



PRINCÍPIOS DE RADAR

# ***PRINCÍPIOS DO RADAR***

***OSWALDO MASSAMBANI, Ph.D.***

Professor Titular

Departamento de Ciências Atmosféricas

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

Universidade de São Paulo

São Paulo – Brasil

**Texto básico para a disciplina Meteorologia com Radar**

Departamento de Ciências Atmosféricas

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas- IAG-USP

Universidade de São Paulo



PRINCÍPIOS DE RADAR

# ÍNDICE

- ▣ **Uma visão geral histórica**
- ▣ **Sistemas de radar**
  - sensoriamento remoto - unidades de radar
- ▣ **Parâmetros do radar**
  - diagrama de bloco, antena, comprimento do pulso, espectro EM, PRF
- ▣ **Propagação do feixe**
  - propagação EM – índice de refração – lei de Snell, equação do caminho do raio - curvatura do caminho do raio - equação alvo-altitude – refração não padrão
- ▣ **Estratégias de varredura**
  - estratégia da coleta de dados de radar
- ▣ **A equação do radar**
  - distribuição tamanho-gota - taxa de precipitação - refletividade
- ▣ **Sinal Mínimo Detectável**
- ▣ **Conversão ZR**
- ▣ **Atenuação**
- ▣ **Velocidade radial**
  - Efeito Doppler – velocidade radial vs. velocidade real – resolução aimute
- ▣ **Ambigüidade velocidade-alcance**
  - $R_{max} \times PRF - V_{max} \times PRF$  – dilema Doppler
- ▣ **Efeitos no Espectro Doppler**
  - largura espectral – Inphase/Quadrature
- ▣ **Técnicas de rejeição do clutter de superfície**
- ▣ **Radar de dupla polarização**
- ▣ **Radar de dupla frequência**
- ▣ **Alvos de ar limpo**
  - experimento com insetos - turbulência
- ▣ **Controle de qualidade da refletividade do radar – dados de precipitação**
- ▣ **Radares no espaço**



PRINCÍPIOS DE RADAR

# UMA VISÃO GERAL HISTÓRICA

Nem um único estado nem uma única pessoa é capaz de dizer, que é o inventor do método de radar.

O radar é um resultado de uma acumulação de resultados de muitos desenvolvimentos e melhorias, das quais muitos cientistas de diversas nações compartilharam.

Existem muitos marcos com a descoberta de um conhecimento básico importante e invenções importantes.

Os interesses da guerra e o desenvolvimento geral das forças aéreas são os principais atores na construção da tecnologia por radar, principalmente durante a segunda Guerra Mundial.

Após a segunda Guerra Mundial o método de radar é usado para fins pacíficos.



PRINCÍPIOS DE RADAR

- 1865** - O físico inglês James Clerk **Maxwell** desenvolveu a teoria da luz eletromagnética (descrição das ondas eletromagnéticas e sua propagação)
- 1886** - O físico alemão Heinrich Rudolf **Hertz** descobre as ondas eletromagnéticas e prova a teoria de **Maxwell**.
- 1904** - O técnico alemão Christian Hülsmeier inventa o "**Telemobiloskop**" para a supervisão do tráfego na água. Ele mede o tempo de viagem até um objeto de metal (navio) e sua volta. Um cálculo da distância pode ser feita. Este é o primeiro teste prático de radar. Hülsmeier **patenteou** sua invenção.
- 1921** - A invenção do **Magnetron** como um tubo transmissor eficiente por Albert Wallace Hull
- 1922** - A. H. Taylor e L.C.Young do Laboratório Naval de Pesquisa (USA) localizaram um navio de madeira pela primeira vez.
- 1930** - L. A. Hyland (também do Laboratório Naval de Pesquisa), localizou um avião pela primeira vez.
- 1931** - Um navio é equipado com radar. Pratos parabólicos como antenas e radiadores de buzina eram usados
- 1936** - O desenvolvimento do Klystron por Metcalf e Hahn. Este será um componente importante nas unidades de radar como amplificador ou um tubo oscilador.
- 1940** - Diferentes equipamentos de radar são desenvolvidos nos EUA, Rússia, Alemanha, França e Japão.



PRINCÍPIOS DE RADAR

- 1941** - Meteorologia por Radar no laboratório de Radiação – MIT
- 1942** - Os antigos B-18s carregavam o primeiro radar operacional de microonda, banda S SCR-517.
- 1944** - Treinamento de Radar dos Army Air Corps Weather Officers
- 1944** - Stormy Weather Group em Meteorologia por Radar na Universidade de McGill
- 1946** - Pesquisa e desenvolvimento pós-guerra – Radar de tempo, Signal Corps Laboratories.
- 1946** - Projeto de Pesquisa de Radar do Tempo no Departamento de Meteorologia do MIT
- 1950** - Radar de tempo no ramo Meteorológico, Divisão Meteorológica e Laboratório de Ciências Atmosféricas, Fort Monmouth EUA
- 1954** - Primeiro radar de tempo Japonês de banda X construído por JRC
- 1954** - Estabelecimento da Rede de Radares Meteorológicos na Índia
- 1958** - Radares de tempo britânicos instalados em Shanghai and Beijing.
- 1964** - Meteorologia por Radar no Laboratório Nacional de Tempestades Severas
- 1977** - Primeira pesquisa em Radar Meteorológico em São Paulo – Brasil



PRINCÍPIOS DE RADAR

# SISTEMAS DE RADAR



PRINCÍPIOS DE RADAR

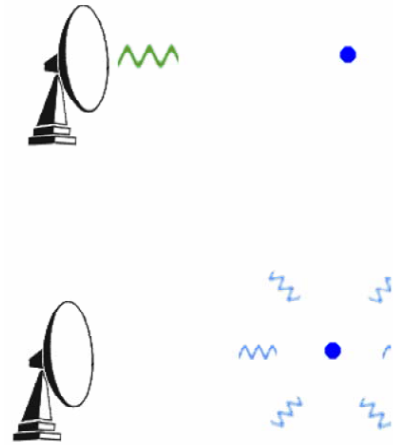
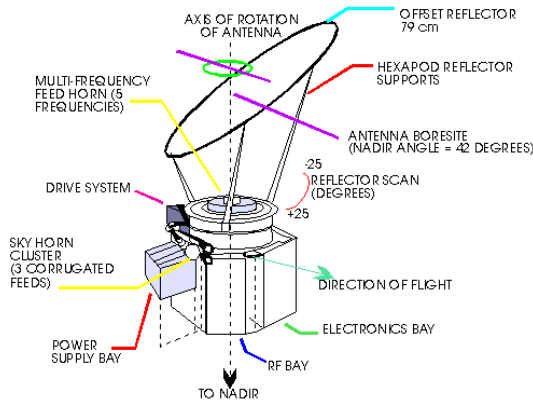
# SENSORIAMENTO REMOTO

PASSIVO

ATIVO

RADIÔMETROS

RADARES



## Radiômetro Scanner de Microonda Multicanal (RSMM)



PRINCÍPIOS DE RADAR

# RADAR

um acrônimo para

**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging  
**R**Ádio Detecção e Localização

É um dispositivo de rádio ou um sistema para detecção e localização do alvo através de ondas de rádio UHF.

A energia EM “refletida” do alvo é analisada pela parte receptora do dispositivo de tal modo que as características do alvo podem ser determinada.



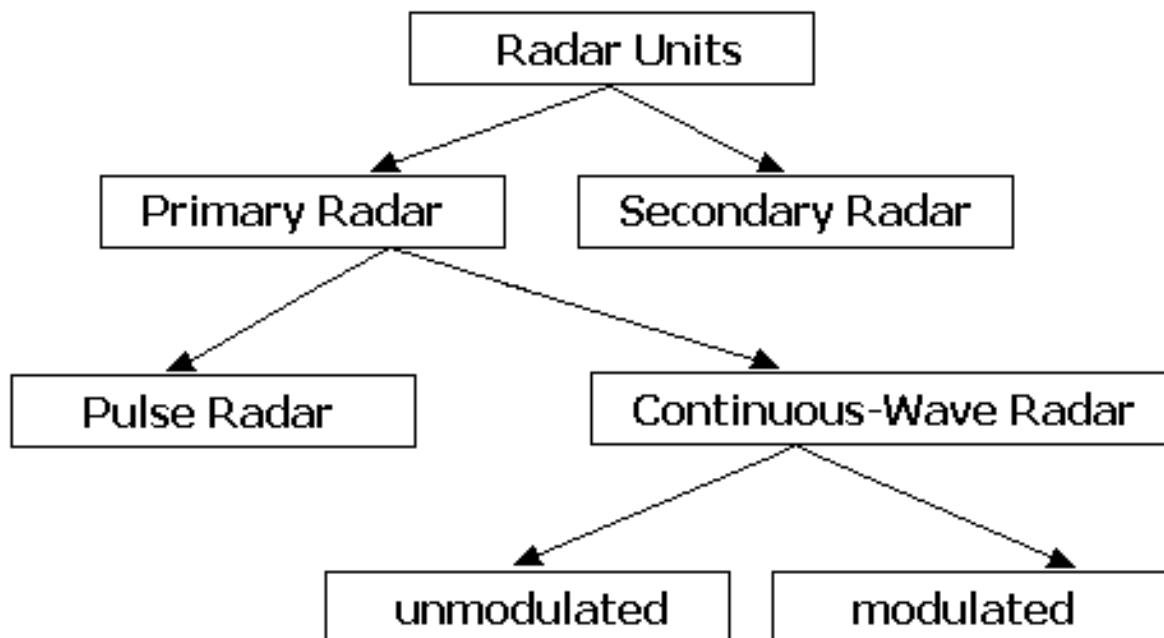


PRINCÍPIOS DE RADAR

## CLASSIFICADOS DE ACORDO COM SUA FUNÇÃO ESPECÍFICA

Dependendo da informação desejada, unidades de radar devem ter diferentes qualidades e tecnologia.

Essas diferentes qualidades e unidades de técnicas de radar são classificadas como:





PRINCÍPIOS DE RADAR

## RADAR PRIMÁRIO

Um radar primário transmite sinais de alta frequência que são refletidos pelo alvo. Os ecos produzidos são recebidos e avaliados. Isto significa, diferentemente de unidades de radar secundário, uma unidade de radar primário recebe seus próprios sinais emitidos como um eco.

## RADAR SECUNDÁRIO

Nessas unidades de radar secundário, as aeronaves devem possuir a bordo um **transponder** (**trans**mitting **responder** – transmissor de resposta) e recebe um sinal codificado da unidade de radar. Um sinal de resposta ativo e também codificado é retornado à unidade de radar a qual é gerada no transponder. A partir dessa resposta é possível obter muito mais informação, como uma unidade de radar primário faz (ex. Altitude, um código de identificação ou qualquer problema técnico a bordo como perda do contato por rádio ...).



PRINCÍPIOS DE RADAR

## RADARES DE PULSO

Radar de pulso é uma unidade primária de radar, que transmite um sinal de alta frequência **impulsivo** de alta energia.

Depois disto, há um longo intervalo de tempo antes de emitir novamente para que o eco seja recebido.

Direção, distância e se necessário a altitude do alvo pode ser determinada a partir da posição da antena e o tempo de propagação do sinal-pulso.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Radares Convencionais de Tempo (não o Doppler)

Um radar convencional de tempo pode ser definido como anteriormente, um sistema de radar de tempo que não seja Doppler usa um processamento menos eficiente de eliminação de clutter (como clutter de mapa e estatística) do que sistemas mais modernos. No entanto, ainda existem muitos sistemas de radar convencional de tempo em operação, que não são mais fabricados.

## Radares Doppler de Tempo

É um tipo de radar que mede a mudança na frequência do sinal de retorno para determinar se alvos estão se movendo em direção a estação de radar ou se afastando. Objetos que se movem tangencialmente ao radar apresentam nenhuma variação na frequência e não apresentam nenhum retorno no radar Doppler. Radares **COERENTES** fornecem a detecção da diferença de fase entre o sinal que vai e o que volta. Radares **NÃO-COERENTES** são incapazes de medir a diferença entre o pulso que vai e o que volta.

## Radares Doppler Polarimétricos de Tempo

Radares Doppler Polarimétricos de Tempo são radares Doppler de Tempo com uma função adicional de transmissão e processamento permitindo posteriormente computar a informação da direção da energia eletromagnética refletida.

Radares de tempo **Convencional, Doppler e Polarimétrico** são todos sistemas operacionais que operam na Banda-C, Banda-S ou X.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## **RADAR DE ONDAS CONTÍNUAS**

Unidades de radar OCtransmite um sinal contínuo de alta frequência.

O sinal de eco é recebido e processado permanentemente.

O receptor não precisa ser montado no mesmo local que o transmissor, de maneira alguma. Toda transmissão civil de rádio pode trabalhar como um transmissor de radar ao mesmo tempo, um receptor remoto compara os tempos de propagação do sinal direto com o refletido.

Testes são conhecidos que a localização correta de uma aeronave pode ser calculada pela avaliação dos sinais de três estações de televisão.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## **Radar de OC não-modulada**

O sinal transmitido desses equipamentos são constantes em amplitude e frequência. Esses equipamentos são geralmente usados na medição de velocidade. Distâncias não podem ser medidas. Em geral, são usados pela polícia.

## **Radar de OC modulada**

O sinal transmitido é constante na amplitude, mas modulado na frequência. O princípio da medida do tempo de propagação. A vantagem desses equipamentos é que o resultado da medida está continuamente disponível. Essas unidades de radar são usadas em todo lugar onde a medida da distância não é grande e que seu uso é necessariamente contínuo (ex. Um medidor de altitude nas aeronaves ou como em radares de tempo/perfil de vento). Um princípio similar de obtenção é usado por unidades de radar nas quais o pulso transmitido é muito longo para se conseguir uma boa resolução da distância.

## **Sets de Radar Biestático**

Um radar biestático consiste de um transmissor separado e um receptor separado por uma distância considerável.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Characteristic	Primary Surveillance Radar	Weather Radar
<b>FREQUENCY</b>	L, S-band	S,C & X-band (+L-band)
<b>DOPPLER</b>	yes	yes
<b>SCANNING</b>	Azimuth <b>or</b> Elevation	Azimuth <b>and</b> Elevation
<b>PROCESSING</b>	Complex & real-time	Very complex, not time-critical
<b>POLARISATION</b>	Linear and Circular	Dual (vertical and horizontal)
<b>PEAK POWER</b>	Various (kW - Mw)	Various (kW - Mw)
<b>PROCESSING</b>	I (inface) & Q (quadrata)	I & Q
<b>"PICTURE"UPDATE</b>	6 - 12 seconds	5 - 15 minutes
<b>CLUTTER PROCESSING</b>	Yes (but weather is clutter)	Yes (but aircraft are clutter)
<b>ANTENNA SIZE</b>	Larger (longer wavelength)	smaller (shorter wavelength)



PRINCÍPIOS DE RADAR

# PARÂMETROS DO RADAR





PRINCÍPIOS DE RADAR

**Largura do pulso ( $\tau$ )** O tempo de transmissão do pulso (geralmente medido em microsegundos). Também chamado de duração do pulso.

**Frequência de repetição do pulso (FRP)** O número de pulsos transmitido em um tempo dado (geralmente medido em pulsos por segundo).

**Potência de Pico ( $P_t$ )** A máxima potência de pico do pulso (medida The maximum power of the pulse (medido em Watts).

**Comprimento de onda ( $\lambda$ )** O comprimento de onda da onda de rádio transmitida pelo radar. Os radares de tempo estão na região de microondas (comprimentos de 3 a 10 cm são comuns).

**Largura do feixe ( $\theta$ )** A largura angular do feixe do radar.

**Área da antena ( $A_e$ )** Área de abertura da antena.

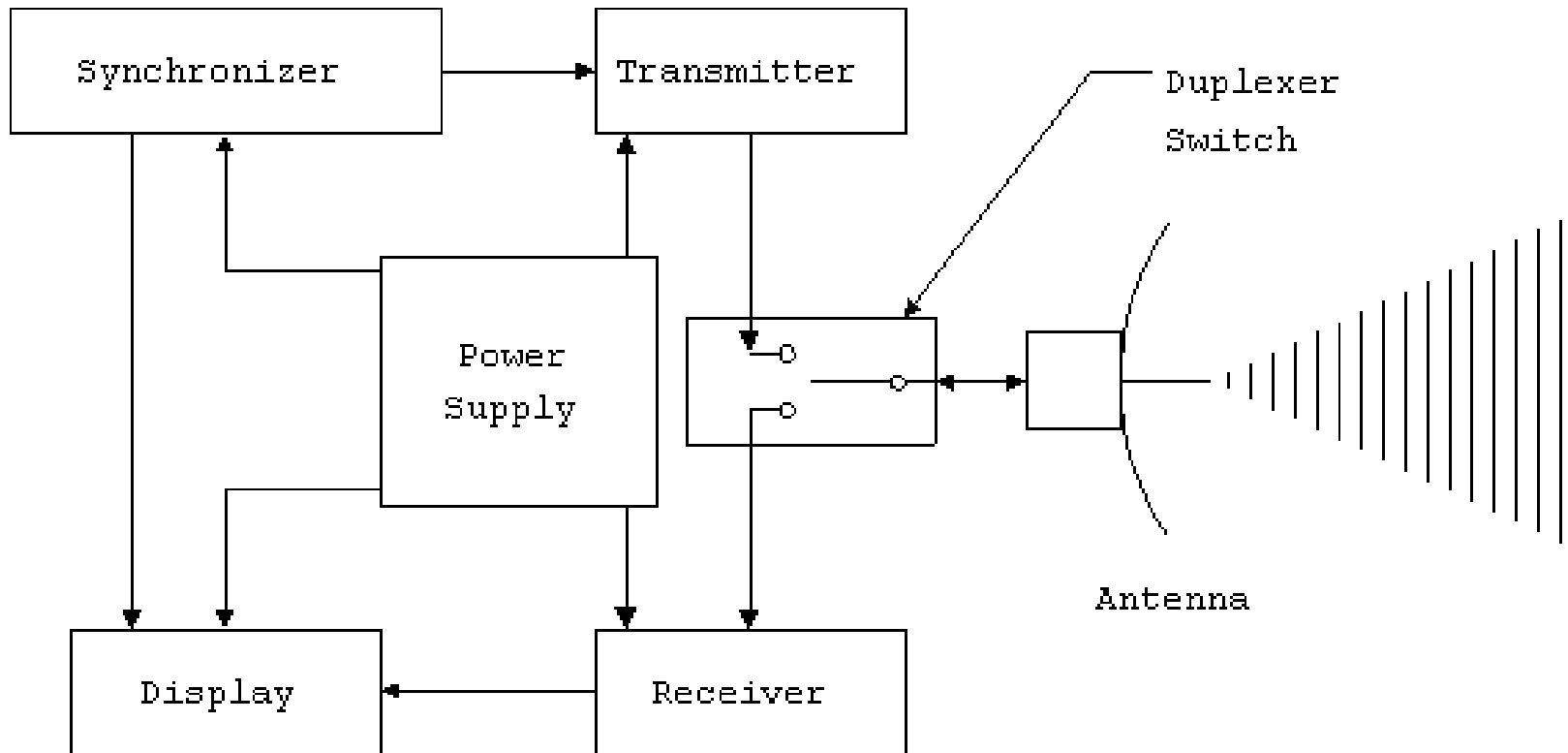
Para uma dada largura de feixe, a área da antena aumenta com o aumento do comprimento de onda. Então, um radar operando com um comprimento de onda de 10 cm terá sua área maior do que um operando com um comprimento de onda de 3 cm.

**Ganho da antena ( $G$ )** A razão da radiância no feixe ( $L$ ) pela radiância isotrópica ( $L_0$ ).



PRINCÍPIOS DE RADAR

## DIAGRAMA DE BLOCO DE UM RADAR SIMPLES

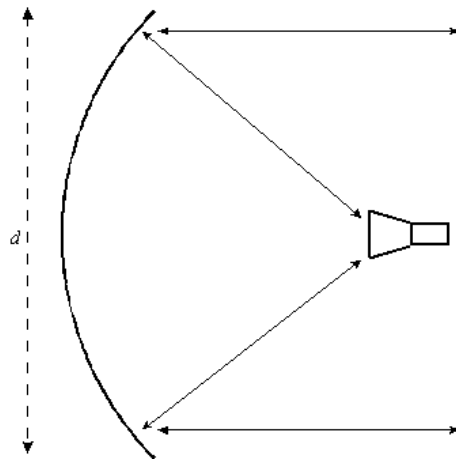




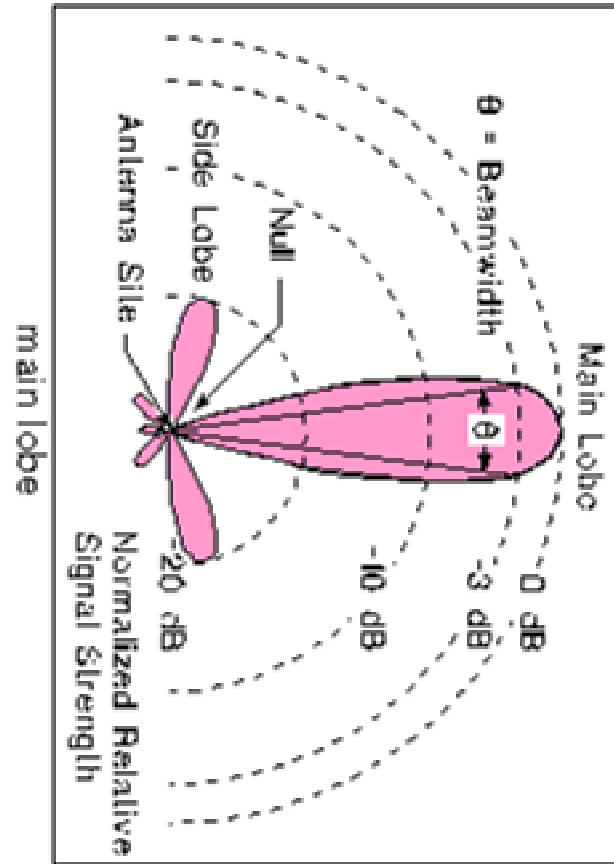
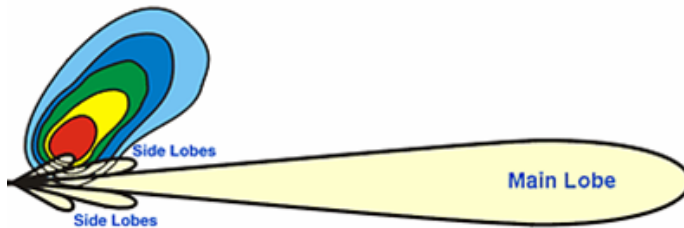
PRINCÍPIOS DE RADAR

# ANTENA DE RADAR E LARGURA DO FEIXE

Parabolic antenna model

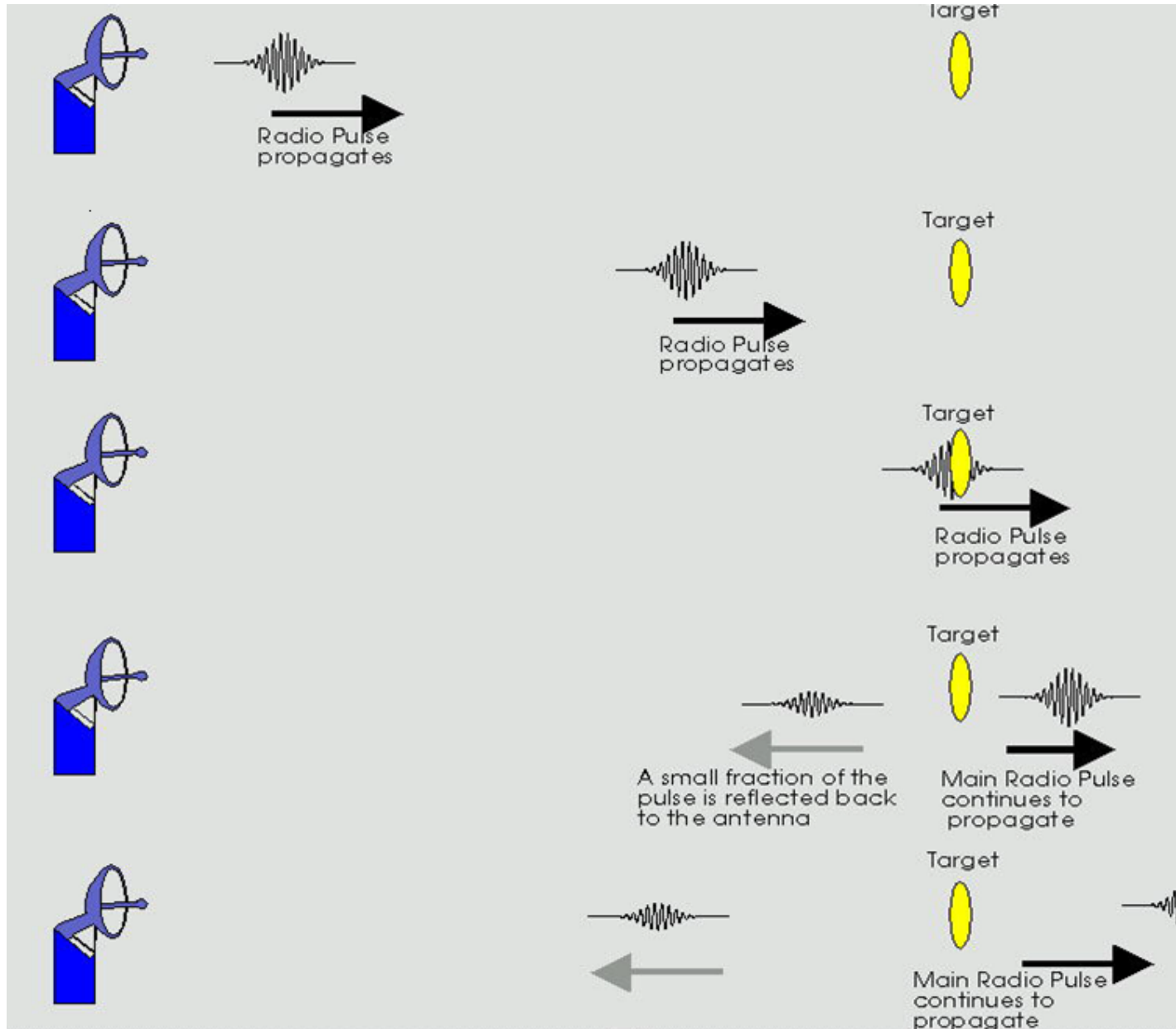


Strong Thunderstorm





PRINCÍPIOS DE RADAR





PRINCÍPIOS DE RADAR

O GANHO não possui dimensão e é maior que 1

$$G \equiv L/L_0$$

O **GANHO** é função do comprimento de onda e da área da antena, e é dada aproximadamente por:

$$G \cong 4\pi A_e / \lambda^2$$

O **MÁXIMO ALCANCE NÃO AMBÍGUO** do radar é função da frequência de repetição do pulso. Quanto menor o PRF, maior o máximo alcance não ambíguo, que dada por:

$$r_{\max} = c/2PRF$$

O **MÍNIMO ALCANCE DO RADAR** é função da largura do pulso, já que o radar não pode detectar um pulso enquanto transmitindo. O mínimo alcance é:

$$r_{\min} = c\tau/2$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

# DETERMINANDO O COMPRIMENTO DO PULSO

Exemplo:

Para um pulso de duração de  $1.57\mu\text{s}$  e  $4.7\mu\text{s}$  e considerando a **Velocidade da Luz**: 300 metros por microsegundo

Comprimento do pulso = Duração do pulso  $\mu\text{s}$  X 300 m  $\mu\text{s}^{-1}$

Os comprimentos do pulso são: **471 m** e **1410 m**

Comprimento do pulso será equivalente ao comprimento de cada "bin" para qual a informação é coletada. Isso determina a resolução de alcance.

