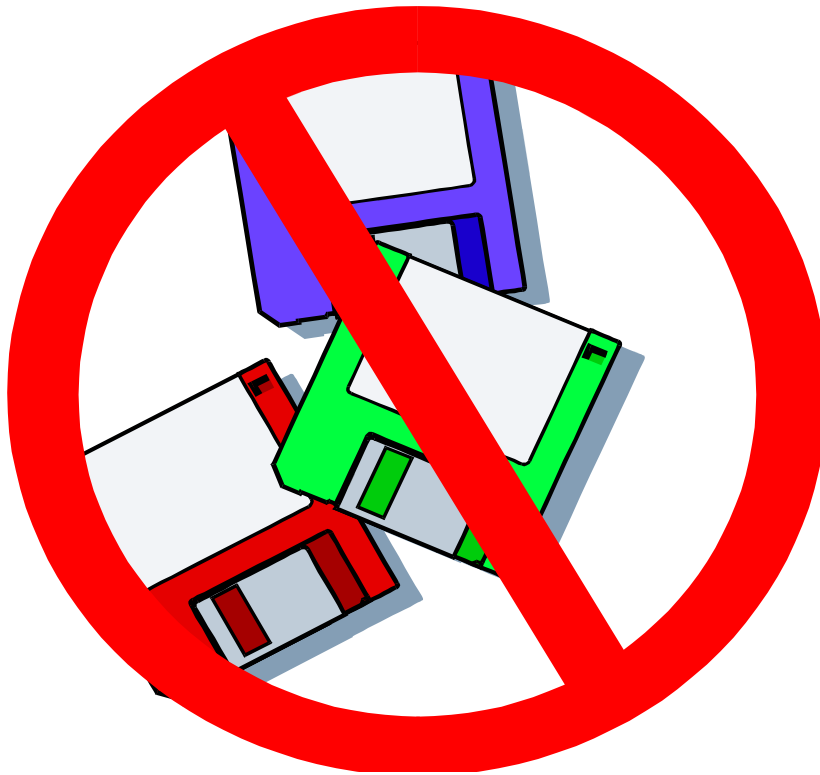


RADAR
Radio Detection And Ranging
P2

SEL 413 Telecomunicações

Amílcar Careli César
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

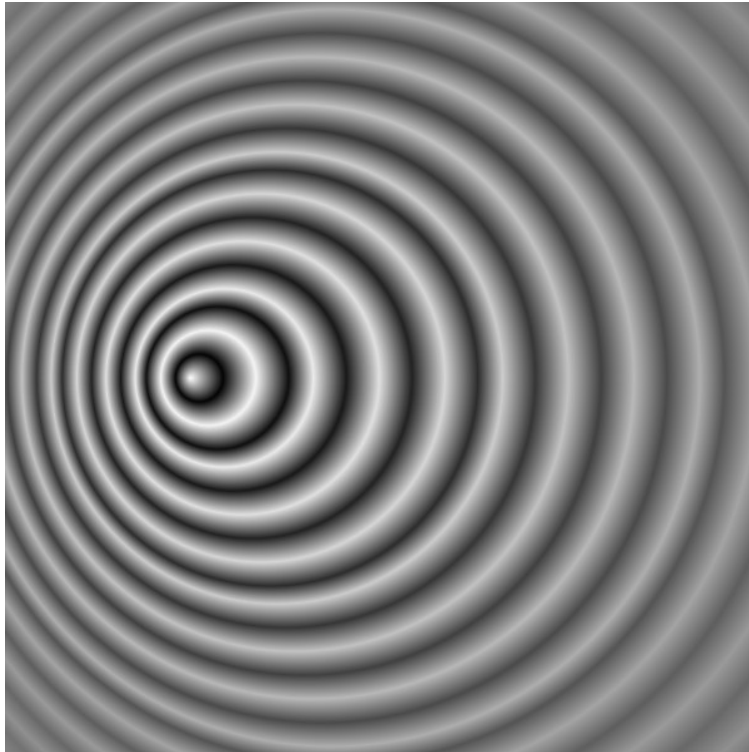
Atenção!



- ✓ 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.



Efeito Doppler-1



Fonte de ondas se deslocando para a esquerda.
A frequência é maior à esquerda.



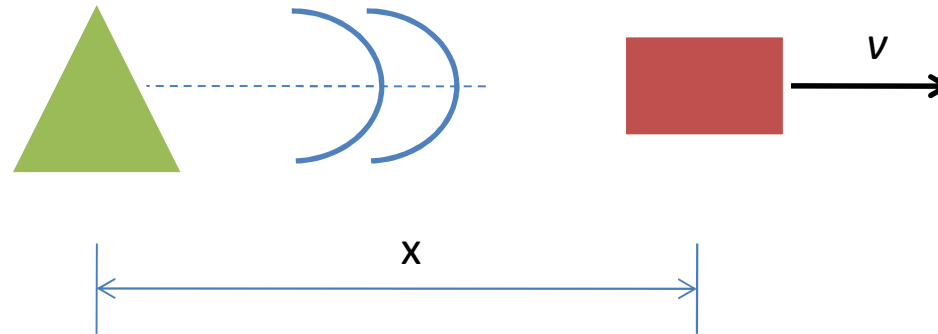
Christian Andreas Doppler

Nascido em	29 novembro de 1803 Salzburg, Áustria
Falecimento em	17 março de 1853 (49 anos) Veneza, Itália
Instituições	Prague Polytechnic University of Vienna
Conhecido pelo	Efeito Doppler

