



PRINCÍPIOS DE RADAR

FUNDAMENTOS DO RADAR

CAPÍTULO 1

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 em microondas, 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
- 1987** - Radar Meteorológico de São Paulo – Ponte Nova

- 2008 - Radar Banda-X - USP
- 2009 - possível 3º. Radar Meteorológico da UNESP



PRINCÍPIOS DE RADAR

SISTEMAS DE RADAR



PRINCÍPIOS DE RADAR

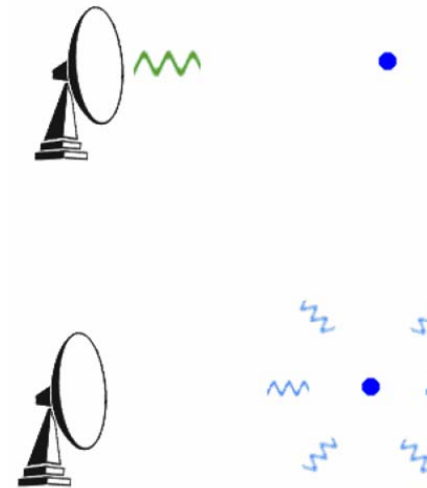
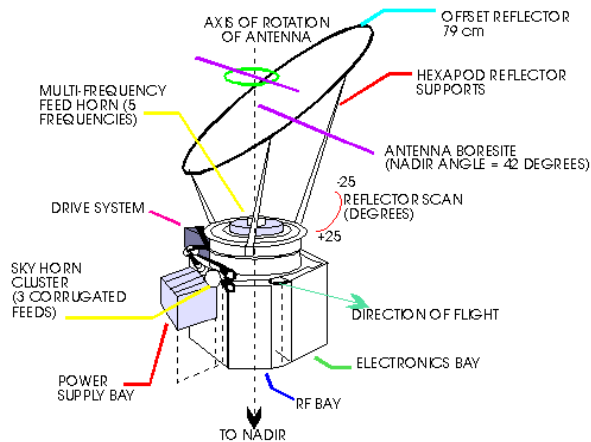
SENSORIAMENTO REMOTO

PASSIVO

ATIVO

RADIÔMETROS

RADARES



Radiômetro Scanner de Microonda Multicanal (RSMM)



PRINCÍPIOS DE RADAR

RADAR

um acrônimo para

RAdio **D**etection **A**nd **R**anging
RÁdio 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.