- o **Pulse creates a BIN volume: length times width and height**
- o Melhor resolução com menor tempo



PRINCÍPIOS DE RADAR

# DETERMINANDO O ALCANCE MÁXIMO DO RADAR

Exemplo:

Com um FRP de 500 pulsos por segundo (pps), o que corresponde a um pulso a cada  $2000 \mu\text{s}$

O pulso viaja  $2000\mu\text{s} \times 300\text{m } \mu\text{s}^{-1} = 600,000 \text{ m}$  ou 600 km

**Alcance máximo** é 300 km, dado o mesmo tempo para o retorno do eco ao radar

NEXRAD PRF's:

318 Hz & 1304 Hz both at  $1.57\mu\text{s}$  and  
452 Hz at  $4.7\mu\text{s}$  lengths

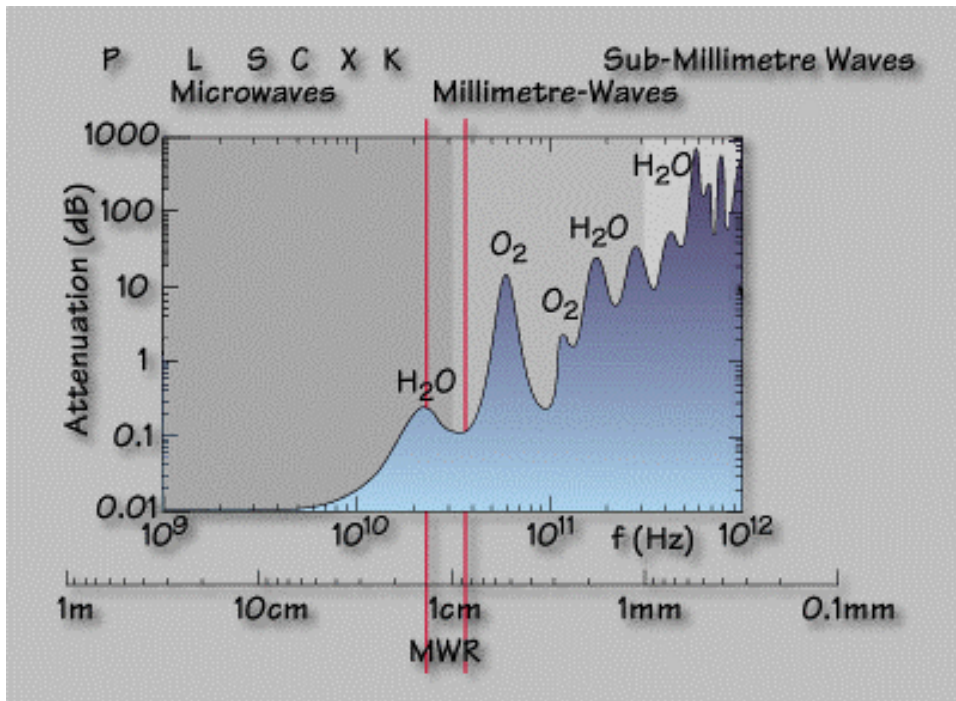
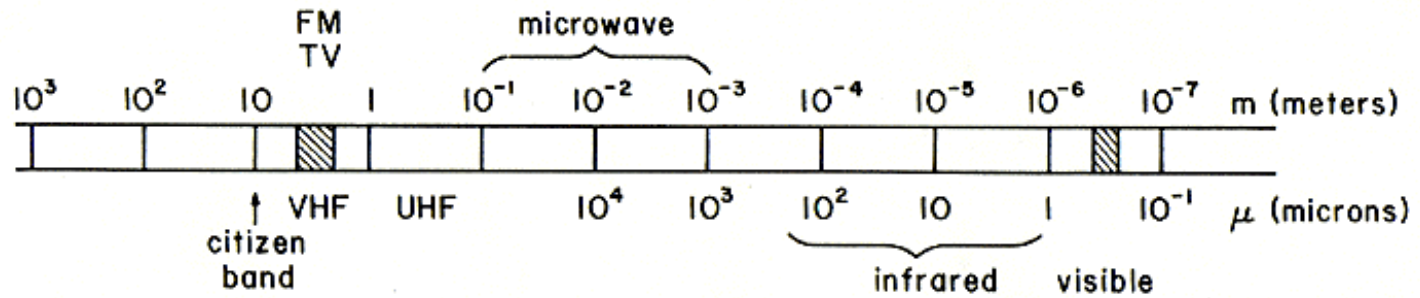
Conclusão:

maior PRF, menor alcance;  
menor PRF = maior alcance



PRINCÍPIOS DE RADAR

# ESPECTRO EM



<u>Frequency Band</u>	<u>Frequency (MHz)</u>	<u>Wavelength range (cm)</u>	<u>Meteorological typical</u>
UHF	300-1000	30-100	Profiler
L	1000-2000	15-30	
S	2000-4000	7.5-15	10 cm
C	4000-8000	4-7.5	5 cm
X	8000-12500	2.5-4	3 cm
K	> 12500	about 1	8 mm





PRINCÍPIOS DE RADAR

## COMPRIIMENTO DE ONDA DO RADAR

- **Radar signals are EM waves and, as such, have a wavelength given by,**

$$\lambda = \frac{c}{f_0}$$

where,

$\lambda$  wavelength (m)

$c$  speed of light (m/sec)

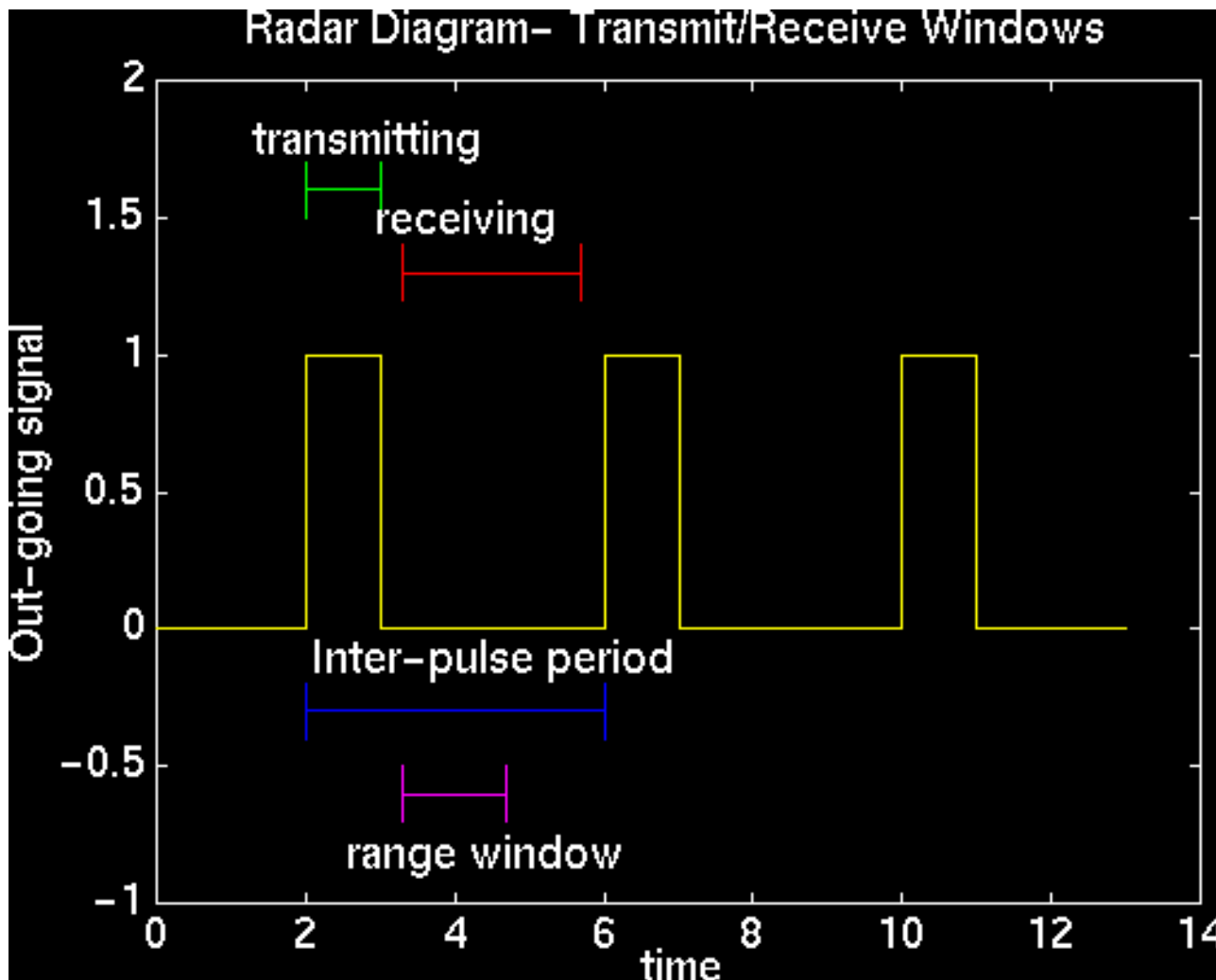
$f_0$  transmit frequency of radar (Hz)

- **The wavelength is one of the most important factors influencing the radar imagery characteristics**



PRINCÍPIOS DE RADAR

# DIAGRAMA DE TEMPO





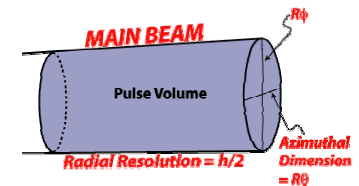
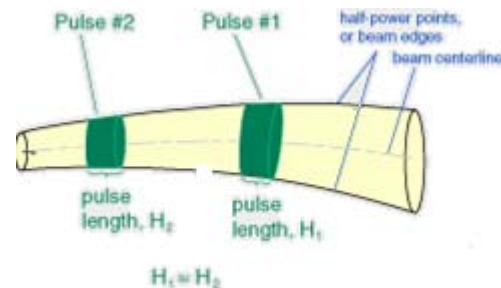
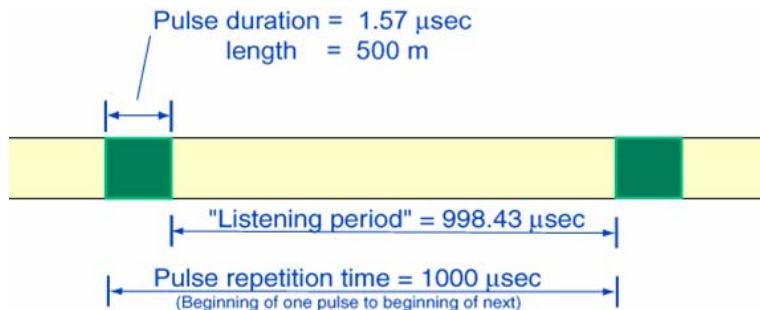
PRINCÍPIOS DE RADAR

# Frequência de Repetição do Pulso

**Pulse Repetition Frequency (PRF) (Frequência de repetição do pulso)** é o número de pulsos transmitidos por segundo pelo radar. O recíproco disso é chamado de **Tempo de Repetição do Pulso (Pulse Repetition Time (PRT))**, o qual é o tempo decorrido do início de um pulso para o início do próximo.

PRF é importante já que determina alcance máximo do alvo ( $R_{\max}$ ) e velocidade Doppler máxima ( $V_{\max}$ ) que pode ser exatamente determinada.

PRF & PRT			
PRF ( $s^{-1}$ )	PRT (msec)	PRF ( $s^{-1}$ )	PRT (msec)
250	4.0	1000	1.0
500	2.0	1250	0.80
750	1.3	1500	0.67





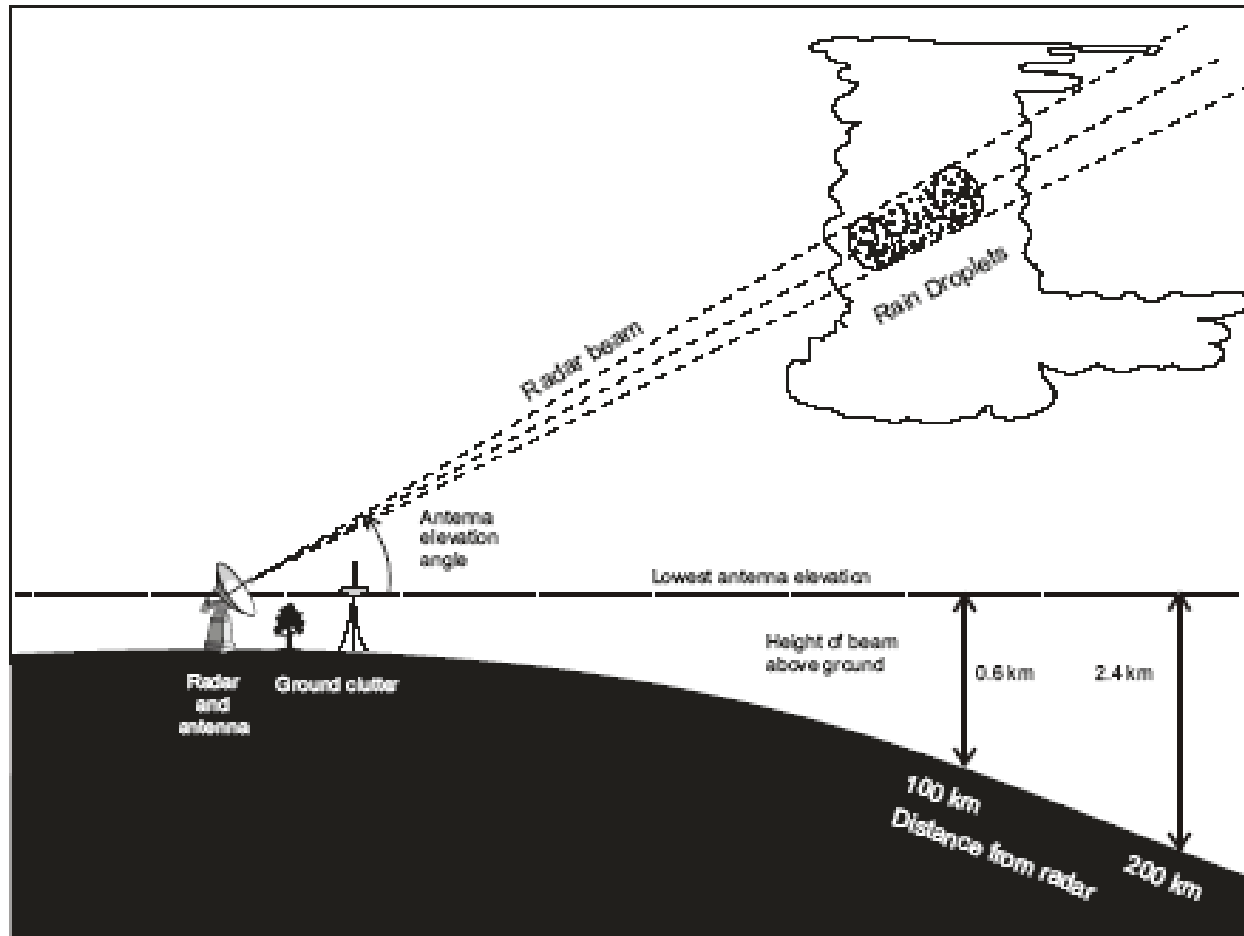
PRINCÍPIOS DE RADAR

# PROPAGAÇÃO DO FEIXE



PRINCÍPIOS DE RADAR

# PROPAGAÇÃO DO FEIXE DO RADAR



Radar scans this entire volume by raising and lowering the beam as the antenna rotates.



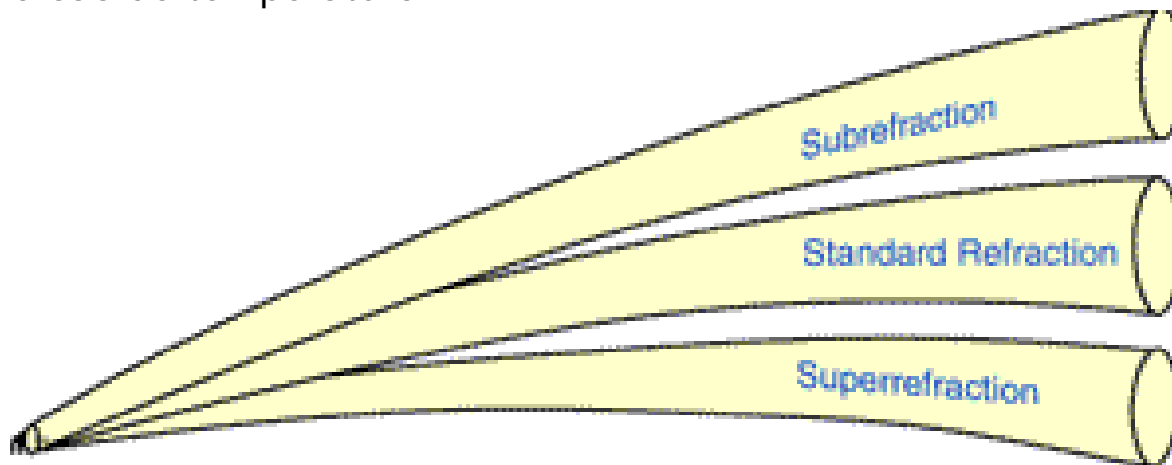
Para determinar a localização do feixe do radar é necessário calcular a altura (acima da altura da antena do radar **feed horn**) do centro do feixe do radar assumindo uma **atmosfera padrão**.

PRINCÍPIOS DE RADAR

Se a atmosfera desviar-se das condições padrões de refração, o feixe do radar também desviará do seu caminho de propagação **normal** ou assumido.

Em outras palavras, o feixe refrata como um feixe de luz propagando-se por diferentes meios e ele pode tanto **sub refratar** como **super refratar**. A figura seguinte é uma ilustração dos vários caminhos de propagação do feixe.

**Ducting** é um caso extremo de condição de super refração como aquela em que o feixe do radar fica prendido ou “ducted” dentro de uma camada estável ou uma camada de inversão de temperatura.





PRINCÍPIOS DE RADAR

# PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Nesta sessão vamos discutir a propagação de ondas eletromagnéticas (EM) incluindo discussões posteriores sobre o índice de refração, lei de Snell e a derivação de equações para o caminho do raio de uma onda de radar viajando sob diferentes condições atmosféricas.

A atmosfera é um meio não-vácuo, lidamos com velocidades de ondas que são diferentes da velocidade da luz,  $c = 2.998 \times 10^8$  m/s. Como discutido na seção anterior, a velocidade da onda para um meio não-vácuo define o índice de refração,  $n = c/v$  onde  $v$  é a velocidade da onda no meio em questão. Como  $c = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  e  $v = \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$ , temos

$$n^2 = \epsilon \mu \quad \text{onde } \epsilon = \epsilon_1 / \epsilon_0 \text{ e } \mu = \mu_1 / \mu_0$$

Como  $\mu$  é aproximadamente igual a 1 para a maioria dos meios considerados,  $n^2 = \epsilon$ . Com  $\epsilon > 1$ ,  $n > 1$  e portanto  $v < c$  (por uma pequena diferença). A forma geral do índice de refração é da forma

$$m = n - ik$$

onde  $k$  é a absorvidade do meio.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Índice de Refração

A atmosfera é um meio não homogêneo, com variações na temperatura, pressão e vapor d'água, os quais contribuem para a mudança no índice de refração.

Índice de refração para a atmosfera governa o caminho das ondas de radar

Índice de refração para o ar seco, ou **N**, - **A refratividade**

Para o ar seco,  $N = (n-1)10^6 = k_1 p/T$  onde P é dado em mb, T em K,  $k_1 = 77.6$  (K/mb)

Substituindo na lei Ideal dos Gases,

$$(n-1) 10^6 = K_1 R \rho = \text{constante} \times \rho$$

Portanto,

$$dn/dz \approx d \rho/dz$$





PRINCÍPIOS DE RADAR

## Contribuição do vapor d'água para o índice de refração ( n )

Já que moléculas do ar não têm momento de dipolo permanente, **N** não varia frequentemente. Contudo, este não é o caso para a molécula de vapor d'água, que tem um momento de dipolo permanente. O grau de alinhamento do momento de dipolo com o vetor campo E incidente é dependente da frequência. Para frequências microondas,

$$\mathbf{N} = (\mathbf{n}-1)10^6 = \mathbf{K}_3\mathbf{e}/\mathbf{T}^2 - \mathbf{K}_2\mathbf{e}/\mathbf{T}$$

onde e é a pressão de vapor em mb;  $\mathbf{K}_2 = 5.6 \text{ K}/\text{mb}$ ;  $\mathbf{K}_3 = 3.75 \times 10^5 \text{ (K)}^2/\text{mb}$

O índice de refração pode ser encontrado adicionando componentes para o ar seco e o vapor d'água,

$$\mathbf{N} = \mathbf{K}_1\mathbf{p}/\mathbf{T} + \mathbf{K}_3\mathbf{e}/\mathbf{T}^2 - \mathbf{K}_2\mathbf{e}/\mathbf{T}$$

Perguntinha chave: Como N varia com a altura e com as condições variáveis da atmosfera?



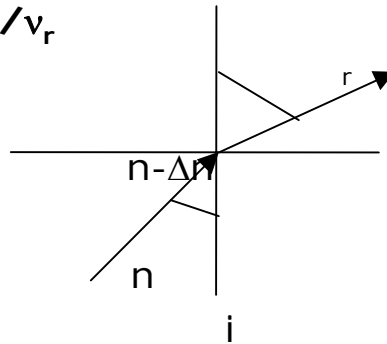
PRINCÍPIOS DE RADAR

## Leis de Snell

Primeiramente, examinar refração simples em termos da **Lei de Snell**

Já que  $\rho$  e  $e$  decrescem exponencialmente com a altitude,  $n$  também decresce com a altitude (**these affects offset the linear decrease in height for T, for most situations**). Desde que  $n = c/v$ ,  $v$  cresce com a altitude então a onda é curvada para baixo. A lei de Snell é:

$$\sin i / \sin r = v_i / v_r$$



desde que  $v_r > v_i$  segue que  $\sin r > \sin i$  e então  $r > i$

Esta é uma típica situação para o caminho de um raio na atmosfera sob condições em que a temperatura decresce com a altitude.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## EQUAÇÃO DO CAMINHO DO RAIOS ATMOSFERA ESFÉRICA E ESTRATIFICADA

Para  $dn/dh$  pequeno, Hartee, Michel e Nicolson (1946) derivaram uma equação diferencial exata para o caminho do raio do radar em uma atmosfera esférica e estratificada.

$$d^2h/ds^2 - (2/(R+h) + 1/n(dn/dh))(dh/ds)^2 - ((R+h)/R)^2 (1/(R+h) + 1/n(dn/dh)) = 0 \quad (1)$$

onde  $d^2h/ds^2$  é a curvatura do caminho do raio do radar. Sob uma grande parte de condições, pode-se assumir o seguinte:

$$(dh/ds)^2 \ll 1$$

$$n \approx 1$$

$$h \ll R$$

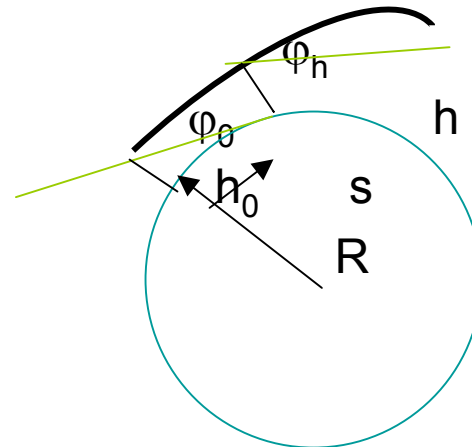
Assumindo isso, (1) reduz a

$$d^2h/ds^2 = 1/R + dn/dh \quad (2) \text{ Aqui } d^2h/ds^2 \text{ é a curvatura do caminho do raio.}$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

Considere a geometria para um caminho de um raio na atmosfera da Terra. Aqui  $R$  é o raio da Terra,  $h_0$  é a altura do transmissor acima da superfície,  $\varphi_0$  é ângulo inicial de lançamento do feixe,  $\varphi_h$  é o ângulo relativo a tangente local em algum ponto ao longo do feixe (a uma altura  $h$  acima da superfície a uma grande distância circular  $s$  do transmissor).





PRINCÍPIOS DE RADAR

Integrando (2) tem-se,

$$(dh/ds)^2 = 2 \int (1/R + dn/dh) dh + \text{constante} \quad (3)$$

Para  $dh/ds \approx \varphi$  para pequenos  $\varphi$ , (3) pode ser escrito como,

$$\begin{aligned} 1/2(\varphi_h^2 - \varphi_0^2) &= (h - h_0)/R + n - n_0 \\ &= (h/R + n) - (h_0/R + n_0) \end{aligned}$$

Chamando  $M = [h/R + (n-1)] \times 10^6$ , temos

$$= (M - M_0) 10^{-6}$$

M é chamado de **índice de refração modificado**. M vale aproximadamente 300 ao nível do mar.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# Curvatura dos Caminhos do Raio em relação à Terra

Se o perfil vertical de  $M$  é conhecido (say through a sounding yielding  $p$ ,  $T$  and  $q$ ),  $\phi_h$  pode ser calculado em qualquer altitude  $h$ , ou seja, o ângulo relativo à tangente local.

Vamos agora considerar os caminhos dos raios relativos à Terra. Para o caso de nenhuma atmosfera, ou se  $N$  é constante com a altura ( $dN/dh = 0$ ), os caminhos dos raios seriam linhas retas em relação à curvatura da Terra.

$$d\phi/ds = 1/R + dn/dh$$

$1/R$  para  $n$  constante com a altura

Para  $n$  variando com a altura,

$$d\phi/ds = 1/R + dn/dh$$

$< 1/R$  já que  $dn/dh < 0$

Para o caso especial onde  $dn/dh = -1/R$ ,  $d\phi/ds = 0$ . Então o raio viaja em torno da Terra concêntrico a ela, com um raio fixo,  $R + h$ . Este é o caso de uma onda confinada. “ DUCTING ”



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Equação Altura-Alcance

Por conviniência, é mais fácil introduzir um raio fictício para a Terra,  
 **$1/R' = 1/R + dn/dh$**

Para condições típicas,  $dn/dh = -1/4 R \text{ m}^{-1}$

Então  **$R' = R/(1 - 1/4) = 4/3 R$**

Este é o modelo do raio da Terra efetivo.

Doviak e Zrníc (1993) fornecem uma expressão completa para  $h$  vs.  $r$ , onde  $r$  é a inclinação do alcance (distância ao longo do raio).

$$h = \{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin\theta\}^{1/2} - k_e R + h_o$$

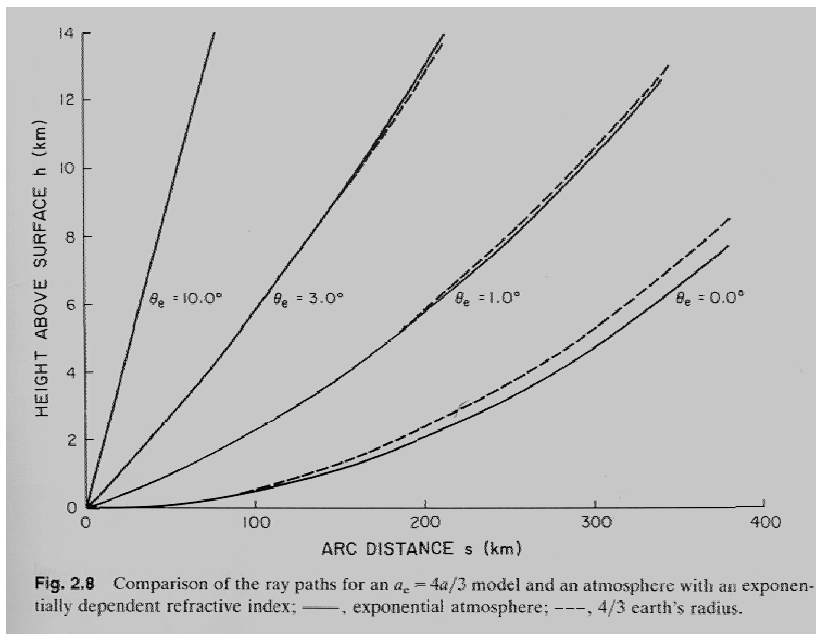
Onde  $h$  é a altura do feixe como a inclinação do alcance como a inclinação do alcance  $r$ ,  $\theta$  é o ângulo de elevação da antena, e  $k_e$  é  $4/3$  ( $R$  é o raio real da Terra).

