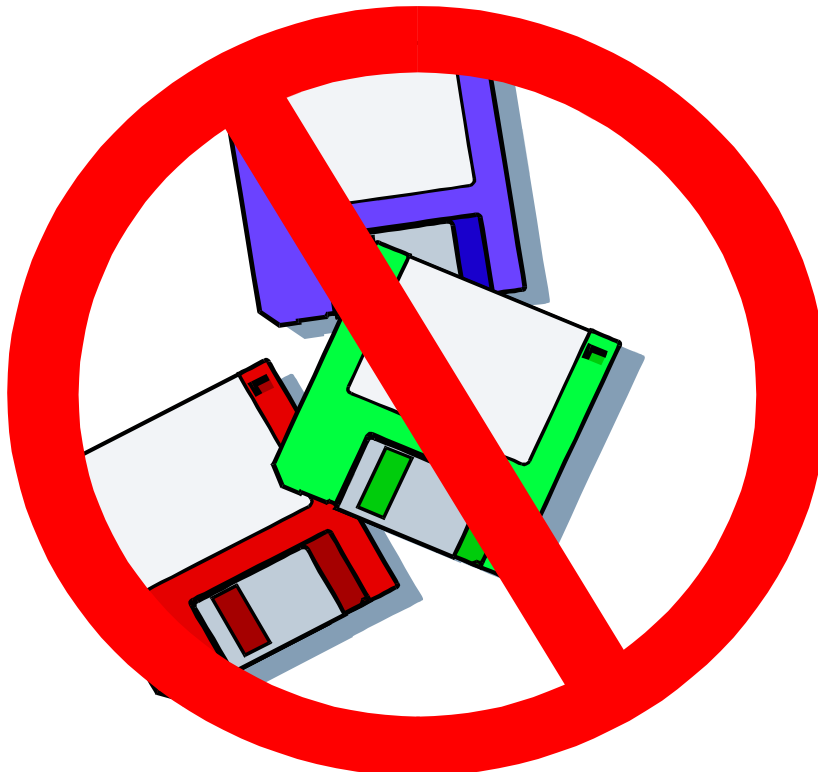


RADAR
Radio Detection And Ranging
P1

SEL 413 Telecomunicações

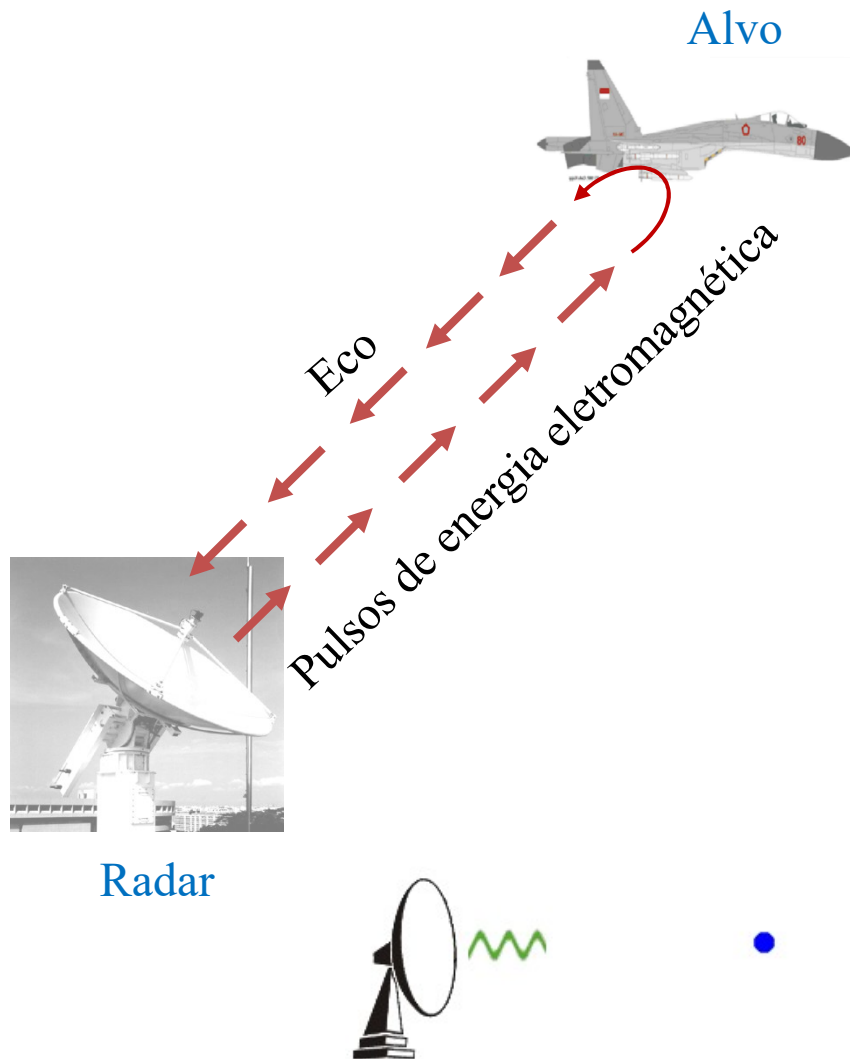
Amílcar Careli César
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

Atenção!



