

## ***Sistemas de Radar***

- **Introdução**
- **Conceitos básicos**
- **Radares de impulsos**
- **Radares de onda contínua**
- **Radares de abertura sintética**
- **Radares múltiplos**
- **Limitações práticas**

---

*Mário Jorge M Leitão*

Este capítulo aborda apenas aspetos básicos dos sistemas de radar. Trata-se de uma área muito vasta e multi-disciplinar, que abrange, em especial, aspetos de electrónica de microondas (sinal e potência), processamento digital de sinal (cada vez mais complexo) e antenas (mais ou menos convencionais, agrupamentos de antenas e antenas de abertura sintética).

# *Introdução*

---

## **Princípios do sistema**

### **RADAR - *RA*dio *D*etection *And* *R*anging**

#### Deteção

- uma antena com uma certa diretividade transmite uma onda eletromagnética
- qualquer obstrução ou alteração no trajeto (alvo) dá origem a um eco
- este eco pode ser detetado, dando informações sobre a presença e propriedades do alvo

#### Localização

- as ondas eletromagnéticas propagam-se a uma velocidade conhecida
- medindo o atraso de propagação entre transmissão e eco obtém-se a distância do alvo

$$d = \frac{c \Delta t}{2} = \frac{3 \times 10^8}{2} \Delta t$$

- a direção do alvo é obtida a partir da elevação e azimute da antena

Breve historial – [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_radar](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_radar)

---

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

O radar consiste num método de estender a percepção do homem na determinação da presença e localização de objetos através do uso de ondas de rádio.

# *Introdução*

---

## **Princípios do sistema**

Vantagens do radar em relação aos sistemas ópticos

- operação na escuridão, através de nuvens e a longas distâncias
- indicações de localização muito mais precisas
- possibilidade de recorrer a circuitos electrónicos para processar sinais

Frequências utilizadas

- UHF
- Microondas

<b>Bandas de sistemas de radar</b>	
Banda UHF	0,3 - 1 GHz
Banda L	1 - 2 GHz
Banda S	2 - 4 GHz
Banda C	4 - 8 GHz
Banda X	8 - 12 GHz
Banda Ku	12 - 18 GHz
Banda K	18 - 27 GHz
Banda Ka	27 - 40 GHz

---

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

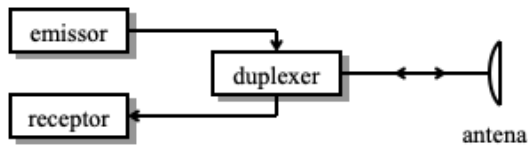
*Sistemas de Radar*

As frequências mais baixas têm a vantagem de terem menores problemas de propagação, nomeadamente absorção pelos gases atmosféricos e atenuação pela chuva. Contudo, exigem antenas de maiores dimensões para se obter uma dada largura de feixe.

## Conceitos básicos

### Sistema de radar elementar

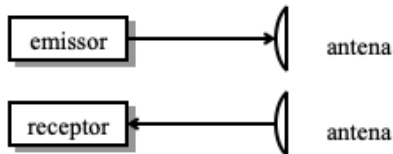
#### Radar mono-estático



#### Radar mono-estático

- duplexer comuta para a posição de emissão
- emissor envia um curto impulso
- duplexer comuta para a posição de recepção
- o eco é recebido, amplificado e desmodulado
- a antena move-se para uma nova direção

#### Radar bi-estático



#### Radar bi-estático

- transmissão e recepção podem ser simultâneas
- exige duas antenas apontadas na mesma direção
- exige movimento sincronizado das antenas

O radar bi-estático é mais difícil de construir e operar, tendo, contudo, a grande vantagem de isolar completamente a emissão da recepção. É, por isso, utilizado em situações em que se pretende grande sensibilidade.

# Conceitos básicos

## Equação do radar

Densidade de potência à distância  $r$   $W_a = \frac{P_e G}{4\pi r^2}$

Potência isotrópica equivalente reflectida pelo alvo  $P_a = W_a \sigma$  → área efectiva de eco (área equivalente de eco) *radar cross section*

Densidade de potência na antena receptora  $W = \frac{P_a}{4\pi r^2} = \frac{P_e G}{4\pi r^2} \frac{\sigma}{4\pi r^2}$

Potência recebida na antena  $P_r = W A_0$  → área de captura da antena receptora  $A_0 = G \frac{\lambda^2}{4\pi}$

Potência recebida na antena  $P_r = \frac{P_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} = \frac{P_e A_0^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 r^4}$

equação do radar (1) → Alcance máximo  $r_{\max} = \left[ \frac{P_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{r \min}} \right]^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{P_e A_0^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 P_{r \min}} \right)^{\frac{1}{4}}$   
 limiar de detecção

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Radar

Na literatura poderão ser encontradas várias formas para a chamada equação do radar. De um modo geral, a equação do radar exprime o alcance máximo do radar em função de um conjunto de parâmetros característicos do radar. As diversas formas da equação do radar diferem precisamente no conjunto de parâmetros considerado ou em certas aproximações assumidas.

Note-se que na derivação da equação do radar não foram considerados:

- efeitos de propagação;
- interferências;
- perdas suplementares no sistema.

Alguns destes efeitos são idênticos aos que ocorrem em feixes hertzianos terrestres.

# Conceitos básicos

## Equação do radar

Figura de ruído do receptor  $F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} = 1 + \frac{N_r}{N_i}$

Potência mínima detectável  $P_{r \min} = S_{i \min} = N_i F (S_o/N_o)_{\min} = kTB F (S_o/N_o)_{\min}$

equação do radar (2)

Alcance máximo

$$r_{\max} = \left[ \frac{P_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 kTB F (S_o/N_o)_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{P_e A_o^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 kTB F (S_o/N_o)_{\min}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Aproximação prática para o limiar de detecção (efeito do processo de integração - ver adiante)

$$P_{r \min} \approx N_r = N_i (F - 1) = kTB (F - 1)$$

equação do radar (3)

Alcance máximo

$$r_{\max} = \left[ \frac{P_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 kTB (F - 1)} \right]^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{P_e A_o^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 kTB (F - 1)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Outras aproximações e constantes  $A_o \approx 0,65 \pi D^2 / 4$      $T \approx T_o = 290K$      $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

equação do radar (4)

Alcance máximo

$$r_{\max} = 48 \left[ \frac{P_e D^4 \sigma}{\lambda^2 B (F - 1)} \right]^{\frac{1}{4}} \times 10^3 \text{ (m)} \quad \text{(equação prática)}$$

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Radar

As equações em função da área efectiva de captura mostram que o alcance máximo depende de um conjunto de factores, sendo necessário estabelecer compromissos. Assim, para duplicar o alcance seria necessário:

- aumentar 16 vezes a potência transmitida → não rentável a partir de determinados limites;
- diminuir 16 vezes a potência mínima detectável, ou a relação sinal-ruído mínima → receptor mais complexo; torna o sistema mais sujeito a interferências;
- aumentar 2 vezes o diâmetro da antena → limitações físicas;
- diminuir 4 vezes o comprimento de onda (assumindo que os outros parâmetros seriam constantes, o que não é exactamente verdadeiro) → problemas de propagação; diagrama de radiação da antena pode tornar-se demasiado estreito.

# *Conceitos básicos*

---

## **Área efetiva de eco**

### Definição

- área fictícia colocada no alvo que, interceptando uma certa potência incidente, dispersa-a igualmente em todas as direções, produzindo um eco no radar igual ao do alvo real

### Dependência

- frequência e polarização da onda incidente
- tipo de superfície, rugosidade, revestimento
- aspeto (ângulo) em que se apresenta o objeto

### Cálculo

- objetos simples
  - aplicação direta das equações de Maxwell
- objetos complexos
  - decomposição em objetos simples
  - aplicação do princípio da sobreposição

ver Skolnik, M. (2001), "Introduction to Radar Systems", Mc Graw-Hill, pág. 56-64

A área efectiva de eco de um alvo pode ser determinada resolvendo as equações de Maxwell, uma vez definidas as condições fronteira. Contudo, a solução deste problema é apenas possível para objetos muito simples, sendo necessário usar aproximações para formas mais complexas.