É importante notar que, para locais em que o radar não está ao nível do mar, a altura ( $h_o$ ) deve ser acrescentada da altura acima do nível do mar, para computar a altura da linha central do feixe para converter a altura ARL para a referência ao nível do mar (ASL).

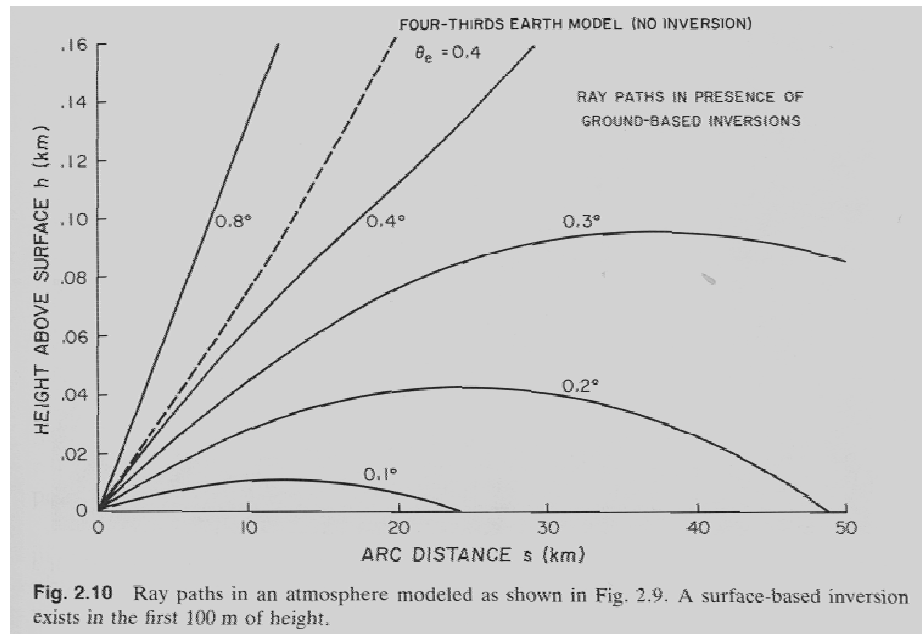


PRINCÍPIOS DE RADAR

## Modelos de Refração



## Modelo de Refração despadronizado



Doviak and Zrníc (1992)





PRINCÍPIOS DE RADAR

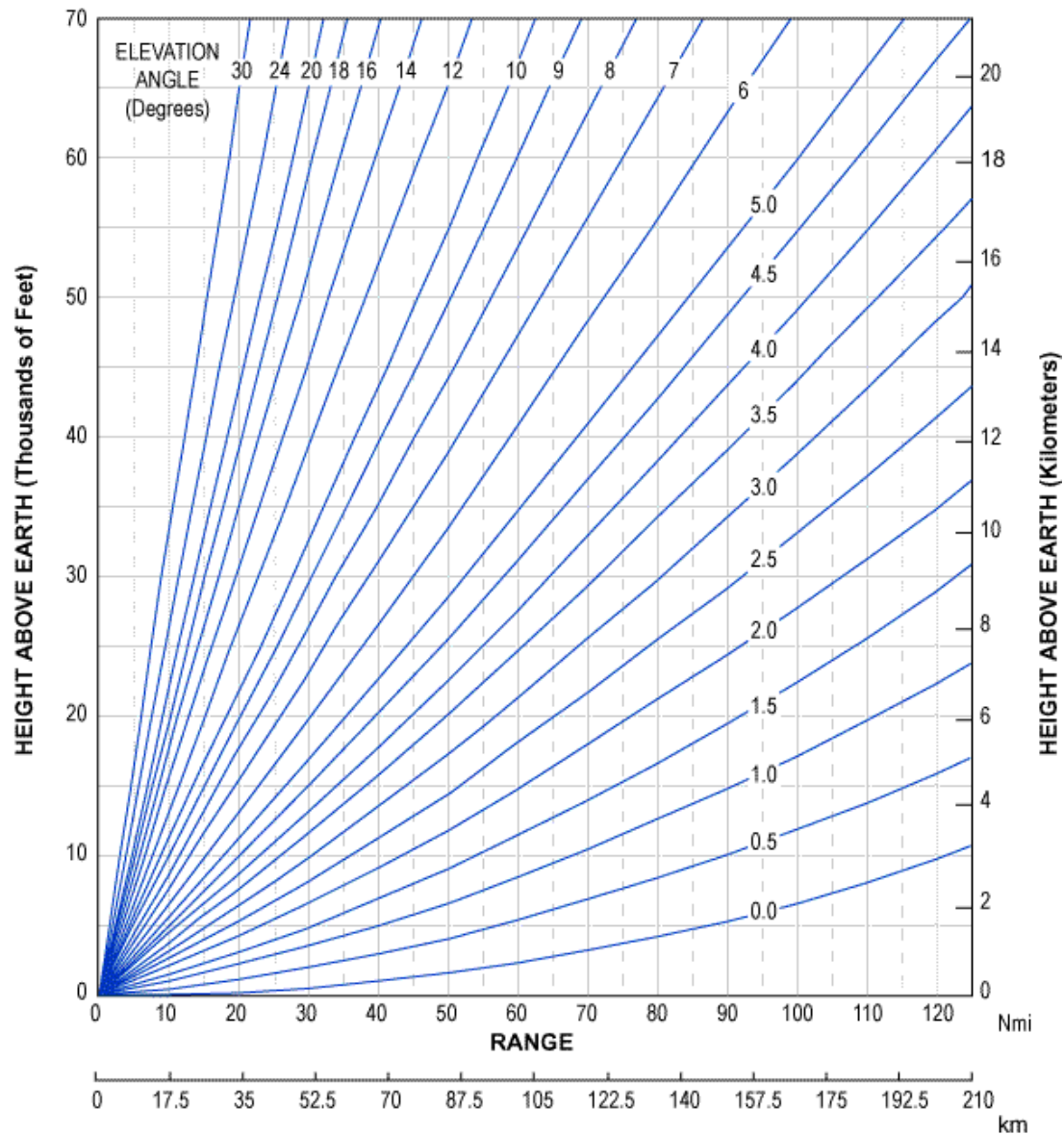


Gráfico do Alcance vs. Altura do feixe de altura central sob condições padrão de **refratividade**



PRINCÍPIOS DE RADAR

Refração Non-standard tipicamente ocorre com distribuição de temperatura não segue o lapse rate padrão ( $dn/dh \neq -1/4 (R)$ ). Como resultado, ondas do radar podem desviar de seus caminhos normais previstos pelo modelo anterior. Esta situação é conhecida como propagação anômala ou anormal.

**Abnormal downward bending  
(most common type of AP)**

**super refração**

**Abnormal upward bending  
refraction**

**sub**

Superrefração está associada, muitas das vezes, com o ar frio da superfície, onde há inversão de temperatura, T aumenta com a altura. Mais **comumente** causada por resfriamento radiativo durante a noite, ou divergência de ar frio de uma tempestade.

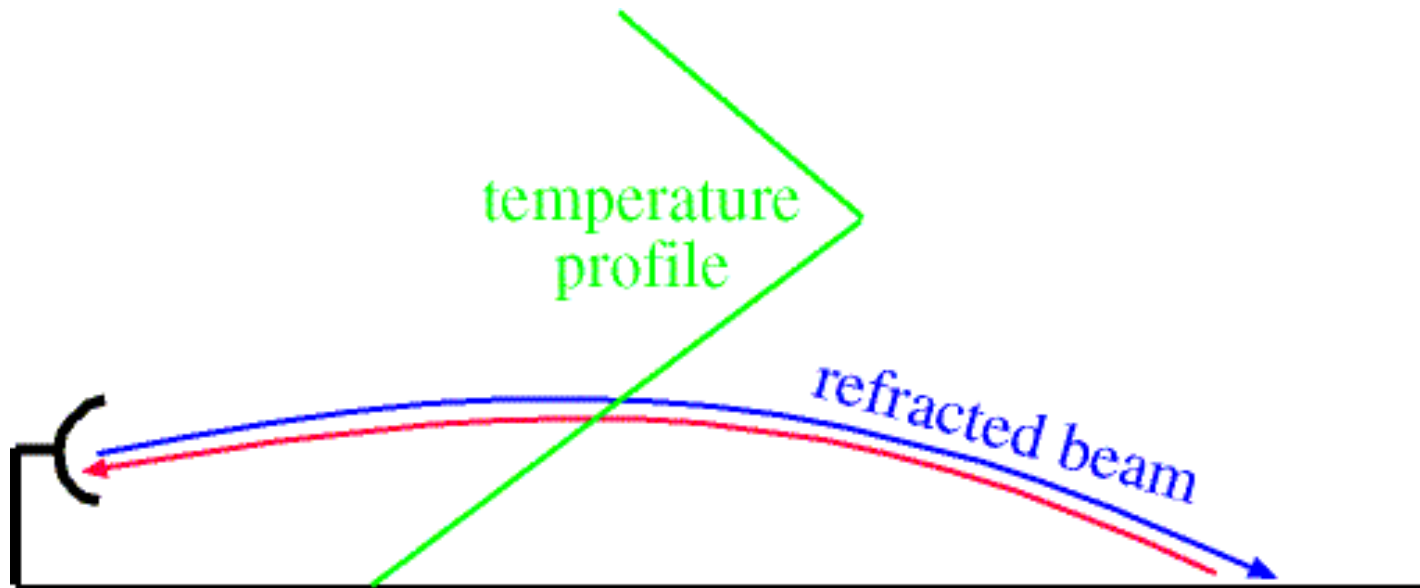
Como T aumenta com a altura, n decresce (rapidamente) com a altura ( $dn/dh$  é muito negativo).

Como  $n = c/v$ , v deve aumentar com a altura, causando inclinação para baixo do caminho do raio.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## REFRAÇÃO NÃO PADRÃO





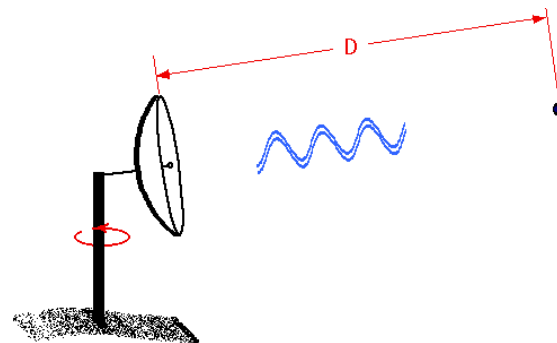
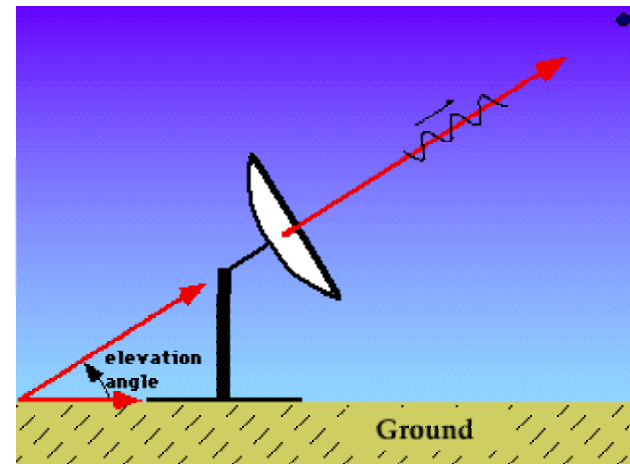
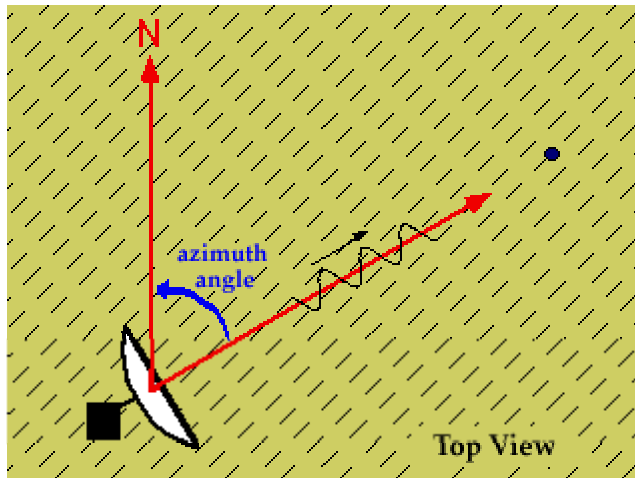
PRINCÍPIOS DE RADAR

# ESTRATÉGIAS DE SCANNING



PRINCÍPIOS DE RADAR

# AZIMUTE – ELEVAÇÃO – ALCANCE





PRINCÍPIOS DE RADAR

## PADRÃO DE COBERTURA DE VOLUME

É uma série de scans consecutivos, tanto ao longo do horizonte como em um setor, juntos varrem um volume do espaço. Scans de volume são tipicamente executados por uma série de scans horizontais, cada um progressivamente a um ângulo de elevação maior.

Um método menos comum é conduzir uma série de scans verticais entre os horizontais e os zenitais, cada um com um ângulo azimutal diferente.

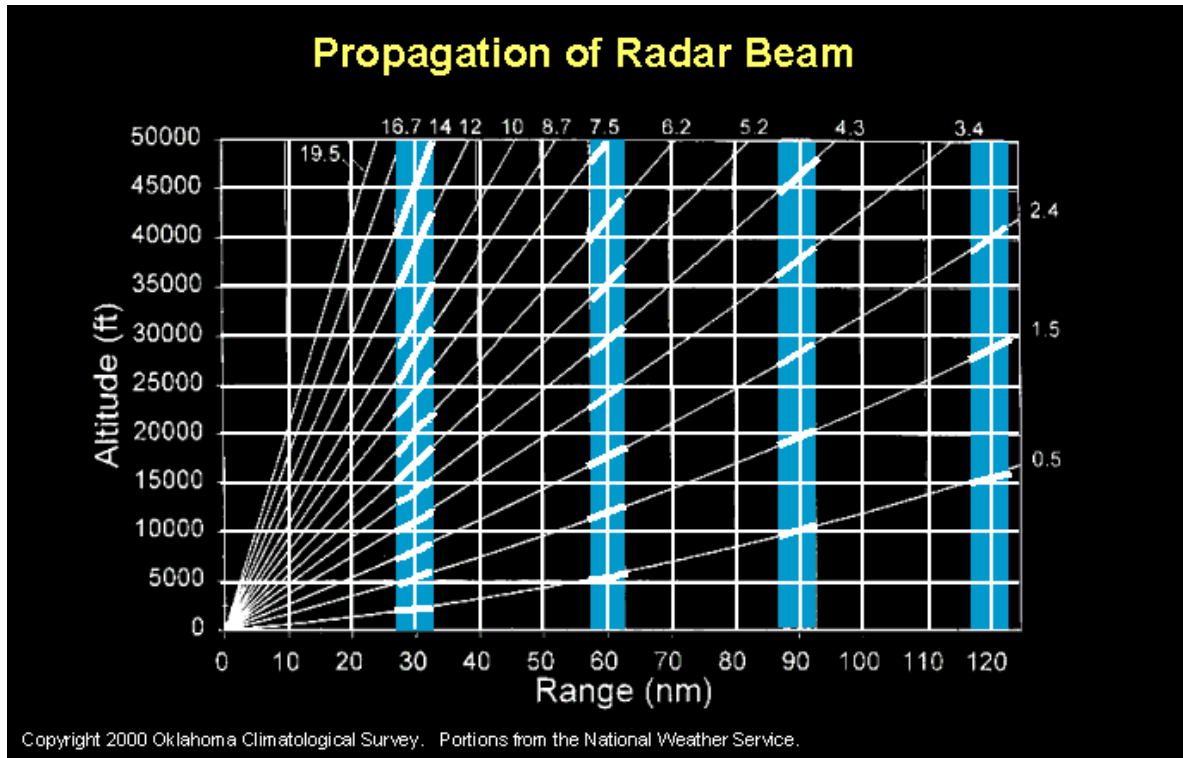
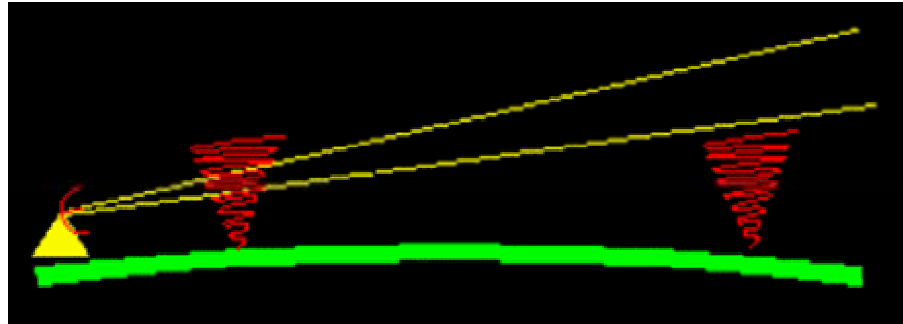
Scans de volume são usados para desenvolver visões tri-dimensionais do campo de refletividade e, em um Radar Doppler, o campo de velocidade radial associado com os alvos iluminados pelo radar.

Um **Padrão de Cobertura de Volume** é uma série de varredura de 360 graus da antena com um determinado ângulo de elevação completada em um período de tempo específico. Quatro estratégias separadas de scan são usadas agora com a possibilidade de outros serem implementados no futuro.

# ALTURA x ALCANCE DA INCLINAÇÃO

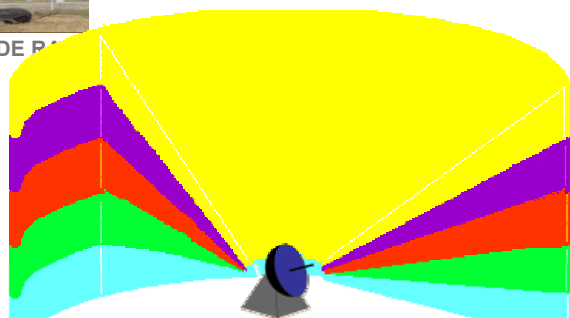


PRINCÍPIOS DE RADAR





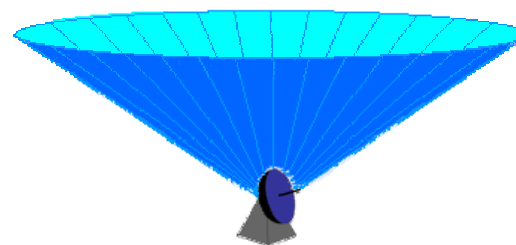
PRINCÍPIOS DE RA



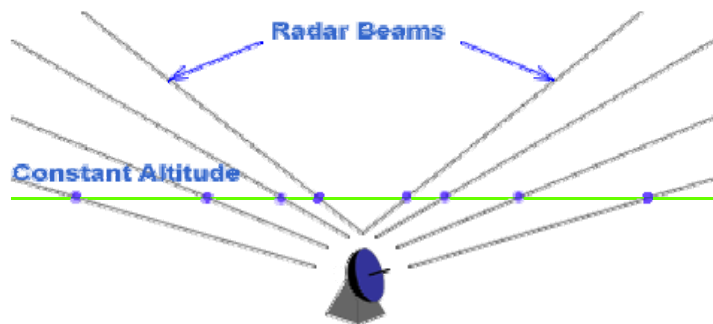
A cross section of a Clear Air Mode Volume Scan

The different colors represent scans at different elevation angles.

The scans form a cylindrical stack of cones.



PPI displays the data from one elevation angle (the surface of the cone)



CAPPI combines data from many different elevation angles

**CAPPI: Constant Altitude PPI (Altitude Constante PP1)**, é um estilo de visualização no qual os dados de diferentes volumes de varreduras são juntados apresentando uma imagem da área fora da estação do radar em uma altitude constante (lembrando que em um PPI normal, quanto mais longe do centro da tela, maior a altitude de retorno).

Existem dois principais tipos de modos usados por estações de radar para detectar padrões de tempo: **Modo Ar limpo e Mode Precipitação.**





PRINCÍPIOS DE RADAR

# ESTRATÉGIA DE COLETA DE DADOS NO RADAR

Para representar adequadamente a atmosfera os radares de vigilância do tempo empregam diversas estratégias de scanning ou padrões de cobertura de volume.

**Scan de Volume** – é uma estratégia de scanning na qual varreduras são feitas com elevações sucessivas da antena (i.e., uma sequência de inclinação), e então combinadas para obter uma estrutura tri-dimensional do eco.

Os sete ângulos mais baixos são contínuos. Os dados resultantes são usados em algoritmos para determinar storm tracks, cisalhamento e mesociclones. Outros algoritmos computam precipitação e perfil de vento.

**Scanning** – É o movimento da antena do radar durante a coleta de dados. Scanning geralmente segue um padrão sistemático envolvendo um dos seguintes:

No scanning horizontal, usado para gerar visualização PPI, a antena é continuamente girada no azimute em torno do horizonte ou é girada para frente e para trás em um setor (scanning de setor) na conclusão dos 360 graus ou do setor, o ângulo de elevação é geralmente aumentado;

Scanning vertical, usado para gerar visualizações RHI, is realizado mantendo o azimute constante enquanto continuamente o ângulo de elevação da antena é variado; na conclusão de cada scan vertical, o azimute é geralmente incrementado e o scan vertical varre na direção oposta.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## **Modo ar limpo:**

É um modo de operação do radar. Neste modo, scans são realizados em cinco diferentes elevações começando em  $0.5^\circ$  e incrementado por  $1^\circ$  a cada elevação.

Duas rotações completas são realizadas em cada elevação. Imagens são atualizadas a cada dez minutos. Isto aumenta a habilidade do radar em detectar pequenos objetos na atmosfera. Neste modo a detecção do radar será de material particulado e poeira.

É usado para detectar previamente formação de precipitação convectiva, descontinuidades na massa de ar e obtenção de perfil de vento.

Este modo usa um pulso longo e varre cinco ângulos de elevação em dez minutos. Existem scans separados de vigilância e Doppler varre nos três mais baixos ângulos de elevação.

O radar começa no ângulo de elevação de  $0.5^\circ$  e executa scans de volumes em cinco diferentes ângulos de elevação (Fig F1). Cada elevação subsequente é  $1^\circ$  maior que a última (scans são feitos em  $0.5^\circ$ ,  $1.5^\circ$ ,  $2.5^\circ$ ,  $3.5^\circ$  and  $4.5^\circ$ ).

Em cada ângulo de elevação, o radar faz duas rotações azimnutaís completas. Uma rotação é para coletar dados de refletividade e a outra para coletar dados de Doppler.

Demora aproximadamente 10 minutos para o radar completar todas as 5 elevações. Devido à neve possuir baixa refletividade, este modo pode ser usado para detectar pequenos flocos caindo.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## **Modo Precipitação:**

É um modo de operação do radar. Neste modo, varreduras são feitas em quatorze diferentes elevações começando em  $0.5^\circ$  e aumentando até  $19.5^\circ$ . Duas rotações completas são feitas para cada elevação.

Em elevações menores, varreduras são geralmente separadas por  $1^\circ$ ; contudo em elevações maiores as varreduras são separadas por incrementos maiores deixando espaços no volume varrido.

A rotação da antena é consideravelmente mais rápida e a sensibilidade da varredura é menor do que no modo Ar Limpo. Contudo, volumes de varredura mais altos são obtidos, permitindo a análise da estrutura de tempestades.

É usado como uma estratégia do modo precipitação, na qual um pulso curto é usado e varre 14 ângulos de elevação em 5 minutos.

No geral o RADAR usa vigilância separada e varreduras Doppler nos 2 ângulos mais baixos: Os dois ângulos de elevação mais baixos são varridos primeiramente pela refletividade e depois pela velocidade.

Uma segunda estratégia do modo de precipitação, é usado para observar tempestades mais distantes; se utiliza de um pulso curto e varre 9 ângulos de elevação em 6 minutos.

Existem varreduras de vigilância e Doppler nos dois ângulos de elevação mais baixos com os cinco mais baixos sendo contíguo.

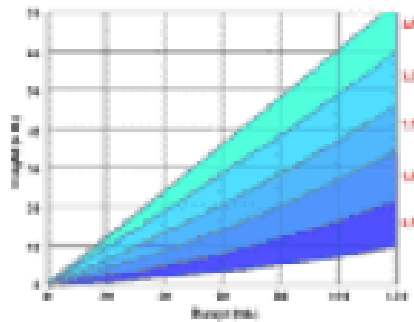


PRINCÍPIOS DE RADAR

# Volume Scanning Patterns

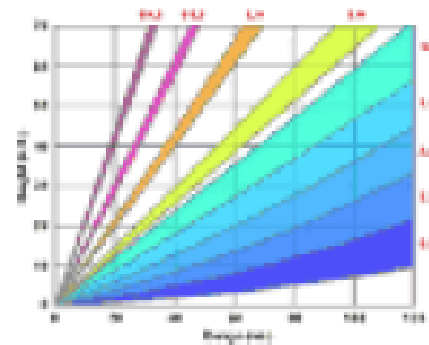
Precipitation Mode

Clear Air Mode



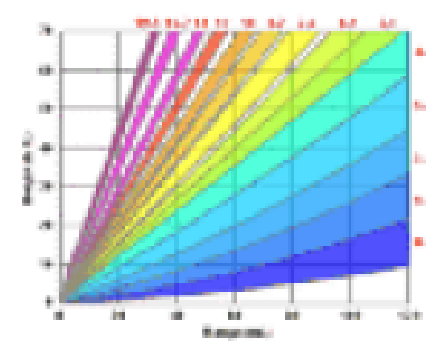
10 min

Slow Scan



6 min

Fast Scan

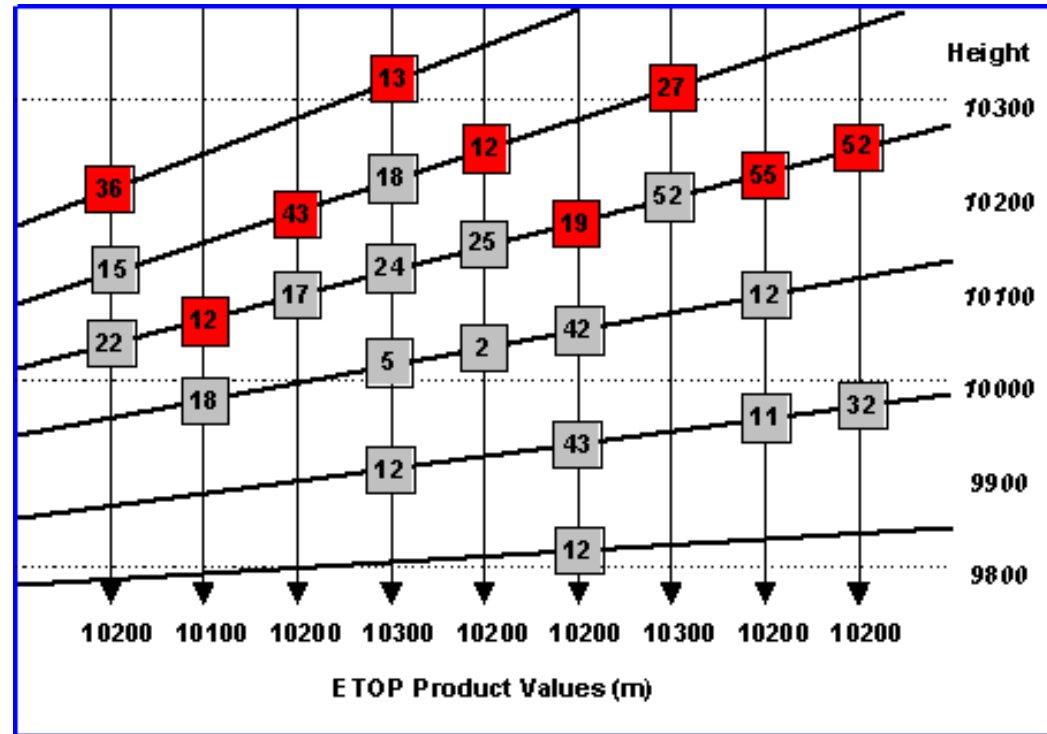


5 min



PRINCÍPIOS DE RADAR

## ECHO TOP



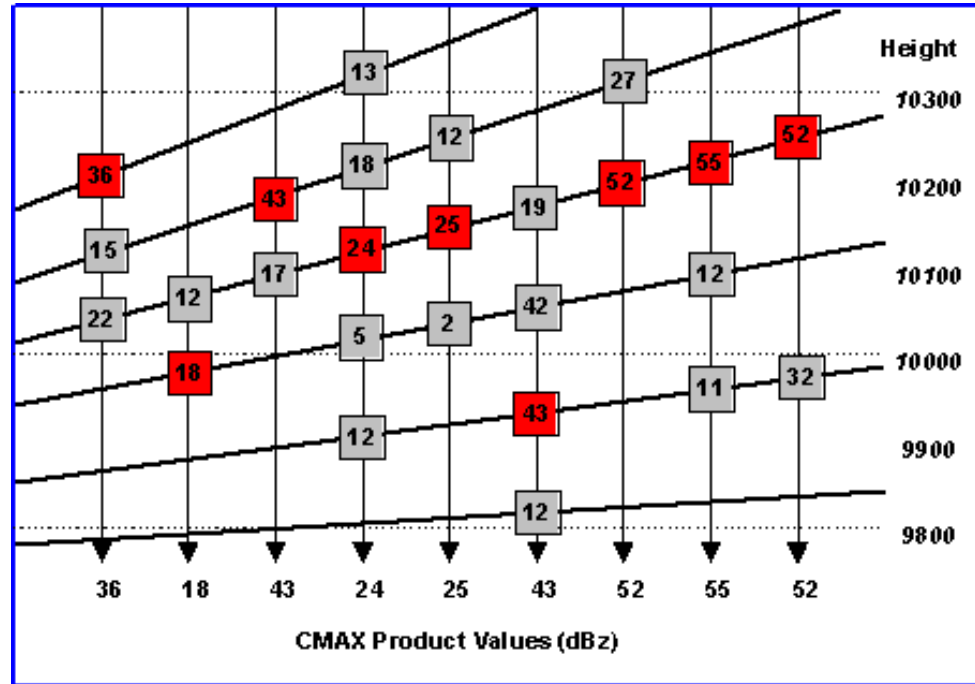
O produto ECHO TOP é o mais alto (em altitude) de retorno na célula. Tanto corrigido como não corrigido a refletividade pode ser usada para gerar esse produto.

