

2

Conceitos básicos de sistemas radar

Radar é um sistema eletromagnético de detecção e localização de objetos refletores, como aeronaves, navios, pessoas, e ambientes naturais, os quais, neste trabalho, serão referidos simplesmente como alvos. Cada aplicação tem interesse na detecção de um tipo de alvo específico. Sendo assim, todo objeto refletor que não é de interesse para determinado sistema é chamado de *clutter*.

A operação de um sistema radar consiste na transmissão de uma forma de onda particular e na detecção e processamento do sinal refletido no alvo devido à reflexão do sinal transmitido no mesmo visando extrair características deste. Sua forma mais simples de configuração envolve a geração da forma de onda a ser transmitida, a cadeia de radio frequência de transmissão, as antenas transmissora e receptora, a cadeia de radio frequência de recepção e o detector de alvos, ou mais especificamente, um decisor que avalia se o sinal em sua entrada contém, ou não, parte de um sinal refletido em um alvo, conforme a Figura 2.1.

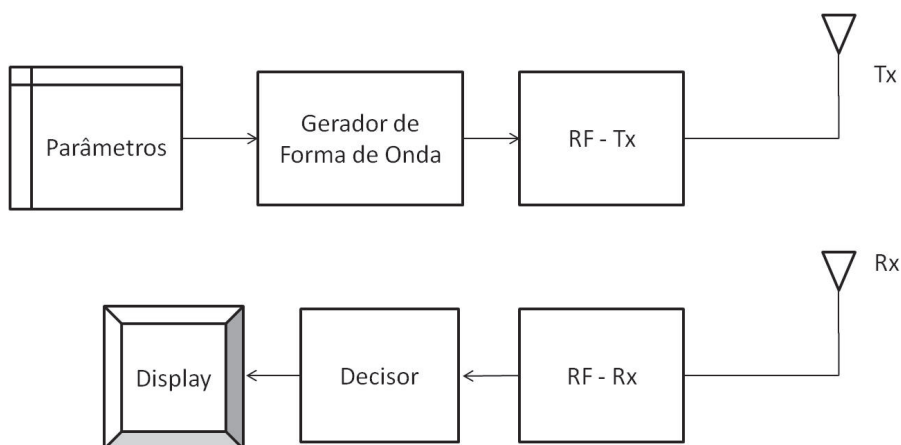


Figura 2.1: Diagrama em blocos simplificado de um sistema radar.

Conforme dito anteriormente, uma parte do sinal transmitido é interceptada pelo objeto refletor, alvo, e é reirradiada em todas as direções. Esta energia irradiada, de interesse primordial para o radar, é captada pela antena de recepção e entregue para o receptor onde é processada para a detecção do alvo

e extração das características do mesmo, conforme a Figura 2.2. Um sistema radar pode operar de forma inalterável em distâncias curtas ou longas, e sob circunstâncias que seriam críticas para outros sistemas de mesmo objetivo como ópticos ou infravermelhos, tais como escuridão, neblina, chuva e neve. Conforme ilustrado na Figura 2.2, existem diversas aplicações em que uma única antena é utilizada de forma compartilhada tanto para transmissão quanto para recepção. Este é o caso de radares do tipo pulsado, onde se transmite uma sequência de pulsos de duração finita. Tal sistema será objeto de estudo neste trabalho e seu funcionamento será melhor explicado nas seções subsequentes.