Efeito Doppler-2

Transmissor fixo

Receptor em movimento



$$v_o : \begin{cases} + : \text{observador aproxima-se da fonte} \\ - : \text{observador afasta-se da fonte} \end{cases}$$
$$v_f : \begin{cases} - : \text{fonte aproxima-se do observador} \\ + : \text{fonte afasta-se da do observador} \end{cases}$$

$$v_o = 0 \text{ observador parado}$$

$$v_f = 0 \text{ fonte parada}$$

Efeito Doppler-2

$$f_a = f \left(\frac{v + v_0}{v - v_f} \right)$$

$$f_a = f \left(\frac{v - v_0}{v + v_f} \right)$$

$$f_a = f \left(\frac{v - v_0}{v - v_f} \right)$$

$$f_a = f \left(\frac{v + v_0}{v + v_f} \right)$$



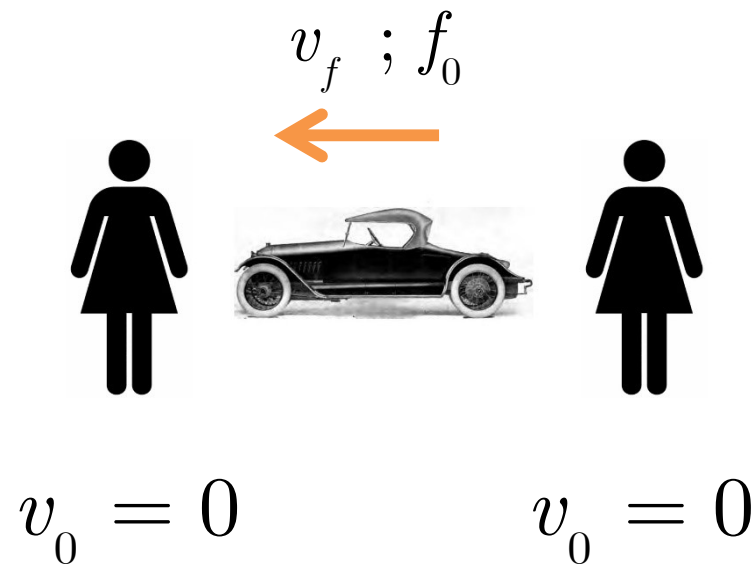
f_a : frequência aparente; f : frequência da fonte

$v = 330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$: velocidade do som no ar

v_0 : velocidade do observador

v_f : velocidade da fonte

Efeito Doppler-3



$$f_a = f \left(\frac{v}{v - v_f} \right)$$

$$f_a = f \left(\frac{v}{v + v_f} \right)$$

$v_f = 0$
 f_0
 v_0

$$f_a = f \left(\frac{v + v_0}{v} \right)$$

$v_f = 0$
 f_0
 v_0

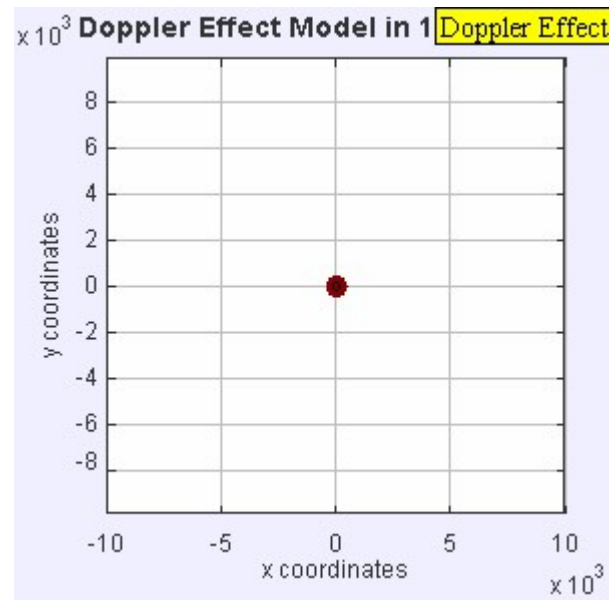
$$f_a = f \left(\frac{v - v_0}{v} \right)$$

f_a : frequência aparente; f : frequência da fonte

$v = 330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$: velocidade do som no ar

v_0 : velocidade do observador; v_f : velocidade da fonte

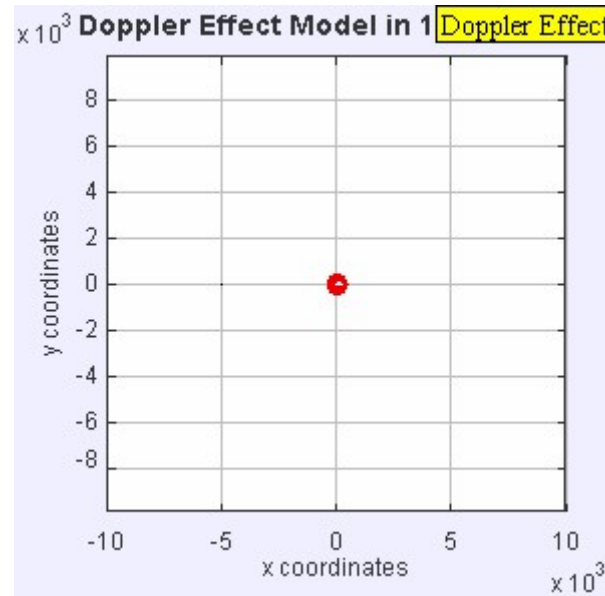
Efeito Doppler-3



Fonte estacionária. Frequência constante. Distância entre frentes de onda é o comprimento de onda. Velocidade de propagação $c = 330 \text{ m/s}$. Todos os observadores ouvem a mesma frequência.