O algoritmo ETOPS algorithm **transverses** the volume scan calculating the height of the echoes. Os ecos mais altos em altitude com intensidade acima do threshold são selecionados. A resolução é dependente da largura do pulso.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# Intensidade Máxima da Coluna



A máxima intensidade em uma coluna é uma indicação da máxima refletividade em cada célula. Alturas máxima e mínima podem ser definidas pelo usuário e padronizadas para zero e 30 quilômetros.

Isto permite a geração de produtos de camada, ajustando os valores aos limites da camada desejada, e pode ser realizado para o máximo alcance do volume do scan.

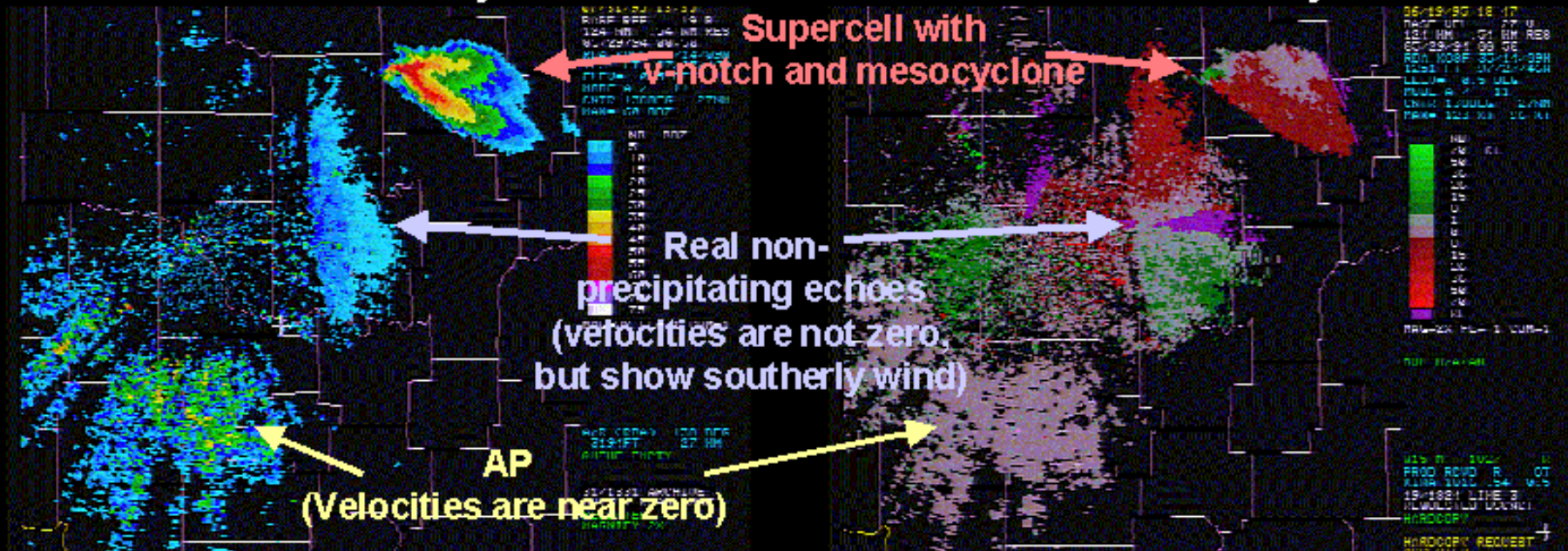


PRINCÍPIOS DE RADAR

## Anomalous Propagation (AP) Example

Base Reflectivity

Base Velocity



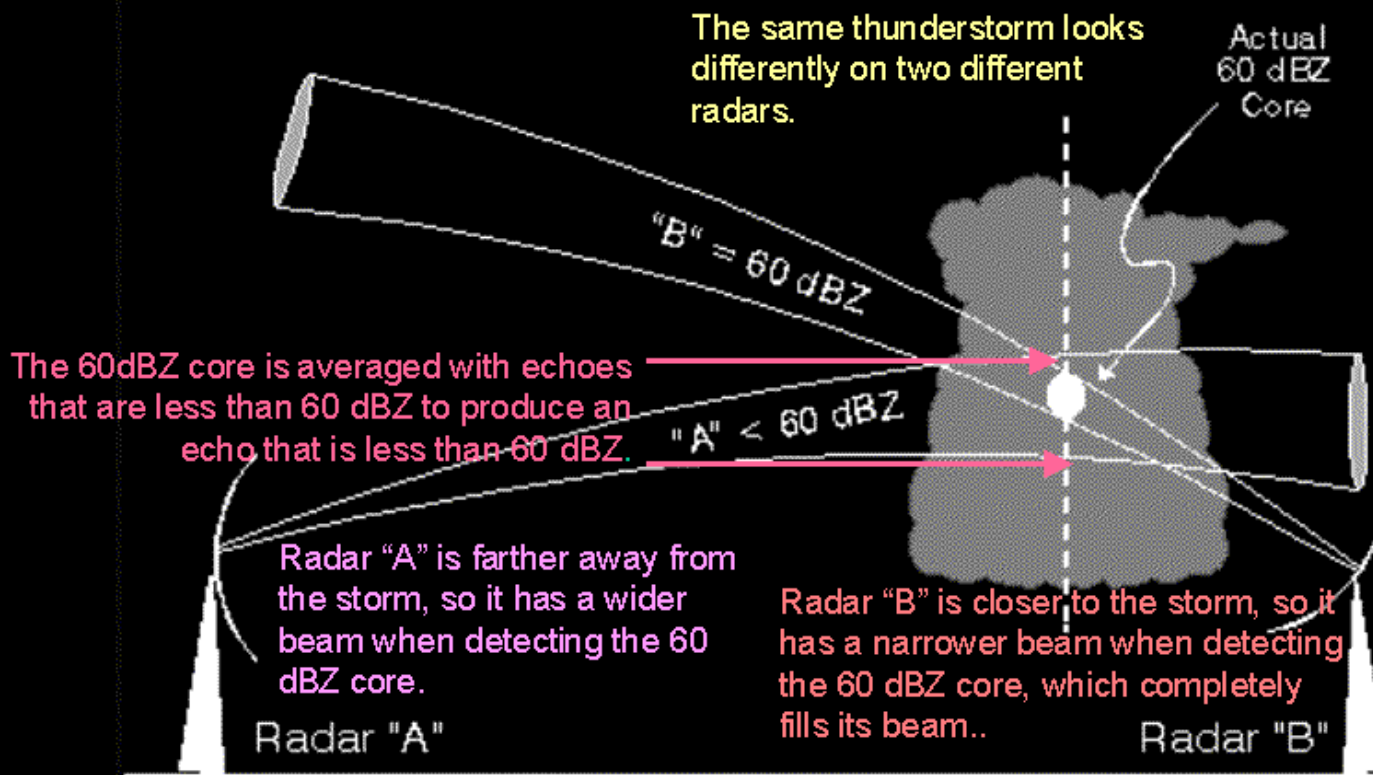
AP is caused by ground returns when the radar beam bends and strikes the earth's surface at a relatively large distance from the radar. *Base* velocities of AP echoes are usually near zero and AP usually only appears on the lowest tilts.

Copyright 2000 Oklahoma Climatological Survey. Portions from the National Weather Service.



PRINCÍPIOS DE RADA

## Radar Beam Broadening and Comparing Two Radars



While it is often a good practice to check signatures between multiple radars, broadening of the radar beam with increasing distance from the radar causes storms at far ranges to appear to be weaker than they really are.

Copyright 2000 Oklahoma Climatological Survey. Portions from the National Weather Service/Operational Support Facility.





PRINCÍPIOS DE RADAR

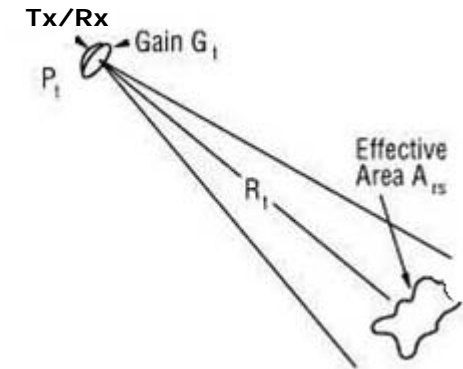
# A EQUAÇÃO DO RADAR



PRINCÍPIOS DE RADAR

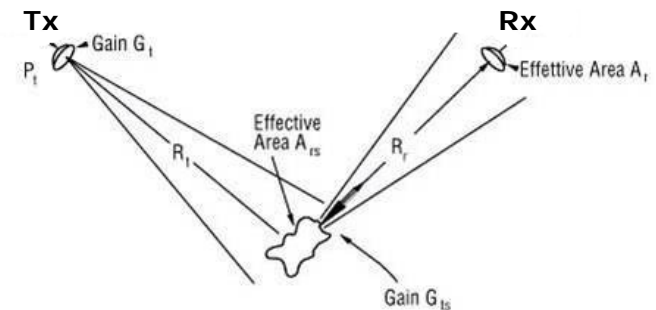
## RADAR MONOESTÁTICO

A configuração mais comum de um sistema de radar, com o receptor do radar no mesmo local do transmissor. Neste sistema, superfícies de alcance constantes são esferas com centro no radar, e somente a componente radial da velocidade do alvo causa uma mudança na frequência Doppler



## RADAR BIESTÁTICO

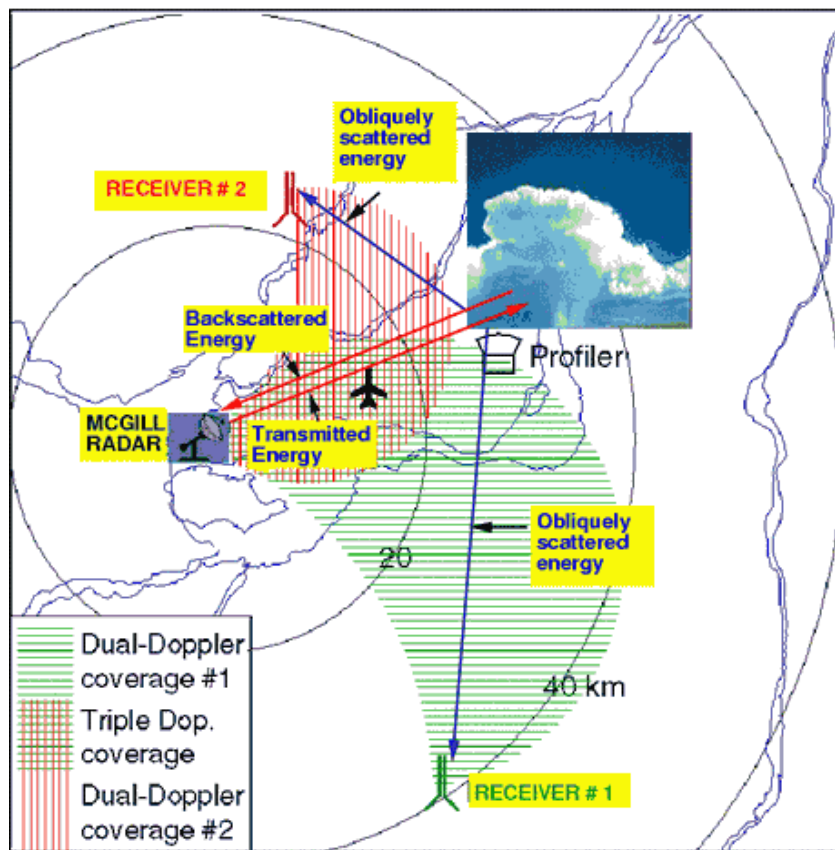
Uma configuração de sistema de radar com o receptor localizado em um local diferente do transmissor. Neste sistema, superfícies de alcance constante são elipsóides com os focos localizados nas posições do transmissor e receptor, e a componente da velocidade do alvo induz uma mudança na frequência Doppler é a componente normal aos elipsóides.





PRINCÍPIOS DE RADAR

# EXEMPLO DE RADAR BIESTÁTICO





PRINCÍPIOS DE RADAR

O conceito do receptor biestático para radar meteorológico foi desenvolvido por Joshua Wurman no National Center for Atmospheric Research.

Nesse sistema, um simples e tradicional radar monoestático transmite um feixe estreito e recebe radiação espalhada de volta enquanto um ou mais receptores biestáticos passivos recebem de forma oblíqua a radiação espalhada.

Devido à multiplicidade de ângulos de vistas, diversos componentes do vento podem ser medidos simultaneamente. Isto permite a possibilidade de se medir um perfil 3-D com um único sistema de radar.

Como parte de um esforço colaborativo entre a Universidade de Oklahoma, o pessoal do NCAR, e McGill, nós operamos dois receptores biestático, um instalado a 40km sudeste do radar e o outro a 23km nordeste.

Ambos receptores estão ajustados para receber radiação espalhada de forma oblíqua do sistema de banda S em um ângulo de aproximadamente  $70^\circ$ . Esta configuração permite cobertura múltipla de Doppler cobrindo o Greater Montreal, incluindo o aeroporto Dorval.

A combinação de um sistema principal de radar com receptores biestáticos é usada para auxiliar nosso trabalho de recuperação, ambos como verificação de um único radar dos perfis de vento assim como para a termodinâmica.

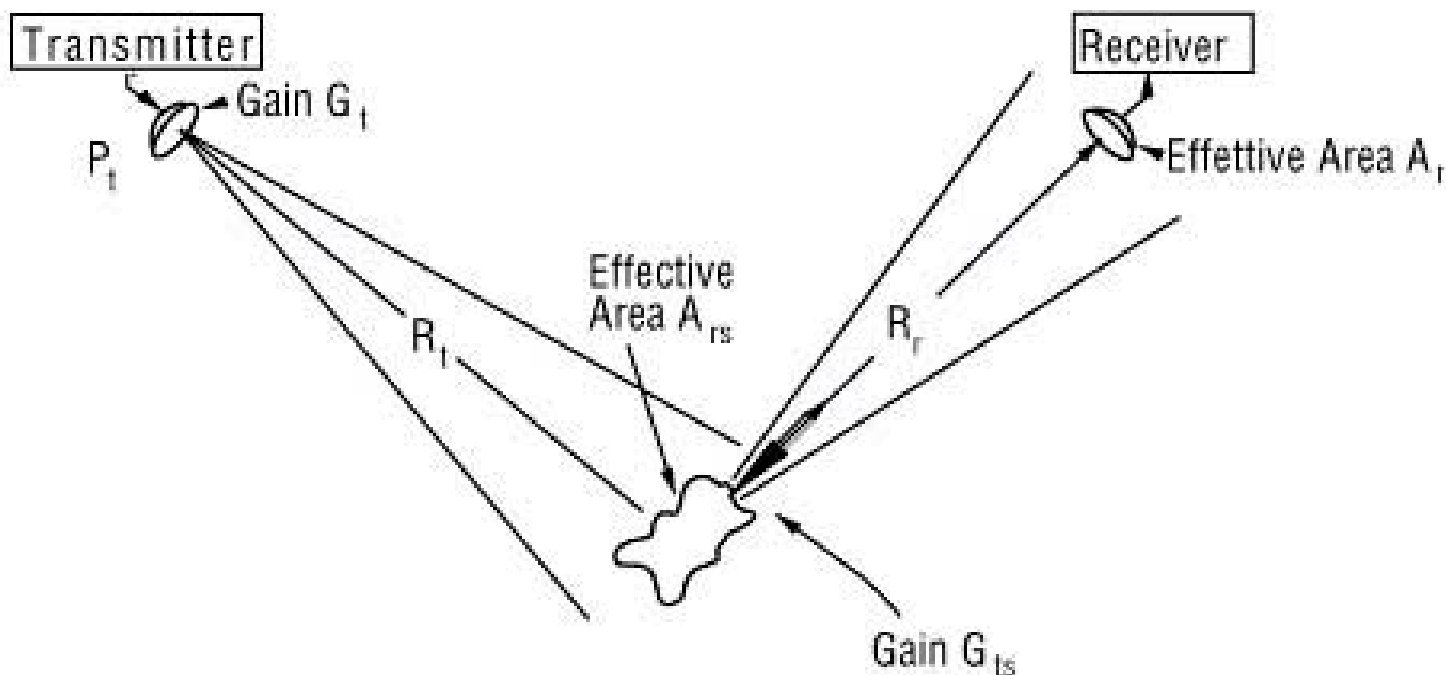
Além disso, a excelente cobertura sobre o aeroporto poderia melhorar a detecção de tempo severo que assustam as linhas aéreas como downbursts.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## DENSIDADE DE FLUXO DE ENERGIA INCIDENTE EM UM ALVO

Considere um sistema de radar iluminando um alvo distante, como na figura seguinte. Assume-se que o alvo está longe o suficiente para permitir que a onda incidente é uma onda plana. Assume-se também que o alvo é pequeno o suficiente podendo ser considerado como um alvo ponto. Assume-se que a onda incidente é linearmente polarizada.





PRINCÍPIOS DE RADAR

A relação fundamental entre as características do radar, o alvo, e o sinal recebido é chamada de relação fundamental.

A geometria de espalhamento de um alvo de radar isolado (espalhador) é mostrado na figura, com os parâmetros que estão na equação do radar.

Quando uma energia  $P_t$  é transmitida por uma antena com ganho  $G_t$ , a energia por unidade de ângulo sólido na direcção do espalhador é  $P_t G_t$ , onde o valor de  $G_t$  naquela direcção é usado.

No espalhador,

$$S_s = (P_t G_t) \left( \frac{1}{4\pi R^2} \right)$$

Onde  $S_s$  é a densidade de energia no espalhador. O ganho efetivo  $G_t$  da antena transmissora do radar é definido como a razão do fluxo de energia em questão incidente no alvo, e a densidade do fluxo de energia se não houvesse nenhuma perda, se uma antena omnidirecional fosse usada.

Perda do espalhamento

$$\dots \frac{1}{4\pi R^2} \dots$$

é a redução na densidade de energia associada com o espalhamento da energia sobre uma esfera de raio  $R$  n power density associated with spreading of the power over a sphere of radius  $R$  ao redor da antena.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Para obter a energia total interceptada pelo espalhador, a densidade de energia deve ser multiplicada pela área efetiva de recepção do espalhador.

$$P_{rs} = S A_{rs}$$

Note que a área efetiva  $A_{rs}$  não é a área do feixe incidente interceptada pelo espalhador, porém é a área efetiva;

i.e., é a área do feixe incidente da qual toda energia seria removida se fosse assumido que toda a energia ao longo do feixe fosse ininterrupta.

O valor real de  $A_{rs}$  depende na efetividade do espalhador como uma antena receptora.

Uma parte da energia recebida pelo espalhador é absorvida e perdida, a não ser que o espalhador seja um perfeito condutor ou um perfeito isolante; o resto é radiado em várias direções. A fração absorvida é  $f_a$ , então a fração radiada é  $1 - f_a$ , e a energia total radiada é

$$P_{ra} = P_{rs}(1 - f_a)$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

A condução e disposição da corrente que flui no espalhador resulta na radiação re-emitida que tem um padrão (como um padrão da antena). Note que a área de recebimento efetiva do espalhador é função da sua orientação relativa ao feixe incidente, então entende-se de  $A_{rs}$  na equação acima que deve ser aplicado somente para a direção do feixe incidente.

O padrão da radiação re-emitida talvez não seja o mesmo como o padrão  $A_{rs}$ , e o ganho na direção do receptor é o valor relevante no padrão de re-emissão da radiação.

Então,

$$S_r = P_{ts} G_{ts} \frac{1}{4\pi R_r^2}$$

onde  $P_{ts}$  é a potência total re-emitida,  $G_{ts}$  é o ganho do espalhador na direção do receptor, e

$$\frac{1}{4\pi R_r^2}$$

é o fator de espalhamento da radiação re-emitida





PRINCÍPIOS DE RADAR

Note que a maior diferença entre o link de comunicação e o espalhamento do radar é aquela que o link de comunicação tem apenas um fator de espalhamento, enquanto o radar tem dois.

Então, se  $R_r = R_t$ , a distância total é  $2R_t$ ;

para um link de comunicação com esta distância, o fator de espalhamento é somente:

$$1/4 \left( \frac{1}{4\pi R_t^2} \right)$$

visto que para o radar é:

$$\left( \frac{1}{4\pi} \right)^2 \left( \frac{1}{R_t} \right)^4$$

Então, a perda por espalhamento para um radar é muito maior que para um link de comunicação com o mesmo comprimento total de caminho.



PRINCÍPIOS DE RADAR

A energia entrando no receptor é: (5)  $P_r = S A_r$ .

onde a área  $A_r$  é a abertura efetiva da antena receptora, não a área real.

Não apenas nessa função de direção, mas também na função da impedância de carga o receptor fornece para a antena;

por exemplo,  $P_r$  teria que ser zero se a carga fosse um curto circuito ou um circuito aberto.

Os fatores na eq. 1 através da eq. 5 podem ser combinados e obtém-se:

$$\begin{aligned}
 (6) \\
 P_r &= (P/G) \left( \frac{1}{4\pi R_s^2} \right) A_r (1 - f_{sp}) G \left( \frac{1}{4\pi R_r^2} \right) A_r \\
 &= \left( \frac{P G A_r}{(4\pi)^2 R_s^2 R_r^2} \right) [A_r (1 - f_{sp}) G]
 \end{aligned}$$

Os fatores associados com o espalhador são combinados dentro dos parênteses, termos elevados ao quadrado.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Esses fatores são difíceis de serem medidos individualmente, e sua contribuição relativa não são interessantes para quem deseja saber o tamanho do sinal recebido pelo radar. Então, eles são normalmente combinados em um fator apenas, a seção transversal do espalhamento do radar:  
(7)

$$\sigma = A_{\text{e}}(1 - f_{\text{a}})G_{\text{e}}$$

A seção transversal do radar é a medida da natureza e do tamanho do alvo. Isso caracteriza o alvo de uma maneira que é especialmente usada para calcular a energia do eco esperada do alvo.

A seção transversal  $\sigma$  é a função das direções da onda incidente e da onda em direção ao receptor, assim como a forma do espalhador e propriedades dielétricas.

A forma final da equação do radar é obtida reescrevendo a eq. 6 usando a definição da eq. 7:

(8)

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \sigma$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

A situação mais comum é aquela para qual locais de transmissão e recepção são os mesmos, então as distâncias do transmissor e receptor são as mesmas.

Quase tão comum é o uso da mesma antena para transmitir e receber, então os ganhos e as aberturas efetivas são os mesmos, isto é:

$$\begin{aligned}R_t &= R_r = R \\G_t &= G_r = G \\A_t &= A_r = A\end{aligned}$$

Como a área efetiva da antena está relacionada com seu ganho:  
(9)

$$A = \frac{\lambda^2 G}{4\pi}$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

reescrevendo a equação do radar, tem-se  
(10)

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} = \frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 R^4}$$

aonde duas formas são dadas, uma em termos do ganho da antena e a outra em termos da área da antena.

As equações do radar (eq. 8 and eq. 10) são equações gerais para ambos alvos, pontuais e de área.

Isto é, a seção transversal de espalhamento não é definida em termos de nenhuma característica de um tipo de alvo, porém da sua seção transversal de espalhamento.

A forma da equação 10 é para o radar monoestático, e a eq. 8 para o radar biestático, contudo também pode ser usada para um radar monoestático quando as condições para R, G, A dadas acima forem satisfeitas.



PRINCÍPIOS DE RADAR

$$P_r = \frac{P_t G^2 \theta^2 H \pi^3 K^2 L}{1024 (\ln 2) \lambda^2} \times \frac{Z}{R^2}$$

Abaixo está a lista das variáveis, o que elas são, e como são medidas.

- Pr:** Energia média de retorno de um alvo para o radar. O radar envia mais de 25 pulsos e então mede a energia média que é recebida nos retornos. O radar usa pulsos múltiplos já que o pulso de retorno varia para alvos meteorológicos. Este é um valor desconhecido do radar, porém é diretamente calculado.
- Pt:** Energia de pico transmitida pelo radar. Este é um valor conhecido pelo radar. É importante conhecê-lo, pois a energia média de retorno é diretamente relacionada a energia transmitida.
- G:** Ganho da antena do radar. Este é um valor conhecido pelo radar. Esta é uma medida da habilidade da antena de focar. This is a measure of the antenna's ability to focus a energia que parte para dentro do feixe. A energia recebida e um dado alvo é diretamente relacionada ao quadrado do ganho da antena.
- $\theta$ :** Largura do feixe angular do radar. Este é um valor conhecido pelo radar. Através da equação de Probert-Jones pode ser aprendido que a energia de retorno está diretamente relacionada com o quadrado da largura do feixe angular. O problema se dá, quando assume-se a equação, é que a precipitação enche o feixe dos radares com feixes mais largos que dois graus. Uma suposição inválida para qualquer radar meteorológico de longa distância. A resolução baixa para grandes distâncias é chamado de problema de razão de aspecto.



PRINCÍPIOS DE RADAR

- H:** Comprimento do pulso do radar. Este é um valor conhecido do radar. A energia recebida de um alvo meteorológico está diretamente relacionada com o comprimento do pulso.
- K:** Este é uma constante física. Este é um valor conhecido do radar. Esta constante se baseia na constante dielétrica da água. Esta é uma suposição que tem que ser feita, mas também pode causar alguns problemas. A constante dielétrica da água é aproximadamente um, o que significa que possui uma boa refletividade. O problema ocorre quando alvos meteorológicos não compartilham dessa mesma refletividade. Alguns exemplos disso são a neve e dry granizo, já que suas constantes estão em torno de 0.2.
- L:** Este é o fator de perda do radar. Este é uma valor calculado para compensar a atenuação pela precipitação, gases atmosféricos e limitações da detecção do receptor. A atenuação por precipitação é uma função da intensidade da precipitação e o comprimento de onda. Para gases atmosféricos, é uma função do ângulo de elevação, alcance, e comprimento de onda. Como a perda é de 2dB, todos sinais estão acima de 2dB.
- $\lambda$  : Este é o comprimento de onda da energia transmitida. Este é um valor conhecido do radar. A quantidade de energia retornada de uma precipitação é inversamente já que comprimento de onda curto estão sujeitos à atenuação significativa. Quanto maior o comprimento de onda, menor será a atenuação causada pela precipitação.