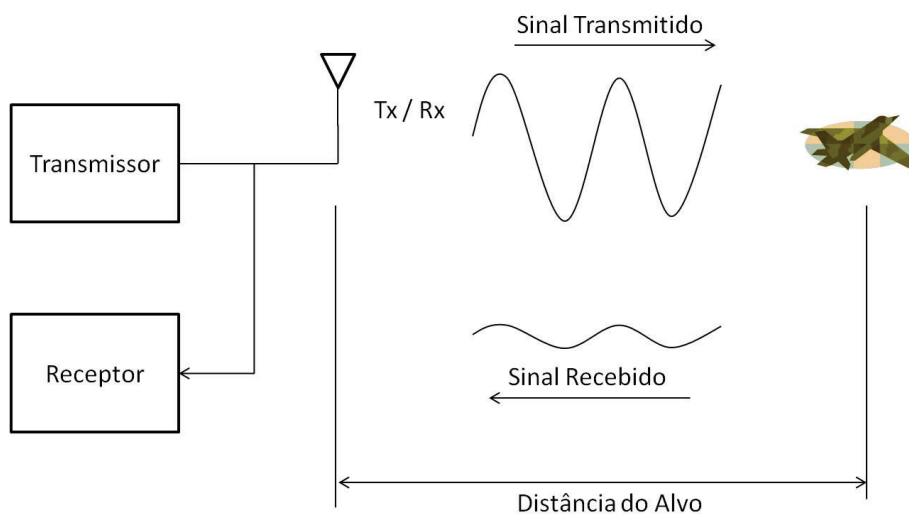


Figura 2.2: Sinal de retorno de um sistema radar.

Dentre as características do alvo passíveis de serem extraídas a partir do sinal recebido destaca-se a sua posição, composta pela distância radial, azimuth e elevação, sua velocidade radial, a direção de seu movimento e sua natureza. A distância radial do alvo é determinada medindo-se o tempo que o sinal transmitido levou para viajar até o mesmo e retornar devido à reflexão. O azimuth pode ser determinado pela direção de chegada da onda eletromagnética. Normalmente, radares que envolvem esta funcionalidade possuem antenas de feixes estreitos, menores que 3° [09]. A elevação pode ser determinada de algumas formas distintas, a mais comum é através da interferometria entre duas antenas de recepção [09].

Se existir movimento relativo entre o radar e o alvo, então o desvio na frequência central do sinal de retorno, efeito doppler, é uma medida da velocidade radial deste e pode ser utilizado para caracterizar objetos estacionários ou em movimento [10]. A direção do alvo e a natureza do mesmo são medidas mais difíceis de serem executadas. Todavia, novas linhas de pesquisa na área apontam uma técnica capaz de determinar com precisão

a forma do objeto iluminado e para onde este está se dirigindo, chamada de micro doppler [11].

Embora o desenvolvimento de sistemas radar como se conhece atualmente não tenha ocorrido até a segunda guerra mundial, o princípio básico de seu funcionamento é quase tão antigo quanto a temática envolvendo eletromagnetismo. A primeira detecção de aeronaves utilizando-se o fenômeno de interferência de onda foi feita em meados de 1930, dando início a uma corrida envolvendo diversos países do primeiro mundo que culminaria, na segunda guerra mundial, com diversos sistemas, ainda básicos, oriundos dos diferentes países considerados superpotências na época. A partir de então, as constantes melhorias e evoluções do sistema, fizeram com que os requisitos e expectativas sobre os mesmos passassem a ir muito além de apenas detecção de alvos.

Dentre as principais evoluções do sistema destacam-se o uso do efeito doppler na distinção de alvos estáticos de alvos móveis, o uso da técnica de compressão de pulso que permitiu que formas de onda de tamanho longo fossem utilizadas de modo a se obter alta energia sem perder resolução em distância, o desenvolvimento de radares de abertura sintética que provêm alta resolução para aplicações de mapeamento, antenas do tipo *phased array*, que permitiram um avanço para radares de busca e tiro, desenvolvimento de radares do tipo *over the horizon*, os quais permitiram estender o alcance máximo detectável, desenvolvimento da tecnologia de sistemas *bistatic* que permitiu o início do conceito de redes de radares e principalmente a evolução da tecnologia digital para processamento de sinais e dados, o que permitiu que muitas capacidades teóricas se tornassem práticas.