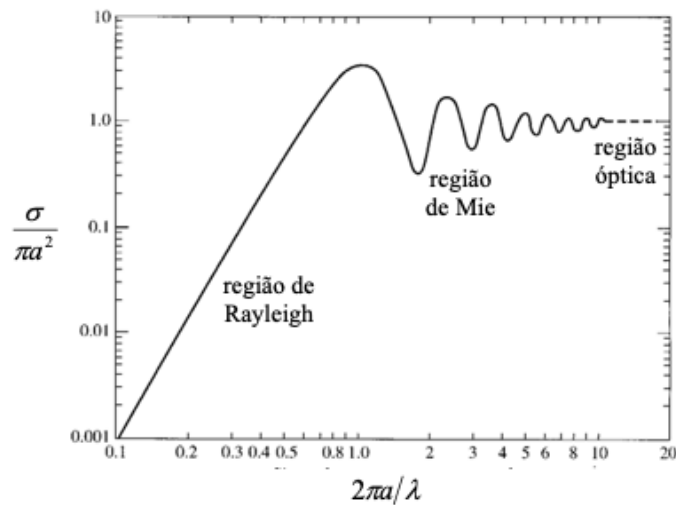
Uma das técnicas mais usadas consiste em descrever o alvo através de um conjunto de formas simples cujas áreas efectivas de eco são conhecidas. A área efectiva de eco total é então obtida somando vectorialmente as contribuições individuais das formas simples (princípio da sobreposição).

## Conceitos básicos

### Área efectiva de eco

#### Exemplos

- esfera condutora



**Área efectiva de eco normalizada de uma esfera de raio  $a$  em função da circunferência medida em comprimentos de onda  $\lambda$**

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

Neste caso, a área efectiva de eco só depende da relação entre as dimensões físicas da esfera e o comprimento de onda, observando-se três comportamentos:

- região de Rayleigh  $2\pi a \ll \lambda$   
 $\sigma$  é proporcional a  $\lambda^{-4}$  ( $f^4$ ), e muito menor do que a seção efectiva  $\pi a^2$
- região óptica  $2\pi a \gg \lambda$   
 $\sigma$  aproxima-se da seção efectiva
- região de Mie ou de ressonância (região intermédia)  
 $\sigma$  oscila em torno de  $\pi a^2$  (não mais do que cerca de 5,5 dB)

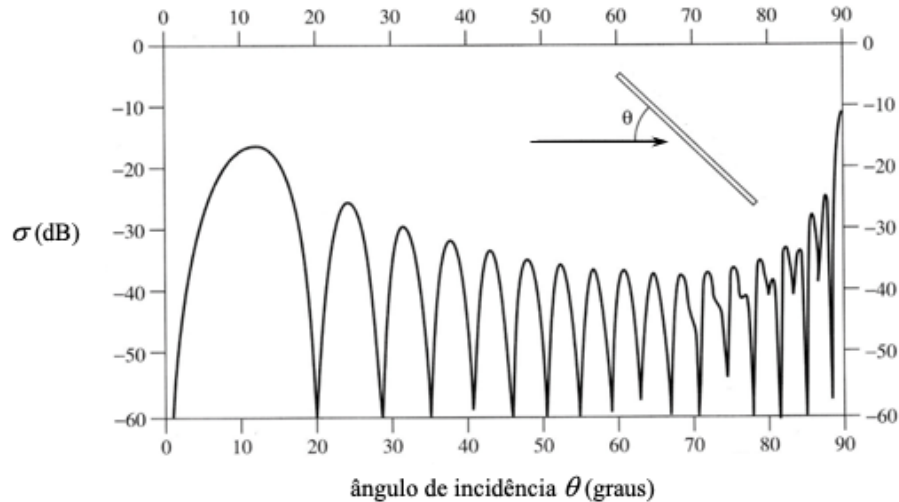


## Conceitos básicos

### Área efectiva de eco

Exemplos

– fio condutor



**Área efectiva de eco de num fio condutor com comprimento  $16,5\lambda$  e diâmetro  $0,01\lambda$  em função do ângulo de incidência  $\theta$**

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

Quando o fio é visto perpendicularmente à onda incidente, a área efectiva de eco é máxima. À medida que o ângulo se afasta de 90°, a área efectiva de eco decresce rapidamente, passando a um regime oscilatório, indicando a ocorrência de situações de interferência construtiva e destrutiva.

# Conceitos básicos

## Efeito Doppler

### Análise teórica

- ocorre efeito Doppler se o alvo tiver uma componente radial da velocidade, relativa ao radar
- o valor do desvio de frequência é o dobro do que se verifica numa ligação simples

frequência de transmissão	$f_t$	<div><math display="block">f_r = f_t \left( 1 + \frac{2v_r}{c} \right)</math><math display="block">\Delta f = \frac{2f_t v_r}{c} = \frac{2v_r}{\lambda_t}</math></div>
frequência de recepção	$f_r$	
desvio de frequência	$\Delta f$	
velocidade radial do alvo	$v_r$	
velocidade da luz	$c$	
comprimento de onda de transmissão	$\lambda_t$	

### Aplicações

- medição de velocidades de deslocamento
  - faz-se o batimento entre o sinal transmitido e recebido
  - mede-se a frequência diferença de efeito Doppler
- utilizado tanto em radares de impulsos como em radares de onda contínua

---

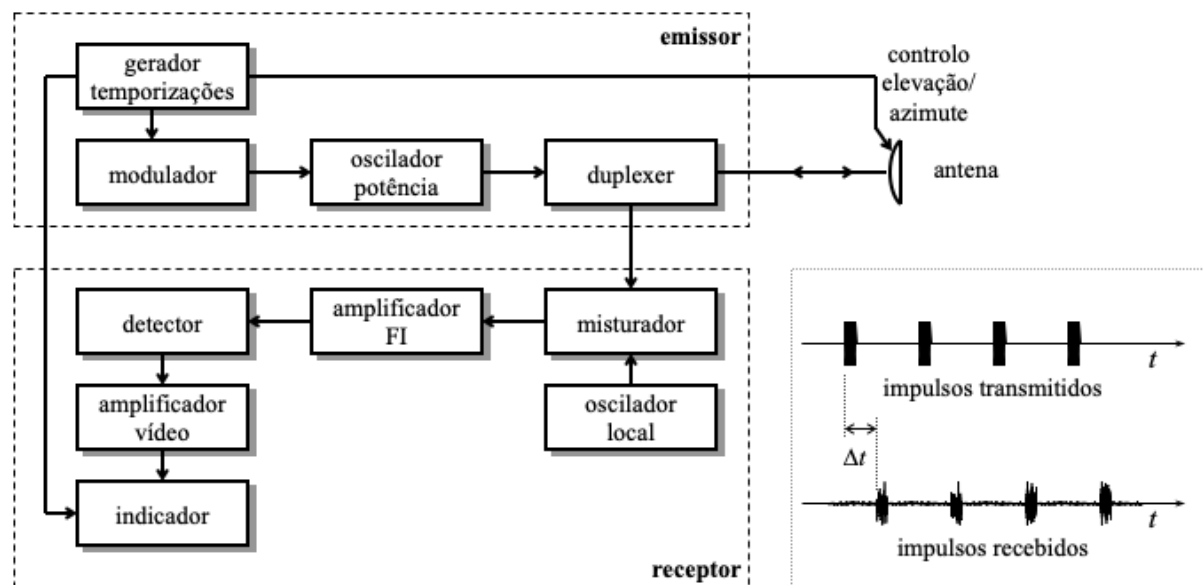
*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

O efeito Doppler é responsável pela diferença entre a frequência transmitida e recebida no radar. Deve notar-se que, neste caso, o alvo recebe e emite ao mesmo tempo, fazendo com que o desvio de frequência seja duplo daquele que ocorreria numa ligação simples ponto-a-ponto.