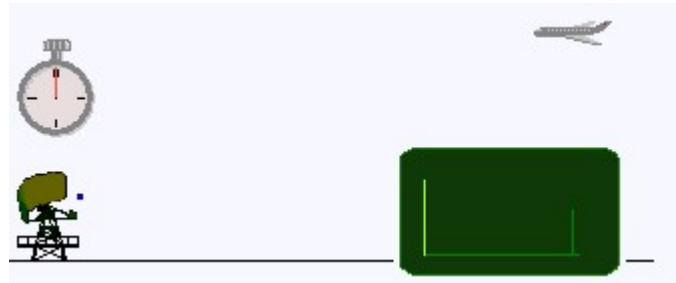
- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL-413: Telecomunicações**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia aeronáutica.
- ✓ Não são permitidas a reprodução e/ou comercialização do material.
- ✓ solicitar autorização ao docente para qualquer tipo de uso distinto daquele para o qual foi planejado.

Operação do Radar



- ✓ Similar ao princípio de reflexão de ondas acústicas
- ✓ Objeto reflete o som emitido (eco)
- ✓ Distância do objeto é estimada pela velocidade do som no ar
- ✓ Radares utilizam pulsos de energia eletromagnética da mesma maneira
 - A parcela da energia eletromagnética que se reflete no objeto é o *ECO*

Operação



<http://en.wikipedia.org/wiki/Radar>

Radar: frequências (1)

Band	Frequency range	Wavelength range	Notes
HF	3–30 MHz	10–100 m	Coastal radar systems, over-the-horizon radar (OTH) radars; 'high frequency'
VHF	30–300 MHz	1–10 m	Very long range, ground penetrating; 'very high frequency'
P	< 300 MHz	> 1 m	'P' for 'previous', applied retrospectively to early radar systems; essentially HF + VHF
UHF	300–1000 MHz	0.3–1 m	Very long range (e.g. ballistic missile early warning), ground penetrating, foliage penetrating; 'ultra high frequency'
L	1–2 GHz	15–30 cm	Long range air traffic control and surveillance; 'L' for 'long'
S	2–4 GHz	7.5–15 cm	Moderate range surveillance, Terminal air traffic control, long-range weather, marine radar; 'S' for 'short'
C	4–8 GHz	3.75–7.5 cm	Satellite transponders; a compromise (hence 'C') between X and S bands; weather; long range tracking
X	8–12 GHz	2.5–3.75 cm	Missile guidance, marine radar, weather, medium-resolution mapping and ground surveillance; in the USA the narrow range 10.525 GHz \pm 25 MHz is used for airport radar; short range tracking. Named X band because the frequency was a secret during WW2.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Radar>

Radar: frequências (2)

Band	Frequency range	Wavelength range	Notes
K _u	12–18 GHz	1.67–2.5 cm	High-resolution, also used for satellite transponders, frequency under K band (hence 'u')
K	18–24 GHz	1.11–1.67 cm	From German <i>kurz</i> , meaning 'short'; limited use due to absorption by water vapour, so K _u and K _a were used instead for surveillance. K-band is used for detecting clouds by meteorologists, and by police for detecting speeding motorists. K-band radar guns operate at 24.150 ± 0.100 GHz.
K _a	24–40 GHz	0.75–1.11 cm	Mapping, short range, airport surveillance; frequency just above K band (hence 'a') Photo radar, used to trigger cameras which take pictures of license plates of cars running red lights, operates at 34.300 ± 0.100 GHz.
mm	40–300 GHz	1.0–7.5 mm	Millimeter band, subdivided as below. The frequency ranges depend on waveguide size. Multiple letters are assigned to these bands by different groups. These are from Baytron, a now defunct company that made test equipment.
V	40–75 GHz	4.0–7.5 mm	Very strongly absorbed by atmospheric oxygen, which resonates at 60 GHz.
W	75–110 GHz	2.7–4.0 mm	Used as a visual sensor for experimental autonomous vehicles, high-resolution meteorological observation, and imaging.

