realizar medidas de azimute é necessário que a antena esteja girando com o eixo de rotação no sentido vertical e para cálculos de elevação é necessário que o eixo de rotação esteja no sentido horizontal.

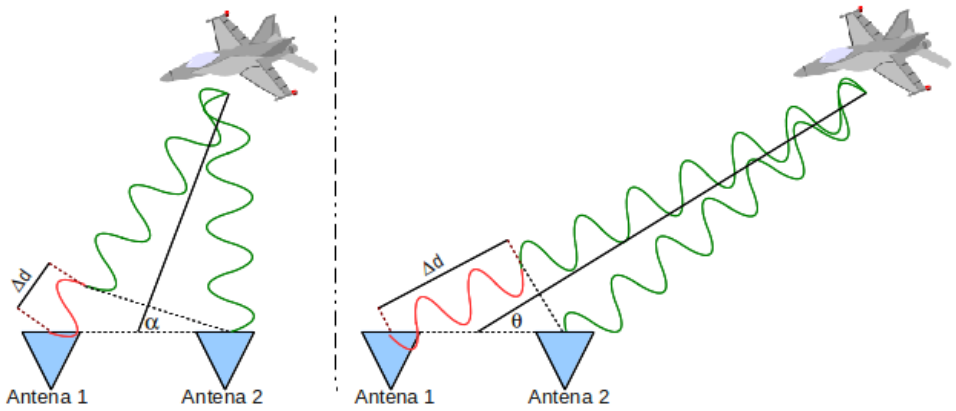

Figura 2.12: Técnica de interferometria para se calcular a direção angular do vetor

Na técnica interferométrica necessita-se ter duas antenas distantes uma da outra, onde cada uma é responsável por um canal de recepção. O fato das antenas se encontrarem em posições diferentes causa uma diferença de fase entre os sinais dos dois canais e a partir dessa diferença de fase é possível determinar a direção angular do vetor. Na Figura 2.12 é ilustrado como a posição angular do vetor altera a diferença de fase sendo possível o cálculo inverso. Para realizar medidas de azimute é necessário que a distância, entre as duas antenas, esteja no sentido horizontal e para cálculos de elevação é necessário que a distância, entre as duas antenas, esteja no sentido vertical. Assim o processador de dados recebe os sinais de reflexões de um vetor e calcula os parâmetros desejáveis para esse vetor.

2.2.4 Componentes de controle

O rastreamento atua no controle do direcionamento do feixe fornecendo a direção da predição do posicionamento do vetor. O rastreamento pode não ser um componente de controle e atuar somente no processamento de dados, caso

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

a ele não seja requisitado a predição da posição de um vetor para o controle de feixe.

O rastreamento refina as medidas das coordenadas dos vetores, determina as trajetórias dos vetores e prediz as posições futuras. Todos ou um subconjunto dos dados disponibilizados pelo radar, como a distância, ângulo de azimute, ângulo de elevação e velocidade podem ser usados na predição da posição futura do vetor, ou seja, um radar pode rastrear a distância, o ângulo de azimute, o ângulo de elevação e a velocidade, ou qualquer combinação.

Desde que a informação fornecida por um radar seja processada corretamente, qualquer radar pode ser considerado de rastreamento. Um radar de acompanhamento contínuo e um de busca e vigilância são diferentes, sendo que o primeiro monitora um vetor específico e fornece dados contínuos, enquanto o segundo fornece amostras de dados de um ou mais vetores. Em geral, o radar de monitoramento contínuo e o radar de busca e vigilância utilizam equipamentos diferentes. (30)

O conformador de feixe é o elemento responsável pelo direcionamento do feixe de irradiação de uma matriz de antenas. Uma matriz de antenas é uma antena diretiva composta de antenas, ou elementos de antena, irradiantes individuais que geram um padrão de irradiação cuja forma e direção é determinada pelas fases e amplitudes relativas dos sinais nos elementos individuais. Variando adequadamente a fase relativa é possível orientar a direção da irradiação; na Figura 2.13, por exemplo, uma diferença de fase entre os elementos de antena provoca uma inclinação α na direção de propagação principal. Na Figura 2.14 é ilustrado o diagrama unificado dos elementos de antena com a inclinação α no lóbulo principal.

A flexibilidade inerente oferecida por uma matriz de antenas no direcionamento do feixe por meio do controle eletrônico é o que a tornou atraente para os sistemas radar. Ela tem sido considerada para as aplicações radar onde é necessário deslocar o feixe rapidamente de uma posição no espaço para outra, ou onde se deseja obter informações sobre vários vetores em uma taxa de dados flexível e rápida. O potencial de uma matriz de antenas requer o uso de processamentos que possam determinar em tempo real, com base na situação real de funcionamento, a melhor forma de usar os recursos oferecidos pela matriz (30).