Em suma, observa-se que a tecnologia e as aplicações de sistema radar não param de aumentar. As linhas de pesquisa atuais concentram-se em: uso de tecnologia digital para emprego tanto no processamento de sinais quanto no controle do sistema radar; melhorias no uso do efeito doppler para detecção de pequenos movimentos, mesmo em ambientes com alta incidência de *clutter*; automação da detecção e extração de informações; novas técnicas para reconhecimento de alvos; estudo de novas formas de onda de transmissão que permitam construir sistemas com melhor desempenho; sistemas com processamento distribuído de alto desempenho; sistemas do tipo *phased array* e sistemas *multistatic*.

Atualmente, sistemas radar são empregados no solo, mar, ar e até espaço. Radares de solo são principalmente empregados para detecção, localização e rastreamento de aeronaves ou mais genericamente, alvos aéreos, tendo emprego tanto na área militar, em defesa, quanto na área civil, em controle de tráfego

aéreo. Radares marítimos são empregados para navegação, de modo, por exemplo, a se evitar colisões entre embarcações. Radares embarcados em aeronaves são utilizados também com o intuito de se evitar colisões e, ainda, em aplicações meteorológicas e de mapeamento de terreno, e sensoriamento remoto. Observa-se, então, que existem diversas aplicações tanto civis quanto militares de sistemas radar, porém, foram as militares que mais contribuíram para o desenvolvimento da tecnologia até o presente momento.

Entre as aplicações militares, os radares são principalmente categorizados como: radares de busca e vigilância, radares de tiro, radares de vigilância terrestre e radares *trough wall*. É evidente que tais sistemas exigem uma complexidade maior no tocante a probabilidade de interceptação e susceptibilidade a interferências, as quais normalmente não são de relevância para aplicações civis.

Sobre o funcionamento de sistemas radar, destaca-se que, embora os radares típicos transmitam formas de onda pulsadas, existem também sistemas de transmissão contínua, ou simplesmente CW. Tais radares são mais simples e, por isso, possuem limitações em seu funcionamento. Dentre as limitações de tais sistemas destaca-se que estes não são capazes de determinar a distância do alvo, determinando, apenas, sua velocidade. Neste trabalho o funcionamento de tais sistemas não será abordado, serão apenas tratados radares do tipo pulsado, cujo funcionamento é melhor detalhado na seção seguinte.

2.1

Radar Pulsado

Radares do tipo pulsado são sistemas cujas formas de onda de transmissão, $s_i(t)$, são sinais de duração finita, τ_s . Durante a transmissão não há recepção, a qual ocorre apenas entre as os intervalos de transmissão. A temporização de sistemas desta natureza é ilustrada na Figura 2.3, onde PRT denota o período de repetição de pulso (intervalo entre pulsos consecutivos).

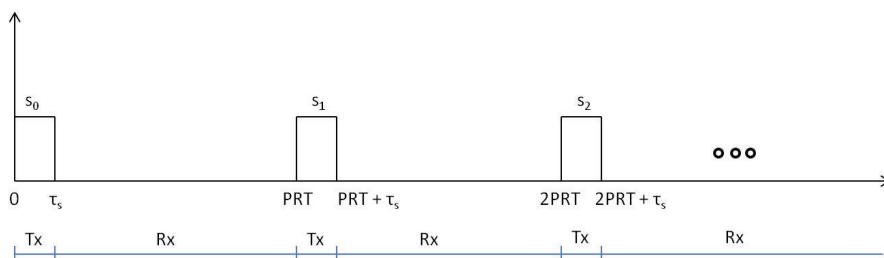


Figura 2.3: Temporização de um sistema radar pulsado.

Geralmente, em sistemas desta natureza, a base de tempo para reflexões de um pulso i tem como referência o instante de tempo do início da transmissão deste i -ésimo pulso.