PRINCÍPIOS DE RADAR

- Z:** Este é o fator de refletividade do precipitante. Este é um valor que é resolvido matematicamente pelo radar. O número de gotas e seu tamanho afetam esse valor. Este valor pode causar problemas, pois o radar não consegue determinar o tamanho do precipitante. O tamanho é importante já que o fator de refletividade do alvo precipitante é determinado elevando o diâmetro de cada gota num volume de amostra à sexta potência e então somando todos esses valores juntos.  $\frac{1}{4}$ " de gota reflete a mesma quantidade de energia que  $64 \frac{1}{8}$ " de gota, mesmo tendo 729 vezes mais líquido.
- R:** Este é o alcance do alvo precipitante. Este valor pode ser calculado medindo o tempo que o sinal leva para retornar. O alcance é importante já que a potência média de retorno de um alvo é inversamente relacionada com o quadrado do alcance do radar. O radar tem que normalizar a potência de retorno para compensar a atenuação do alcance.





PRINCÍPIOS DE RADAR

# Mínimo Sinal Detectável



PRINCÍPIOS DE RADAR

# IMPLICAÇÕES DE RUÍDO NO RECEPTOR DO RADAR

O receptor do radar é limitado em sua habilidade de detectar um sinal de eco pela energia de ruído a qual ocupa a mesma porção do espectro de frequência como o sinal.

O sinal de ruído mais fraco que um radar pode detectar é referido como o sinal mínimo detectável (SMD). O SMD pode ser de difícil especificação, pois é uma quantidade estatística e o critério para declarar a detecção pode variar em diversas circunstâncias.

Detecção é usualmente baseada na estabilização de um ponto inicial no receptor do radar. Se o ponto inicial é muito alto, então sinais fracos ou ecos podem ser perdidos.

Por outro lado, se o ponto inicial é configurado muito baixo, então ruídos detectados pelo radar serão como alvos e alarmes falsos serão dados. O ruído presente no receptor do radar limita sua sensibilidade.

O receptor é sensível ao alcance das frequências transmitidas e fornece uma amplificação do sinal de retorno.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Com o objetivo de fornecer o maior alcance, o receptor deve ser muito sensível sem introduzir ruído excessivo. A habilidade de discernir um sinal recebido de um ruído de plano de fundo depende da razão sinal-ruído (S/N).

O ruído de plano de fundo é especificado por um valor médio, chamado de potência equivalente de ruído (PER). Isto diretamente iguala o ruído a um nível detectável de potência para que possa ser comparado com o retorno. Usando essas definições, o critério para uma detecção bem sucedida é

$P_r > (S/N) \text{ PER}$ , aonde  $P_r$  é a potência do sinal de retorno. Como isso é uma quantidade significativa na determinação do desempenho do radar, é dado uma designação única,  $S_{\text{min}}$ , e é chamada de *Sinal Mínimo para Detecção*.

$$S_{\text{min}} = (S/N) \text{ PER}$$

Como  $S_{\text{min}}$ , expresso em Watts, é usualmente um número pequeno, tem sido provado sua utilização para definir o equivalente em decibel, *Mínimo*

*Sinal Discernível* (MSD)

$$\text{MSD} = 10 \text{ Log } (S_{\text{min}}/1 \text{ mW})$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

## MSD e ALCANCE

Então há um ponto inicial inferior com habilidade de detecção de ecos.

Para a maioria dos radares, o MSD é em torno de 15 dBZ para um sinal a 100 km para a signal at 100 km. Isto significa que uma tempestade mais fraca que 15 dBZ a 100 km, não será detectada pelo radar.

Se uma tempestade está mais perto que 100km do radar com intensidade abaixo de 15 dBZ, talvez seja detectada.

Se a tempestade está mais longe que 100km, o ponto inicial aumenta para mais de 15 dBZ. A razão para isso, é a expansão do feixe do radar com o alcance, que reduz a potência incidente em hidrometeoros, enquanto que distâncias extendidas de volta para o radar enfraquecem o sinal ainda mais.

Um termo de correção de alcance é feito na equação do radar, mas o menor ponto inicial do receptor finalmente determina se a tempestade será observada ou não.

A implicação para o usuário é para ser **cognitive** do fato de tempestades fracas não são geralmente detectadas a longos alcances. Isto tem um impacto na observação da chuva em geral a um longo alcance do radar. Geralmente existe chuva fraca em longos alcances, mas não é detectado pelo radar.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# A CONVERSÃO Z-R

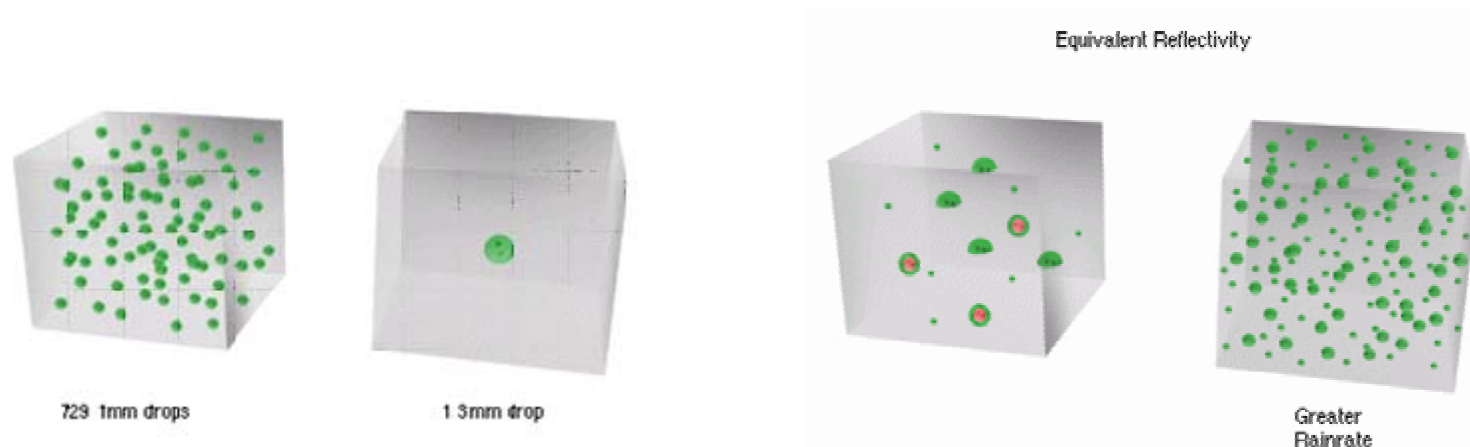


PRINCÍPIOS DE RADAR

## DERIVANDO CHUVA DA REFLETIVIDADE

Taxas de chuva ( $R$ ) são diretamente relacionadas com a distribuição do tamanho da gota da precipitação, baseado no cúbico do diâmetro.

Refletividade ( $Z$ ) está diretamente relacionada com a distribuição do tamanho da gota da precipitação, baseado na sexta potência do diâmetro.



Se a distribuição do tamanho da gota fosse conhecida, a relação entre  $Z$  e  $R$  poderia ser calculada. Isso não é conhecido, portanto não há como definir uma única relação entre  $Z$  e  $R$ . Ao invés, relações empíricas foram desenvolvidas.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DA GOTA

A frequência de distribuição do tamanho de gotas (diâmetros, volumes) que é característico de uma dada nuvem ou de uma dada chuva.

Nuvens mais naturais tem distribuições unimodal (máximo simples), mas ocasionalmente distribuições bimodal são observadas.

Em nuvens convectivas, a distribuição do tamanho da gota pode variar com o tempo e sistematicamente com a altura, o tamanho modal aumenta e o número diminui com a altura.

Para muitos propósitos a utilização de um simples parâmetro representando a distribuição dada é o diâmetro mediano de volume, que é, o diâmetro para qual o volume total de gotas com diâmetros maiores é igual ao volume total de gotas com diâmetros menores.

A distribuição do tamanho de gotas é um dos fatores primários envolvidos na determinação da refletividade do radar de qualquer precipitação, ou massa de nuvem.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# ESPECTRO DE GOTA

Para um espectro de gota representado por uma função gamma normalizada

$$N(D) \equiv N_w f(\mu) \left(\frac{D}{D_0}\right)^\mu \exp\left[-\frac{3.67 \mu D}{D_0}\right]$$

$$f(\mu) \equiv \frac{6}{3.67^4} \frac{3.67 \mu^{\mu+4}}{\Gamma(\mu+4)}$$

$D_0$  = Tamanho equivolumétrico mediano da gota

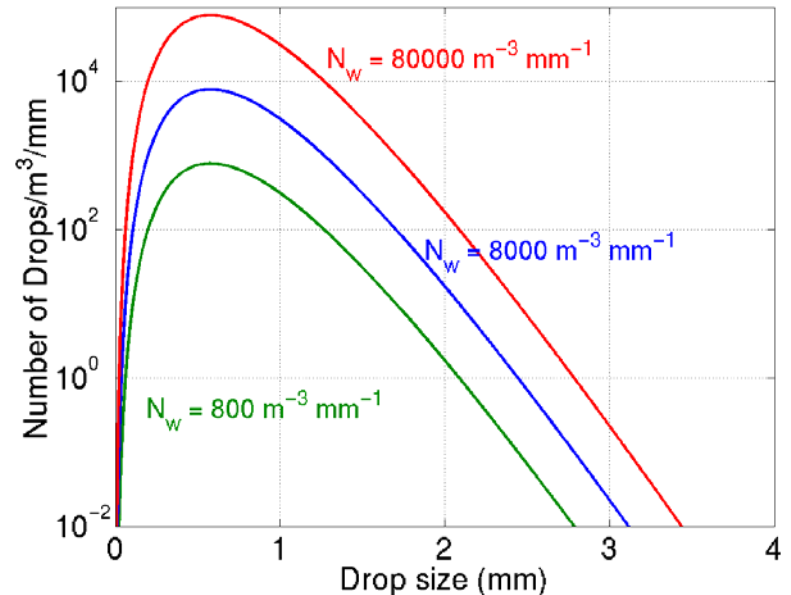
$N_w$  = Concentração normalizada

$\mu$  = largura do espectro

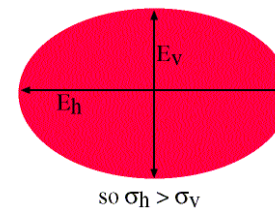
Para cada  $Z_{dr}$  calcula-se  $Z$  for  $R=1$  mm/h  
 $\text{dBZ} (1\text{mm/hr}) = f(Z_{dr})$

Aumento  $N_w$ , ambos  $R$  e  $Z$  escalam com  $N_w$ ,

$$\text{dBR} = \text{dBZ}(\text{obs}) - f(Z_{dr})$$



bigger drops become more oblate





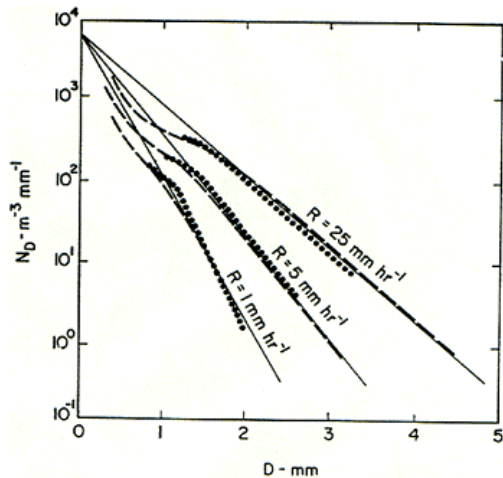


PRINCÍPIOS DE RADAR

Assim, a taxa de chuva (em profundidade por tempo) é dada por

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} u(D) D^3 n(D) dD$$

Para a distribuição Marshall-Palmer a equação é



$$n(D) = N_0 \exp(-\Lambda D)$$

$$R = \frac{\pi}{6} N_0 \int_0^{\infty} u(D) D^3 \exp(-\Lambda D) dD$$



PRINCÍPIOS DE RADAR

O tamanho da gota tem um importante efeito na atenuação e refletividade do tempo. E dependendo da taxa de precipitação, pode haver algum grau de confiança que determinados volumes de tamanho de gota será encontrado na nuvem.

Quando isto é conhecido, a refletividade desses tipos de gotas podem ser estimados e comparativamente pela refletividade a taxa de precipitação pode ser estimada. A tabela seguinte ajuda a ilustrar.

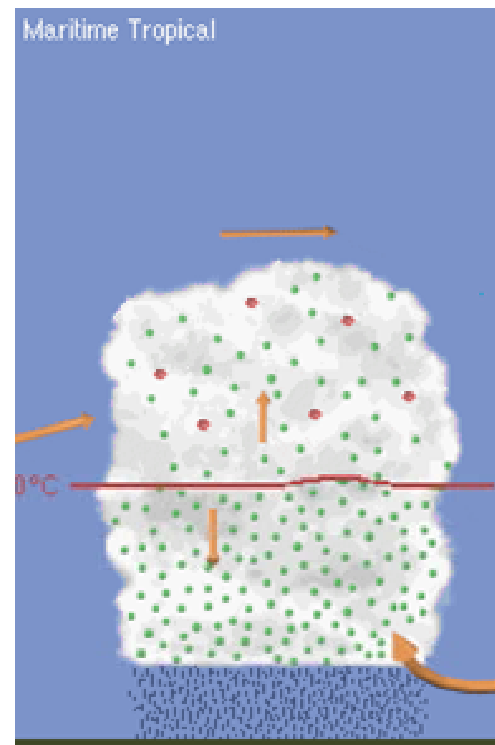
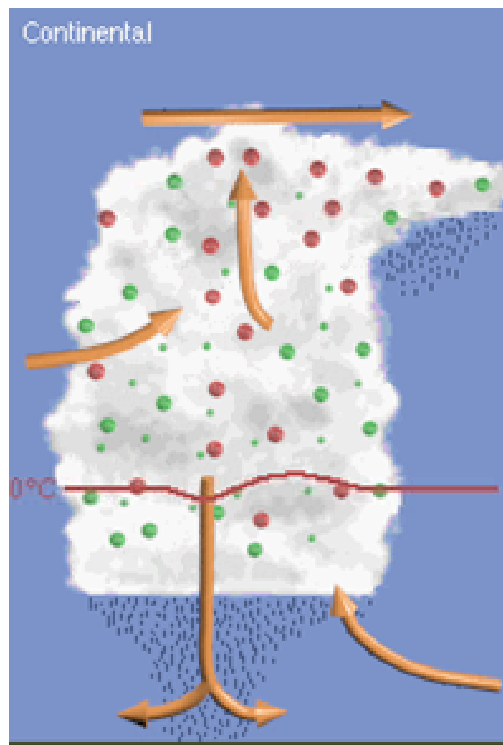
A porcentagem esperada para gotas de tamanhos específicos por taxa de precipitação está mostrada abaixo.

Diâmetro da gota (D - cm)	Taxa de precipitação (mm/hr)			
	0.25	1.25	2.5	12.5
	Porcentagem de um volume dado com gotas de diâmetro D			
0.05	28.0	10.9	7.3	2.6
0.10	50.1	37.1	27.8	11.5
0.15	18.2	31.3	32.8	24.5
0.20	3.0	13.5	19.0	25.4
0.25	0.7	4.9	7.9	17.3
0.30	-	1.5	3.3	10.1
0.35	-	0.6	1.1	4.3



PRINCÍPIOS DE RADAR

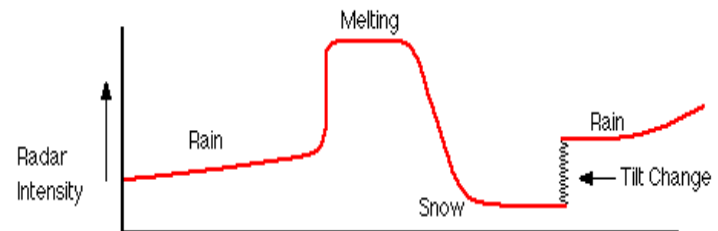
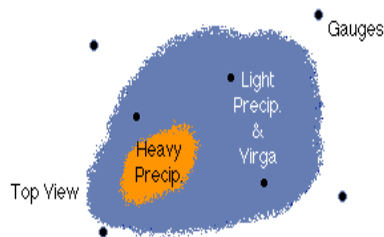
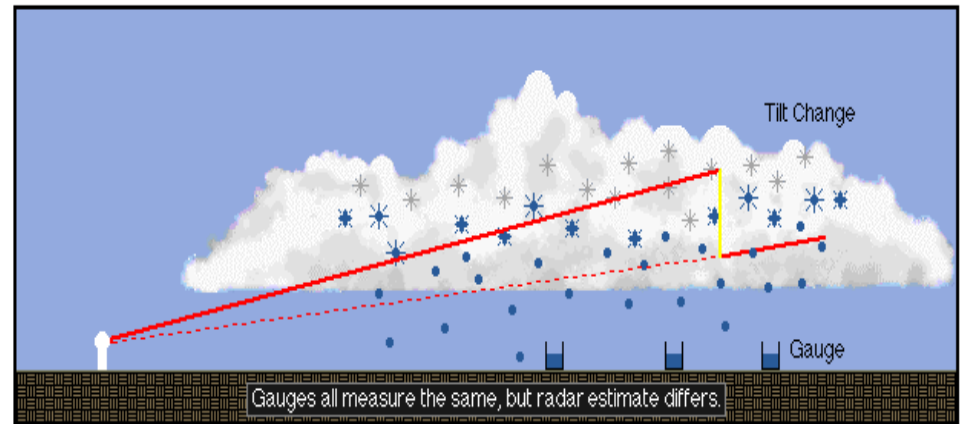
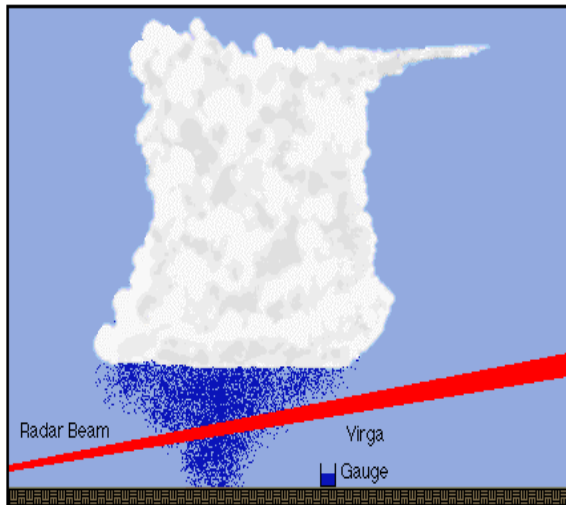
## ESPECTRO DE GOTA TÍPICO DE UMA NUVEM





PRINCÍPIOS DE RADAR

# RADAR x RAINGAUGE





PRINCÍPIOS DE RADAR

# REFLETIVIDADE DO RADAR

Em geral, a medida de eficiência do radar é a interceptação do alvo e o retorno da energia ao radar.

Depende do tamanho, do formato, aspecto, e propriedades dielétricas do alvo. Inclui não somente os efeitos da reflexão, mas do espalhamento e da difração.

Em particular, a refletividade de um alvo meteorológico depende dos seguintes fatores:

- o número de hidrometeoros por unidade de volume;
- os tamanhos dos hidrometeoros;
- o estado físico dos hidrometeoros (gelo ou água);
- o formato ou formatos dos elementos individuais do grupo; e
- se assimétrico, seu aspecto em relação ao radar. A refletividade do radar tem dimensões de área por unidade de volume (e.x.,  $\text{cm}^2\text{m}^3$ , ou, mais comumente,  $\text{cm}^1$  or  $\text{m}^1$ ) e é definido por

$$\eta = \sum_i N_i \sigma_i,$$

onde  $N_i$  é o número de hidrometeoros por unidade de volume com secção transversal de retroespalhamento  $\sigma_i$ , e a soma de todos os hidrometeoros em uma unidade de volume.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Para hidrometeoros esféricos pequenos o suficiente comparados com o comprimento de onda, para a aproximação de espalhamento Rayleigh ser válida, a secção transversal do radar é relacionado com o tamanho da partícula por

$$\sigma = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4}, \quad K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2},$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $D$  o diâmetro do hidrometeoro, e  $K$  o fator dielétrico definido por

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_{i=1}^n D_i^6 \quad Z = \sum_{i=1}^n D_i^6$$

onde  $m$  é o índice complexo de refração do hidrometeoro.

Para bandas do radar L a X água tem  $|K|^2 = 0.93$  e para o gelo  $|K|^2 = 0.2$



PRINCÍPIOS DE RADAR

A intensidade do sinal de retorno (**eco do radar**) recebido pelo radar depende não somente da intensidade da chuva, mas também na distância da chuva para o radar, e na sensibilidade na antena e nas partes eletrônicas do radar. O sinal recebido por uma chuva mais distante é mais fraco comparado a uma chuva mais perto do radar.

O programa do radar computa automaticamente uma correção do alcance e calibração da refletividade do equipamento, ao qual é dado o símbolo **Z**. Mas **Z** pode variar de valores extremamente grandes para chuva pesada a valores pequenos para uma mistura. Para ser possível visualizar essa variação de **Z** na tela do computador, o programa primeiramente faz o logarítmo de **Z**, o qual é expressado em unidades de decibéis (**dB**). Então, os números que geralmente são mostrados nas imagens de refletividade do radar são expressos em **dBZ**.

Valores altos de **dBZ** correspondem à chuva forte de tempestades intensas, enquanto que valores mais baixos correspondem à chuva fraca de nuvens rasas, ou retorno de insetos. A taxa de precipitação (**TP**) é definida como a razão do aumento da profundidade da água em um reengage, medido em mm/hour.

Uma relação aproximada entre **dBZ**, **TP**, e descritiva intensidade é dada na seguinte figura.

Por exemplo, uma refletividade de 40 **dBZ** corresponde a uma taxa de precipitação de **TP** = 10 mm/h, chuva moderada.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Precipitação é geralmente medida usando a relação entre o

**FATOR DE REFLETIVIDADE (Z em  $\text{mm}^6 / \text{m}^{-3}$ )**

e a

**INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO (R in  $\text{mm} / \text{hr-1}$ )**

Tabelas de refletividade são usadas nas estações e usadas como base para uma interpretação inicial e cálculos.

A intensidade de precipitação R pode ser empiricamente relacionada com o fator de refletividade Z pela expressão:

$$Z = AR^b$$

onde A e b são constantes e R é a intensidade de precipitação em mm/hr.

O fator de refletividade Z é dependente do número e tamanho das gotas de chuva por unidade de volume e tem unidade de  $\text{mm}^6/\text{m}^{-3}$ .

Vários pesquisadores têm criado uma grande variedade para os valores de A e b

O valor de A e b será específico para cada radar e sua configuração.

Um número de ambiguidades é conhecido e possível, dependendo da configuração do radar e da situação meteorológica em particular.





PRINCÍPIOS DE RADAR

## Relações ZR

Expressões típicas para tipos de precipitação

chuva estratiforme	$Z = 200R^{1.6}$
chuva orográfica	$Z = 31R^{1.71}$
tempestades	$Z = 286R^{1.37}$
neve	$Z = 2000R^2$

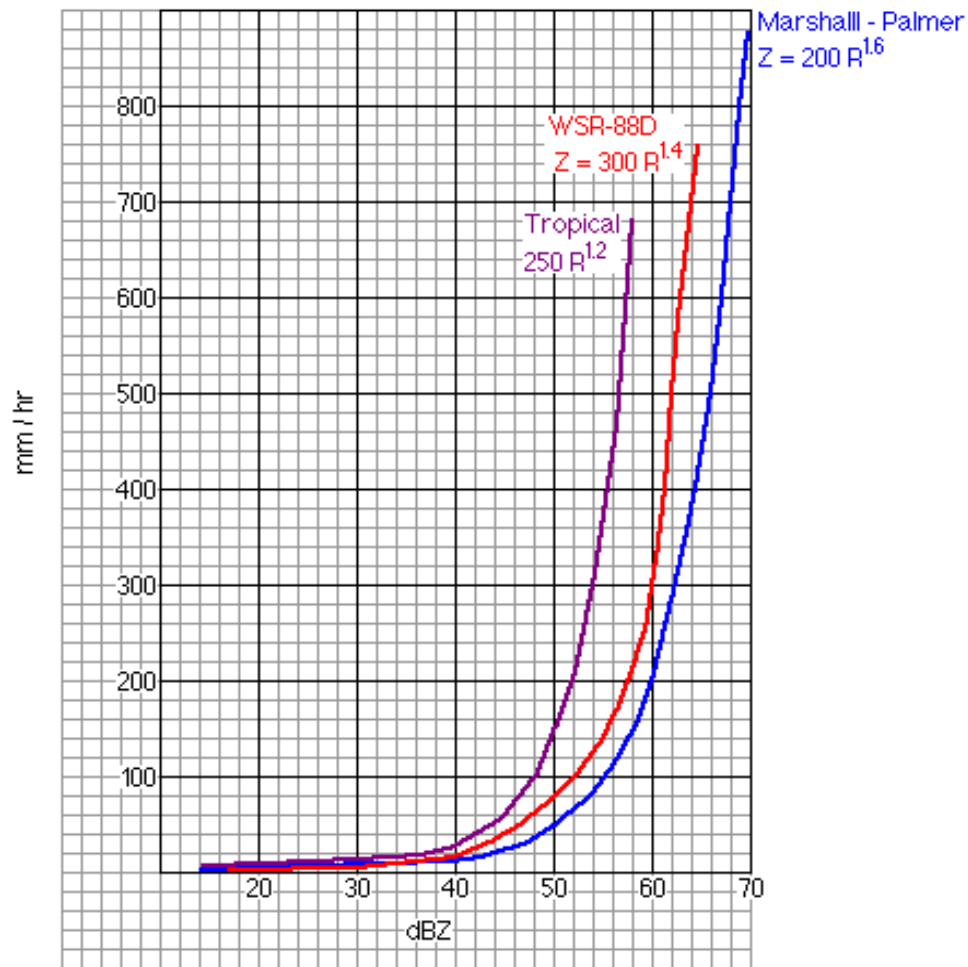
Na falta de informação é geralmente aceito, em climas de latitudes médias, o uso do valor padrão de  $Z = 200R^{1.6}$ .

Usualmente  $Z$  é especificado em uma escala logarítmica onde  $Z_{dB} = 10 \log Z$ .