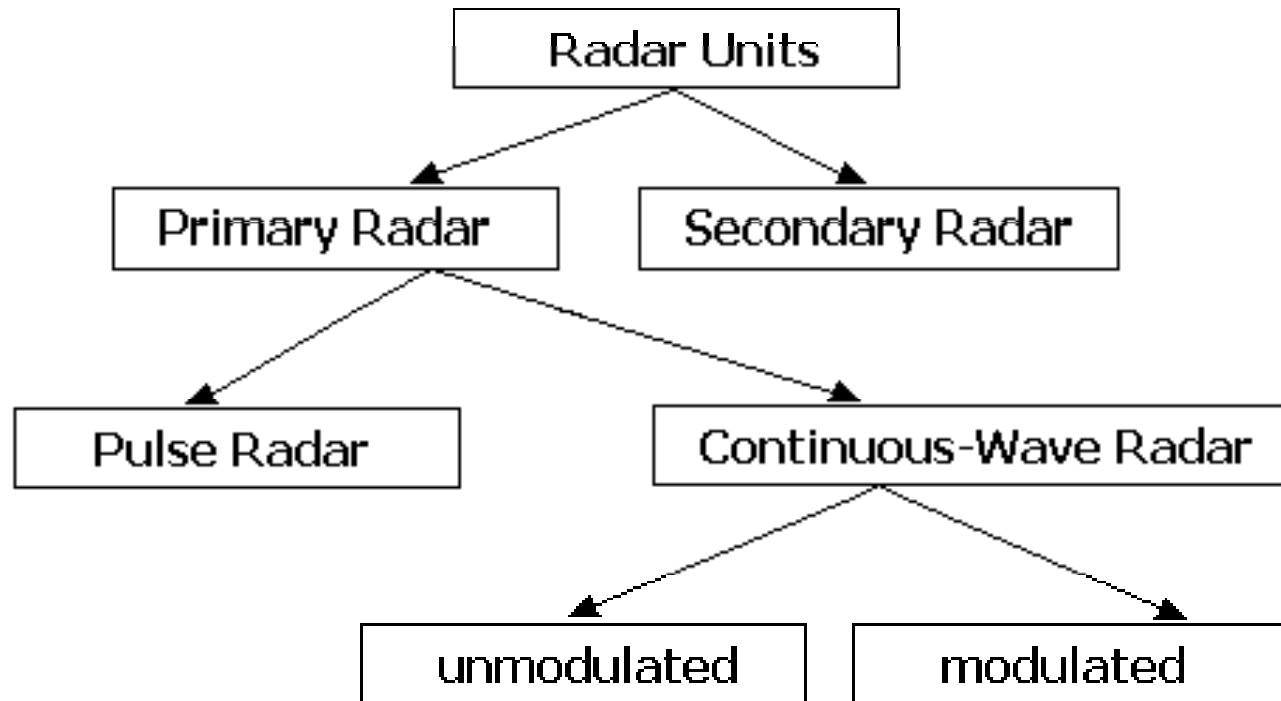


PRINCÍPIOS DE RADAR

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 pulso de alta frequência 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

Radars 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.

Radars 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. Radars **COERENTES** fornecem a detecção da diferença de fase entre o sinal que vai e o que volta. Radars **NÃO-COERENTES** são incapazes de medir a diferença entre o pulso que vai e o que volta.

Radars Doppler Polarimétricos de Tempo

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