Radar é uma sigla para *Radio Detection and Ranging* e foi inicialmente desenvolvido para alertar sobre aproximação de aeronaves inimigas e direcionar o sistema de armas para abatê-las. Assim, apesar de sistemas modernos serem capazes de extrair diversas informações do alvo, e de novas aplicações terem emergido com interesse específico nesta variedade de informações, a medida de distância ainda é uma das funcionalidades mais importantes destes, não existindo, na literatura, nenhum outro sistema tão eficiente quanto o mesmo para este fim.

Conforme dito anteriormente, a distância do alvo é determinada medindo-se o tempo T_0 que um pulso transmitido, $s_i(t)$, leva para viajar até o alvo e retornar, contado a partir do instante inicial da transmissão deste. Como ondas eletromagnéticas trafegam à velocidade da luz, c , então a distância radial do alvo, R , é medida como

$$R = \frac{cT_0}{2} \quad (2-1)$$

O fator 2 aparece na equação porque a onda se propaga em dois sentidos, ida e volta.

2.2

Ambiguidade em Distância

Uma vez que um pulso foi transmitido, um tempo, PRT , suficientemente grande deve ser esperado antes que outro pulso seja transmitido, garantindo que os sinais refletidos em todos os objetos de interesse, presentes no cenário de observação, sejam recebidos. Sendo assim, o período de repetição de pulsos e, consequentemente, a taxa com que os pulsos são transmitidos são determinados pela maior distância a qual se quer detectar.

Se a frequência de repetição de pulsos, PRF for muito grande, ou seja, se o tempo entre a transmissão de dois pulsos consecutivos for pequeno, então o sinal refletido em determinados alvos pode ser recebido após a transmissão do pulso seguinte, criando ambiguidades em distância, conforme ilustrado na Figura 2.4. Neste cenário, se os pulsos de transmissão forem idênticos, tais retornos podem ser interpretados como de alvos próximos, se considerados relativos ao segundo pulso de transmissão e não ao primeiro, como deveriam.

O efeito descrito é ilustrado na Figura 2.4 onde o retorno do alvo 2 relativo ao primeiro pulso de transmissão é recebido após a transmissão do segundo pulso.

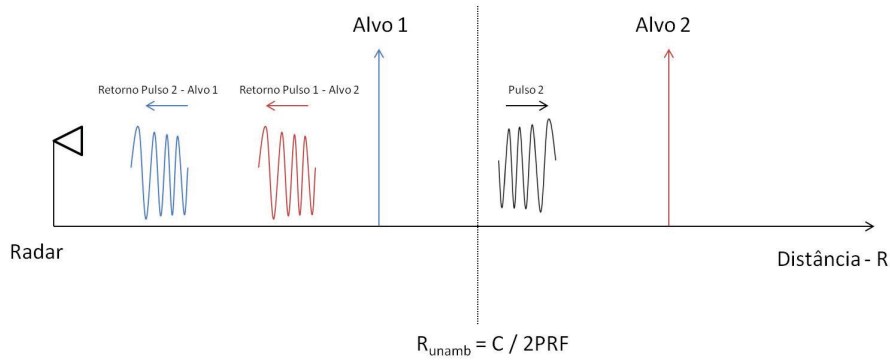


Figura 2.4: Sistema Radar com ambiguidade em distância.

A distância máxima sem ambiguidade, R_{unamb} , é dada por

$$R_{unamb} = \frac{cPRT}{2} = \frac{c}{2PRF} \quad (2-2)$$

Sendo assim, qualquer alvo com distância superior à R_{unamb} cujo sinal refletido no mesmo tenha energia suficiente para ser detectado provocará ambiguidade em distância em sistemas que empregam o mesmo pulso em transmissões distintas.