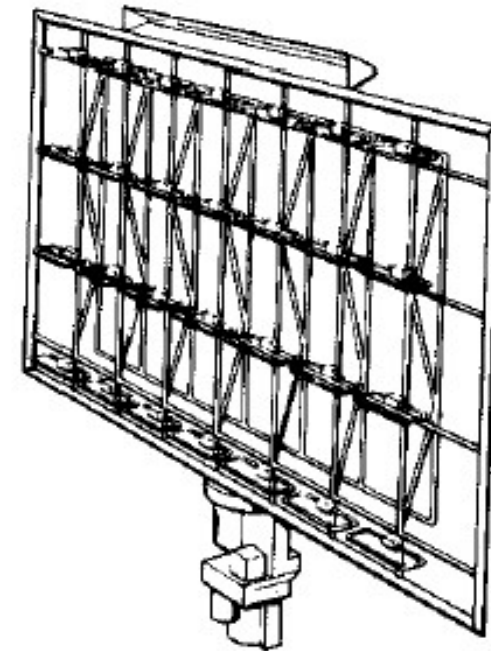
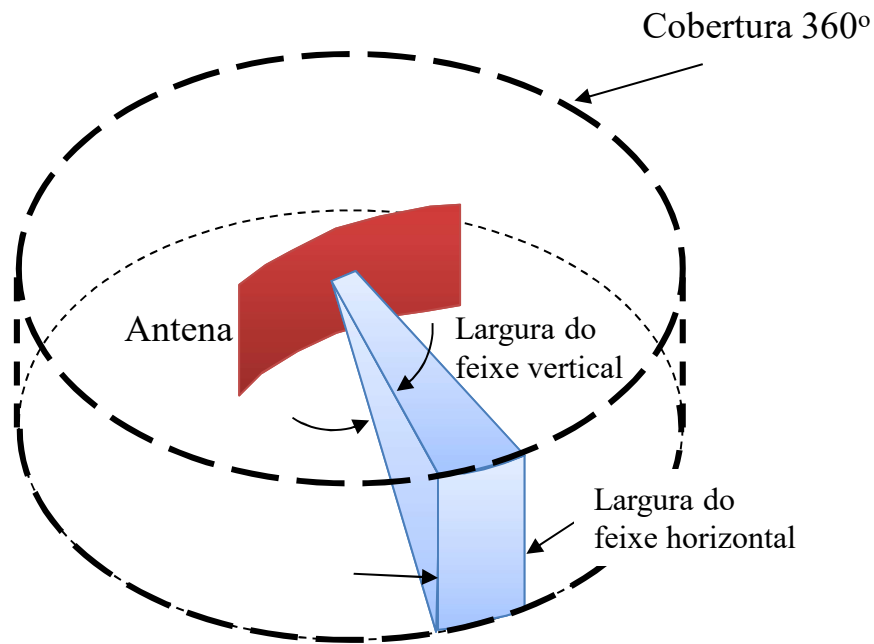
<http://en.wikipedia.org/wiki/Radar>

História

- ✓ **1904**: Engenheiro alemão patenteia o sistema de detecção de reflexões vindas de navios
 - a marinha alemã não demonstrou interesse pelo sistema!
- ✓ **1922**: Primeiro experimento oficial de “ecos de rádio”, EUA
- ✓ **1930**: Foi verificada a possibilidade de detecção de aeronaves, EUA
- ✓ **1937**: Sistema instalado em navio foi capaz de detectar alvos a distâncias de 12 milhas, EUA
- ✓ **1938**: Sistema instalado em navio foi capaz de detectar alvos a distâncias de 50 milhas
- ✓ **1936**: Exército EUA desenvolveu o sistema pulsado para controle de disparo em aeronaves
- ✓ **1940**: Com o início da Segunda Guerra, a Inglaterra obteve os maiores avanços com esta tecnologia; radar banda-X