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



PRINCÍPIOS DE RADAR

PARÂMETROS DO RADAR



PRINCÍPIOS DE RADAR

Largura do pulso (τ) 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 (λ) 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 (θ) A largura angular do feixe do radar.

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

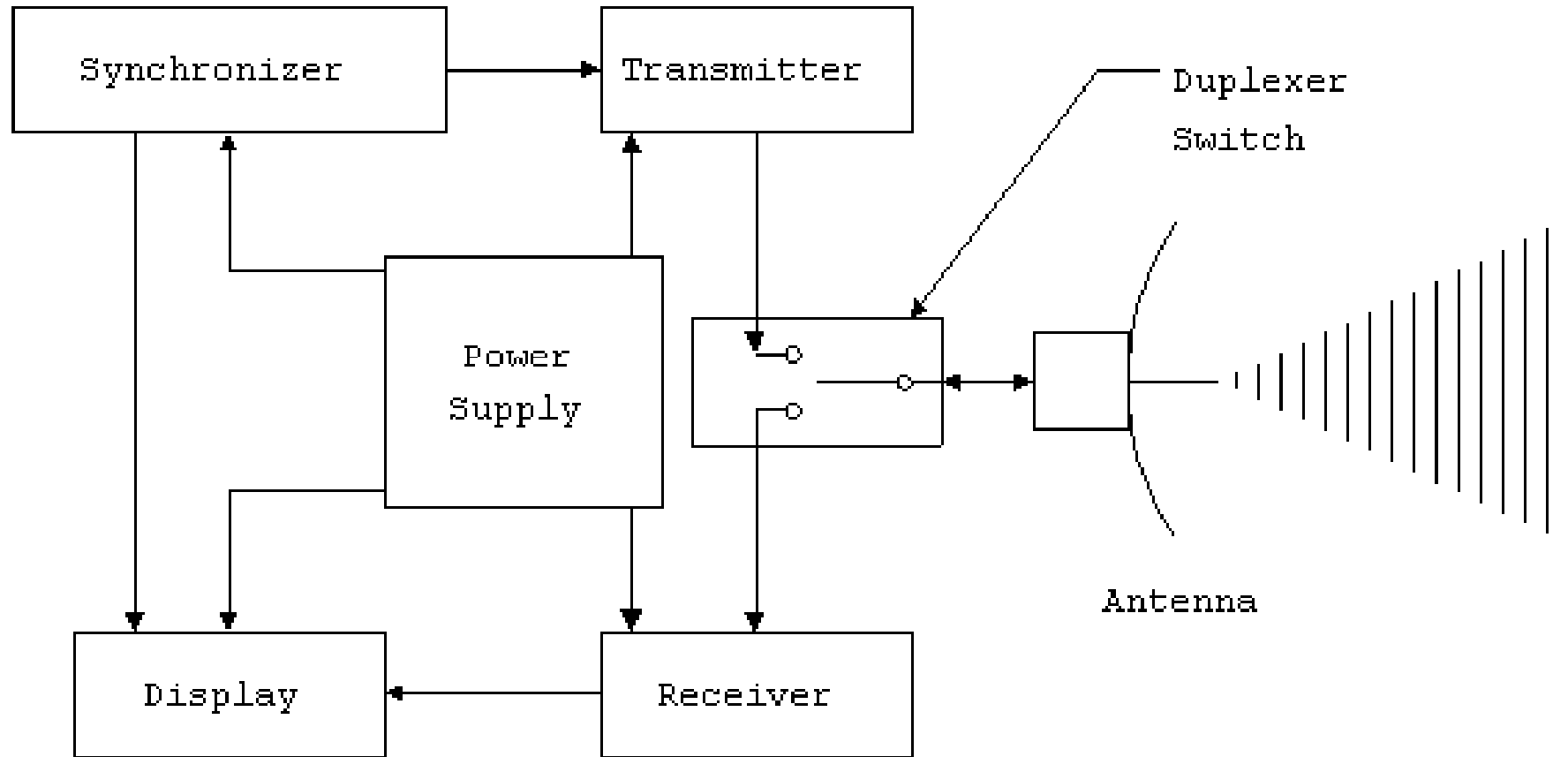
Para uma dada largura de feixe, a área da antena aumenta com o aumento do comprimento de onda. Então, um radar operando com um comprimento de onda de 10 cm terá sua área maior do que um operando com um comprimento de onda de 3 cm.