2.3

Resolução em distância

O conceito de resolução em distância descreve a habilidade do radar em distinguir dois alvos próximos um do outro. Se o pulso de transmissão tem duração τ_s , então este se estende no espaço por uma distância dada por

$$R_{\tau_s} = c\tau_s \quad (2-3)$$

Sendo assim, dois alvos só podem ser interpretados como tais, ou seja, sem serem confundidos como um único alvo, quando estão separados de uma distância igual ou superior a

$$\Delta R_{\tau_s} = \frac{R_{\tau_s}}{2} = \frac{c\tau_s}{2} \quad (2-4)$$

Nesta situação, os sinais refletidos nos mesmos chegam ao receptor com uma diferença de tempo, $\Delta\tau = \frac{R_{\tau_s}}{c}$, não havendo superposição entre os pulsos recebidos. A grandeza ΔR recebe o nome de resolução em distância. Assim

como em (2-1), observa-se que o fator $\frac{1}{2}$ aparece devido ao percurso de ida e volta executado pelo pulso.

Observa-se, então, que sistemas que empregam pulsos longos, normalmente sistemas que necessitam de elevada energia para detectar alvos a distâncias maiores, apresentam baixa resolução em distância. Em contrapartida, sistemas que empregam pulsos curtos apresentam resolução em distância elevada.

2.4

Equação Radar

Nas seções anteriores foram equacionados alguns parâmetros básicos de sistemas radar, onde se pôde observar as relações de dependência que existem entre eles. Desta forma, notou-se, ainda que de forma introdutória, os *tradeoffs* existentes em sistemas desta natureza. Nesta seção é apresentada a equação radar que por sua vez relaciona a distância máxima detectável por um radar com as diversas características do transmissor, receptor, antena, ambiente e do próprio alvo.

Todo projeto de um sistema radar tem sua origem na equação radar. Com base nesta, o projetista controla os parâmetros do sistema de modo a detectar os alvos desejados. Nesta seção, são apresentadas as equações em suas formas mais simples, uma vez que não faz parte do escopo deste trabalho sua análise detalhada.

A potência média do sinal recebido pela antena de recepção, P_r , relativo à reflexão do sinal de transmissão em um alvo a uma distância R é dada por [10]

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2-5)$$

onde σ representa a seção reta radar do alvo que, em outras palavras, representa uma medida de quanto de energia incidente este reflete para o radar, P_t representa a potência média do sinal de transmissão, G_t é o ganho da antena de transmissão, G_r é o ganho da antena de recepção e λ é o comprimento de onda do sinal transmitido.

A distância máxima detectável é dada quando a potência de recepção é mínima, S_{min} , ou seja, abaixo da qual não se consegue detectar o sinal recebido. Esta é dada, então, por

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda}{(4\pi)^3 P_r} \right]^{\frac{1}{4}} \Big|_{P_r=S_{min}} \quad (2-6)$$

Com exceção da seção reta radar do alvo, todos os parâmetros de (2-6) estão, de alguma forma, sob controle do projetista. Sendo assim, para aumentar a distância máxima de detecção de um alvo, este pode, por exemplo, aumentar a potência de transmissão ou rever o projeto das antenas utilizadas. Na prática, (2-6) é extremamente otimista, no sentido que não leva em consideração nem as perdas do sistema nem, tampouco, a natureza estatística de seus parâmetros.

A potência mínima detectável e a seção reta do alvo são ambos estatísticos e devem ser tratados desta forma. Ainda, efeitos como condições meteorológicas, multi-percurso, entre outros, que não são explícitos em (2-6) também são aleatórios e deveriam ser incluídos na análise. Sendo assim, torna-se evidente que a distância máxima detectável é melhor expressa através de probabilidades de detecção ao invés de um simples número, resultado de uma equação.