By Lookang many thanks to Fu-Kwun Hwang and author of Easy Java Simulation = Francisco Esquembre - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16444997>. https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect

Efeito Doppler-4



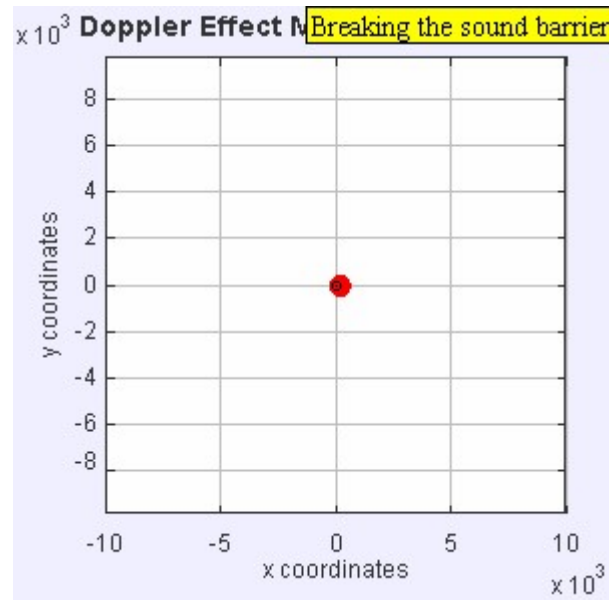
Velocidade de deslocamento da fonte: $v_s = 0,7c$.

Observador à frente da fonte ouve, $f = \frac{(c+0)}{(c-0,7c)} = 3,3f_0$.

Observador atrás da fonte ouve $f = \frac{(c-0)}{(c+0,7c)} = 0,59f_0$.

By Lookang many thanks to Fu-Kwun Hwang and author of Easy Java Simulation = Francisco Esquembre - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16444997>. https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect

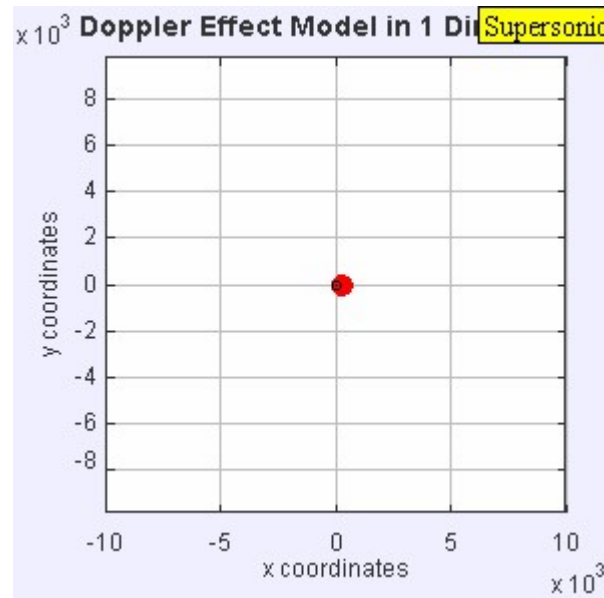
Efeito Doppler-5



Velocidade de deslocamento da fonte: $v_s = c$. As frentes de onda na frente da fonte agora estão agrupadas no mesmo ponto. Observador à frente da fonte ouve somente quando a fonte chega. Observador atrás da fonte ouve $f = \frac{(c-0)}{(c+c)} = 0,5f_0$.

By Lookang many thanks to Fu-Kwun Hwang and author of Easy Java Simulation = Francisco Esquembre - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16444997>. https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect

Efeito Doppler-6



Velocidade de deslocamento da fonte: $v_s = 1,4c$. A fonte move-se mais rapidamente do que as ondas sonoras que cria. A fonte sonora passará por um observador parado antes que ele ouça o som. Observador à frente da fonte ouve somente quando a fonte chega até ele. Observador atrás da fonte “ouve” $f = \frac{(c+0)}{(c-1,4c)} = -2,5f_0$. Observador atrás da fonte ouve $f = \frac{(c-0)}{(c+1,4c)} = 0,42f_0$.

By Lookang many thanks to Fu-Kwun Hwang and author of Easy Java Simulation = Francisco Esquembre - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16444997>. https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect

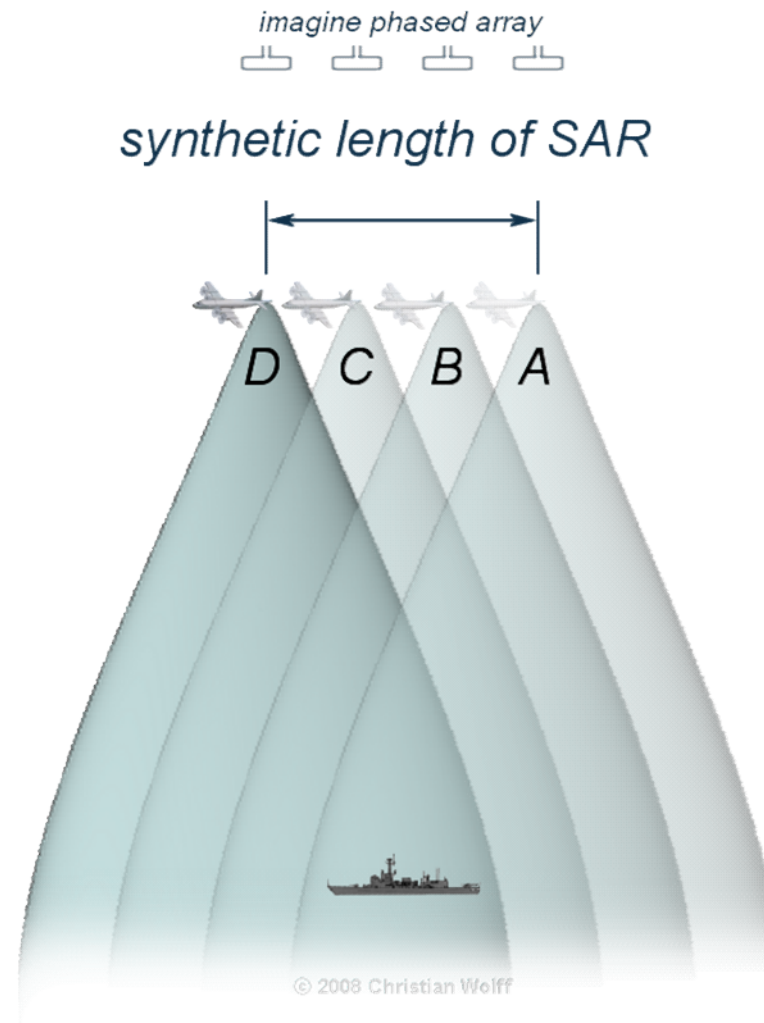
Efeito Doppler na faixa óptica



Doppler effect in light waves <https://www.youtube.com/watch?v=vDvIhiCnatE>

Synthetic aperture radar (SAR)