PRINCÍPIOS DE RADAR

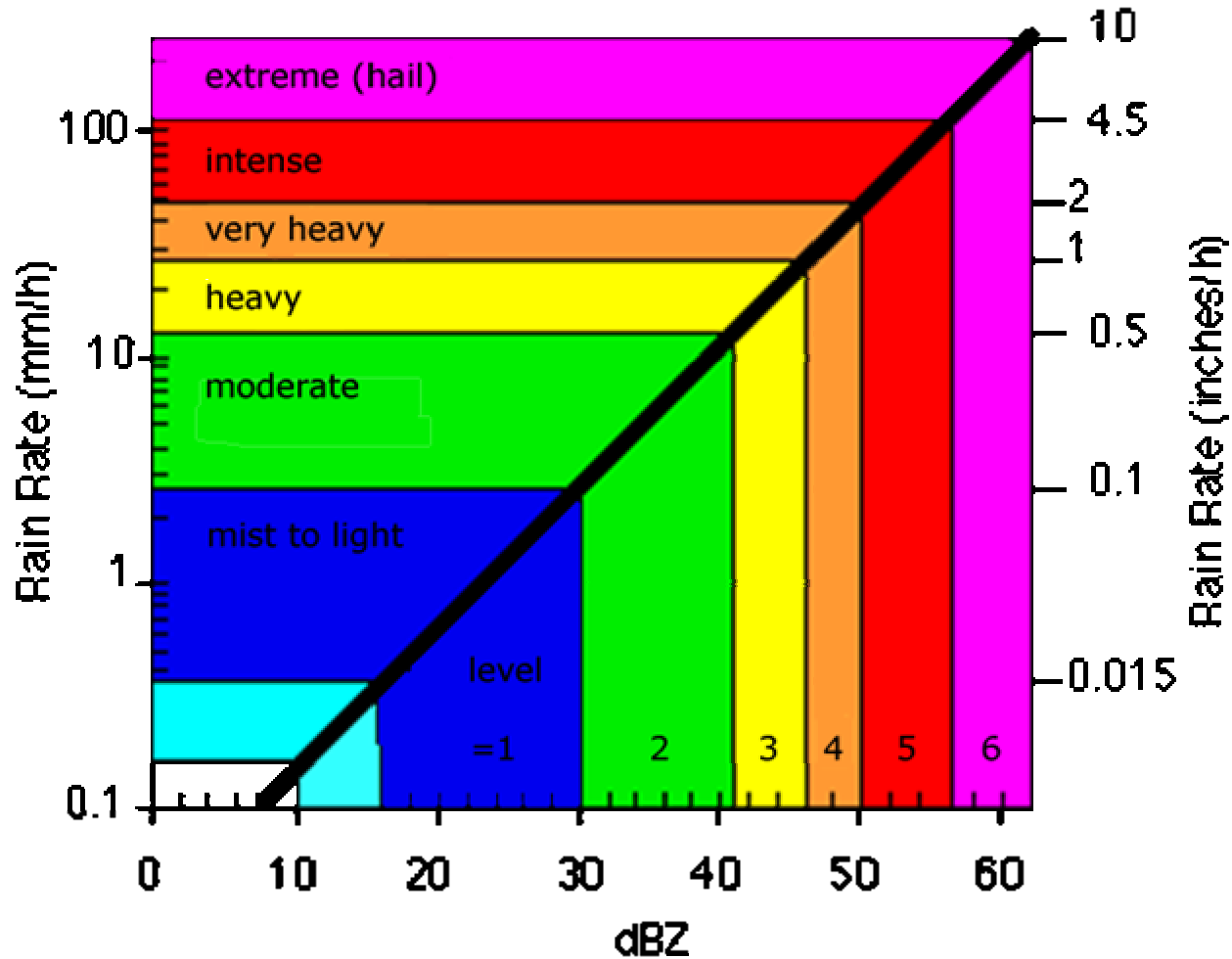
## Relações ZR





PRINCÍPIOS DE RADAR

# CATEGORIA DE PRECIPITAÇÃO





PRINCÍPIOS DE RADAR

# ATENUAÇÃO



PRINCÍPIOS DE RADAR

# ATENUAÇÃO

Atenuação é o enfraquecimento do feixe do radar quando movendo-se para baixo devido à perda de energia por espalhamento e absorção.

Quanto mais para baixo mover-se o feixe do radar mais poeira, hidrometeoros, etc o feixe do radar terá que atravessar. Devido à atenuação, tempestades próximas ao radar são mais bem amostradas que tempestades longe do radar.

Espalhamento e atenuação do feixe ambas combinadas produzem uma amostragem muito pobre de tempestades longe do radar.

A atenuação é maior quando o feixe do radar atravessa um grande número de hidrometeoros.

Tempestades e precipitação próximas ao radar degradam a sua energia antes de chegar a lugares mais distantes.

Comprimento de onda mais curto do feixe do radar atenuam mais rapidamente do que comprimentos maiores.

Por causa disso a banda C tem um alcance mais curto de alta claridade comparado com a banda S.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Integrando o lado esquerdo tem-se:

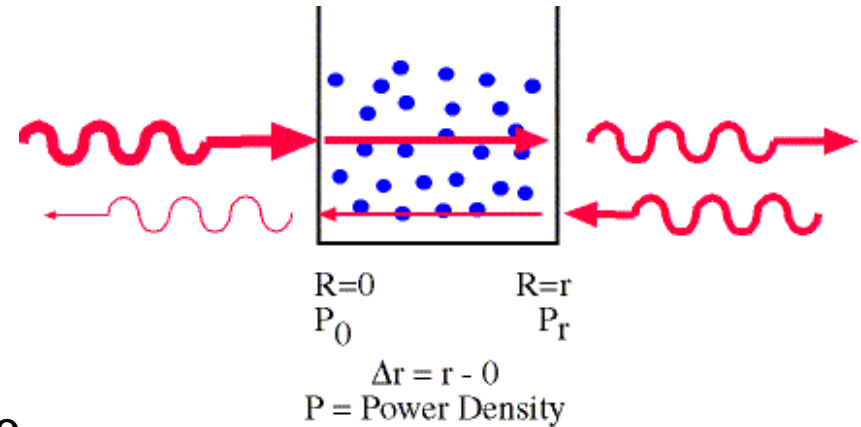
$$P_r = P_0 e^{-2 \int_0^r \kappa dr}$$

onde o termo exponencial é o **fator de atenuação** o qual será definido como:

$$\kappa = e^{-2 \int_0^r \kappa dr}$$

Substituindo na equação do radar, tem-se:

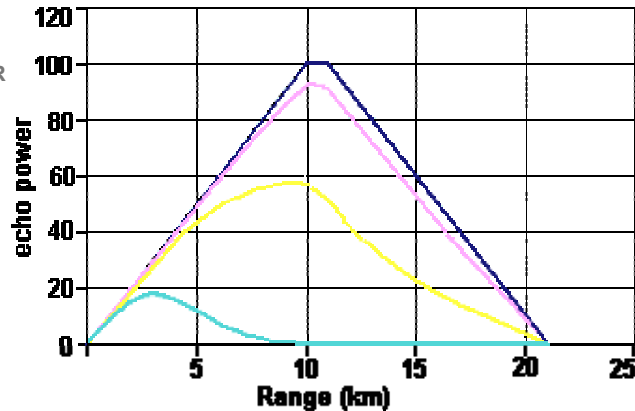
$$P_r = \frac{\pi^3 P_t G^2 \theta^2 h |k_w|^2 \kappa Z_e}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2}$$





PRINCÍPIOS DE RADAR

# ATENUAÇÃO DA CHUVA



Este gráfico mostra o efeito da atenuação da chuva para diferentes comprimentos de onda.

A curva no topo, azul, mostra o tempo não atenuado, para uma tempestade cilíndrica com 20km de diâmetro a intensidade da chuva de 100 mm/hr no centro.

A curva rosa mostra o retorno visto por um radar de banda S.

As duas próximas curvas (amarela e azul claro) mostram a saída de um radar de banda C e banda S respectivamente. Todos os resultados foram normalizados.

É óbvio que a banda X sofre atenuação e não consegue enxergar tempestades distantes, enquanto a banda S possui pouca atenuação.

Banda C oferece uma bom negócio. Por essas razões, radares de banda X são usados somente para curtas distâncias, de banda S são usados nos trópicos, pois podem ver além de tempestades severas, e de banda C é favorecido em latitudes temperadas, possuindo boa sensibilidade e alcance.



PRINCÍPIOS DE RADAR

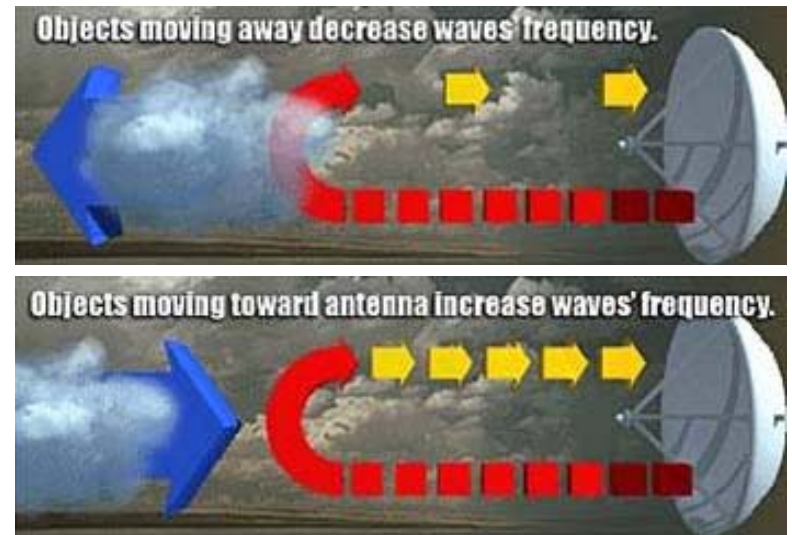
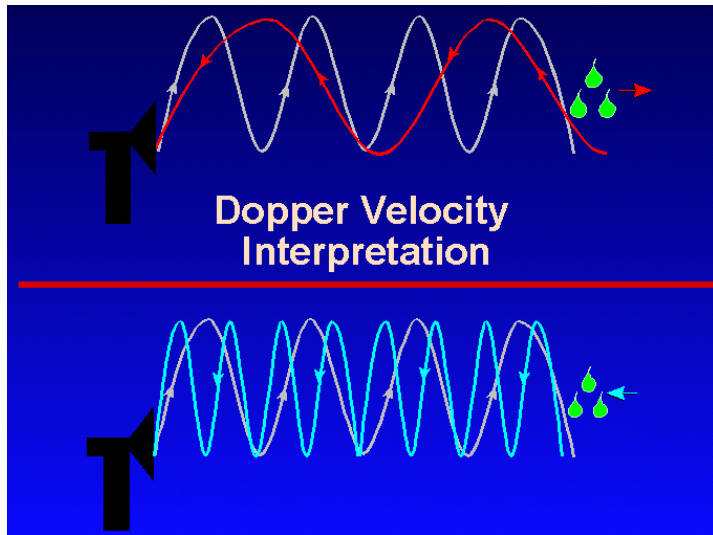
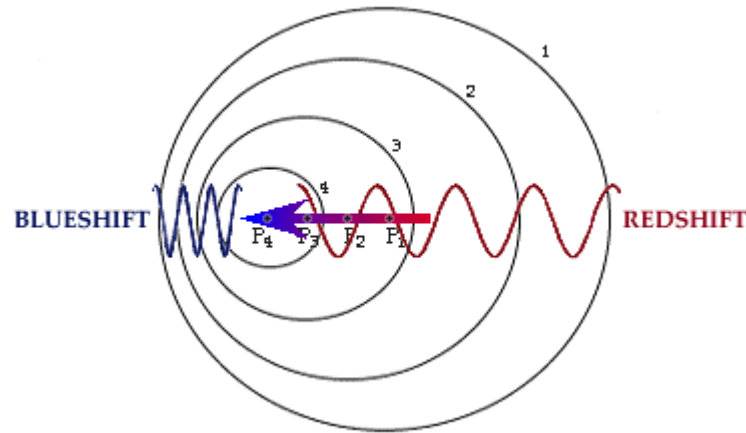
# VELOCIDADE RADIAL





PRINCÍPIOS DE RADAR

# O EFEITO DOPPLER

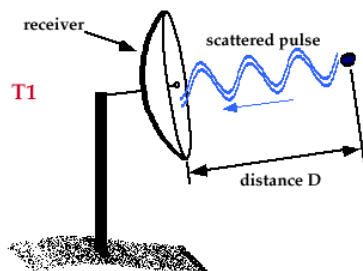




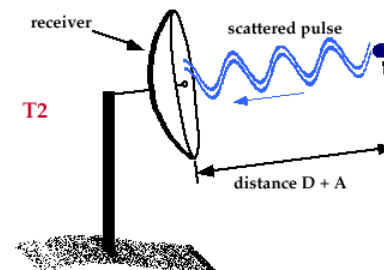
PRINCÍPIOS DE RADAR

## O RADAR DOPPLER

O radar Doppler pode medir a componente da velocidade dos alvos se aproximando ou se afastando do radar. Esta componente é chamada de "velocidade radial".



No tempo T1 um pulso é enviado em direção ao alvo e volta com a informação da distância "D".



No tempo T2, outro pulso é enviado em direção ao alvo e retorna com a informação da distância "D+A".

A distância do alvo mudou do tempo T1 para o tempo T2, resultando em uma mudança de fase entre os dois sinais de retorno, os quais o radar Doppler é capaz de medir. Conhecendo a mudança de fase, o comprimento de onda e o intervalo de tempo entre T1 e T2, a velocidade com que o alvo se moveu afastando-se ou aproximando-se do radar pode ser medida.

Se o alvo está se movendo lateralmente, ou seja, não há mudança nas distâncias medidas pelo radar, o radar informará velocidade igual a zero para o alvo.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Visualização PPI da Velocidade Radial

Medição operacional de radares de tempo Doppler consiste em diversas medidas de PPI (medidas com o ângulo de elevação constante e variando o azimute) em diferentes ângulos de elevação.

A visualização mais simples desse “volume” de dados é a projeção de um único PPI em um plano horizontal.

O valor em cada pixel é então expressado por uma certa cor, numa escala de cinza.

A distância do radar  $r$  e o ângulo de elevação do nível de PPI correspondente dará a altitude do alvo visualizado  $z = r \sin \alpha$ .

Tal visualização do campo escalar (como refletividade do radar ou intensidade da chuva) é limpo e intuitivo.

O mesmo não é verdade para o campo vetorial como da velocidade e assim, durante a interpretação do PPI, temos que lembrar que o radar Doppler não mede o vetor velocidade, mas somente a magnitude da sua componente radial.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Um radar Doppler possui a capacidade de medir algumas informações sobre o vento ( todos os radares medem utilizando a intensidade do eco) utilizando o efeito Doppler.

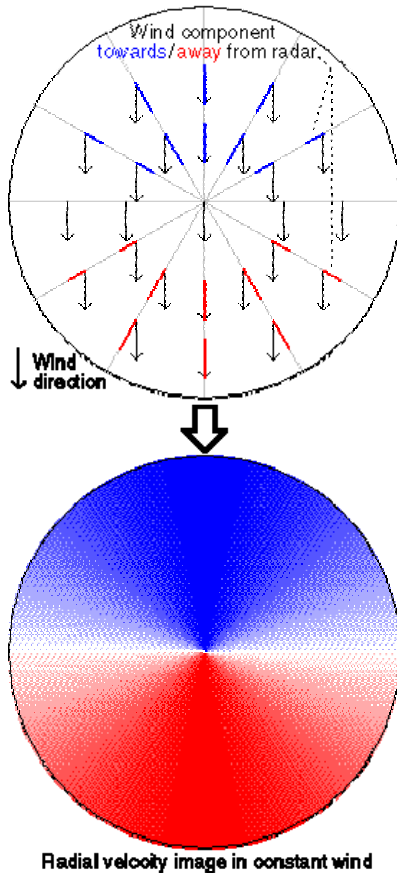
No entanto, muitos radares são "Doppler", esta informação adicional é quase nunca mostrada ao público, devido a sua difícil análise até mesmo para meteorologistas experientes.

A informação mais comum de vento medida por um radar Doppler é a velocidade radial, que é a componente do vento em direção ao radar (afastando-se ou aproximando-se).

Se tomarmos como exemplo um vento constante de norte, velocidades altas de aproximação serão observadas quando o radar olhar para norte, velocidades altas se afastando quando olhar ao sul, e velocidade igual a zero quando olhar a oeste ou leste.

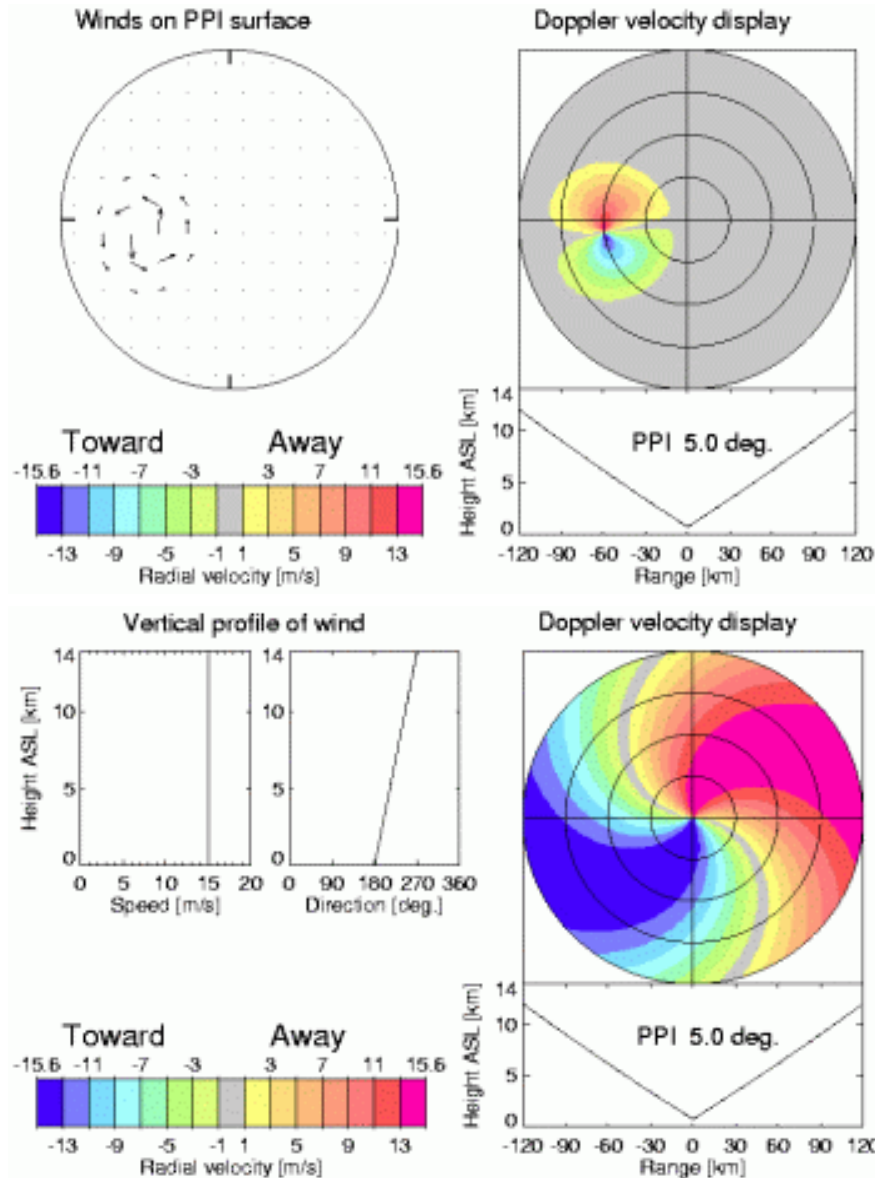
Esta informação pode então ser visualizada, geralmente usando progressivamente cores frias (por exemplo o azul) para velocidades altas se aproximando do radar e cores quentes (por exemplo o vermelho) para velocidades altas se afastando do radar.

***Isódopas zero*** – zonas de velocidade igual a zero





PRINCÍPIOS DE RADAR



## ***Simulação de campos de velocidade Doppler***

Simulações de PPI de visualizações de velocidades Doppler para diferentes campos de vento foram criadas para auxiliar a operação na interpretação de dados de Doppler no futuro.

Simulações foram feitas não somente para campos horizontais uniformes de vento, mas também para campos mais complexos, como da divergência, convergência ou rotação ciclônica ou anticiclônica.

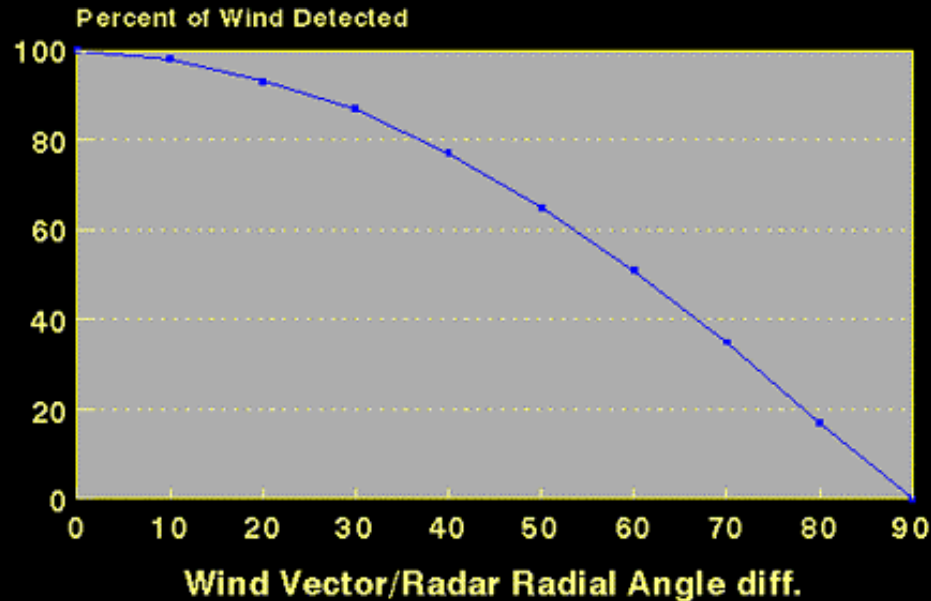
Simulações de velocidade aliased e descontinuidade frontal do campo de vento foram também realizadas.

Exemplos dessas simulações são mostradas nas figuras.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Radial Velocity vs Actual Velocity



The amount of the wind speed that a radar detects depends on the angle between the wind and the direction the antenna points.

Actual Wind	Antenna Direction (Radial)	Difference	Amount of Wind Detected
S (180°) @ 30 kts	S (180°)	0°	100 % (30 kts)
S (180°) @ 30 kts	SSW (203°)	23°	95 % (28.5 kts)
S (180°) @ 30 kts	SW (225°)	45°	70 % (21 kts)
S (180°) @ 30 kts	WSW (248°)	68°	38 % (11.4 kts)
S (180°) @ 30 kts	W (270°)	90°	0 % (0 kts)

Copyright 2000 Oklahoma Climatological Survey. Portions from the National Weather Service/Operational Support Facility.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Imagens de velocidade radial são geralmente mais complicadas devido:

- O vento é raramente uniforme;
- A área na qual informação sobre o vento pode ser obtida é limitada a regiões com alvos (como chuva, insetos, etc), pois a medida da velocidade radial é possível somente se existe um alvo que se possa medir a velocidade;
- A altura na qual o radar observa o tempo aumenta com a distância, pois o radar geralmente aponta para uma elevação acima do horizonte.

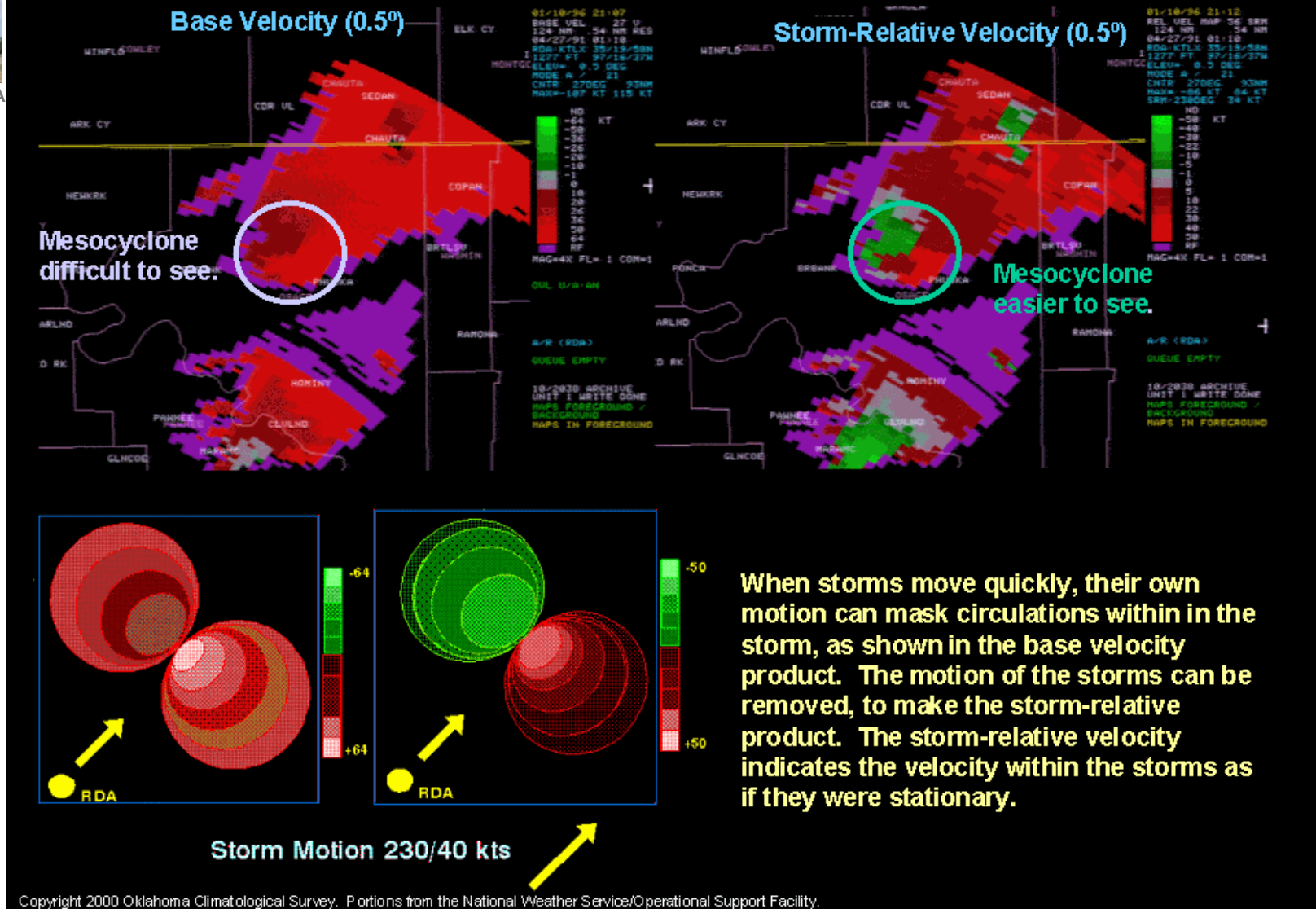
Além dessas limitações, informação Doppler é de grande valia para previsores de tempo especialmente em tempo severo onde:

- assinaturas de rotação – indicativo de risco de tornado, e
- assinaturas de divergência - indicativo de forte subsidência, quando observado próxima à superfície pode ser identificado.