Radar de busca aérea

- ✓ Alcance pode ser superior a 500 km e
- ✓ Cobertura de posição é de 360 graus



Radar com padrão de cobertura bidimensional

Taxa de repetição de pulso

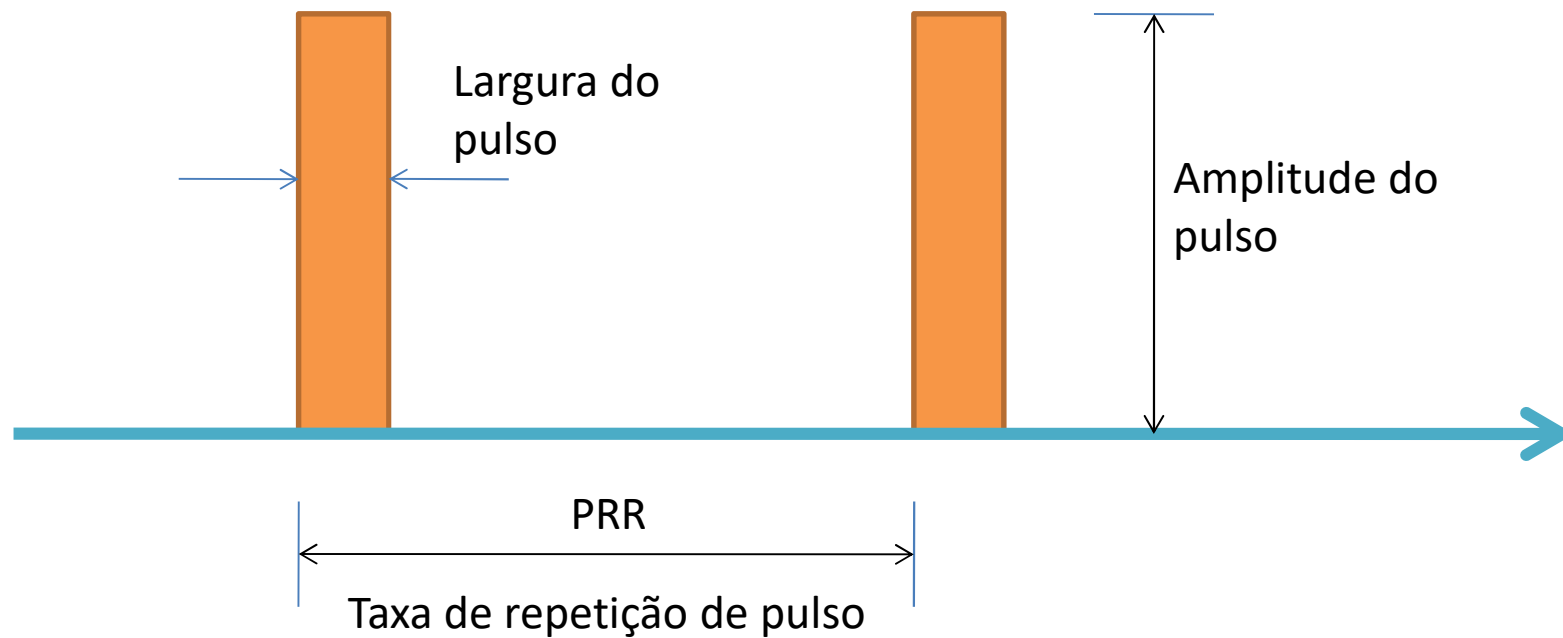


Diagrama de blocos-1

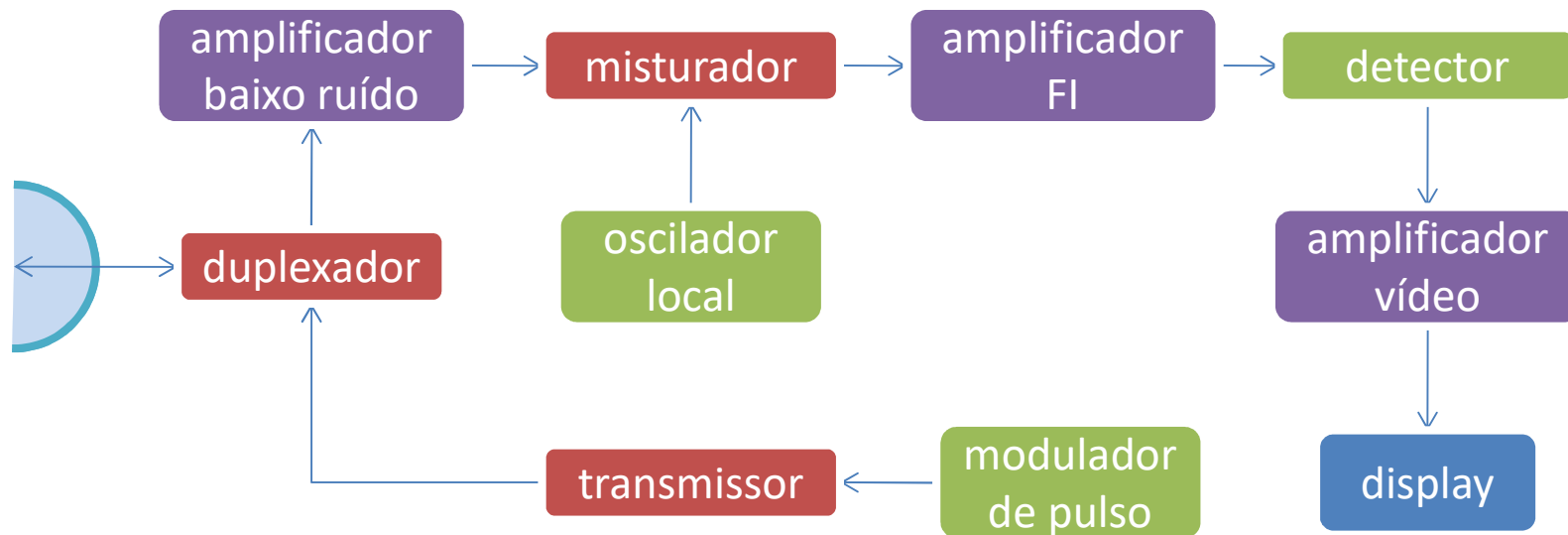


Diagrama de blocos-2

- ✓ **Modulador de pulso**
 - Executa o chaveamento do transmissor (*on* e *off*) produzindo pulsos de microondas que são emitidos pela antena
- ✓ **Amplificador de RF de baixo ruído**
 - Amplifica o sinal recebido pela antena
- ✓ **Misturador, oscilador local**
 - Converte o sinal de microondas para uma frequência mais baixa (frequência intermediária-FI)
- ✓ **Amplificador de FI**
 - Amplifica o sinal de frequência intermediária
- ✓ **Amplificador de vídeo**
 - Amplifica o sinal detectado
- ✓ **Display**
 - Exibe o sinal recebido (ecos provenientes do alvo)

Diagrama de blocos-3

✓ Sistema de Antena

- Inclui a antena, linhas de transmissão e guias de ondas do transmissor para a antena e da antena para o receptor

✓ Sincronizador (Timer)

- Assegura que todos os circuitos conectados ao radar operem sob sincronismo temporal
- Controla o intervalo entre pulsos transmitidos

✓ Transmissor

- Gera pulsos eletromagnéticos em intervalos
- Utiliza osciladores de microondas com válvulas magnetrons ou klystrons para gerar pulsos retangulares, de alta amplitude e bem sincronizados
- Valor típico de tensão para estes pulsos é 10^5 volts

✓ Duplexador

- Chave eletrônica que permite ao radar utilizar a mesma antena para transmissão e recepção
- Deve exibir baixas perdas porque o sinal recebido geralmente possui nível muito baixo

Frequências e aplicações (1)