# Radars de impulsos

## Princípio de funcionamento



Constituição de um radar de impulsos básico

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Radar

O gerador de temporizações controla o varrimento da antena e a frequência dos impulsos.

Na maioria dos radares de impulsos, especialmente nos de maior potência, o modulador produz um sinal de tipo *on-off* com uma tensão de pico relativamente elevada, que é aplicado à alimentação de um oscilador de potência: no estado *on*, há oscilação (impulso de RF); no estado *off*, não haverá sinal à saída. Desta forma produz-se um trem de impulsos de RF à saída.

Nos estado *on*, o duplexer deixa passar o impulso; no estado *off* comuta para o receptor.

O receptor é, de um modo geral, de tipo super-heterodino, com um detector de amplitude. O amplificador de vídeo tem uma banda relativamente larga (daí a designação de vídeo), para deixar passar o sinal correspondente aos impulsos detetados.

Pelas suas particularidades, abordaremos mais adiante os indicadores, antenas e transmissores de radares de impulsos.

# Radars de impulsos

## Princípio de funcionamento

### Integração de impulsos de radar

- o radar recebe múltiplos ecos do mesmo alvo, mesmo no caso de uma antena rotativa
- estes ecos podem ser utilizados para melhorar a detecção → integração de impulsos

número de impulsos recebidos de um mesmo alvo  $n = \frac{\phi PRF}{\omega}$

$\phi$  largura do feixe  
 $PRF$  taxa de repetição de impulsos  
 $\omega$  velocidade angular de varrimento da antena

eficiência da integração  $E_i(n) = \frac{(S/N)_1}{n (S/N)_n}$

$(S/N)_1$  relação sinal ruído mínima para 1 impulso  
 $(S/N)_n$  relação sinal ruído mínima para  $n$  impulsos integrados

Tipos de integração	
Coerente	Incoerente
Soma dos impulsos antes da detecção	Soma dos impulsos após a detecção
Preserva a informação de fase	A informação de fase é perdida
Muito eficaz	Menos eficaz
Relativa complexidade	Muito simples

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Radar

Vejam os um exemplo:

- largura do feixe: 1,5°
- frequência de repetição de impulsos: 300 Hz
- velocidade de rotação da antena: 5 rpm (30°/s)
- o número de impulsos calculado através da expressão acima é de 15.

A integração de impulsos é uma operação que poderá ser elementar, como no caso em que o indicador é um tubo de raios catódicos, sendo o processo de integração assegurado pela persistência do fósforo do ecrã. No extremo oposto, temos os radares de processamento digital, em que múltiplos impulsos são tratados de forma a fornecer indicações fiáveis sobre alvos, mesmo na presença de ruído ou interferências significativos.

No caso da integração coerente ideal, a relação sinal ruído requerida para  $n$  impulsos é  $n$  vezes menor do que a requerida com um impulso (sem integração), ou seja,

$$(S/N)_1 = n (S/N)_n$$

e, consequentemente, a eficiência de integração virá  $E_i(n)=1$ .

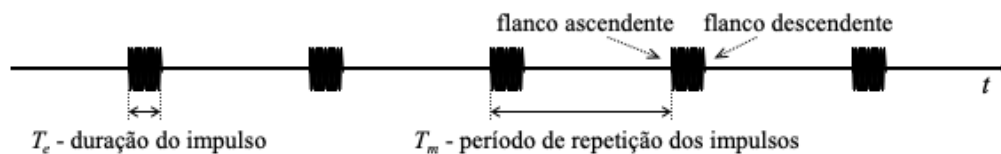
No caso geral  $E_i(n)<1$ .

# Radars de impulsos

## Princípio de funcionamento

### Parâmetros fundamentais

- caracterização da forma de onda



- ciclo imposto e taxa de repetição de impulsos

potência de pico (eficaz)	$P_e$
potência média	$P_m$
ciclo imposto ( <i>duty cycle</i> )	$\alpha = P_m / P_e = T_e / T_m$
taxa de repetição de impulsos ( <i>Pulse Repetition Frequency</i> )	$PRF = 1 / T_m$

- largura de banda do receptor

- inversamente proporcional à largura dos impulsos  $T_e$

$$B = k / T_e$$

- estabelece a forma de onda dos impulsos recebidos  
(particularmente a inclinação dos flancos ascendente e descendente)

$$k = 1 \dots 10$$

( $k = 1 \dots 1,5$  valores típicos)

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

A potência de pico de uma radar pode ser extremamente elevada, da ordem de MW. Contudo, como os ciclos impostos são baixos, resultam potências médias aceitáveis, ainda que em muitos casos continuem a ser elevadas.

# Radars de impulsos

## Princípio de funcionamento

Parâmetros fundamentais

– compromissos de projeto

Parâmetro	Vantagens	
	Elevado	Baixo
$PRF$	maior número de impulsos integrados <ul style="list-style-type: none"><li>• permite operar com menores S/N</li><li>• aumenta o alcance</li></ul>	maior alcance sem detecção ambígua <ul style="list-style-type: none"><li>• a distância máxima do alvo é<math display="block">d_{\max} = \frac{c T_m}{2} = \frac{c}{2 PRF}</math></li></ul>
$T_e$	menor largura de banda <ul style="list-style-type: none"><li>• reduz o ruído</li><li>• aumenta o alcance</li></ul>	maior resolução de distância menor alcance mínimo <ul style="list-style-type: none"><li>• reduz zona cega do radar</li></ul>
inclinação flanco ascendente	maior resolução de distância <ul style="list-style-type: none"><li>• define melhor o instante de chegada do impulso</li></ul>	menor largura de banda <ul style="list-style-type: none"><li>• reduz o ruído</li><li>• aumenta o alcance</li></ul>
inclinação flanco descendente	menor alcance mínimo <ul style="list-style-type: none"><li>• comutação mais rápida entre transmissão e recepção</li></ul>	menor largura de banda <ul style="list-style-type: none"><li>• reduz o ruído</li><li>• aumenta o alcance</li></ul>

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Radar

A detecção ambígua resulta do facto de o eco de um impulso chegar após o envio de um impulso subsequente, levando o radar a assumir um tempo propagação de ida e volta menor, e, consequentemente, que o alvo se encontra mais próximo. Por esta razão, o tempo de ida e volta não deverá ser, em princípio, superior ao período de repetição de impulsos. Há, contudo, formas de evitar esta ambiguidade, qualquer que seja a distância do alvo ao radar: basta, por exemplo, variar o intervalo entre impulsos consecutivos.

A duração dos impulsos tem um impacto direto na resolução de distância do radar: quanto menor for, menor a distância para a qual é possível identificar dois alvos como distintos. De facto, se o eco do alvo mais próximo se prolongar até à chegada do eco do alvo mais distante, o radar "verá" um único eco mais longo, tornando difícil a discriminação dos dois alvos.

Referem-se seguidamente alguns valores típicos resultantes destes compromissos:

- $PRF$  200 - 10000  $s^{-1}$
- $T_e$  0,1 - 10  $\mu s$
- $B$  0,2 - 15 MHz

## *Radares de impulsos*

---

### **Princípio de funcionamento**

Compressão de impulsos

---

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

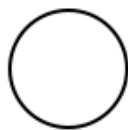
*Sistemas de Radar*

# *Radares de impulsos*

## **Varrimento**

Função de procura

– consiste na identificação da presença de alvos num certo volume de exploração



**Varrimento circular**



**Varrimento oscilatório**



**Varrimento em espiral**

Tipo de varrimento	Movimento da antena em azimuth	Movimento da antena em elevação
circular	rotação rápida num sector circular ou num círculo	elevação constante, geralmente baixa
oscilatório	rotação lenta num sector circular ou num círculo	movimento rápido entre dois limites
espiral	rotação rápida num círculo	movimento lento entre dois limites

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

As figuras representam a projeção do lugar geométrico descrito pelo extremo máximo do diagrama de radiação da antena.