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

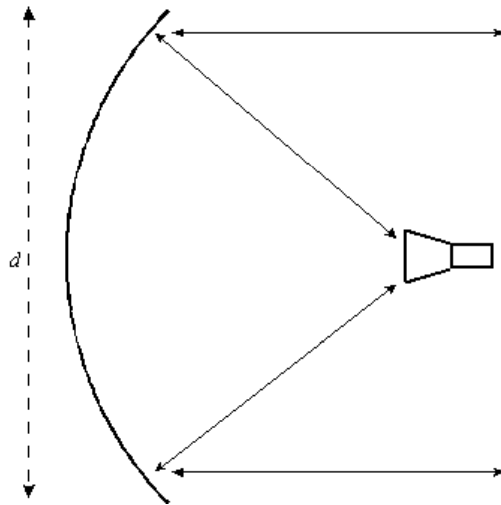




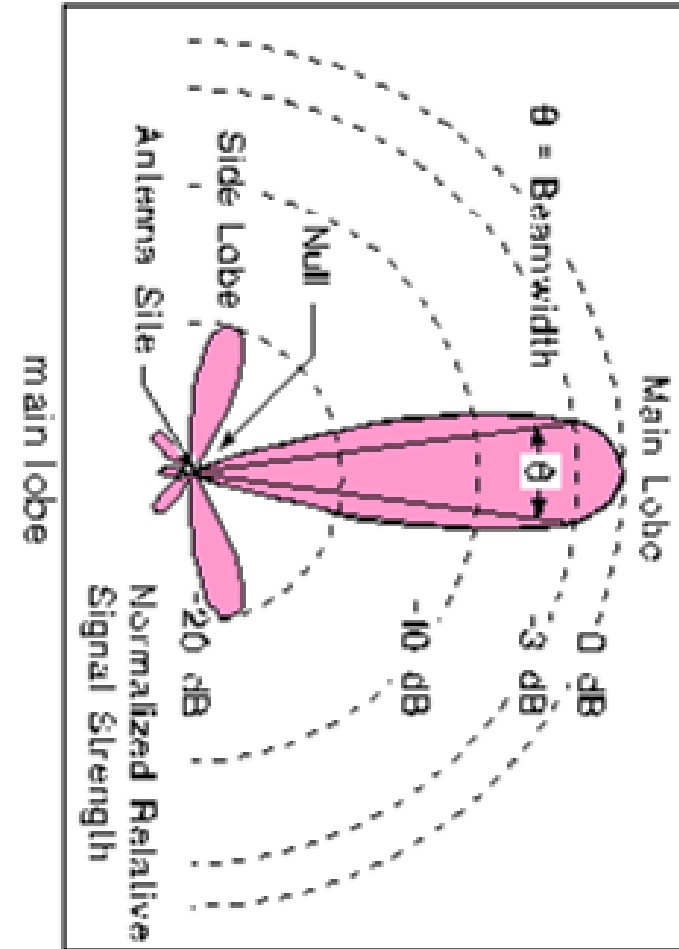
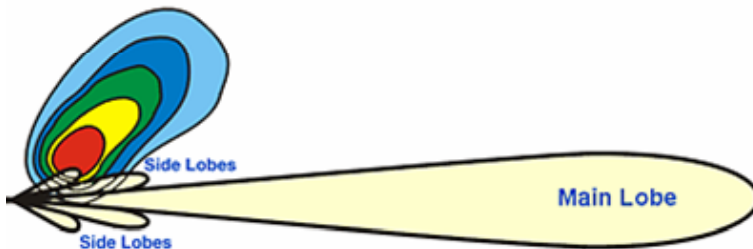
PRINCÍPIOS DE RADAR