Band name	Frequency range	Wavelength range	Notes
HF	3–30 MHz	10–100 m	Coastal radar systems, over-the-horizon radar (OTH) radars; 'high frequency'
VHF	30–300 MHz	1–10 m	Very long range, ground penetrating; 'very high frequency'
P	< 300 MHz	> 1 m	'P' for 'previous', applied retrospectively to early radar systems; essentially HF + VHF
UHF	300–1000 MHz	0.3–1 m	Very long range (e.g. ballistic missile early warning), ground penetrating, foliage penetrating; 'ultra-high frequency'
L	1–2 GHz	15–30 cm	Long range air traffic control and surveillance; 'L' for 'long'
S	2–4 GHz	7.5–15 cm	Moderate range surveillance, Terminal air traffic control, long-range weather, marine radar; 'S' for 'short'
C	4–8 GHz	3.75–7.5 cm	Satellite transponders; a compromise (hence 'C') between X and S bands; weather; long range tracking
X	8–12 GHz	2.5–3.75 cm	Missile guidance, marine radar, weather, medium-resolution mapping and ground surveillance; in the United States the narrow range 10.525 GHz \pm 25 MHz is used for airport radar; short range tracking. Named X band because the frequency was a secret during WW2.

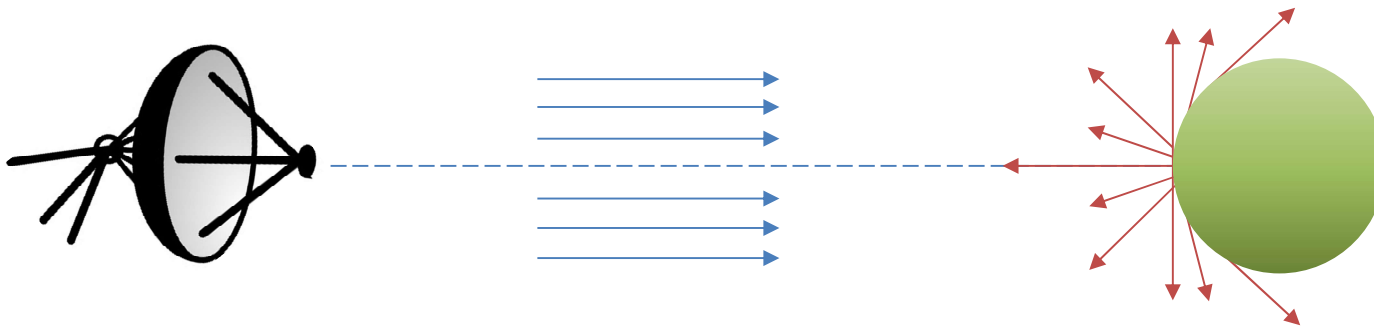
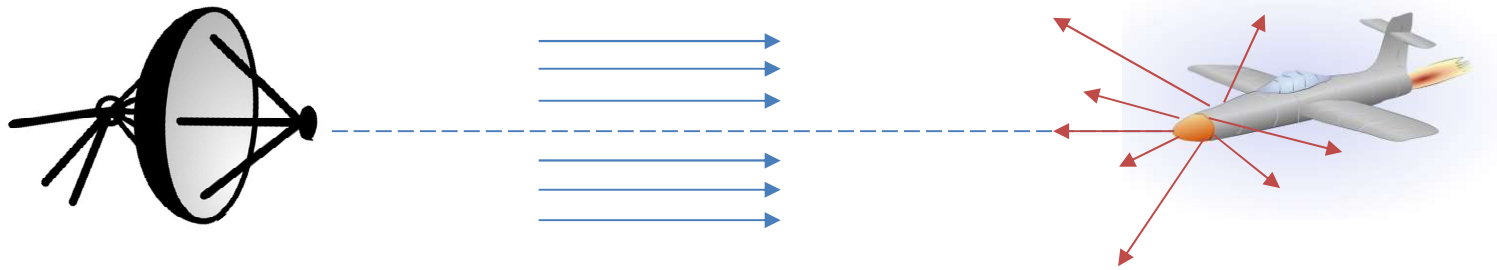
<https://en.wikipedia.org/wiki/Radar>

Frequências e aplicações (2)

Band name	Frequency range	Wavelength range	Notes
K _u	12–18 GHz	1.67–2.5 cm	High-resolution, also used for satellite transponders , frequency under K band (hence 'u')
K	18–24 GHz	1.11–1.67 cm	From German <i>kurz</i> , meaning 'short'; limited use due to absorption by water vapour, so K _u and K _a were used instead for surveillance. K-band is used for detecting clouds by meteorologists, and by police for detecting speeding motorists. K-band radar guns operate at 24.150 ± 0.100 GHz.
K _a	24–40 GHz	0.75–1.11 cm	Mapping, short range, airport surveillance ; frequency just above K band (hence 'a') Photo radar, used to trigger cameras which take pictures of license plates of cars running red lights, operates at 34.300 ± 0.100 GHz.
mm	40–300 GHz	1.0–7.5 mm	Millimeter band, subdivided as below. The frequency ranges depend on waveguide size. Multiple letters are assigned to these bands by different groups. These are from Baytron, a now defunct company that made test equipment.
V	40–75 GHz	4.0–7.5 mm	Very strongly absorbed by atmospheric oxygen, which resonates at 60 GHz.
W	75–110 GHz	2.7–4.0 mm	Used as a visual sensor for experimental autonomous vehicles, high-resolution meteorological observation, and imaging.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Radar>