PRINCÍPIOS DE RADA

## Storm-relative Velocity vs Base Velocity

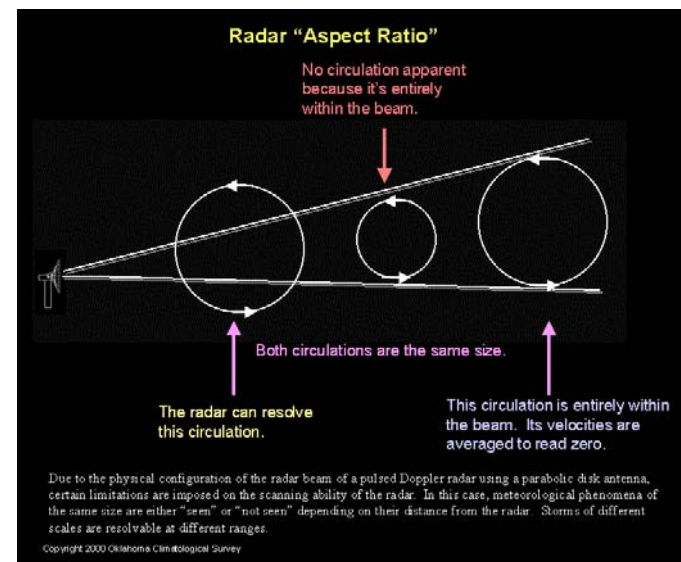
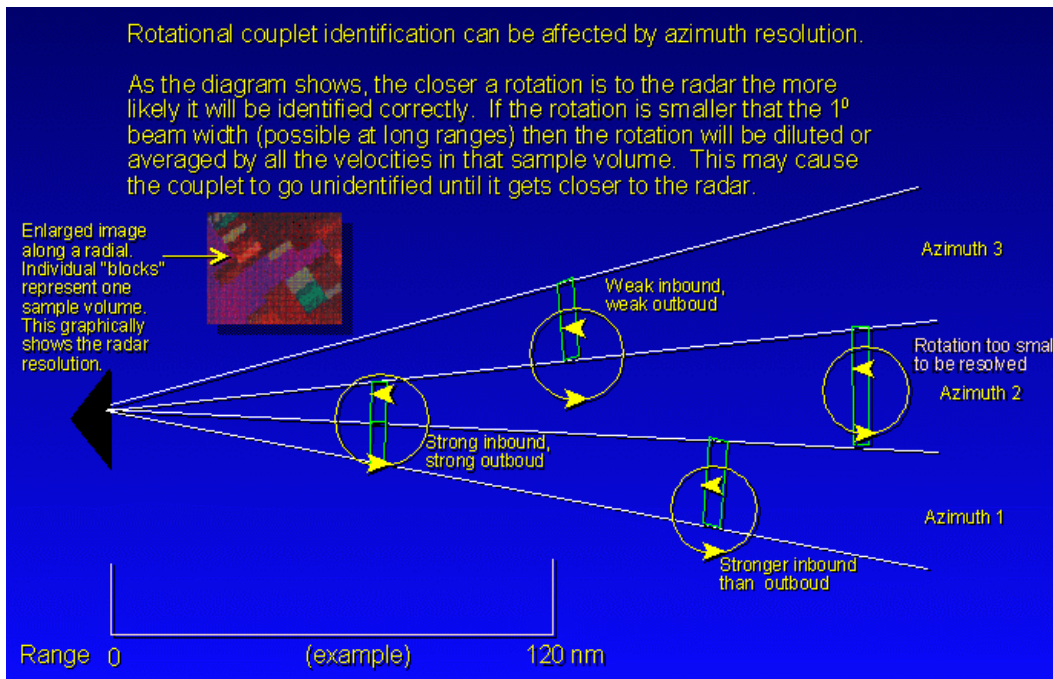






PRINCÍPIOS DE RADAR

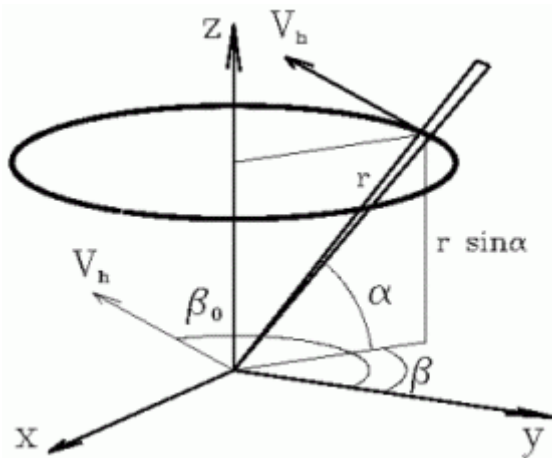
# RESOLUÇÃO AZIMUTAL



# Visualização da Velocidade Azimutal – Método VAD (VVA)



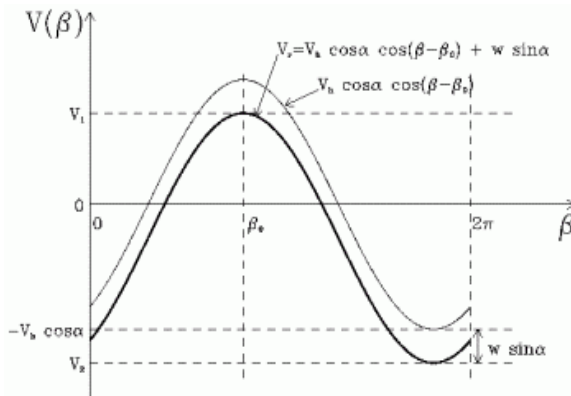
PRINCÍPIOS DE RADAR



Como vimos, o radar Doppler permite apenas a medição da componente radial da velocidade dos alvos. Em casos gerais, o movimento do ar é tridimensional e varia com o tempo e o espaço. Medidas simultâneas com três radares Doppler teriam que ser realizadas para descrever este movimento completamente, mas geralmente tem-se apenas dados de um radar Doppler. Devido a isto somos forçados a fazer suposições simplificadas na estrutura do vento observada durante a geração dos produtos do Doppler.

O caso mais simples é considerar um campo horizontal e uniforme do vento para ambas, componentes horizontal e vertical (velocidade da precipitação).

Neste caso, se fizermos medidas da velocidade em círculos centrados no radar, utilizando a varredura azimutal com ângulo de elevação constante (PPI), temos para uma distância constante do radar uma dependência senoidal da velocidade radial medida no ângulo azimutal.



A direção do vento horizontal  $\beta_0$  é dada pelos azimutes da máxima e mínima velocidade radial medida. Componente horizontal  $[V_h]$   $(v_1 - v_2) / 2 \cos \alpha$  e vertical  $[w]$  da velocidade são obtidas das velocidades máxima ( $V_1 = V_{rmax}$ ) e mínima ( $V_2 = V_{rmin}$ ) e ângulo de elevação  $\alpha$   $(v_1 + v_2) / 2 \sin \alpha$ .



PRINCÍPIOS DE RADAR

# AMBIGUIDADE DO ALCANCE-VELOCIDADE



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Alcance máximo não ambíguo ( $R_{max}$ ) vs. PRF

Uma das primeiras razões de mandar pulsos discretos de energia eletromagnética em intervalos de tempo iguais é que isso permite verificar o alcance do alvo.

O período de escuta é o tempo que o radar para de enviar o primeiro pulso até o envio do segundo pulso. Este período permite que o primeiro pulso faça uma viagem de ida e volta. Essa distância quando dividida por 2 é o alcance máximo não ambíguo ( $R_{max}$ ) do radar.  $R_{max}$  pode ser expresso matematicamente por

$$R_{max} = \frac{c\tau}{2}$$

onde  $c$  = velocidade da luz ( $\sim 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ) e  $t$  = período de escuta (s). Como a duração do pulso é muito pequena (msec) quando comparada ao PRT (msec),  $R_{max}$  pode ser expresso substituindo PRF ou PRT por  $t$ .

$$R_{max} = \frac{c}{2PRF} \quad \text{or} \quad R_{max} = \frac{cPRT}{2}$$

onde PRF = (frequência de repetição do pulso)( $s^{-1}$ ) e PRT = tempo de repetição do pulso (s) =  $1/PRF$



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Máxima velocidade não ambígua ( $V_{max}$ ) vs. PRF

Não somente  $R_{max}$  é dependente de PRF, mas também a máxima velocidade não ambígua ( $V_{max}$ ) que o WSR-88D pode determinar para um volume de alvos.

Por "não ambíguo", estamos nos referindo à habilidade do WSR-88Ds de determinar com precisão a maior velocidade radial Doppler com seu "primeiro chute" ou passar pelos dados. A relação entre  $V_{max}$  e o PRF pode ser expresso matematicamente por

$$V_{max} = \frac{\lambda PRF}{4} \quad \text{or} \quad V_{max} = \frac{\lambda}{4PRT}$$

onde PRF = frequência de repetição do pulso ( $s^{-1}$ ); PRT = tempo de repetição do pulso (s) =  $1/PRF$

e  $\lambda$  = comprimento de onda da energia transmitida

Para a PRF = 1000 pulsos/s (ou PRT = .001 s) e  $\lambda$  = 0.105 m (ou 10.5 cm),  $V_{max}$  é 26.25  $ms^{-1}$  (ou ~ 51 kt).



PRINCÍPIOS DE RADAR

# DILEMA DOPPLER

A combinação da velocidade máxima não ambígua e do alcance máximo não ambíguo forma duas **constraints** que devem ser consideradas na escolha da PRF para uso com um radar Doppler.

$$V_{max} = \frac{\lambda}{4PRT} \quad \times \quad R_{max} = \frac{cPRT}{2} \quad = \quad V_{max} R_{max} = C \lambda / 8$$

**Range folding** é a colocação do eco pelo radar em uma localização na qual o azimute está correto, porém cujo o alcance é errôneo (em uma maneira previsível). Este fenômeno ocorre quando um alvo encontra-se além do alcance máximo não ambíguo do radar ( $R_{max}$ ).

Reduzindo a frequência de repetição do pulso (PRF) e permitindo um tempo de escuta maior aliviará o problema de ambiguidade no alcance and allowing for a longer listening time will alleviate the problem of range ambiguities (or folding or aliasing).

Por exemplo, para um radar de banda S, se a PRF é 1000 Hz, o alcance máximo não ambíguo é 150 km enquanto que  $V_{max}$  é +/- 25 m/s. Para um radar de banda X, usando a mesma PRF,  $R_{max}$  continua igual a 150 km, mas  $V_{max}$  é agora somente +/- 8 m/s.

Para situações meteorológicas, velocidades maiores que +/- 50 m/s talvez tenham que ser medidas e que possam ter um alcance maior que 200 km, portanto nenhum dos limites calculados acima são completamente adequados.



PRINCÍPIOS DE RADAR

O **Dilema Doppler** é causado por restrições físicas. Uma das maneiras de trabalhar escapando desse problema é de operar com PRFs variadas, coletando informações de refletividade em baixas PRFs e informações de velocidade em PRFs altas. Os dois conjuntos de informações coletados são comparados e processados para estimar velocidades radiais e alcances verdadeiros.

A detecção de velocidade é dependente do comprimento de onda. Assim que o limite de meio comprimento de onda é passado, a determinação da velocidade torna-se ambígua. Quando falamos de comprimento de onda estamos também nos referindo à frequência, desde que eles sejam inversamente relacionados.

Por último, a frequência de repetição do pulso de um radar determina a máxima velocidade que se pode determinar sem qualquer confusão. A velocidade máxima não ambígua que se pode detectar a uma dada PRF é chamada de *Nyquist velocity*.

Intervalos Nyquist são aqueles em que a velocidade varia de zero à velocidade Nyquist.

O **co-intervalo Nyquist** é a variação completa que se pode detectar de velocidades, tanto negativas como positivas. Por exemplo, se a velocidade **Nyquist** é 25 nós, então o intervalo Nyquist é qualquer velocidade variando de 0-25 nós, e o co-intervalo Nyquist é de -25 a +25 nós.

**DERROTANDO O DILEMA DOPPLER** – O padrão de cobertura de volume está organizado de forma que para elevações mais baixas, varreduras são realizadas duas vezes, um em baixa e outra em alta PRF, as varreduras do meio são realizadas alternando entre baixa e alta PRF e para altas varreduras são utilizadas apenas altas PRFs.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# EFEITOS NO ESPECTRO DOPPLER





PRINCÍPIOS DE RADAR

## LARGURA DO ESPECTRO

Quando um radar detecta um único alvo, a frequência muda no sinal de retorno e é dado por:

$fd = 2V / \lambda$  onde  $fd$  é a mudança da frequência Doppler,  $V$  é a velocidade radial do alvo e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

Quando existem muitos alvos no volume de amostragem, cada alvo individual produz uma mudança na frequência relacionada com sua velocidade radial.

O resultado é uma distribuição de frequências medidas.

Em uma amostragem real de um radar, haveria bilhões de gotas de chuva presente.

Um radar Doppler geralmente processa todos os sinais de retorno para produzir uma única velocidade para o volume de amostragem inteiro.

Esta é a velocidade média da amostra e é o que medimos geralmente quando falamos da velocidade radial Doppler.

É medido a dispersão das velocidades dentro do volume de amostragem do radar e é computado por desvio padrão do espectro de velocidades.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Como visto, a fase é uma das medidas básicas que podem ser feitas pelos sinais do radar, é necessário determinar a acurácia dessas medidas.

Como podemos medir sua variância?

Considerando o sinal de entrada uma banda estreita Gaussiana:

Com o sinal dividido em parte real e imaginária, podemos notar que a tangente da **fase ( $f$ )** do sinal é a razão da parte imaginária sobre a parte real, que é:  **$\tan(f) = \text{Imaginário} / \text{Real}$**

Na terminologia de radar, que relaciona a fase do sinal a alguma frequência de referência, a **parte real** é chamada de **inphase**, e a **parte imaginária** é chamada de **quadrature**.

A quadrature refere-se a mudança de  $90^\circ$  na fase, um quarto de um círculo. Então,

$$\tan(f) = \text{Quadrature} / \text{Inphase}$$

Agora, com a definição de fase, podemos olhar para o sinal do ruído.

Iremos estabelecer um vetor sinal com potência  $S$ . A amplitude do vetor é a raiz quadrada de  $S$ . Vamos estabelecer o sinal para que ele coincida com o eixo da inphase.

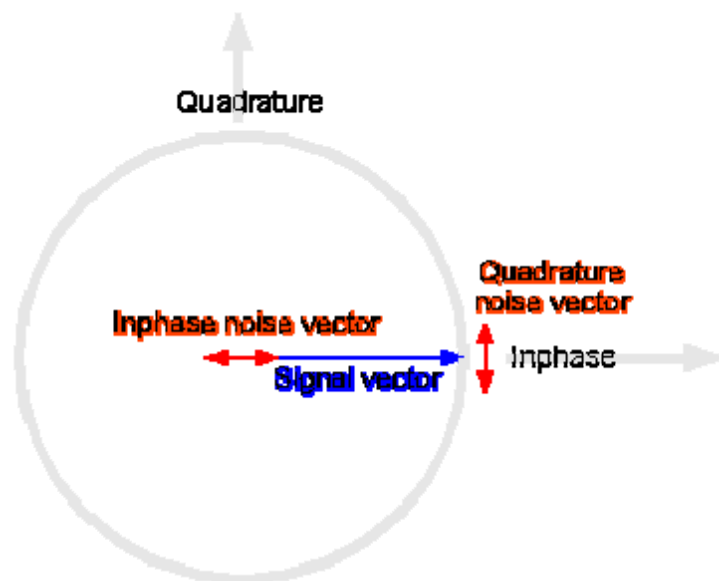


PRINCÍPIOS DE RADAR

Contudo isto não aparece ser geral, isto é uma rotação de eixos somente e dará resultados idênticos independentes do ângulo do vetor sinal. É muito mais fácil visualizar se o vetor sinal está fixo, e a coincidência do vetor sinal com a inphase auxilia no entendimento.

O ruído é somente um pouco mais difícil de ser visualizado. A chave para o ruído é saber que ruído de banda estreita pode ser representado colocando metade da potência do ruído  $N$  na inphase e metade na quadrature, para que cada um tenha potência  $N/2$ .

Os vetores de ruído inphase e quadrature são independentes um do outro, e são identicamente distribuídos em variáveis randômicas Gaussianas. O desvio padrão do ruído em cada canal é a **raíz quadrada ( $N/2$ )**.



A componente inphase component do ruído tem um efeito na fase, porém é um efeito de segunda ordem.

Para qualquer SNR que seria usado na detecção em radar, o ruído inphase apresenta nenhum impacto na medida da fase.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Já que estamos preocupados com a fase somente, nesse problema, deixaremos de lado a inphase do ruído. Com isso, a fase pode ser aproximada a

### $\tan(f) \gg \text{Ruído Quadrature} / \text{Signal}$

$$\sigma_{\text{ruído}}^2 = N$$

$$\sigma_I^2 = \sigma_Q^2 = N/2$$

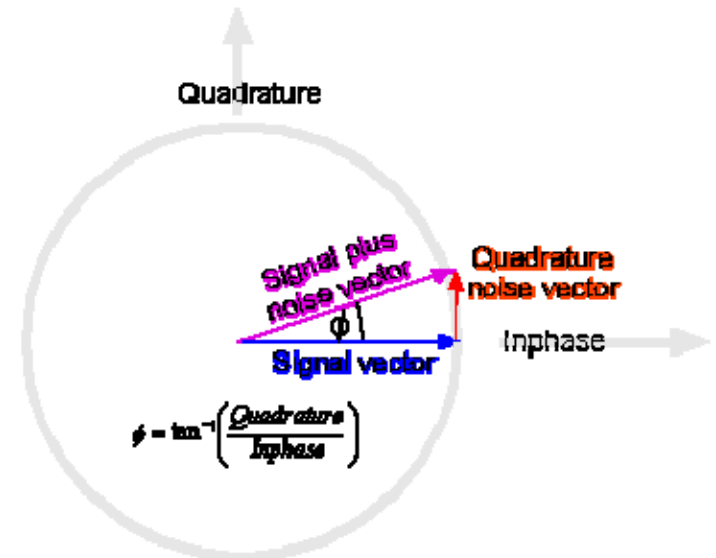
$$\sigma_B = \sigma_T = \sqrt{N/2}$$

$$\text{Sinal} = \sqrt{S}$$

Para  $f$  pequeno,  $\tan(f) \sim f$ . Equivalente a  $S \gg N$ .

Por causa dessa necessidade de detecção, a aproximação é válida para todos os casos de interesse.

$$\sigma_f = \frac{\sqrt{N/2}}{\sqrt{S}} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \text{SNR}}}$$



A variância da velocidade radial média é proporcional a variância da mudança da frequência Doppler.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# TÉCNICAS DE REJEIÇÃO DO CLUTTER DE SUPERFÍCIE



PRINCÍPIOS DE RADAR

## PROBLEMA CLUTTER

A Terra também é um bom objeto para enviar sinais de volta para o radar.

Se você apontar o radar para o chão, você terá um forte sinal. Então, naturalmente a maioria das pessoas não apontam o radar para o chão.

Contudo isto não soluciona o problema de clutter de superfície, pois se você apontar o radar para o chão, parte do feixe interceptará o chão e produzirá um sinal de retorno. Por outro lado, se você apontar bem para cima do chão, você deixará de ver toda a precipitação próxima ao horizonte, com distâncias grandes do radar.

Os serviços de radar de tempo tiram vantagem de um fato importante: o chão não se move. Então, o clutter de superfície cai em um padrão que é conhecido e se repete.

Também, a velocidade Doppler do clutter de superfície é zero.

Os processadores de radar usam essa informação para detectar e identificar clutter de superfície e removê-los da visualização. Essas técnicas não são perfeitas, então você deve ficar alerta por um padrão de ruído do radar que não se move.



PRINCÍPIOS DE RADAR

**Weather Radar Clutter** – Existe uma variedade de outras razões (algumas podem ser muito estranhas) o porque retornos e ecos podem ser recebidos na antena do radar. Alguns exemplos são apresentados a seguir:

**Insetos** – nuvens deles. Claramente, insetos proverão algum nível de reflexão (especialmente em elevações mais baixas, próximo à superfície). Eles podem ser usados como indicativos de brisa marítima, ventos de níveis baixos. Retornos dos insetos são mais comuns perto da estação do radar.

**Rolo de convecção seca na camada limite** – este é um fenômeno detectável na maioria das vezes por clutter de insetos e pássaros. Quando as condições estão corretas, pode haver ‘plumas térmicas secas’ de ar quente subindo, ar úmido nos primeiros cem metros da atmosfera. Esses geralmente formarão em longos rolos. Eles são muito difíceis de se detectar (a não ser se usar reflexão de insetos e pássaros, etc). Isto portanto pode ser definido como um fenômeno.

**Sea Clutter** – Sob certos ventos e outras condições atmosféricas, ondas sharp-tipped podem refletir energia microonda de volta para o radar; este fenômeno é conhecido como sea clutter. Sea clutter pode possuir baixa ou alta refletividade e se estender para longo alcance. Pode complicar a análise de velocidade ‘próximo à superfície’ devido ao retorno de informações misturadas tanto de vento como do movimento da onda. É comum que sea clutter pode ser causado por refração atmosférica e condições climáticas próximo à costa, onde é mais susceptível para esse tipo de fenômeno.

**Ships** – Padrões de Sea Clutter podem ser interrompidos pela passagem de navios.



PRINCÍPIOS DE RADAR

**Migração de pássaros** – Estranho, porém lógico. O retorno da migração de pássaros será vista pelos sistemas de radar – este fenômeno é geralmente referido como Eco Anjo. Reflexões de pássaros podem ser problemáticas em meteorologia por radar. Apenas um pássaro no volume varrido pode apresentar um grande eco que se move. Durante a estação de migração, o efeito pode ser sério. Contudo, usando técnicas Doppler, a velocidade radial da migração cairá normalmente em uma categoria específica.

**Propagação anômala** – Sob algumas condições atmosféricas, o índice de refração do ar pode mudar com a altura de uma maneira capaz de jogar o feixe emitido para a superfície; atinge o chão, e volta ao longo seu caminho curvado ao radar. Isto geralmente é conhecido como propagação anômala.

**Chaff** – Sistema militar de dispersão de várias pequenas partículas reflexivas na atmosfera. Elas se dispersam e demoram a cair. Elas são altamente reflexivas e são essencialmente usadas para derrubar a visualização do radar.

**Aircraft** - Para radar de tempo, reflexões provenientes de aeronaves passando através o espaço aéreo serão consideradas como clutter.

**Clutter da proteção da antena do radar** – Os efeitos dessa proteção usada na antena do radar pode aumentar os efeitos de clutter, ruído e interferência recebida pela antena, etc.





PRINCÍPIOS DE RADAR

## Processamento Clutter

Esta página fornece uma visão geral de algumas técnicas que são geralmente usadas para eliminar clutter e reflexões indesejáveis no sistema de radar para somente termos uma visualização limpa e clara dos objetos desejados. Existe uma grande variedade de métodos (algoritmos) definidos para permitir a visualização de diferentes clutters e eliminá-los. Alguns estão listados abaixo:

### Mapa Clutter (processamento)

Um mapa de clutter pode ser gerado para uma instalação primária e específica de radar que identifica os níveis esperados de retornos indesejáveis de obstruções **não-flutuantes** no feixe do radar.

### Processamento Doppler

Processamento Doppler é geralmente usado para identificar retornos de objetos se movendo e fornece uma imagem das velocidades radiais (ou as velocidades relativas à distância de aproximação ou afastamento do radar). Sua used to identify returns from moving objects and provide a figure for their radial velocity (or velocity relative to their distance towards or from the radar). Seu ponto fraco, no entanto, é que a detecção da velocidade é feita em um plano somente.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## **Polarização (redução)**

Técnicas de polarização são usadas para detectar a 'direção' do campo elétrico (E) da onda eletromagnética. São conhecidas técnicas de polarização linear e circular. Em radar de tempo, sistemas Polarimétricos de radar (contudo ainda em radares Doppler) medem duas polarizações, na horizontal e vertical e usam essa informação em comparação com uma tabela de características gravadas como um outro indicador de tempo.

**Polarização Linear** (mais apropriada para condição de tempo limpo) e polarização circular (mais apropriada para condição de tempo com precipitação) são usadas primeiramente por sistemas PSR. O uso dessas polarizações são para remoção de clutter de tempo.

**Dupla Polarização** (horizontal e vertical) juntas fornecem a refletividade diferencial do tempo (que pode ser usada para identificar tipos de tempo). Técnicas de polarização estão se tornando comum nos dias atuais em sistemas de radar.

## **Outro Processamento Clutter e Técnicas de Redução**

Os assuntos acima serão examinados em maior detalhe no módulo „Radar Basics“. No entanto, pode-se notar que um número considerável de outras técnicas para o processamento e redução de clutter são também definidas e usadas nas implementações de alguns sistemas de radar. Essas não serão examinadas no módulo.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# RADAR DE DUPLA POLARIZAÇÃO



PRINCÍPIOS DE RADAR

Outro método para a detecção de **granizo** usa polarização dupla. O radar transmite e recebe sinais lineares polarizados e muda rapidamente entre polarização horizontal e vertical, qualquer uma entre pulsos individuais ou grupo de pulsos.

Unidades de radares polarimétricos mais modernas mandam ambas direções de polarização simultaneamente.

$$ZDR \sim 10 \log (Z_h / Z_v) [dB]$$

*onde:*

**Z<sub>h</sub>** é a potência de retorno recebida do pulso horizontalmente polarizado.

*e:*

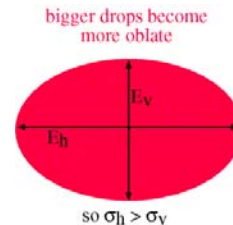
**Z<sub>v</sub>** é a potência de retorno recebida do pulso verticalmente polarizado.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Os dois retornos são referentes a  $Z_H$  e  $Z_V$  e desses a refletividade diferencial  $Z_{DR}$  é calculada.

Em chuva moderada a forte as gotas de chuva são grandes e conforme caem ficam achatadas até se tornarem esferóides **oblate**, apresentando um eco mais forte para a polarização horizontal.



A constante dielétrica de gelo sólido é aproximadamente 20% da constante da água e portanto a forma da partícula tem um efeito muito menor no granizo do que na chuva. Partículas granizo também achatam conforme caem, portanto ZDR será pequeno.

granizo é identificado por  $Z_H$  alto e ZDR baixo. Se mesmo os resultados de ZDR forem menores do que deveriam aparecer (ou um valor negativo de decibel), este é um típico sinal para pedras de granizo. Somente esses podem cair na orientação vertical finalmente!



# DERIVAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO POLARIMÉTRICA

PRINCÍPIOS DE RADAR

Medidas de radar polarimétrico e estimativas de precipitação derivadas deles são sensíveis a forma média das gotas de chuva iluminadas pelo feixe do radar. Gotas oscilantes na atmosfera livre tendem a ser mais esféricas na média do que formas de equilíbrio usadas em muitos estudos.

Um eixo de relação de razão desenvolvido de um número de observações publicadas é:

$$r = 0.9951 + 0.02510D^1 - 0.03644D^2 + 0.005030D^3 - 0.0002492D^4$$

Usando essa relação, medidas disponíveis de disdrômetro, e cálculos de matriz-T do espalhamento na secção transversal, cálculos foram feitos para a refletividade do radar em polarização horizontal (ZH), fase diferencial específica (KDP), refletividade diferencial (ZDR), e a taxa de precipitação (R).

A tabela a seguir de estimativa polarimétrica forma-fixa de precipitação foram então derivadas:

Refletividade do Radar:  $R = 2.62 \times 10^{-2} ZH^{0.687}$

Fase Diferencial Específica:  $R = \text{sign}(KDP) 54.3 |KDP|^{0.806}$

Fase Dif. Espec./Refleti. Dif.:  $R = \text{sign}(KDP) 136 |KDP|^{0.968} ZDR^{-2.86}$

Refletividade do Radar/Refleti. Dif.:  $R = 7.46 \times 10^{-3} ZH^{0.945} ZDR^{-4.76}$



PRINCÍPIOS DE RADAR

# RADAR DE DUPLA FREQUÊNCIA



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Radar de Dupla Frequência

Este método requer o uso de dois comprimentos de onda, um longo o suficiente para o espalhamento Rayleigh, e o outro curto o suficiente para o espalhamento Mie, espalhamento para ocorrer na presença de um grande número de hidrometeoros grandes como pedras de granizo.

Comprimentos de onda típicos são 10 cm e 3 cm (banda S e banda X). Se a reflexão em dBZ é similar para ambos os comprimentos, então os ecos são de hidrometeoros pequenos, mas se a reflexão do comprimento de 3 cm é menor que o de 10 cm, então são hidrometeoros grandes.

Este é um indicativo de granizo, pois raramente existem grandes gotas de chuva.

Contudo, erros podem ocorrer com esse método devido à diferença na atenuação nas duas frequências, quanto menor o comprimento de onda, maior a atenuação.

Algoritmos de correção podem ser usados, porém granizo, chuva, neve seca e úmida, todos têm diferentes taxas de atenuação e isso pode distorcer os resultados apresentando uma declaração falsa de granizo.

Radares são desenvolvidos para usar sistemas de banda X e K.





PRINCÍPIOS DE RADAR

# ALVOS EM UMA ATMOSFERA LIMPA



PRINCÍPIOS DE RADAR

## DADOS DE UMA ATMOSFERA LIMPA

Originalmente, ecos de "atmosfera limpa" eram chamados de ecos de "anjos" ou "fantasmas".

Existem dois possíveis mecanismos de espalhamento:

- Espalhamento de gradientes de índice de refração na escala de  $l/2$

Geralmente se refere a isso como "Espalhamento Bragg"  $\eta \propto \lambda^{-1/3}$

Isso sugere usar comprimentos de onda longos para detectar mais eficientemente gradientes de índice de refração.

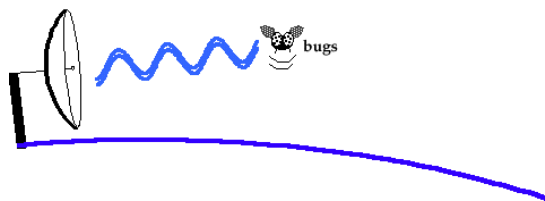
- Espalhamento de partículas de insetos e pássaros

Então tem-se espalhamento Rayleigh onde  $\eta \propto \lambda^{-4}$



PRINCÍPIOS DE RADAR

# O EFEITO DE PÁSSAROS E INSETOS



Para um radar, pássaros são apenas grandes bolas de água com penas. Não é necessário um grande número de pássaros para produzir um bom sinal no radar. Insetos também possuem água, e já que são muito mais pequenos, é necessário um número maior deles para que o sinal seja bom no radar. A secção transversal do radar para pequenos pássaros no comprimento de onda de 10 cm é aproximadamente 10 cm<sup>2</sup>, para pássaros grandes é da ordem de 2000 cm<sup>2</sup> em um curto alcance.