ANTENA DE RADAR E LARGURA DO FEIXE

Parabolic antenna model

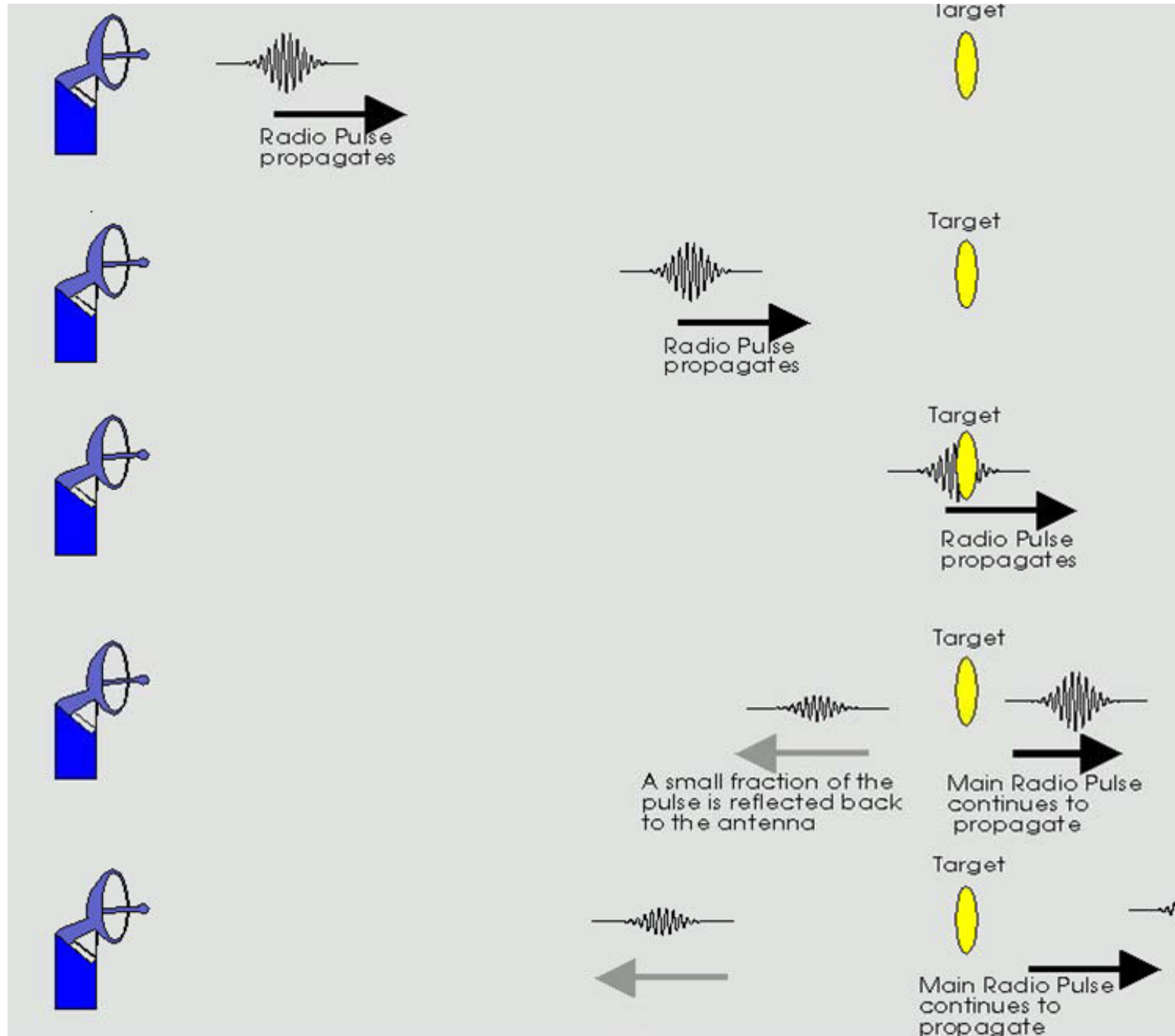


Strong Thunderstorm





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 μs X 300 m μs^{-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 O pulso cria um volume denominado BIN, cujo volume é determinado pelo comprimento, largura e altura.
- 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

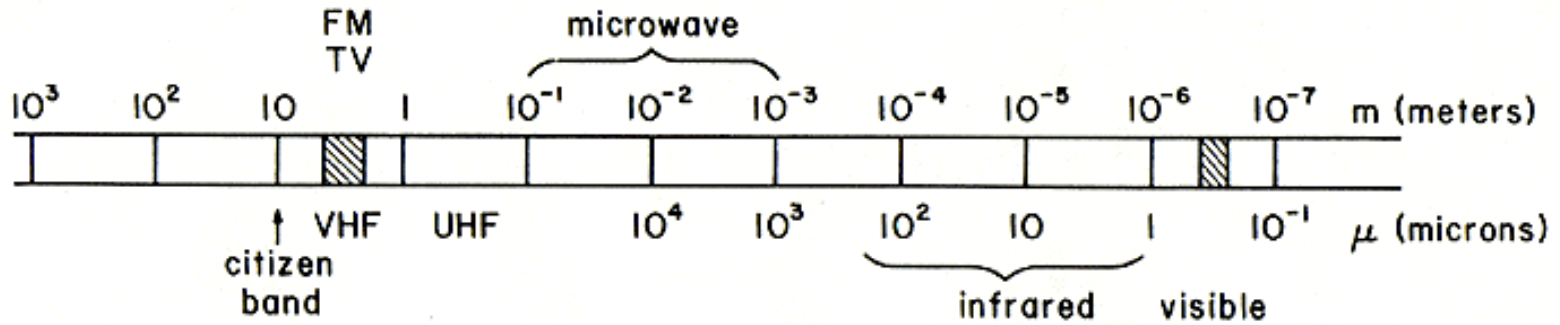
Conclusão:

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

COMPRIENTO DE ONDA DO RADAR

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

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

where,

λ wavelength (m)

c speed of light (m/sec)