Ao conformador de feixe é requisitado que o diagrama da antena seja orientado em uma determinada direção no espaço. Ele determina quais as fases e amplitudes relativas de cada sinal nos elementos de antena devem possuir para posicionar o feixe na direção desejada conforme ilustrado na Figura 2.12. O efeito de direcionamento do feixe ocorre efetivamente após a integração dos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

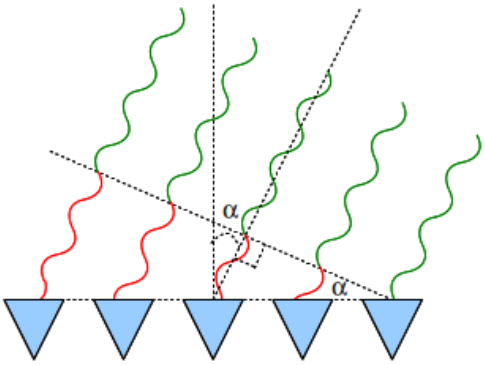

Figura 2.13: Diferença de fase em um matriz de antenas

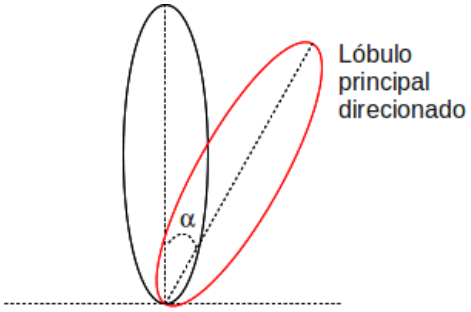

Figura 2.14: Diagrama da composição de matriz de antenas

sinais provenientes de cada elemento de antena, um diagrama unificado de cada elemento de antena é ilustrado na Figura 2.13 onde o lóbulo principal foi inclinado de α, devido às diferenças de fases.

O direcionamento do feixe principal pode ser feito tanto na transmissão quanto na recepção de forma análoga. A conformação analógica do feixe ocorre no receptor por meio de atenuadores/amplificadores e defasadores de sinal. A conformação digital ocorre após a digitalização do sinal por meio da multiplicação do sinal digital por um número complexo, onde a magnitude e a fase do número complexo alteram a amplitude a fase do sinal respectivamente. Após as fases e as amplitudes relativas dos sinais provenientes dos diferentes elementos de antena serem alteradas estes sinais são somados caracterizando efetivamente o direcionamento do feixe.

2.3 Exemplos de radares

Serão apresentados exemplos de radares reais focados no escopo do estudo que são radares pulsados que utilizam uma antena ou uma matriz de antenas. Foram selecionados exemplos de diversas funcionalidades para mostrar a grande abrangência que a biblioteca proposta pode alcançar.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

2.3.1
Radar rodoviário de monitoramento de velocidade

Dentre os radares de monitoramento de velocidade automotiva se destacam os que utilizam tecnologia de micro-ondas e *laser* (lidar). Existem radares de trânsito de micro-ondas que transmitem continuamente; também existem radares de micro-ondas e todos os de *laser* que apenas transmitem ao comando do operador; há radares de micro-ondas que transmitem pulsos periodicamente(pulsado), o tempo suficiente para se obter uma medição de velocidade; e existem poucos que transmitem uma rajada de pulsos ao comando do operador.

Os radares de micro-ondas não exigem que o operador mire exatamente em um determinado veículo, ele apenas deve mirar na direção do tráfego. Estes radares são mais eficazes em função do tráfego moderado em curtas e longas distâncias. Os radares de micro-ondas podem ser projetados para uso em um veículo de patrulha em movimento.

Os radares que utilizam *laser* devem ser direcionados exatamente um veículo. Estes radares são mais eficazes em curtas distâncias. Radares a laser não são projetados para operar a partir de um veículo em movimento. (28)

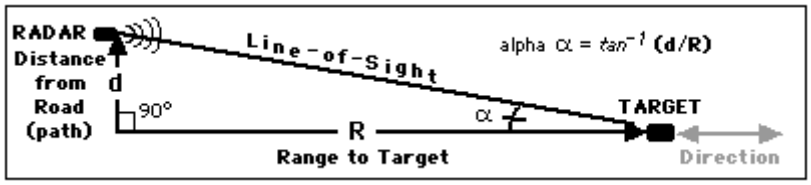

Figura 2.15: Direção de captura da velocidade

Como exibido na Figura 2.15 o radar calcula a velocidade do automóvel na direção de visada do radar. Para se obter a velocidade real, deve-se projetar a velocidade calculada na direção do movimento do automóvel.