A potência mínima detectável é função do ruído térmico presente no receptor, o qual representa sempre um fator limitante em sistemas de alto desempenho. A potência do ruído térmico presente na entrada do receptor é dada por

$$P_n = kTBF = \frac{N_0}{2} B \quad (2-7)$$

onde k é a constante de Boltzmann, B e F são, respectivamente, a largura de banda e a figura de ruído do receptor e $\frac{N_0}{2}$ é o nível espectral do ruído, o qual, conhecidamente, é gaussiano e plano na faixa de frequências do receptor. Sendo assim, a partir de (2-7), (2-6) pode ser reescrita como

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda}{(4\pi)^3 kTBF (SNR)_{min}} \quad (2-8)$$

onde $(SNR)_{min}$ é a razão sinal ruído mínima associada à entrada do receptor que garante que o sinal será corretamente detectado.

A equação descrita em (2-8) é conhecida como Equação Radar. Esta também é utilizada para se descobrir a relação sinal ruído associada à entrada do receptor, SNR_{in} , em função dos parâmetros do sistema e do alvo, como

$$SNR_{in} = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda}{(4\pi)^3 R^4 kTBF} \quad (2-9)$$

A equação radar, (2-9), descreve, então, qual é a razão sinal ruído associada à entrada do receptor. Com base nesta, é possível inferir-se informações acerca do desempenho do sistema, que serão derivadas ao longo deste trabalho.

2.5

Radar Ruído

Radar de ruído se refere às técnicas e aplicações que utilizam sinais aleatórios como formas de onda de transmissão de sistema radar que empregam compressão de pulso na sua cadeia de processamento do sinal recebido. O conceito de radar de ruído apareceu pela primeira vez em meados de 1950. Os primeiros trabalhos que realizaram medidas de distância baseadas em formas de onda aleatória foram publicados por Richard Bourret em 1957. Finalmente, em 1959 Horton [01] pioneiramente descreveu o uso de formas de onda desta natureza para emprego em modulação em frequência.

Neste trabalho Horton observou que a eliminação de ambiguidades em distância e velocidade poderia ser obtida através do uso de formas de onda aleatórias como sinal modulador e aplicação da correlação do sinal recebido com uma réplica do sinal transmitido no receptor. Diversos outros trabalhos acerca da mesma temática foram apresentados nas décadas de 1960 e 1970, caracterizando um período de estudo inicial, enquanto que no período entre 1980 e 2000, pouco estudo foi apresentado não sendo considerado de grande relevância para a evolução da teoria de Radar de Ruído. Na última década, no entanto, diversos grupo de pesquisas ao redor do mundo desenvolveram novas aplicações para radares de ruído o que contribuiu significativamente para melhorar a detecção e caracterização de alvos destes sistemas.

Radares de ruído têm a propriedade única de garantir alta resolução tanto em distância quanto em velocidade as quais podem ser controladas de forma independente variando-se a largura de banda do sinal e o tempo de integração respectivamente [12]. Tais sistemas também satisfazem importantes requisitos de sistemas militares como baixa probabilidade de interceptação e alta imunidade à interferências externas, intencionais ou não [05]. Outra grande vantagem destes sistemas é sua alta capacidade de compartilhar o espectro de frequências, permitindo que diversos radares de ruído operem na mesma faixa, com mínima interferência cruzada.

Grande parte dos primeiros trabalhos propostos não avançou devido às restrições tecnológicas para geração e processamento das formas de onda propostas. Todavia, com o avanço principalmente da tecnologia digital, radares de ruído têm sido utilizados em diversas áreas convencionais e inovadoras, tais como radares do tipo *ultra wide band*. Entre as técnicas de processamento de radares de ruído, o receptor que emprega correlação é o mais difundido e utilizado, porém outras técnicas também podem ser empregadas como, por

exemplo, interferometria espectral ou processamento de duplo espectro, as quais, no entanto, não serão abordadas neste trabalho.

Desenvolvimentos recentes nos campos de dinâmica não linear e teoria do caos introduziram novos métodos para geração de formas de onda aleatórias. *Arbitrary Waveform Generators* e conceitos relativos a radares de ruído definidos por *software* também proporcionaram novas perspectivas para este campo da área de radar que não para de crescer e ganhar notoriedade.