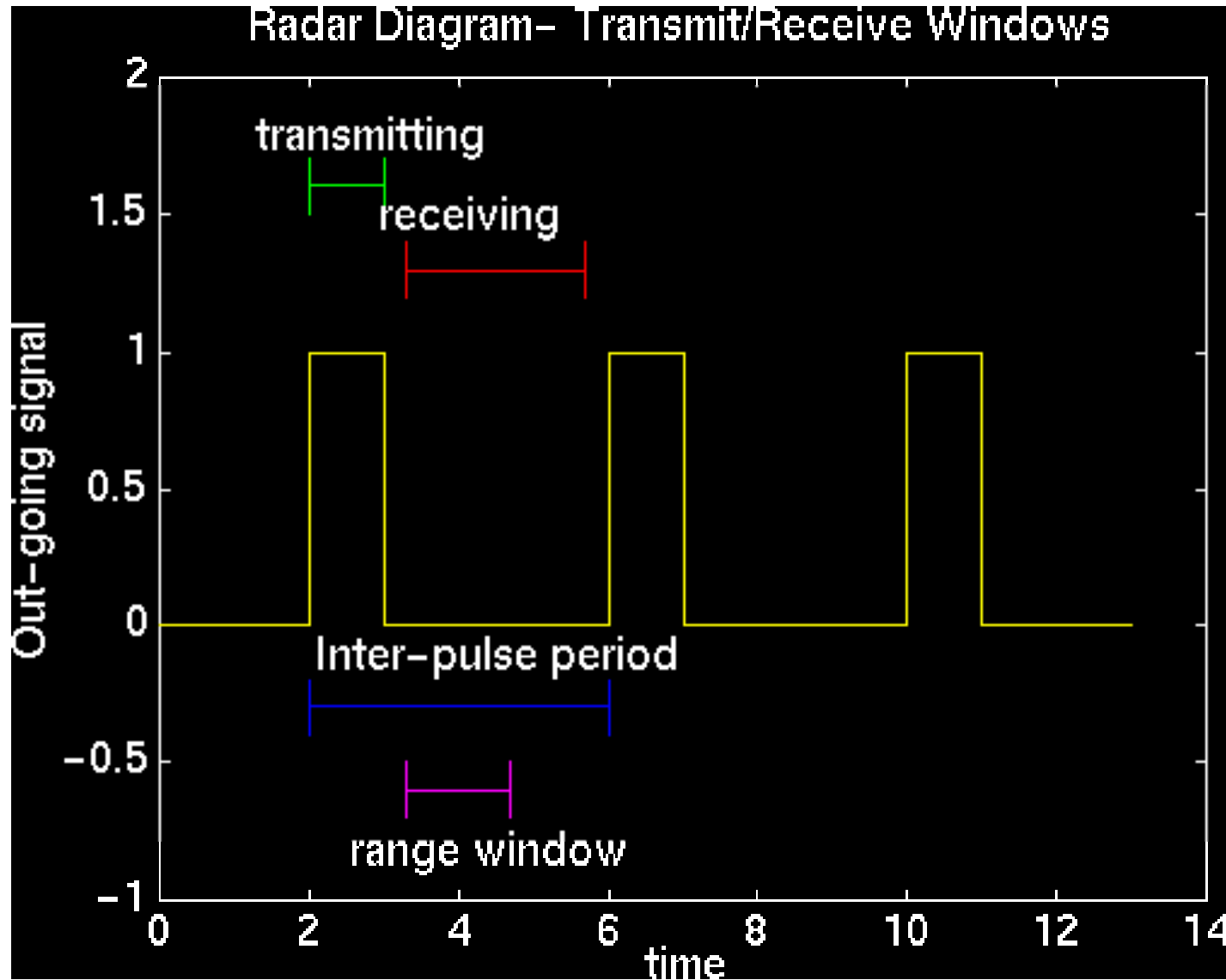
f_0 transmit frequency of radar (Hz)