- ✓ Radar de abertura sintética (artificial)

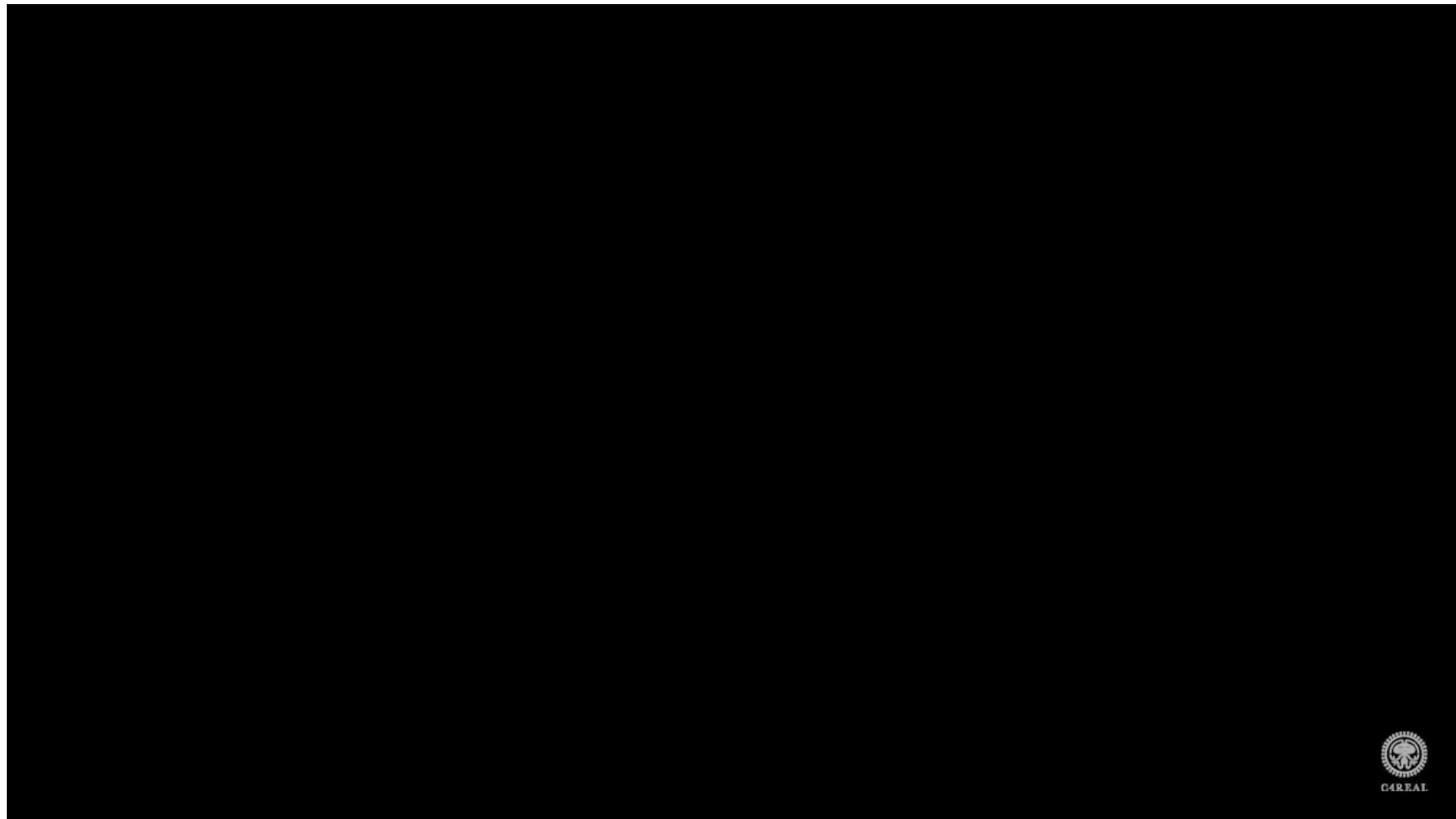


SAR: funcionamento básico

Didn't you always wonder...