Radar cross section (RCS)-1



Radar cross section (RCS)-2

- ✓ Medida da habilidade do alvo em refletir a onda eletromagnética para o receptor
 - Medida de quão detectável por radar é um alvo
 - Quanto maior o RCS, mais fácil de ser detectável
- ✓ Medida da relação entre a potência por unidade de ângulo sólido da onda refletida na direção do receptor do radar e a densidade de potência interceptada pelo alvo
- ✓ A RCS pode ser entendida como a comparação da potência da onda refletida pelo alvo com a potência da onda refletida por uma esfera sem rugosidade de seção transversal 1 m^2

Radar cross section (RCS)-3

- ✓ Refletividade: porcentagem da potência irradiada (espalhada) de volta pelo alvo
- ✓ Diretividade: relação entre a potência refletida na direção do radar e a potência que seria refletida (espalhada) uniformemente em todas as direções (isotropicamente)

$$RCS \equiv \sigma = (\text{seção transversal}) \times (\text{refletividade}) \times (\text{diretividade})$$

Radar cross section (RCS)-4

$RCS \equiv \sigma = (\text{seção transversal}) \times (\text{refletividade}) \times (\text{diretividade})$

P_{Di} : densidade de potência da onda incidente sobre um alvo distante R do radar

P_{Dr} : densidade de potência da onda refletida (espalhada) pelo alvo e recebida no receptor do radar

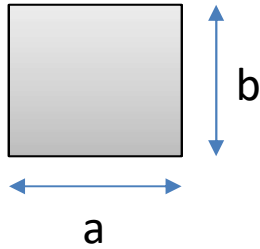
P_r : potência refletida pelo alvo

$$P_r = \sigma P_{Di} \quad \text{W}$$

$$P_{Dr} = \frac{P_r}{4\pi R^2} \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\sigma = 4\pi R^2 \left(\frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \quad \text{m}^2$$

RCS de placa e esfera



Placa plana

$$\sigma = \frac{4\pi(ab)^2}{\lambda^2} \text{ m}^2$$

Esfera ($\lambda \ll \text{range}$ e $\lambda \ll r$)

$$\sigma = \pi r^2 \text{ m}^2$$

Exemplo 1

placa pequena: $a = 0,093 \text{ m}$; $b = 0,093 \text{ m}$

$f = 1 \text{ GHz}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\lambda = 0,3 \text{ m}$; $\sigma \cong 0,010 \text{ m}^2$

$f = 10 \text{ GHz}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\lambda = 0,03 \text{ m}$; $\sigma \cong 1 \text{ m}^2$

Exemplo 2

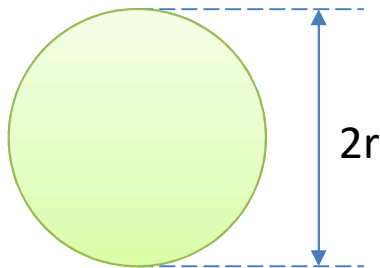
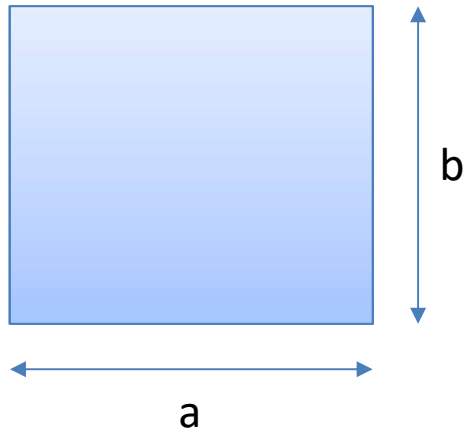
placa: $a = 1,0 \text{ m}$; $b = 1,0 \text{ m}$

$f = 1 \text{ GHz}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\lambda = 0,3 \text{ m}$; $\sigma \cong 140 \text{ m}^2$

$f = 10 \text{ GHz}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\lambda = 0,03 \text{ m}$; $\sigma \cong 13.962 \text{ m}^2$