O movimento circular é frequentemente executado em azimuth, com elevação constante, mas pode igualmente ser efectuado em elevação, com azimuth constante - é o caso do varrimento num sector circular assente num plano vertical. Em qualquer dos casos, o varrimento é efectuado sobre uma superfície simples.

Pelo contrário, os varrimentos oscilatório e em espiral permitem a exploração de um certo volume.

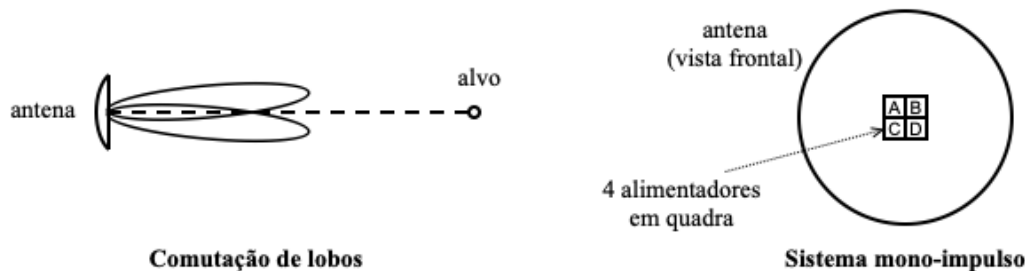


# Radars de impulsos

## Varrimento

### Função de localização

- consiste na determinação precisa da posição de alvos já detetados



Tipo de varrimento	Movimento da antena	Objectivo do algoritmo de localização
comutação de lobos	entre duas direcções que enquadram o alvo	pontos extremos de varrimento com igual nível de amplitude de eco
mono-impulso	apenas movimento de aproximação	anulamento de componentes diferença $(A+C)-(B+D)$ e $(A+B)-(C+D)$

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

A dificuldade da localização reside no facto de, quando o radar aponta na direcção exacta do alvo, o diagrama de radiação apresenta um máximo a que corresponde a derivada nula da potência recebida em relação ao deslocamento angular. Neste caso, pequenas alterações de pontaria não conduzem a variações significativas da potência de eco, o que impossibilita uma localização precisa do alvo.

A comutação de lobos aproveita exactamente os pontos do diagrama de radiação em que a potência recebida varia rapidamente com o ângulo. Movendo a antena rapidamente para um e outro lado do alvo, procura-se uma situação em que o sinal recebido nos dois extremos do varrimento apresenta a mesma potência - neste caso o alvo estará na bissetriz desses extremos.

O sistema mono-impulso não requer qualquer movimento da antena para obter a indicação de pontaria exacta. Usa-se uma antena com quatro canais (A, B, C, D), a que correspondem outros tantos alimentadores em quadra, que produzem quatro diagramas de radiação com pequenos desvios angulares em relação à direcção de pontaria. Quando a antena se encontra apontada exactamente para o alvo, e só nesse caso, as potências recebidas em cada canal são idênticas, o que permite fornecer uma indicação precisa de pontaria. Por outro lado, as diferenças  $(A+C)-(B+D)$  e  $(A+B)-(C+D)$  podem ser utilizadas como sinal de controlo num mecanismo de retroação que controla o movimento da antena em duas direcções ortogonais - o anulamento daquelas diferenças corresponde à situação de pontaria exacta. Em simultâneo com o processo de pontaria, o radar pode disponibilizar a soma  $A+B+C+D$  como sinal de eco, que será processado como em qualquer outro radar.

# Radares de impulsos

## Indicadores

### Indicadores de sinal

- CRT's ou dispositivos bidimensionais equivalentes (dimensões X e Y)
- cada pixel pode ter uma intensidade ou cor associada (dimensão Z)
- a representação da intensidade de eco é normalizada em função da distância

$$P_r = \frac{P_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4}$$

a potência recebida é multiplicada por  $r^4$

Tipo de indicador	Informação disponibilizada em cada dimensão		
	X	Y	Z
A	distância	intensidade de eco	
B	azimute	distância	intensidade de eco
PPI	azimute e distância em coordenadas polares		intensidade de eco
RHI	distância	altura	intensidade de eco

### Indicadores sintéticos

- indicam apenas o resultado do processo de deteção após o processamento

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

O indicador disponibiliza a informação sob um formato adequado à função do radar. O quadro acima refere apenas os mais importantes.

Por exemplo, o indicador PPI está adequado a uma exploração de um sector circular horizontal, ou quase horizontal, centrado no radar (eventualmente um círculo centrado no radar, se o varrimento em azimute for de 360°).

O indicador RHI é utilizado no caso de o varrimento se fazer num plano vertical.

Os tubos de raios catódicos são, desde há muitos anos, os dispositivos básicos para disponibilizar imagens de radar aos utilizadores. Como já referido, nestes dispositivos, a persistência do fósforo do ecrã assegura a função essencial de integração de impulsos.

Nos radares mais recentes, uma das maiores evoluções ocorre a nível do processamento digital do sinal detetado, que permite aumentar as capacidades de forma muito significativa. Embora os indicadores sejam da mesma natureza, isto é, tubos de raios catódicos ou LCD's, a informação disponibilizada já não é necessariamente o sinal de vídeo recebido, com mais ou menos processamento, mas o resultado de decisões de deteção que permitem gerar uma imagem sintetizada, contendo apenas a informação relevante (indicadores sintéticos).

Por vezes, combina-se no mesmo indicador o sinal recebido e o resultado sintético da deteção, isto é, obtém-se um indicador que destaca a informação relevante, mas mantém uma imagem de fundo que permite dar maior confiança ao utilizador e, porventura, efectuar outros tipos de análise.

# *Radares de impulsos*

---

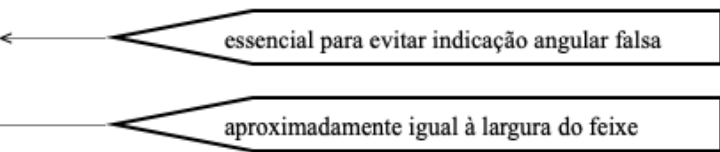
## **Antenas**

### Tipos de antenas

- monopolos e dipolos
- Yagi
- helicoidais
- cornetas
- parabolóides
- secções de parabolóides
- agrupamentos de fase

### Figuras de mérito

- ganho máximo
- rejeição dos lobos laterais
- largura do feixe
- resolução angular



essencial para evitar indicação angular falsa

aproximadamente igual à largura do feixe

---

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

Como noutros sistemas, as antenas filiformes são utilizadas a baixas frequências, enquanto as antenas de abertura têm aplicação em radares que operam a frequências superiores.

Se houver ecos de alvos na direção de lobos laterais proeminentes, resultam erros de indicação angular, uma vez que o radar assume sempre que a direção do alvo é a do lobo principal. Um boa antena deverá, por isso, assegurar uma boa rejeição dos lobos laterais.

A capacidade de uma antena apresentar uma boa discriminação angular está diretamente relacionada com a largura do feixe, que deverá ser pequena. Contudo, na função de procura poderá ser necessário que a antena possua uma característica exactamente oposta, isto é, uma largura de feixe relativamente grande, sacrificando, obviamente, a resolução angular.