<https://www.youtube.com/watch?v=g-YICKbcC-A>

SAR: exemplo

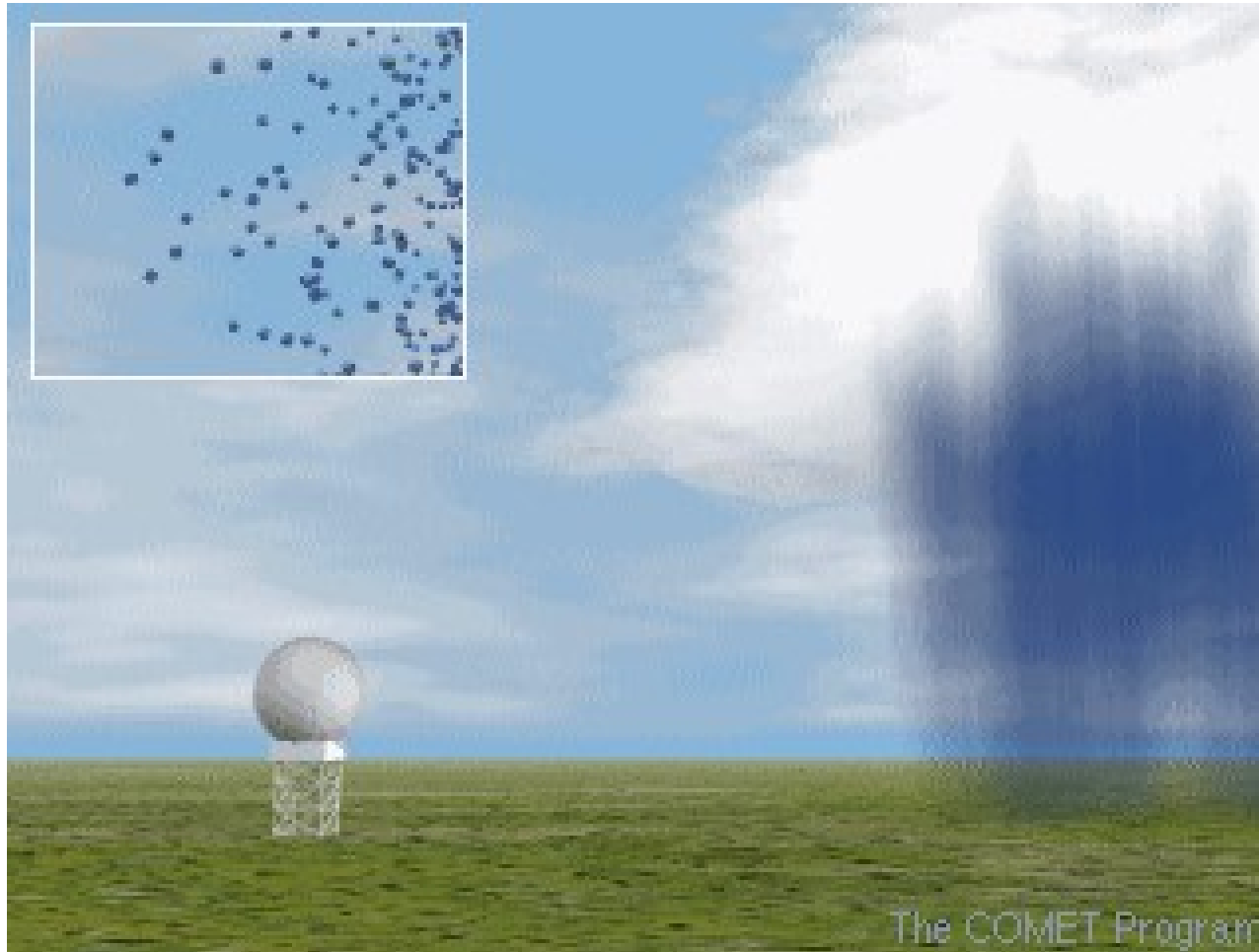


AESA radar technology animation: Thales Raytheon Systems <https://www.youtube.com/watch?v=3LeKxA9YLsA>