2.3.2
Radares de defesa aérea

Radares de defesa aérea devem detectar vetores aéreos em uma região relativamente grande e determinar a sua posição, direção e velocidade. Eles são normalmente classificados em duas categorias: os radares bidimensionais ou 2D, que determinam a distância, o azimute e a velocidade dos vetores aéreos, e os tridimensionais, que determinam também a altura dos vetores aéreos. Como estes radares podem detectar aviões inimigos ou mísseis a grandes distâncias, eles são empregados como dispositivos de alerta; sendo vital a detecção precoce do inimigo para defesa e contra ataques.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

Como exemplo de radar bidimensional existe o PSTAR (16) da empresa americana Lockheed Martin exibido na Figura 2.16.

Figura 2.16: Radar PSTAR

Para a categoria 3D tem-se como exemplo o Radar Saber M60 (04), exibido na Figura 2.17(a), desenvolvido pelo Exército Brasileiro. Este é um radar de busca e vigilância aérea de curto alcance, de baixa altura e de varredura mecânica que usa a técnica denominada pulso-Doppler para determinar a velocidade e a técnica de interferometria para determinar a altura. Outro exemplo é o Radar EL/M-2106 NG (07) da empresa israelense Elta Systems exibido na Figura 2.17(b) possuindo características similares ao Radar Saber M60.

2.17(a): Radar Saber M60

2.17(b): Radar EL/M-2106 NG

Figura 2.17: Radares de busca e vigilância 3D

2.3.3 Radares com matriz de antenas

Os radares com matriz de antenas podem possuir centenas e até milhares de elementos em suas antenas. Eles variam de tamanho e usabilidade indo do gigante Radar PAVE PAWS (36) (03) da força aérea americana, exibido na Figura 2.18(a), usado dentre outras funções para detectar mísseis intercontinentais; ao Radar AESA RBE2 (35) da Thales, exibido na Figura 2.18(d), possuindo um tamanho bastante reduzido utilizado em aviões caça para guiar mísseis. Outros exemplos são o Patriot (26) exibido na Figura 2.18(b) que faz parte de um sistema diretor de misseis e de busca e vigilância; e o Radar AN

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

FPS-117 (15) da Lockheed Martin, exibido na Figura 2.18(c), que é um radar de busca e vilância de longo alcance.

2.18(a): Radar PAVE PAWS

2.18(b): Radar Patriot

2.18(c): Radar AN FPS-117

2.18(d): Radar AESA RBE2

Figura 2.18: Radares com matriz de antenas

2.3.4 Radar de orientação de míssil

Sistemas de radar de orientação de míssil detectam e direcionam o míssil para o alvo. A origem da radiação refletida é um transmissor de radar. No caso de armas com a orientação ativa, este transmissor está situado no míssil e no caso da orientação semiativa a transmissão é realizada pela plataforma de lançamento. Nos dois casos, o transmissor deve irradiar na direção do alvo, esta radiação deve viajar até o alvo, refletir, retornar para a antena receptora do míssil, ser amplificada, demodulada e analisada para determinar a direção do alvo, então esta informação permite a orientação da arma na direção do alvo para alvejá-lo. Uma arma eficaz deve ter a capacidade de discriminar entre o eco do alvo e os reflexos de fundo, como a superfície da terra ou do oceano, deve também ser capaz de resistir a interferência ou falha e ser capaz de suportar condições meteorológicas adversas (13).

O sistema mono pulso de fase exibido na Figura 2.19 utiliza a diferença de fase entre os canais de entrada para calcular a direção do alvo. Caso o alvo esteja na direção do eixo do míssil, o eco chega simultaneamente em cada receptor. No entanto, se o alvo está fora do eixo, o eco radar chega no receptor

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA

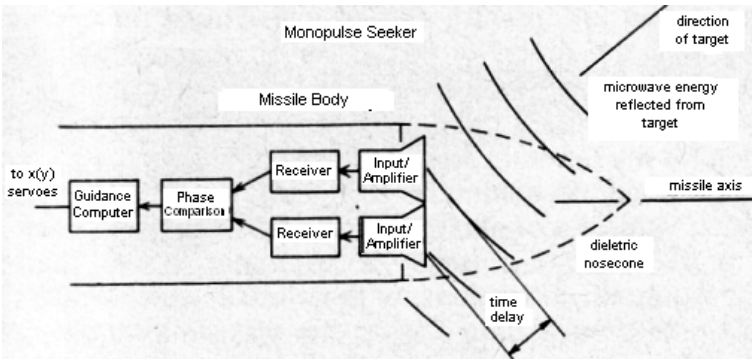

Figura 2.19: Sistema de Interferometria para orientação de míssil

do lado mais próximo a ele antes promovendo uma diferença de fase em relação ao outro canal. Esta diferença de fase é proporcional ao ângulo entre o eixo do míssil e o eixo do alvo e pode ser facilmente detectada pelo sistema. Um sistema prático emprega quatro receptores, dois para cada eixo, com dois detectores de fase, deve ser preciso, resistir a interferências, rejeitar ruídos e orientar o míssil até o alvo com eficácia. (13)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812533/CA