# Radars de impulsos

## Antenas

Antenas baseadas em agrupamentos de fase

- permitem maior agilidade no varrimento → o varrimento pode ser electrónico
  - varrimento electrónico em duas direcções
  - varrimento electrónico numa direcção
- é possível variar a forma do diagrama de radiação à medida das necessidades de operação

Tipos de antenas baseadas em agrupamentos de fase	
Alimentação única	Alimentação múltipla
Tubo de elevada potência alimenta todo o agrupamento Utilizados divisores de potência e esfasadores Tipos de esfasadores <ul style="list-style-type: none"><li>• ferrite - esfasamento dependente de um campo magnético aplicado à ferrite</li><li>• díodos - cada díodo está associado a um circuito que introduz, ou não, um dado esfasamento</li></ul>	Múltiplos geradores alimentam directamente cada antena ou grupo de antenas Utilizados divisores de potência (no caso de alimentação por grupos) e esfasadores Tipos de esfasadores <ul style="list-style-type: none"><li>• ferrite</li><li>• circuitos integrados de microondas</li></ul>

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

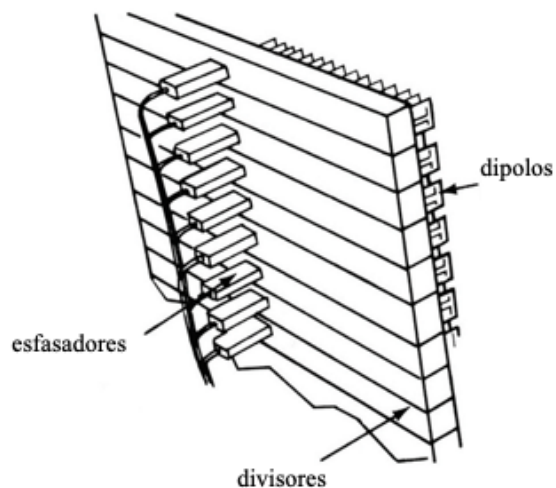
*Sistemas de Radar*

Os radares convencionais são pouco ágeis, uma vez que têm limitações no movimento da antena, devido à inércia, e na forma do diagrama de radiação, que normalmente é fixo.

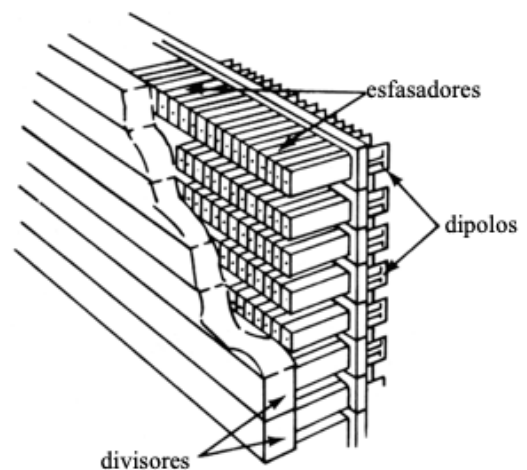
Os radares com agrupamento de fase vieram resolver estas limitações à custa de técnicas de síntese de diagramas de radiação, controlando eletronicamente a amplitude e fase dos sinais aplicados às antenas que compõem o agrupamento.

No limite, a antena poderá estar fixa, sendo necessários vários milhares de elementos para assegurar o controlo adequado do feixe. Noutros casos, a antena move-se mecanicamente numa direcção, por exemplo em azimute, efectuando-se o varrimento electrónico na direcção perpendicular (em elevação). O número de elementos requerido, neste caso, é consideravelmente inferior, sendo frequente não exceder uma centena.

## **Antenas**



(a) Antena com varrimento electrónico em elevação



(b) Antena com varrimento electrónico em elevação e azimute

### **Antenas baseadas em agrupamentos de fase**

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

A figura da esquerda mostra uma antena que assegura apenas o varrimento electrónico em elevação, uma vez que os esfasadores não actuam independentemente ao longo de cada linha de dipolos.

Pelo contrário, na antena representada na figura da direita, já é possível controlar a fase do sinal aplicado a cada dipolo, permitindo, desta forma, efectuar o varrimento em dois planos.

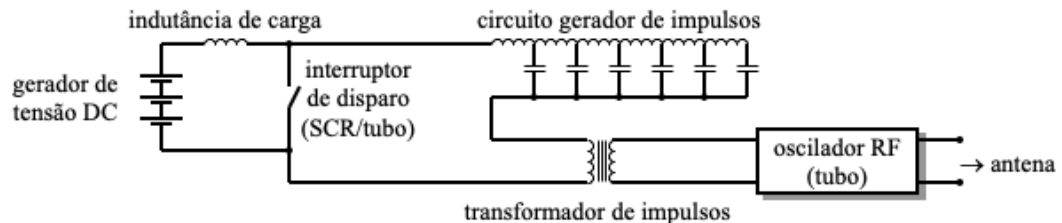
# Radars de impulsos

## Transmissores

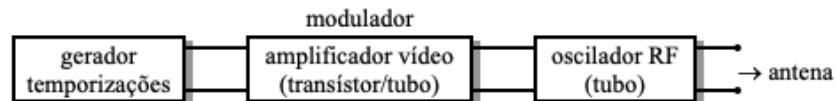
### Oscilador auto-excitado

- modulador de linha
  - construção simples e eficiente
  - largura dos impulsos pré-definida

osciladores de RF tipicamente baseados em tubos (até 30 MW potência de pico!)



- modulador com amplificador
  - mais complexo e menos eficiente
  - possível variar as características dos impulsos



Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Radar

Nos transmissores de radares de elevada potência, utiliza-se um modulador que produz um sinal de de tipo *on-off* com que é aplicado à alimentação de um oscilador de potência de RF.

O modulador de linha é uma das opções que alia a simplicidade à capacidade de gerar um sinal de muito alta potência de pico. Assenta num circuito gerador de impulsos constituído por uma malha LC que simula o comportamento de uma linha de transmissão. Quando o interruptor de disparo está aberto, a linha vai carregar-se lentamente até ficar com uma tensão  $V$  nos seus terminais. Em seguida, o interruptor de disparo actua, ligando a linha à alimentação do oscilador, através de um transformador de impulsos com uma impedância de entrada igual à impedância de onda da linha. No instante de disparo, a tensão na entrada da linha passa a  $V/2$ , criando-se uma frente de onda de amplitude  $V/2$  que se propaga até ao fim da linha. Ocorre depois uma reflexão total desta onda, criando uma nova onda em sentido inverso de amplitude  $-V/2$ , que vai levar progressivamente a tensão na linha a zero. O resultado no transformador de impulsos é uma tensão de amplitude  $V/2$  que prevalece durante um período de tempo igual a  $2t_p$ , em que  $t_p$  é o tempo de propagação na linha.

Um dos inconvenientes do modulador de linha é impor uma largura de impulsos que não poder ser alterada facilmente, já que seria exigida uma alteração do circuito gerador de impulsos.

Já o modulador baseado amplificador de banda larga (vídeo) permite variar a largura do impulso, a taxa de repetição ou mesmo a forma dos impulsos. Utilizam-se, neste caso, amplificadores baseados em tubo de vácuo ou em transistor. A saída do amplificador fornece a tensão de alimentação do oscilador de RF.

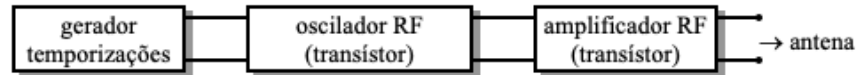
# Radars de impulsos

## Transmissores

Oscilador e amplificador de potência

- modulador desnecessário
- possível combinação de módulos de potência (ex: agrupamentos de fase)

amplificadores de RF tipicamente de estado sólido (< 200 W potência de pico)



### Comparação entre tubos de vácuo e dispositivos de estado sólido

- vantagem dos tubos de vácuo → potências elevadas (exige tensões de dezenas de kV)
- vantagens dos dispositivos de estado sólido
  - maior versatilidade na configuração dos impulsos (taxa de repetição e duração)
  - melhor estabilidade de características
  - menores dimensões (sobretudo com baixas potências, sem dissipadores volumosos)
  - maior fiabilidade
  - manutenção mais simples
  - construção mais simples

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

Nos transmissores de radares de baixa potência o trem de impulsos de RF é obtido a partir de um amplificador de RF de estado sólido.

As limitações de potência das tecnologias de estado sólido podem ser atenuadas usando múltiplos módulos de potência em associação com antenas baseadas em agrupamentos de fase, obtendo-se assim radares de potência moderadamente elevada.