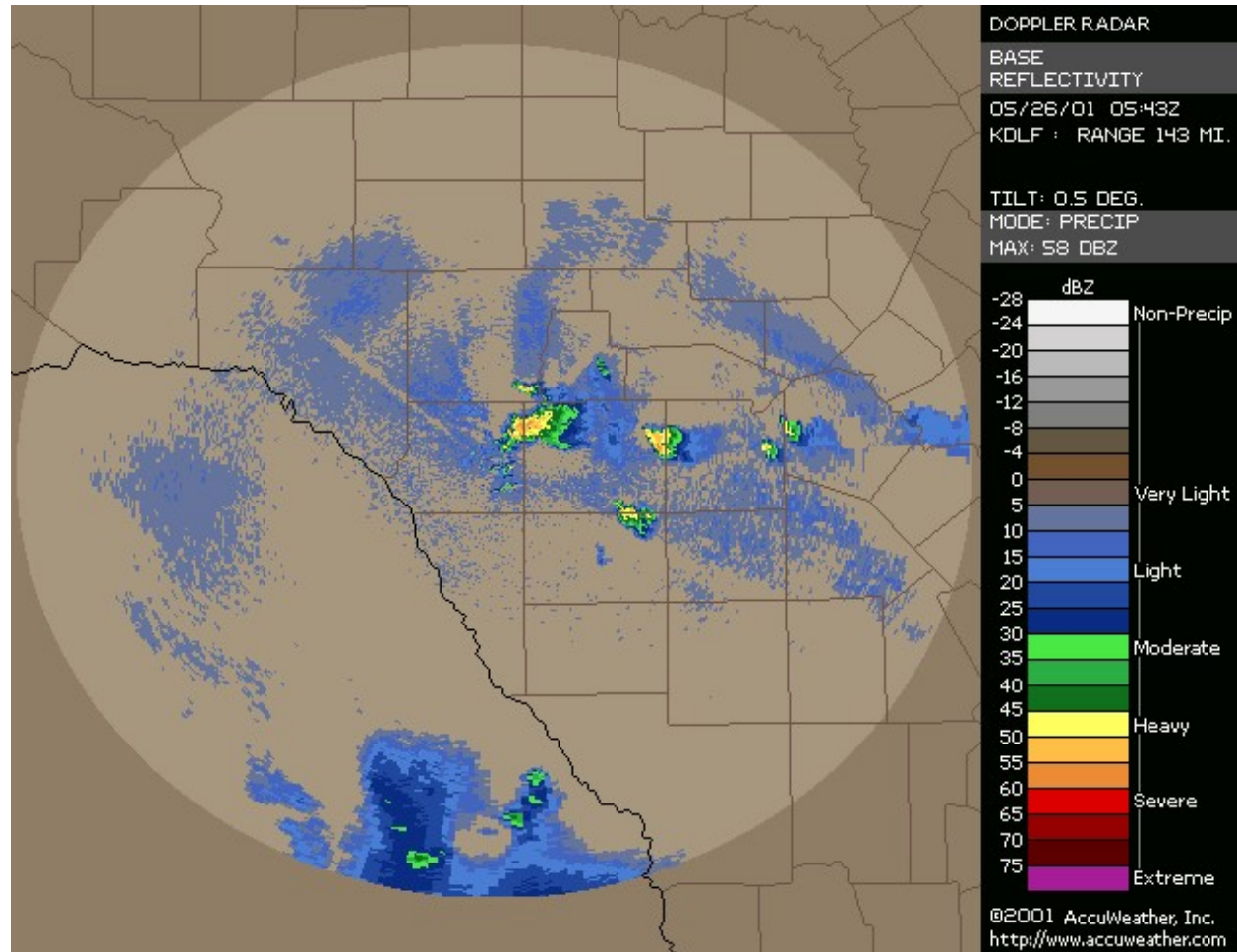
Radar meteorológico em aeronave

- ✓ Banda de operação
 - C: 4 a 8 GHz (5,4 GHz)
 - X: 8 a 12 GHz (9,3 GHz)
- ✓ Detecta:
 - Chuva
 - Granizo úmido e turbulência úmida
- ✓ Não detecta:
 - Nuvens, nevoeiro ou vento (gotas são muito pequenas, ou em ausência de precipitação)
 - Tempestades de areia (partículas sólidas são quase transparentes ao feixe de radar)
 - Relâmpago

Radar meteorológico-1



Radar meteorológico-2



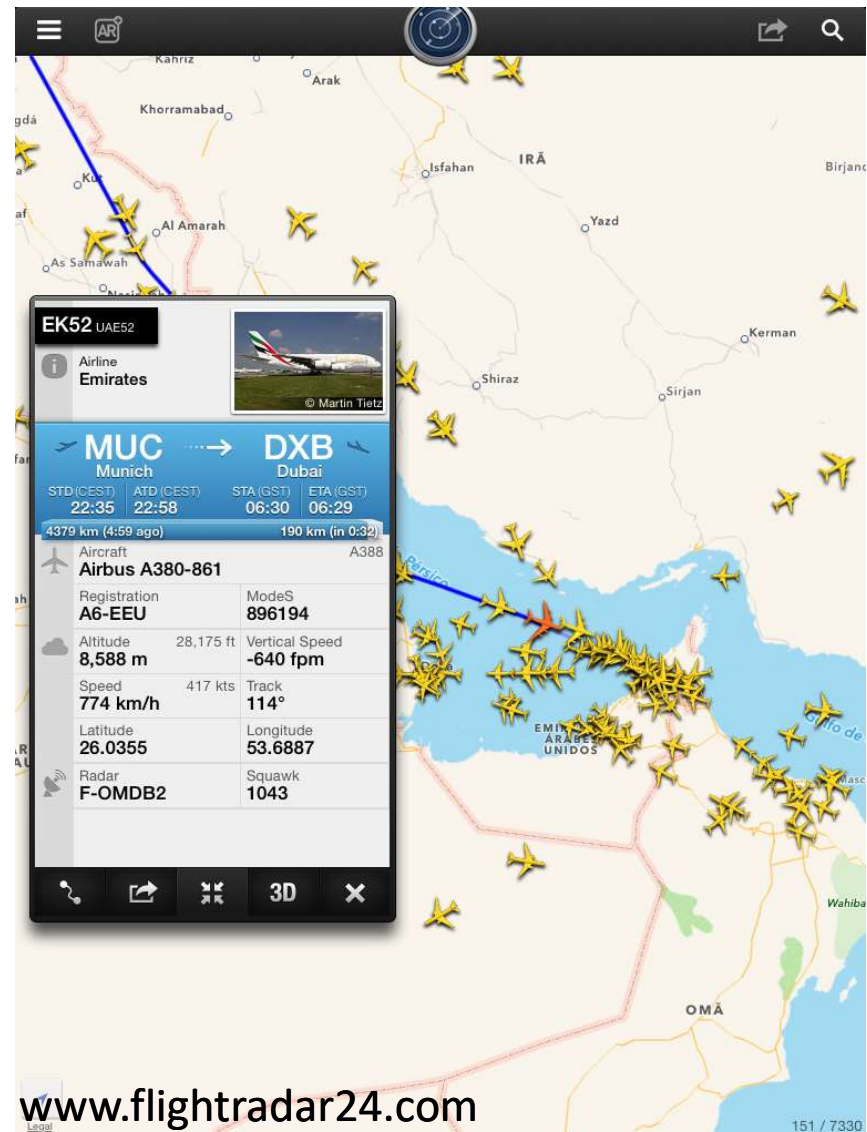
Automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B)

- ✓ Localização via GPS
- ✓ Transponder ADS-B nas aeronaves transmitem a localização (e outras informações)
- ✓ Atualmente, 60% das aeronaves de passageiros são equipadas com ADS-B
- ✓ 2 frequências: 1090 MHz e 978 MHz
- ✓ Cobertura dos receptores: 250 a 400 km



Ref.: www.flightradar24.com ; www.flightradar24.com/how-it-works
http://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_dependent_surveillance-broadcast