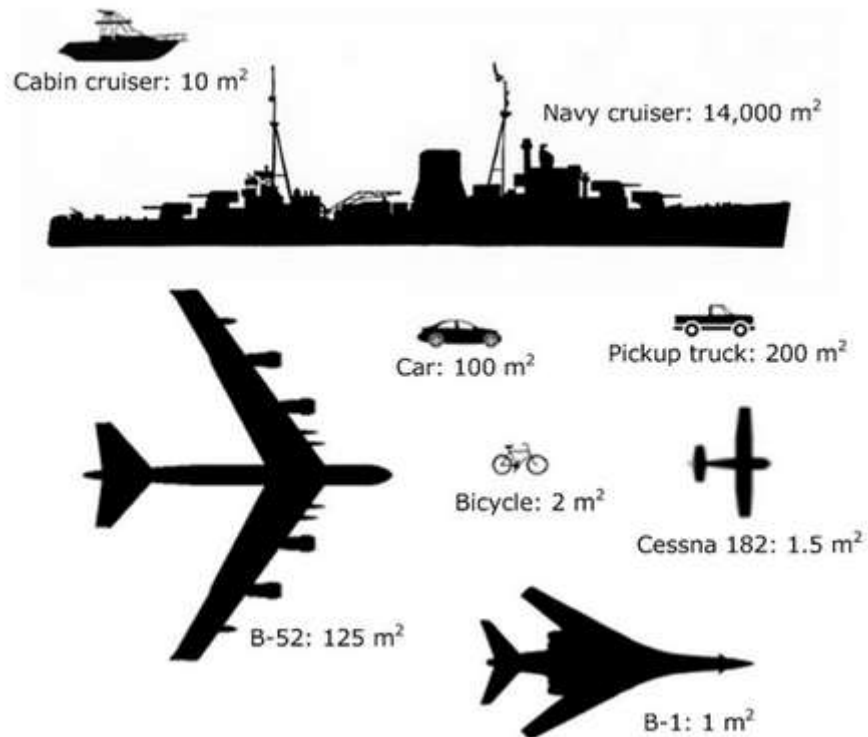
Exemplo 3

esfera: $r = D / 2 = 1,13 / 2 \text{ m}$; $\sigma \cong 1 \text{ m}^2$



RCS: exemplos (1)

$RCS \equiv \sigma = (\text{seção transversal}) \times (\text{refletividade}) \times (\text{diretividade})$



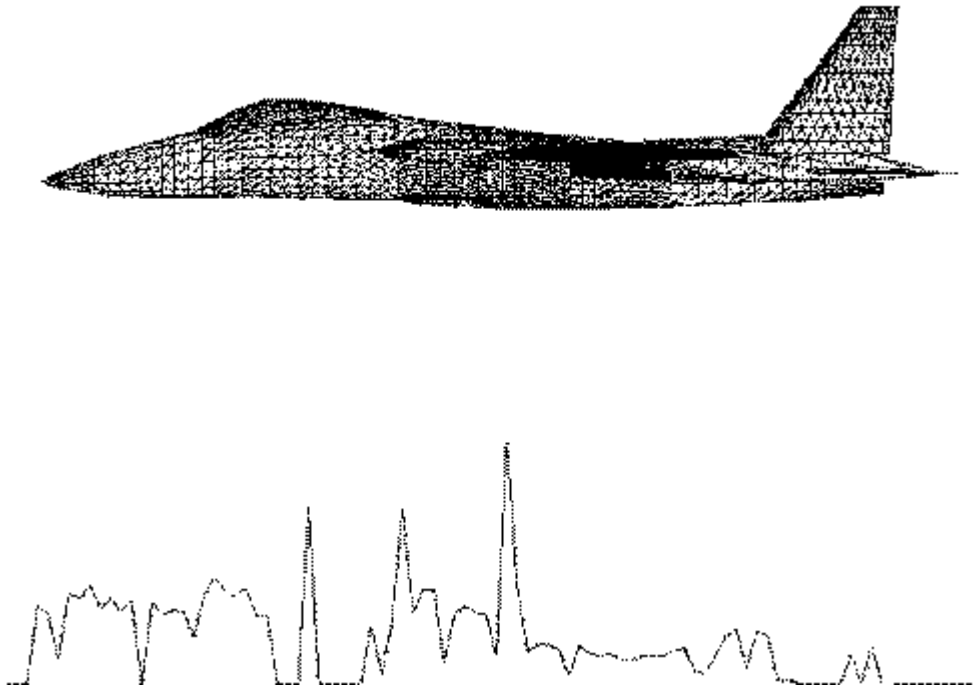
www.thehowlandcompany.com/radar_stealth/Bluefire.htm; www.tscm.com/rcs.pdf (excelente texto)
http://en.wikipedia.org/wiki/Radar_cross-section

RCS: exemplos (2)

Tipo (radar micro-ondas)	RCS (m ²)
inseto	0,00001
pássaro	0,01
Stealth	<0,1
Míssil terra-ar	≈0,1
peessoa	1
Aeronave de combate (pequena)	2 a 3
Aeronave de combate (grande)	5 a 6
Aeronave de carga	Até 100
Contêiner (transporte navio)	10 mil a 80 mil