# *Radares de impulsos*

## **Sistemas de radares de impulsos**

### • Radares de procura

- varrimento rápido de um volume
- diagrama de radiação da antena com largura de feixe relativamente elevada
- recorrem por vezes a duas antenas acopladas
  - uma antena com diagrama de radiação estreito em azimute e largo em elevação
  - a outra antena com diagrama de radiação largo em azimute e estreito em elevação
  - a conjugação do movimento das duas antenas permite cobrir um volume rapidamente

### • Radares de seguimento

- localização precisa de alvos ao longo do tempo
- diagrama de radiação da antena com largura de feixe relativamente pequena
- exige-se muitas vezes a procura e seguimento, existindo várias alternativas
  - o radar comuta do modo de procura para o modo de seguimento, sempre que necessário
  - são usados dois radares, um de cada tipo
  - o radar executa as duas funções em simultâneo

*TWS, Track While Scan*

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

Uma das formas de resolver a contradição entre as características dos radares de procura e de seguimento consiste na utilização de antenas com agrupamentos de fase, devido à possibilidade de reconfigurar rapidamente a pontaria e forma do diagrama de radiação, tornando possível uma operação do tipo TWS (*Track While Scan*).

Os radares de procura têm utilizações múltiplas:

- controlo de tráfego aéreo em aeroportos;
- controlo de navegação marítima junto à costa ou à entrada de portos;
- radares a bordo de aviões ou barcos.

Os radares de seguimento são largamente utilizados em controlo de tráfego aéreo, sendo igualmente muito comuns as aplicações militares - seguimento de aviões ou mísseis. Outra aplicação importante é o seguimento de objetos extra-terrestres, nomeadamente satélites ou veículos espaciais - neste caso, a posição do alvo é previsível, sendo apenas necessária a função de seguimento. Em muitos casos são utilizados repetidores, de forma a aumentar significativamente o alcance (ver adiante).



# Radars de impulsos

## Sistemas de radares de impulsos

### • Radars indicadores de movimento

MTI, Moving Target Indicator

- detetam especificamente alvos móveis
- observa-se a diferença de fase entre o sinal recebido e o sinal transmitido
- alvos estacionários são ignorados
  - ecos sucessivos ocorrem com a mesma fase
- alvos móveis são detetados
  - devido à variação de distância, ecos sucessivos têm fase variável
  - há o problema das velocidades "cegas"

não há variação de fase se o alvo se desloca  $n\lambda/2$  entre impulsos sucessivos

$$|d_{i+1} - d_i| = n \frac{\lambda}{2}$$

$$\frac{|d_{i+1} - d_i|}{T_m} = \frac{1}{T_m} n \frac{\lambda}{2}$$

$$v_r = PRF n \frac{\lambda}{2}$$

velocidades "cegas"



Verificação da situação de velocidade "cega" num radar MTI

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Radar

Se o alvo se desloca  $n\lambda/2$ , em relação ao radar, num tempo  $T_m=1/PRF$  correspondente ao período de repetição de impulsos, a onda recebida em ecos sucessivos percorrerá distâncias que diferem entre si de  $n\lambda$  (devido ao percurso de ida e retorno), logo a fase recebida será a mesma e o alvo não será detetado.

Existem duas possibilidades de contornar este problema:

- variar a própria taxa de repetição de impulsos, impossibilitando que a velocidade radial do alvo seja cega simultaneamente para os dois (ou mais) valores de  $PRF$ ;
- medir o efeito Doppler que está presente em qualquer caso.

# Radars de impulsos

## Sistemas de radares de impulsos

### • Radars indicadores de movimento

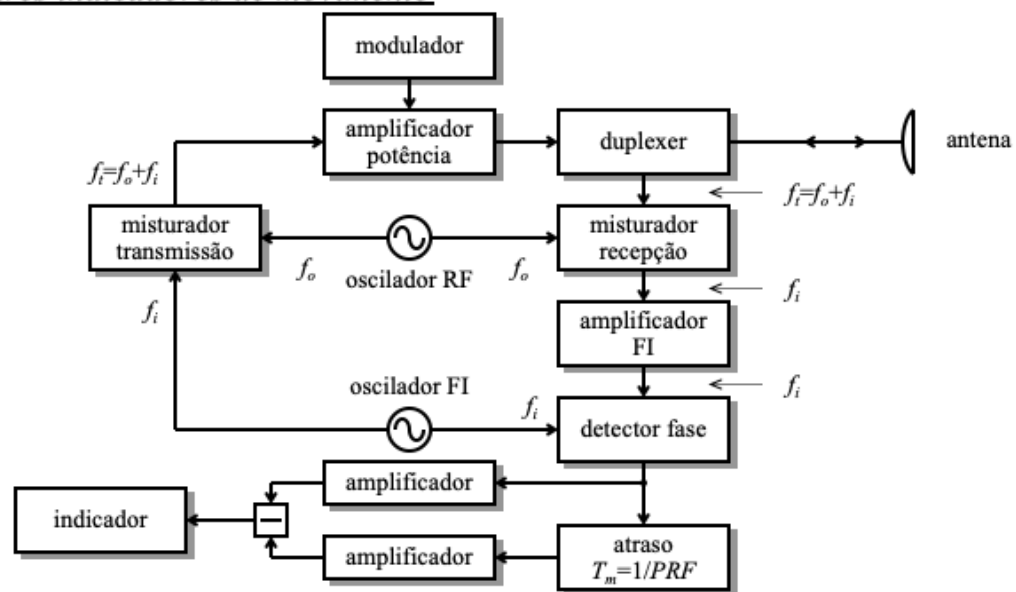


Diagrama-blocos de um radar MTI

O sistema representado na figura baseia-se num receptor super-heterodino com detecção síncrona, num arranjo que é comum a outros radares, com as seguintes características:

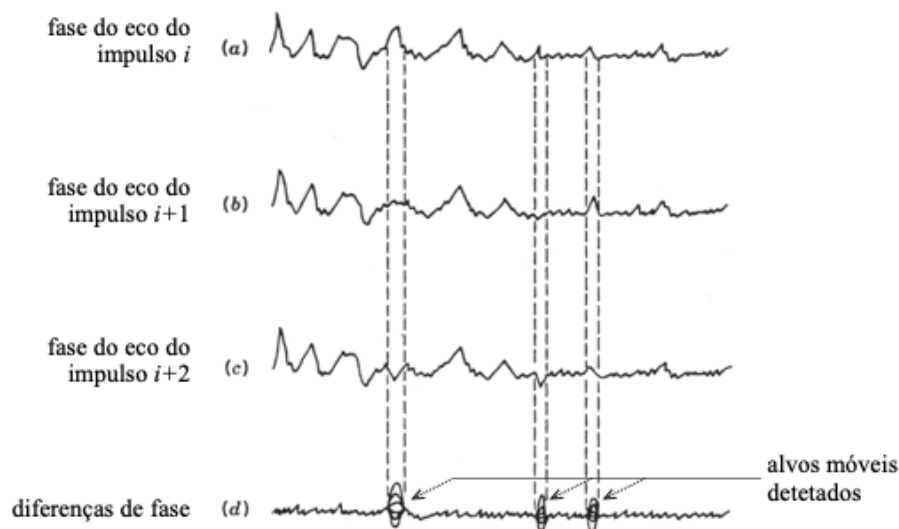
- utilizam-se dois osciladores, um de radio frequência e o outro de uma frequência mais baixa (frequência intermédia);
- no emissor, transmite-se um sinal com frequência igual à soma das frequências dos dois osciladores;
- no receptor, faz-se a translação para a frequência intermédia, usando a frequência do oscilador de RF;
- após a amplificação de FI, utiliza-se a frequência do oscilador de FI para efectuar a detecção síncrona, neste caso de fase;
- a comparação entre impulsos consecutivos é assegurada recorrendo a uma linha de atraso correspondente ao período de repetição de impulsos, e analisando a diferença entre o impulso presente e o impulso anterior, que sofreu o atraso.

Note-se que, nesta configuração, a detecção síncrona é relativamente simples, uma vez que se aproveita o facto de o emissor e receptor estarem na mesma localização, usando-se no receptor a referência do emissor. De um modo geral, num sistema de comunicação ponto-a-ponto, a situação é mais complexa, uma vez que se torna necessário recuperar a portadora a partir do próprio sinal recebido, o qual vem afectado por ruído e distorções.