ADS-B: Exemplo

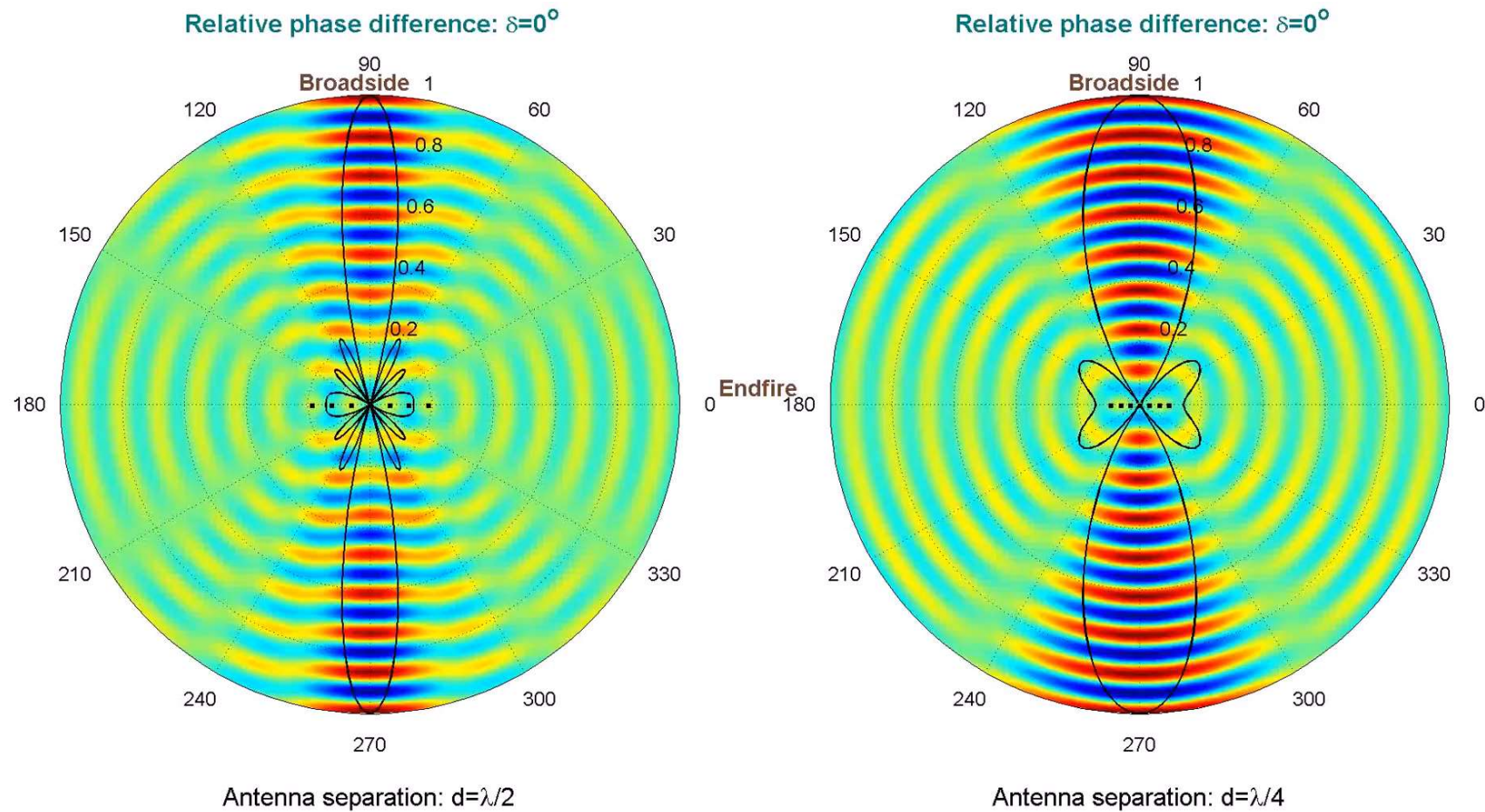


Referências

- ✓ 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>

EXTRAS

Phased Array Antenna (1)



Phased Array Antenna Beam Steering Animation (Beamforming)

<https://www.youtube.com/watch?v=VBFsisCjpBk>

Phased Array Antenna (2)