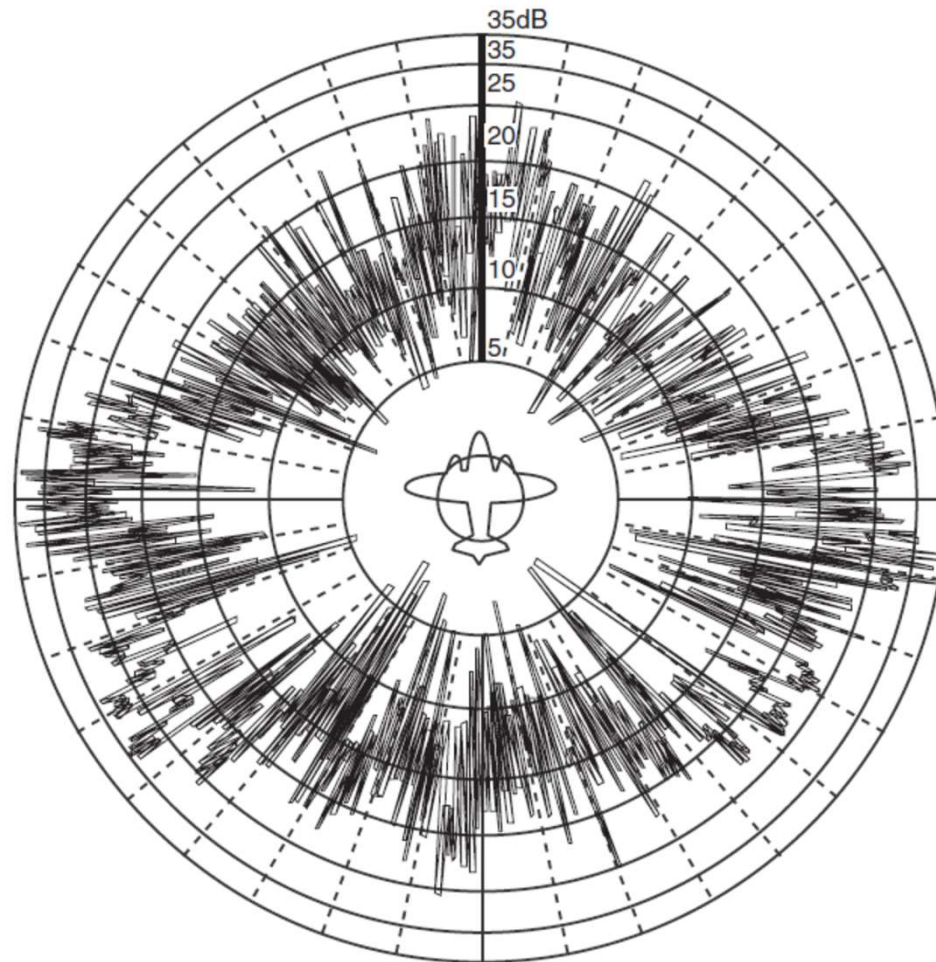
https://en.wikipedia.org/wiki/Radar_cross-section

RCS do Boeing F-15 *Eagle* (animação)



www.aereo.jor.br/2010/02/01/um-pouco-sobre-secao-reta-radar-rCS-e-tecnologia-stealth/

RCS de aeronave na banda-S, $\lambda=10$ cm



Philippe Lacomme, Jean-Philippe Hardange, Jean-Claude Marchais e Eric Normant.
Air and Spaceborne Radar Systems: An Introduction, Elsevier, cap. 3, p. 29.

Densidade de potência radiada

Densidade de potência radiada por fonte isotrópica

$$S = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad \text{W/m}^2$$

P_t : potência radiada (transmitida)
 R : distância do transmissor ao alvo

Densidade de potência radiada por antena diretiva

$$S = \frac{G_t P_t}{4\pi R^2} \quad \text{W/m}^2$$

G_t : ganho da antena ao longo da direção do alvo

Sinal emitido é refletido (eco) e retorna ao radar

Potência recebida pelo radar

Densidade de potência do sinal refletido pelo alvo e recebido pelo radar

$$S_r = \left(\frac{G_t P_t}{4\pi R^2} \sigma \right) \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

σ : seção transversal do alvo; área que reflete o sinal, m^2

Potência que incide sobre o alvo

$$\frac{G_t P_t}{4\pi R^2} \sigma \text{ W}$$

Potência recebida pela antena do radar proveniente da reflexão no alvo

$$P_r = \frac{G_t P_t \sigma A_e}{(4\pi R^2)^2} \text{ W}$$

A_e : área efetiva da antena, m^2

Distância radar-alvo (range) e equação do radar

Potência recebida pelo radar depois da reflexão no alvo

$$P_R = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi R^2)^2} \text{ W}$$

Resolvendo para R ; distância entre o alvo e radar (range)

$$R_{a-r} = \left[\frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi)^2 P_R} \right]^{1/4} \text{ m}$$

A distância máxima ocorre para $P_{R,\min}$, mínima potência de sinal

Equação do radar

$$R_{a-r,\max} = \left[\frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi)^2 P_{R,\min}} \right]^{1/4} \text{ m}$$

Resumo: equações

$$R_{a-r,\max} = \left[\frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi)^2 P_{R,\min}} \right]^{1/4} \quad \text{m; distância máxima}$$

$$P_t = \frac{(4\pi)^2 R_{a-r,\max}^4 P_{R,\min}}{G_t \sigma A_e} \quad \text{W; potência transmitida}$$

$$P_{R,\min} = \frac{G_t \sigma A_e P_t}{(4\pi)^2 R_{a-r,\max}^4} \quad \text{W; potência mínima recebida}$$

$$G_t = \frac{(4\pi)^2 R_{a-r,\max}^4 P_{R,\min}}{\sigma A_e P_t}; \quad \text{ganho da antena transmissora}$$

$$\sigma = \frac{(4\pi)^2 R_{a-r,\max}^4 P_{R,\min}}{A_e G_t P_t} \quad \text{m}^2; \quad \text{área efetiva do alvo}$$

Referências

- ✓ Radar Tutorial: textos concisos e bem escritos
 - <http://www.radartutorial.eu/index.en.html>
- ✓ Keysigt EEsof EDA. How to Understand 5G: Beamforming
 - <https://www.youtube.com/watch?v=jH6eov3h1NM>