# Radares de impulsos

## Sistemas de radares de impulsos

- Radares indicadores de movimento



**Fase dos ecos de três impulsos (a), (b) e (c) recebidos num radar MTI,  
e análise da diferença de fase (d)**

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

Como se pode observar na figura, os ecos de alvos fixos produzem a mesma fase no receptor do radar, enquanto os alvos móveis mostram uma variabilidade da fase facilmente identificável.

Tal como noutros radares de impulsos, a deteção melhora significativamente se for efectuada a integração de impulsos, correspondente neste caso à análise de múltiplas diferenças de fase entre impulsos consecutivos.

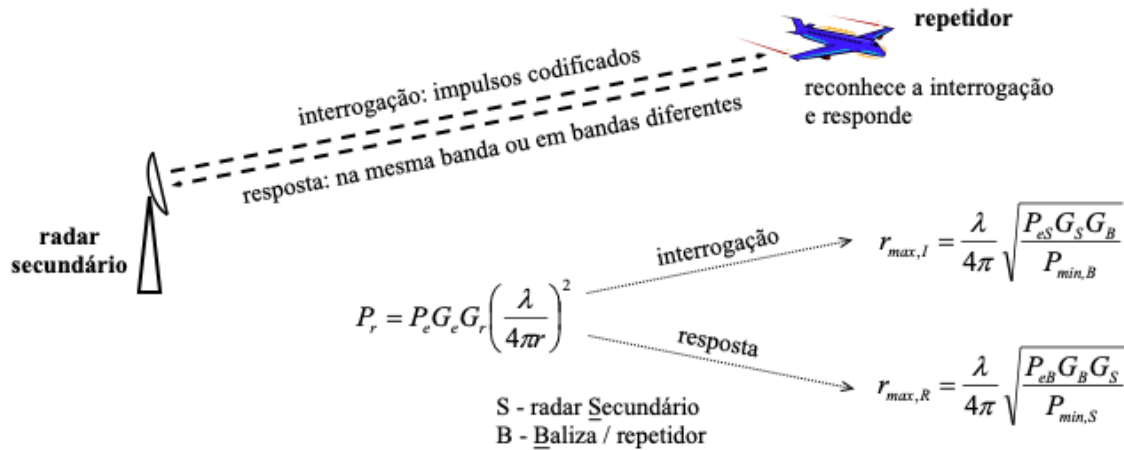
# Radares de impulsos

## Sistemas de radares de impulsos

### • Radares de sinalização

- aumentam o alcance de forma significativa
- aplicações
  - identificação e localização de aviões/navios
  - orientação através de balizas

radares secundários  
(em oposição aos radares básicos, ou primários)



Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Radar

Os radares de sinalização, ou secundários, destinam-se a operar em situações em que o "alvo" coopera com a radar na determinação da sua localização.

Uma das grandes vantagens deste tipo de radar é o facto de receber ecos apenas do alvo pretendido, uma vez que só este responde após reconhecer que a interrogação lhe é dirigida.

O sistema opera numa configuração que se assemelha mais a duas ligações ponto a ponto. Por esta razão, o alcance deste tipo de radar é muito superior ao de um radar primário, já que a potência recebida decresce com o quadrado da distância, e não com a quarta potência.

Assim, o alcance efectivo será o menor dos valores das ligações de interrogação  $r_{max,I}$  e de resposta  $r_{max,R}$ .

# Radars de impulsos

## Sistemas de radares de impulsos

### • Radars meteorológicos

#### Equações básicas (I)

potência recebida de um alvo isolado  
(equação do radar):

$$P_r = \frac{P_e G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4}$$

para uma população de  $n$  partículas no  
volume de radar  $V_m$ , define-se  
reflectividade  $\eta$  como a área efectiva  
de eco por unidade de volume:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{V_m}$$

a potência recebida por unidade de  
volume virá:

$$\frac{\overline{P_r}}{V_m} = \frac{P_e G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{V_m} = \frac{P_e G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \eta$$

na região de Rayleigh a área efectiva  
de eco de partículas de chuva e a  
reflectividade são fáceis de calcular:

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |k|^2}{\lambda^4} D_i^6$$

$k$  – índice de refração da água

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{V_m} = \frac{\pi^5 |k|^2}{\lambda^4} \left( \frac{\sum_{i=1}^n D_i^6}{V_m} \right)$$

$Z$  - factor de reflectividade  
(independente da frequência)

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

Os radares meteorológicos de impulsos destinam-se a observar ecos de partículas de precipitação na atmosfera. O alvo é, neste caso, uma população de partículas que reflectem uma certa potência de sinal.

O radar integra o sinal recebido durante períodos de tempo consecutivos, obtendo assim uma estimativa das partículas existentes em sucessivos volumes de radar. Cada um destes volumes é limitado por duas superfícies esféricas com centro no radar, definidas pelos instantes inicial e final do período de observação correspondente. Além desta limitação do volume em distância ao radar, é ainda necessário ter em conta o diagrama de radiação e a direção de pontaria da antena, que definem um cone de observação com vértice no radar.

Como a antena do radar se pode mover, é possível explorar uma qualquer região da atmosfera.

# Radares de impulsos

## Sistemas de radares de impulsos

### • Radares meteorológicos

#### Equações básicas (II)

a potência recebida por unidade de volume virá então em função de  $\eta$  ou  $Z$ :

$$\frac{\overline{P_r}}{V_m} = \frac{P_e G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \eta = \frac{P_e G^2 \pi^5 |k|^2}{(4\pi)^3 r^4 \lambda^2} Z$$

Nota: esta equação aplica-se mesmo fora da região de Rayleigh - nesse caso,  $Z$  perde o significado simples e passa a depender da frequência, designando-se então de factor de reflectividade equivalente

#### Aplicações

- estudos meteorológicos
- detecção de sistemas de precipitação (particularmente os que causam maior prejuízo)
- medidas da taxa de precipitação

radar mede  $\overline{P_r}/V_m$   $\longrightarrow$  calcula-se  $Z$   $\longrightarrow$  estima-se  $R$  a partir de equações semi-empíricas do tipo  $Z = aR^b$  (ex:  $Z = 200 R^{1.6}$ ,  $Z$  - mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>,  $R$  - mm/h)

Uma das aplicações dos radares meteorológicos é a estimativa da taxa de precipitação. Contudo, os ecos de radar da chuva são largamente afectados pelas dimensões das gotas de chuva que, como se sabe, podem exibir variações significativas para a mesma taxa de precipitação. Por esta razão, as estimativas são baseadas em distribuições médias da dimensão das gotas, em função da taxa de precipitação, que podem conduzir a erros grosseiros.

No entanto, os radares dispõem da capacidade de medida da precipitação em grandes áreas, que não é possível obter com uma rede dispersa de medidas pontuais baseadas em pluviómetros. Ou seja, se a taxa de precipitação numa certa área for obtida por extrapolação de medidas pontuais relativamente escassas, teremos erros eventualmente superiores aos dos radares. Embora cada uma das técnicas tenha as suas limitações, há ainda a possibilidade de conjugar os dois tipos de medida, isto é, utilizar os pluviómetros para calibrar as medidas dos radares, reduzindo assim os erros resultantes dos pressupostos da dimensão das gotas de chuva.

## Radares de onda contínua

### Sistemas de radares de onda contínua

CW, Continuous Wave

#### Vantagens e desvantagens dos radares CW

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>• medidas precisas de velocidades por efeito Doppler</li><li>• pequenas potências</li><li>• circuitos simples</li><li>• sem limitações de alcance mínimo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• alcance reduzido</li><li>• dificuldades na presença de mais de um alvo</li><li>• exige modulação do sinal para ser capaz de fornecer a distância do alvo</li></ul>

#### Aplicações

- medição de velocidade de veículos
- medição de velocidade de aeronaves
- medição de velocidade de subida/descida de aeronaves
- alarmes anti-intrusão
- detector de colisão
- rádio-altímetro

recorrem ao efeito Doppler

exigem a utilização de modulação

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

De um modo geral, os radares de onda contínua recorrem ao efeito Doppler para detetar alvos em movimento e medir a velocidade. Adicionalmente, a utilização de modulação permite "marcar" temporalmente o sinal transmitido, de forma a permitir efectuar medidas de distância.