Durante as estações de migração, os pássaros podem encher os níveis mais baixos do radar. Pode haver uma altitude preferida, ou a densidade de pássaros pode decrescer com a altura. O padrão de refletividade terá a forma de um disco ou um anel, centrado no radar.

Insetos representam um grande número de alvos para o radar e estão sempre presentes durante estações quentes. Isso é benéfico aos meteorologistas. Radares Doppler requerem alvos para determinar o movimento do ar.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Fora das regiões onde há precipitação, não haveria alvos se não houvessem insetos.

Os insetos voadores são bons identificadores do movimento do ar, na média eles voam na direção em sentido do vento.

O retorno de insetos permite aos meteorologistas ver a circulação do ar for a das tempestades, na qual em muitos casos é importante para prever novas tempestades.

Os ecos de radar em uma atmosfera limpa será mais comum nos dias em que a baixa atmosfera está instável, assim como quando há presença de termas, ou quando a velocidade do vento aumenta com a altitude logo acima da superfície, pois há turbulência mecânica.

## **EXPERIMENTO DE RADAR PARA INSETOS**

Em um esforço conjunto do US Department of Agriculture e NSSL no final dos anos setenta. USDA estava no processo de especificar um propósito especial para o radar de identificar insetos perigosos em particular e os experimentos determinaram a secção transversal do radar para um grupo de interesse.



PRINCÍPIOS DE RADAR

O time de pesquisadores confinaram os insetos no Campo de Westheimer, esterilizaram eles e os libertaram de um avião de pequeno porte.

Eles interceptaram os insetos com o radar Norman Doppler e dos parâmetros conhecidos do radar, alvo, etc; e concentração de insetos, estimaram a secção transversal do radar.

As secções transversais medidas para o comprimento de onda de 10 cm e polarização horizontal de  $0.25 (10^{-3}) \text{ cm}^2$  para o boll weevil até  $8.1 (10^{-3}) \text{ cm}^2$  ao corn earworm.

A detecção do alvo foi usada em conjunto com outros requerimentos para especificar o desempenho do propósito especial do radar.

O radar comportou-se bem e foi usado em vários experimentos, a maioria na área do "Big Bend" no Texas.

Em outros experimentos foi usado para monitorar e rastrear migração de insetos. Posteriormente, migração foi relacionada com as condições de tempo (observações de superfície, soundings, etc) das quais modelos de previsão foram desenvolvidos.

Os modelos são usados para a proteção da plantação, como um dispositivo para apontar quando aplicar os pesticidas e aonde aplicá-los.



PRINCÍPIOS DE RADAR

# TURBULÊNCIA

A turbulência fornece uma outra maneira para o retro-espalhamento de uma onda eletromagnética emitida pelo radar. A turbulência está associada com as variações na densidade de atmosfera.

Quando as variações na densidade ocorrem na escala de meio comprimento de onda do radar, a energia é espalhada por um processo chamado difração.

A velocidade na qual a onda eletromagnética viaja entre o radar e o alvo é dependente do índice de refração da atmosfera entre o radar e o alvo.

Pequenas variações no tempo, que o sinal leva do radar ao alvo fixo e voltar, estão relacionadas a pequenas variações no índice de refração causado por mudanças na umidade, temperatura e pressão.

A medição do índice de refração, portanto abre a possibilidade de extrairmos informação das condições de superfície (especialmente a umidade) pelo radar.

Usando a informação de alvos de superfície e sua evolução no tempo como uma aproximação do tempo de viagem das ondas de radar, um procedimento para medidas de índice de refração próximas à superfície nas proximidades do radar foram demonstradas e implementadas.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Um exemplo do J.S. Marshall Radar Observatory Univerdidade McGill

O resultado do trabalho em conjunto entre McGill e NCAR pode ser, a qualquer momento, implementado para qualquer radar Doppler, com o oscilador local estável do transmissor (STALO) com uma precisão abaixo de 0.25 ppm, frequência estável para longos períodos (meses ou alguns anos) e que as fases dos alvos sejam medidas.

Medidas precisas dos campos dos índices de refração em um raio de uns dez quilômetros do radar (onde alvos de superfície podem ser observados) estão sendo realizados, e contrastes na refratividade associadas a passagens frontais e fluxos das tempestades têm sido observadas (Fabry et al. 1997). Ocasionalmente, o começo da convecção ocorre nos limites altos da refratividade.

Uma avaliação desses contrastes de refratividade na área de Montreal (Creese 1999) apresenta que 74% da variabilidade na refração é causada pela variabilidade na mistura.



PRINCÍPIOS DE RADAR

Então, se uma suposição razoável é feita para a temperatura e pressão na área observada, campos de mistura podem ser obtidos com precisão de  $0.3^{\circ}\text{C}$  no ponto de orvalho.

O produto da refratividade (ou índice de refração) usa a fase dos alvos de superfície para detectar pequenas mudanças na velocidade das ondas do radar entre o radar e os alvos de superfície.

Dessa informação a refratividade do ar próxima à superfície é determinada.

Como a refratividade está relacionada com a densidade do ar (e portanto também a temperatura) e especialmente com a mistura, a medida da refratividade pode fornecer informações valiosas sobre as condições de superfície em volta do radar.

Devido ao limite para o qual alvos de superfícies podem ser observados, o máximo alcance útil da medida da refratividade é da ordem de 30 a 40 km.

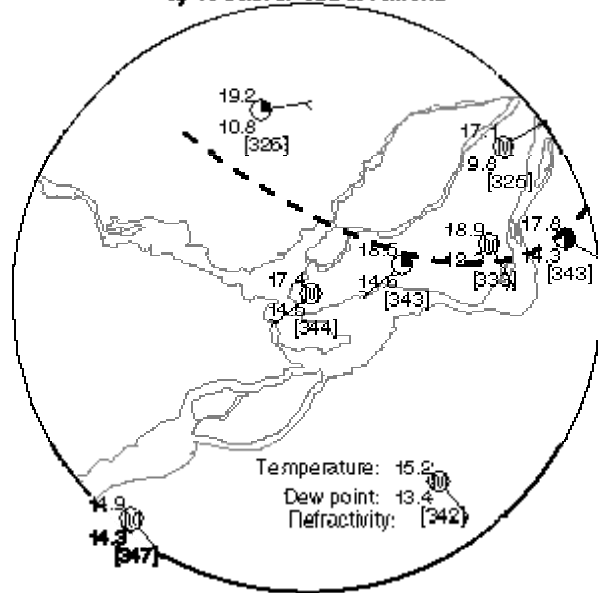
A informação do valor do campo de refratividade para fins meteorológicos ainda está sendo avaliado já que esse produto foi desenvolvido recentemente.



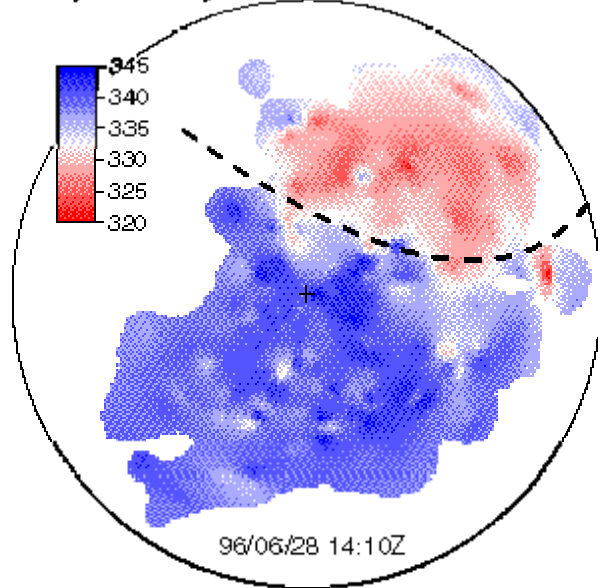


PRINCÍPIOS DE RADAR

### a) Weather observations



### b) Refractivity field derived from radar data



Neste exemplo, o campo medido da refratividade por um radar está contrastado com observações simultâneas do tempo em um raio de 45 km. Duas massas de ar podem ser identificadas, uma mais seca ao norte (temperatura do ponto de orvalho de 10°C) e uma mais úmida ao sul (14°C de temperatura do ponto de orvalho).

A refratividade é computada usando observações de superfície (mostradas dentro dos parêntesis no último slide) combinam bem com a refratividade medida pelo radar.

Enquanto uma medida de um gradiente de mistura possa ter sido inferida por informações de superfície, a medição da refratividade pelo radar permite a determinação precisa da posição do limite entre as duas massas de ar (mostradas com a linha pontilhada).



PRINCÍPIOS DE RADAR

# CONTROLE DE QUALIDADE DA REFLETIVIDADE DO RADAR – DADOS DE PRECIPITAÇÃO



PRINCÍPIOS DE RADAR

Dados da refletividade do radar estão sujeitos a muitos contaminantes. Nem toda a refletividade corresponde a um tempo “verdadeiro”.

É importante remover o maior número possível desses problemas e fornecer um campo limpo para aplicações em rastreamento do tempo e estimativa de precipitação. **Algoritmos de Estimativa de Precipitação Quantitativa - Quantitative Precipitation Estimation (QPE) precisam de Dados com alto controle de qualidade.**

Entre os problemas que a refletividade está sujeita, estão:

**Clutter de Superfície (Ground clutter)** – Como o feixe do radar está em baixas alturas, próximo ao radar, clutter de superfície pode contaminar o eco perto da superfície.

**Propagação Anômala (Anomalous propagation)** – Mesmo que o feixe do radar esteja apontado para cima, em certas condições atmosféricas, o feixe pode ser movido para baixo e acaba medindo prédios altos ou a superfície.



PRINCÍPIOS DE RADAR

## **Espalhamento e atenuação do feixe**

Ambos combinam para produzir uma amostra muito ruim de tempestades distantes do radar.

## **Contaminação de banda Brilhante**

Assim que o feixe atravessa a camada de derretimento, a refletividade é inclinada para cima, na maioria das vezes para mais de 5dBZ.

## **Calibração e manutenção do receptor**

Processo adequado de calibração incluindo fatores de perda e estratégias de controle, com a calibração regularmente monitorada do sistema de um ponto central – também é fundamental para Doppler.

## **Intercomparação quantitativa**

Usando uma rede de dados de radar ou outros sensores de medida



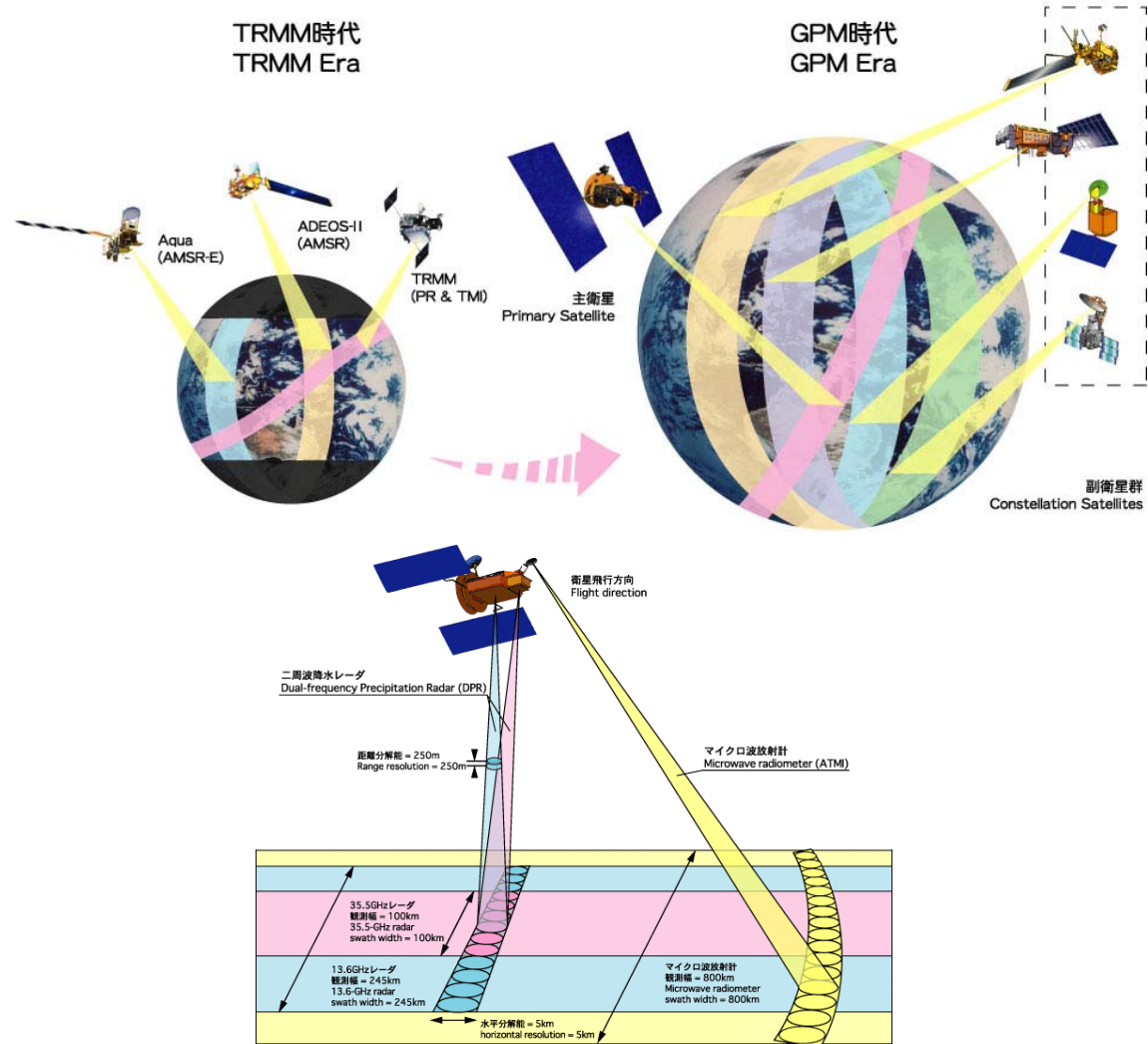
PRINCÍPIOS DE RADAR

# RADARES NO ESPAÇO



PRINCÍPIOS DE RADAR

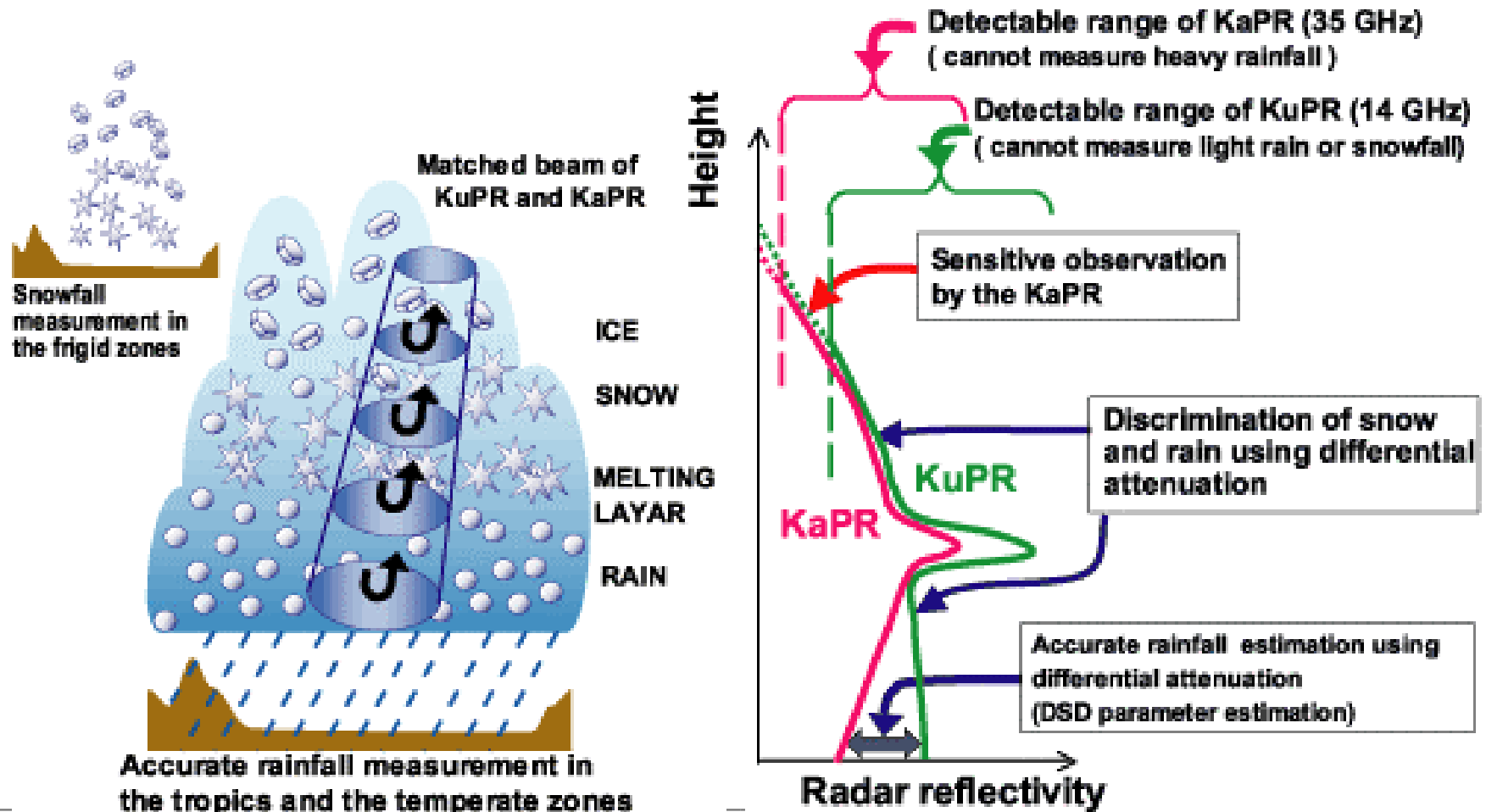
# Medida da Precipitação Global Global Precipitation Measurement (GPM) Conceito de Observação





PRINCÍPIOS DE RADAR

# Medição de Precipitação com Radar de Precipitação de Dupla Frequência



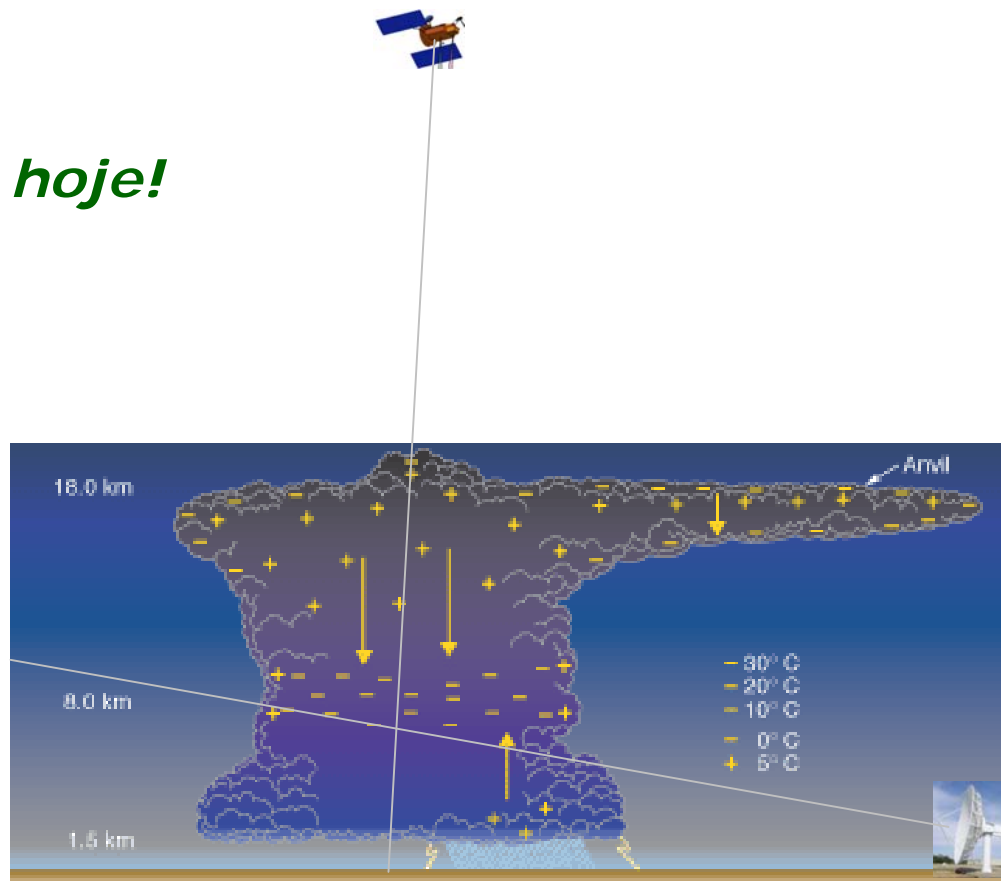


PRINCÍPIOS DE RADAR

*“O trabalho de Battan, Bowen, e outros pioneiros em meteorologia por radar mudou todo o campo de física de nuvens, resolvendo antigos quebra-cabeças, porém criando novos o suficiente para manter seus sucessores ocupados por décadas”*

*W.F. Hitschfeld, McGill University 1986*

***...ainda válido hoje!***







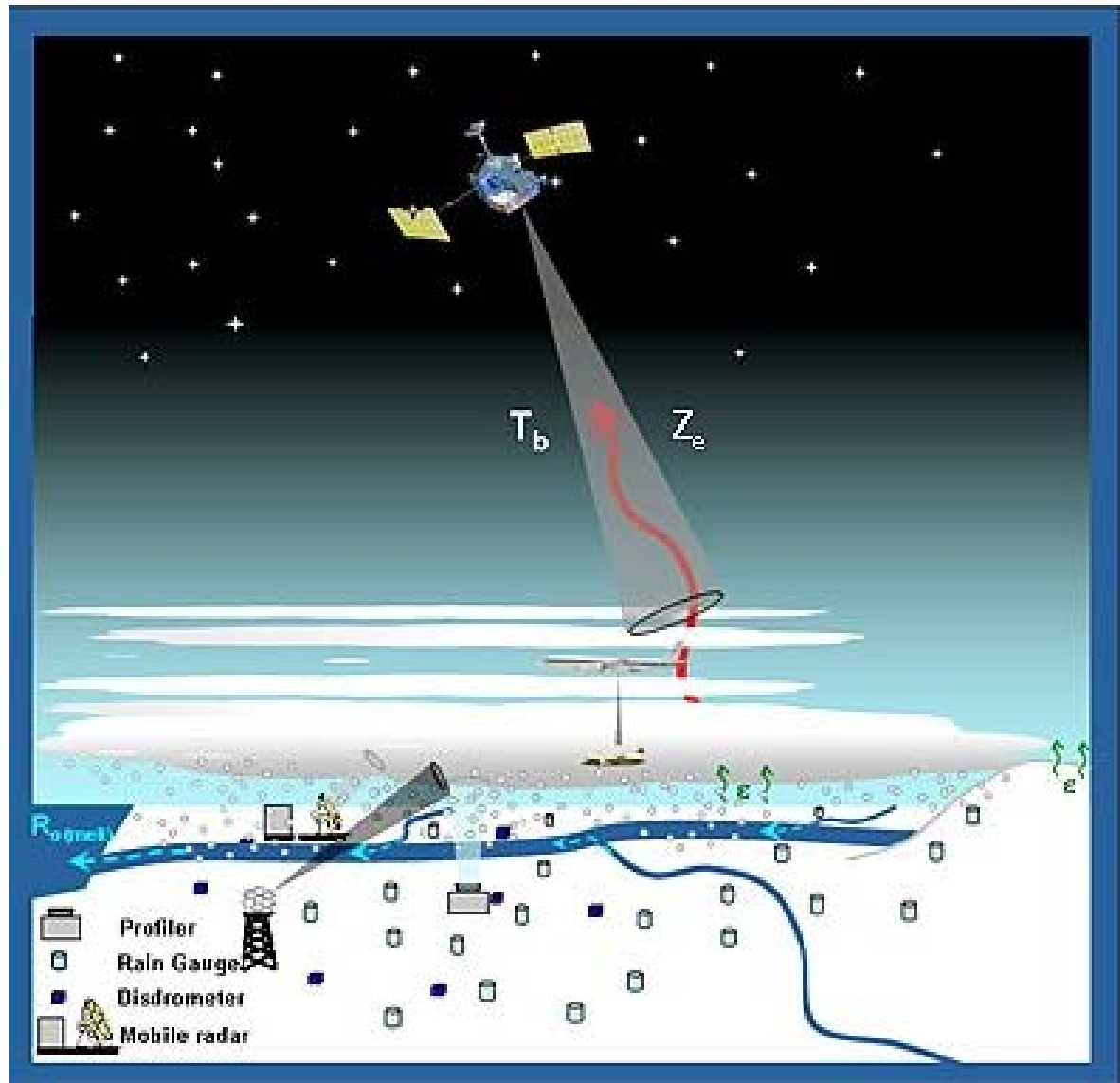
PRINCÍPIOS DE RADAR

# **Tecnologias para o sensoriamento remoto da atmosfera**

# As tecnologias para o sensoriamento da atmosfera



PRINCÍPIOS DE RADAR





PRINCÍPIOS DE RADAR

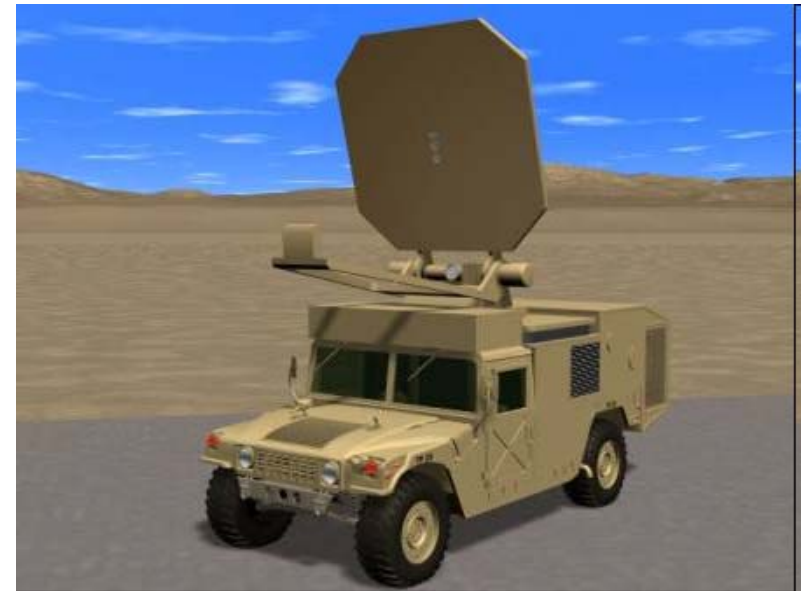
# Aplicação militar



PRINCÍPIOS DE RADAR

## Spin-off das tecnologias de sensoriamento remoto

### Vehicle-Mounted Active Denial System (V-MADS)



Active Denial Technology uses a transmitter to send a narrow beam of 95-GHz millimeter waves towards an identified subject. Traveling at the speed of light, the energy reaches the subject and penetrates less than 1/64 of an inch into the skin, quickly heating up the skin's surface. The 95-GHz energy penetrates 1/64 inch into the skin and produces an intense burning sensation that stops when the transmitter is switched off or when the individual moves out of the beam. Within seconds, an individual feels an intense heating sensation that stops when the transmitter is shut off or when the individual moves out of the beam. According to reports, a 2-second burst from the system can heat the skin to a temperature of 130° F. At 50 °C, the pain reflex makes people pull away automatically in less than a second. Someone would have to stay in the beam for 250 seconds before it burnt the skin,