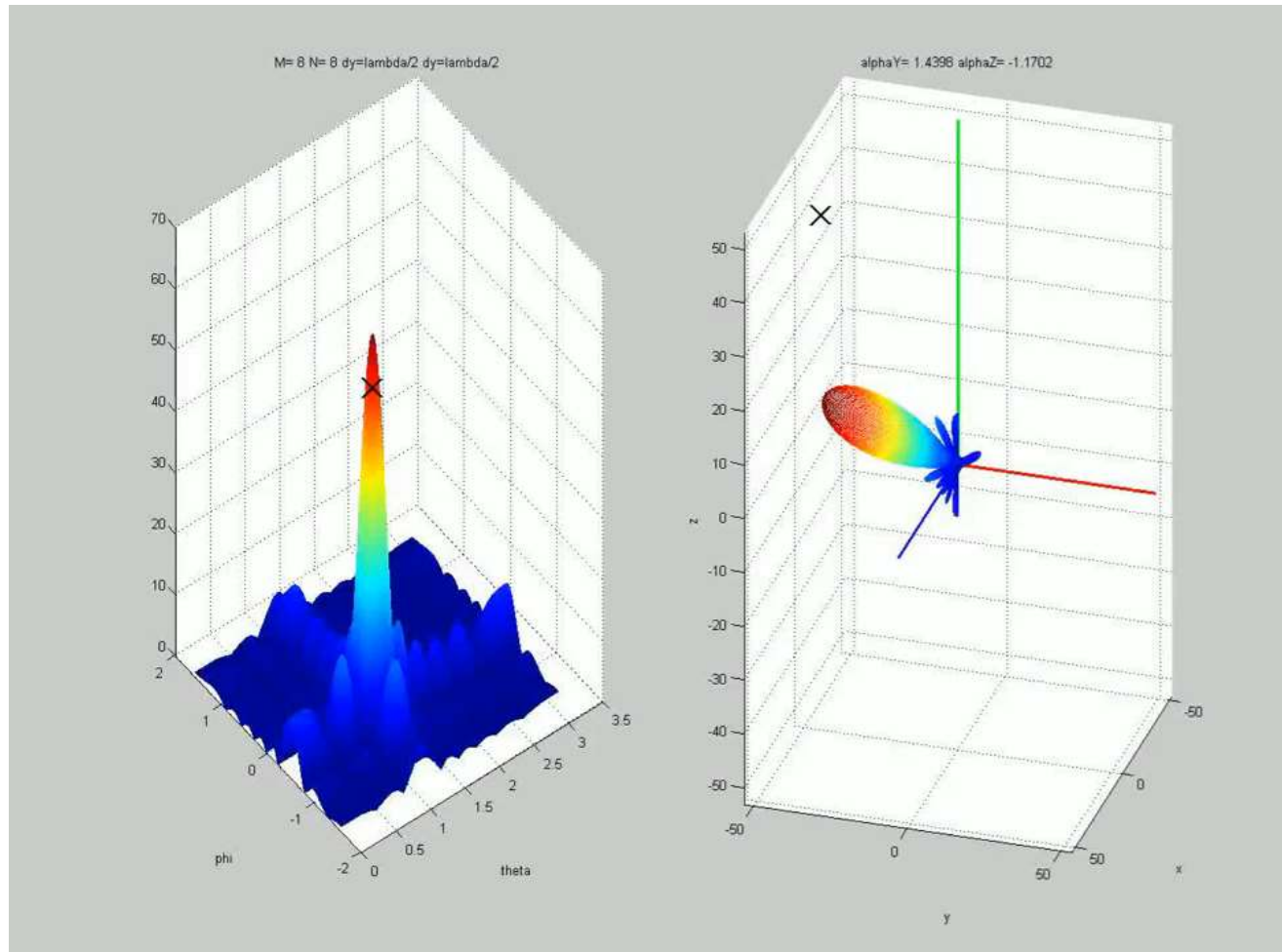


Phased Array Animation <https://www.youtube.com/watch?v=veiFTXrMvvg>

Beamforming

What is beamforming? <https://www.youtube.com/watch?v=uXXYepHKtTs>

Rastreamento com phased array



Tracking with Beam Steering. Phased Array Antenna <https://www.youtube.com/watch?v=emuQ20ekF00>

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

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

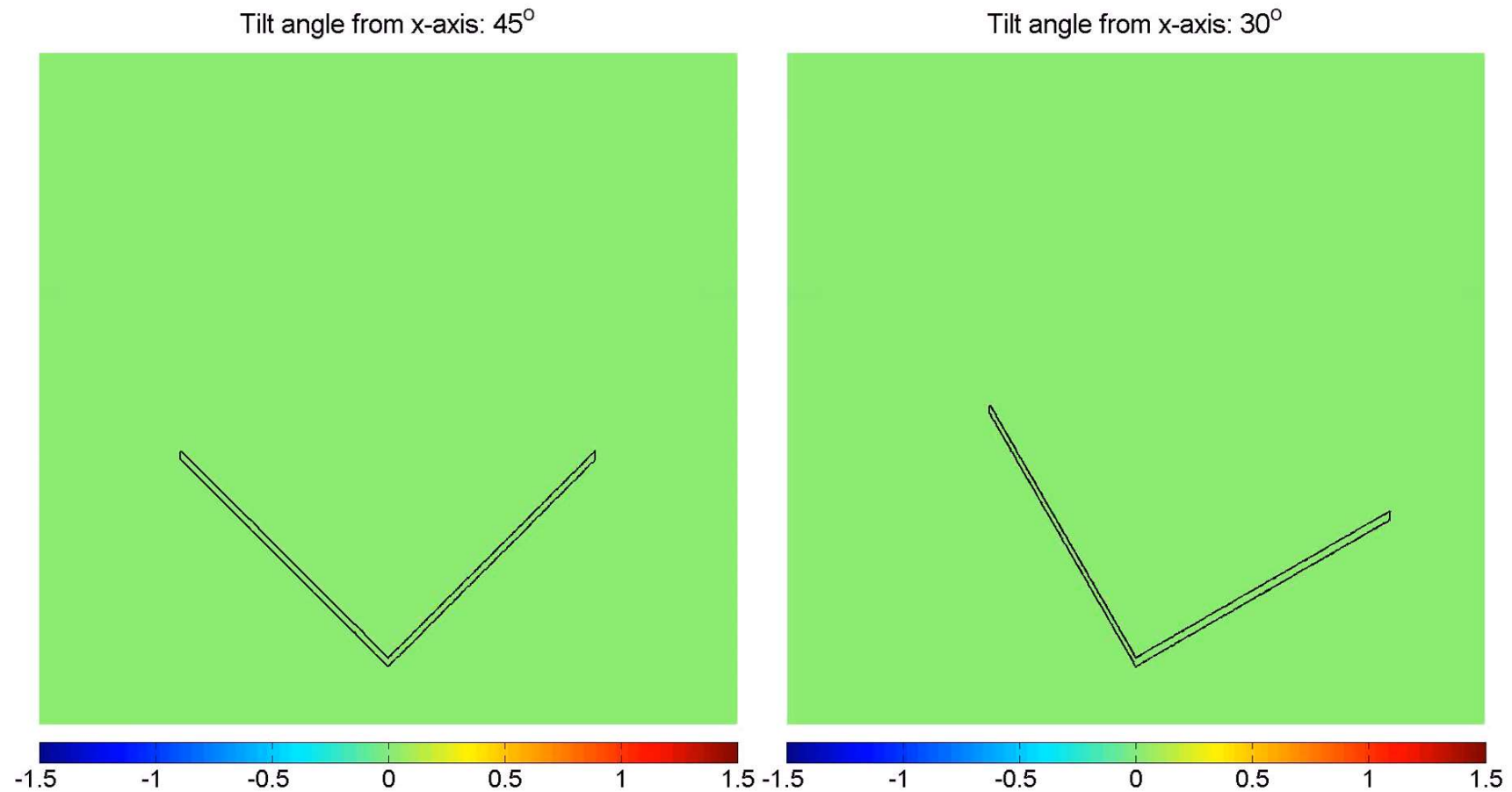
$$P_{Dr} = \frac{P_r}{4\pi R^2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

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

em condição de campo distante ($R \rightarrow \infty$), onda plana

$$\sigma = 4\pi R^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \left(\frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \text{ m}^2 \text{ ou } \sigma = 4\pi R^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \left(\frac{E_{\text{espalhado}}}{P_{\text{incidente}}} \right) \text{ m}^2$$

Refletor de canto



Corner Reflector / Retroreflector

<https://www.youtube.com/watch?v=WRGfYqqjXDo&index=8&list=PL38214462962EB8A0>