As maiores vantagens deste tipo de radar são a sua capacidade de medir a velocidade com precisão e a sua simplicidade. Contudo, o facto de operarem com pequenas potências limita fortemente o alcance.

Uma excepção a esta limitação são os rádio-altímetros, em que a terra constitui o alvo. O facto de a área efectiva de eco ser muito grande permite que estes radares operem com alcances da ordem dos 10-20 km, com potências da ordem de 1-2 W.

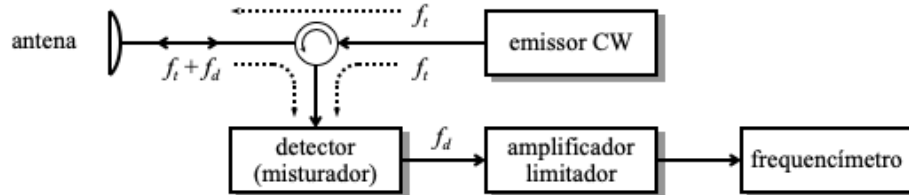
Em aplicações mais exigentes utilizam-se radares de impulsos com medição do efeito Doppler. Estes últimos aliam o maior alcance à capacidade de medir a distância do alvo.

# Radars de onda contínua

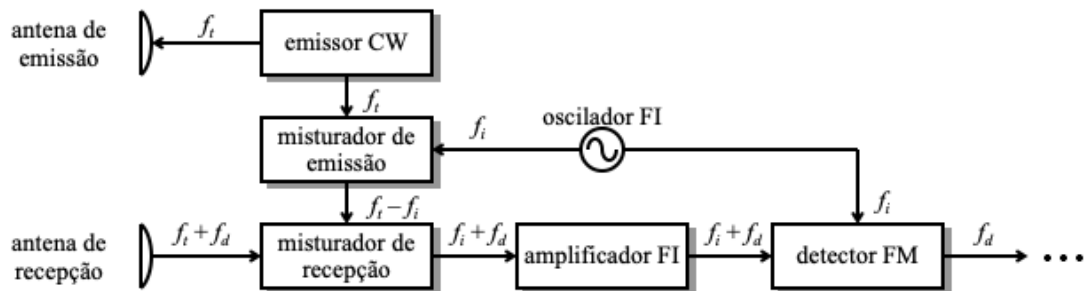
## Sistemas de radares de onda contínua

### • Radar CW de efeito Doppler

#### Deteção homodina



#### Deteção heterodina



*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

O radar CW com detecção homodina corresponde à configuração mais simples, mas tem uma sensibilidade reduzida. Utiliza uma única antena e um circulator, responsável por enviar para o detector o sinal recebido com efeito Doppler. A este sinal sobrepõe-se uma parte do sinal transmitido, dado que o circulator não é ideal - nem poderia ser neste caso! De facto, se considerarmos que o isolamento do circulator é da ordem de 30 dB, o detector efectua o batimento entre o sinal recebido com efeito Doppler e o sinal transmitido com menos 30 dB.

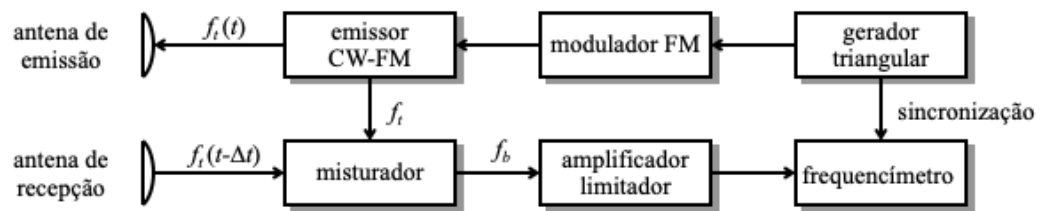
Para aumentar a sensibilidade deverá ser utilizada uma montagem super-heterodina e, eventualmente, duas antenas.



## *Radares de onda contínua*

### **Sistemas de radares de onda contínua**

- *Radar CW de frequência modulada (CW-FM)*

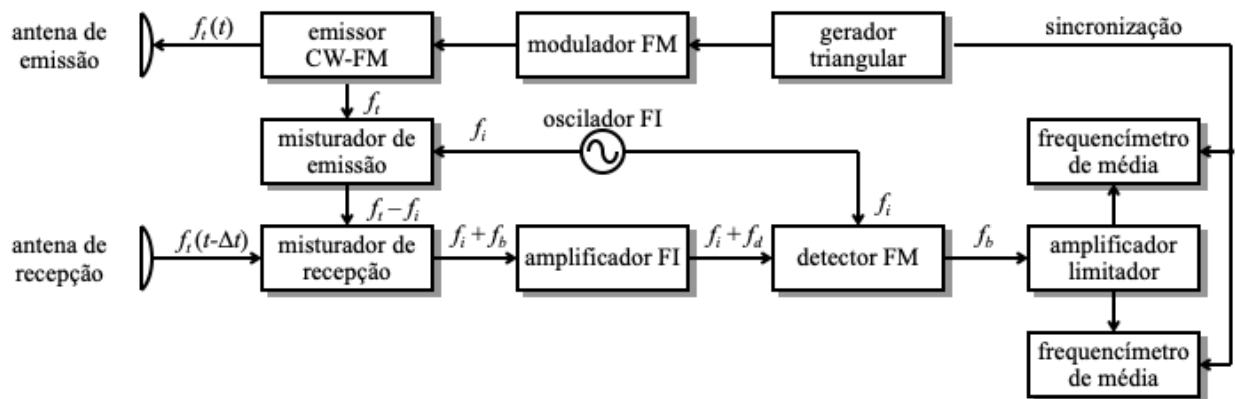


A configuração deste radar é de duas antenas e homodino.

# Radars de onda contínua

## Sistemas de radares de onda contínua

- Radar CW de frequência modulada (CW-FM) e efeito Doppler



Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Radar

A configuração deste radar é de duas antenas e heterodino.

# Limitações

## Limitações práticas em sistemas de radar

- Perdas



limitam o alcance  
criam erros de estimativa da área efectiva de eco

### Perdas nas ligações

- linhas, guias de onda, conectores, duplexers

### Perdas de diagrama de radiação

- impulsos reflectidos pelo alvo são normalmente integrados
- o ganho da antena para cada impulso recebido é menor do que o ganho máximo
- redução tipicamente entre 1,5 e 3 dB (varrimento numa direcção / em duas direcções)

### Perdas de varrimento

- ganho de transmissão e recepção para o mesmo impulso podem ser diferentes devido a:
  - varrimento rápido / largura do feixe da antena muito pequena
  - grandes distâncias dos alvos

### Equipamento não ideal

- envelhecimento de componentes / humidade e corrosão em linhas e guias de onda
- potência transmitida variável com a frequência (ex: dificuldade de sintonização)

# Limitações

## Limitações práticas em sistemas de radar

- Efeitos de propagação

### Desvanecimentos

- atenuação devida aos gases atmosféricos
- atenuação devida à chuva



limitam o alcance  
criam erros de medida (estimativa) da área efectiva de eco

### Multi-percursos

- reflexão na superfície terrestre ou em obstáculos
- refração nas camadas da atmosfera
- ecos de partículas de precipitação



provocam flutuações do sinal recebido - erros de medida

### Variações do ângulo de chegada

- provocada por efeitos de reflexão e refração



criam erros angulares de localização, sobretudo em elevação

*Projeto de Sistemas de Telecomunicações*

*Sistemas de Radar*

Os problemas de desvanecimento manifestam-se sobretudo a altas frequências.