- **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



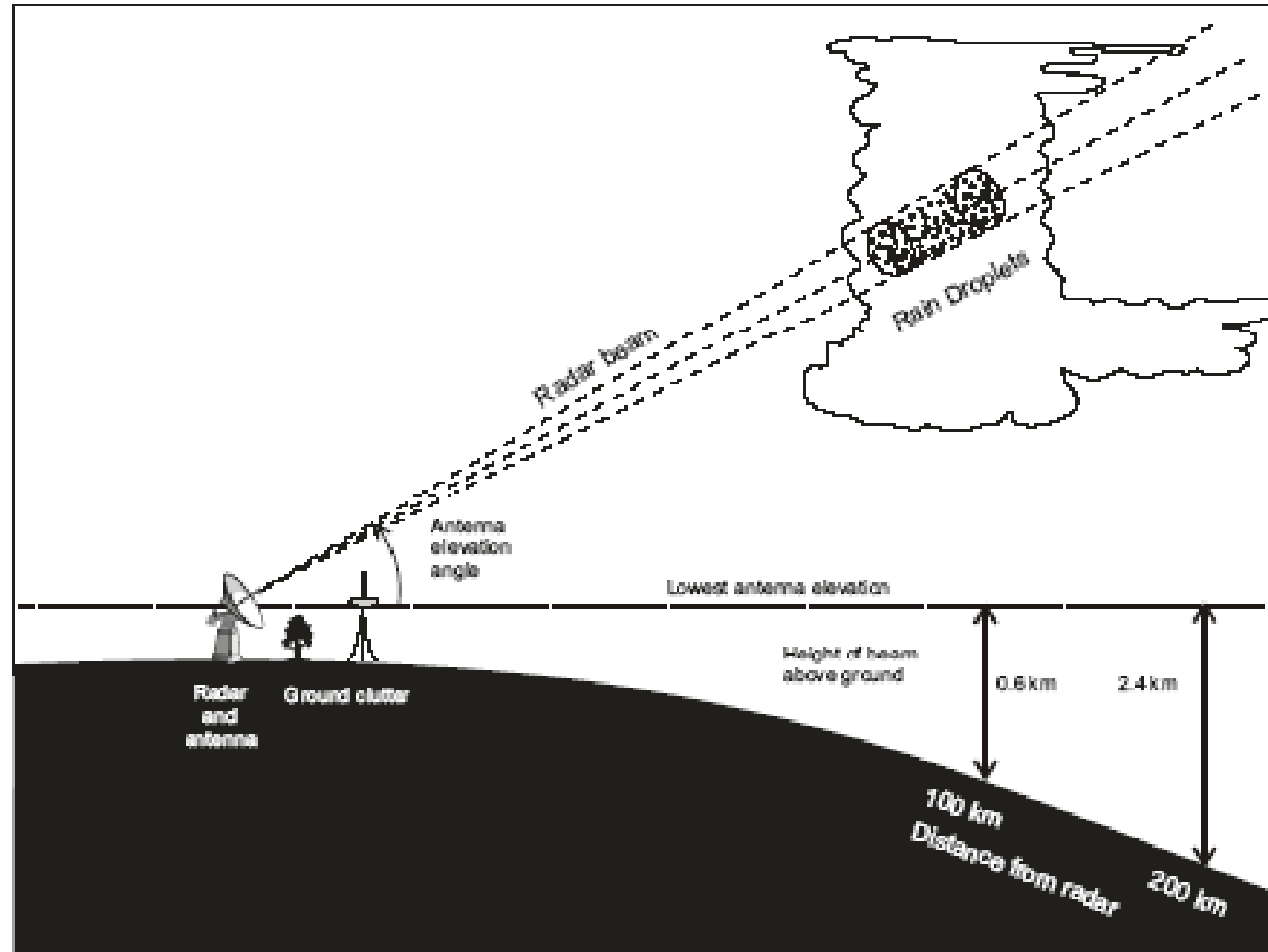
PRINCÍPIOS DE RADAR

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) 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 μ 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?



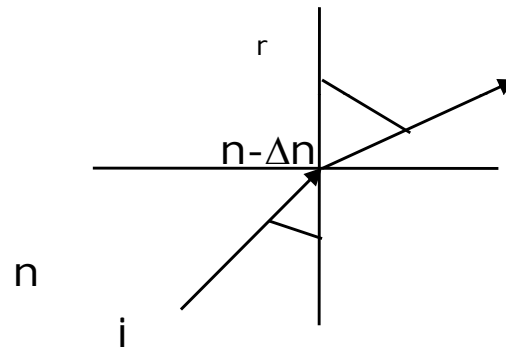
PRINCÍPIOS DE RADAR

Leis de Snell

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

Já que **p** e **e** decrescem exponencialmente com a altitude, **n** também decresce com a altitude. 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 RAI O 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:

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

$$n \approx 1$$

$$h \ll R$$

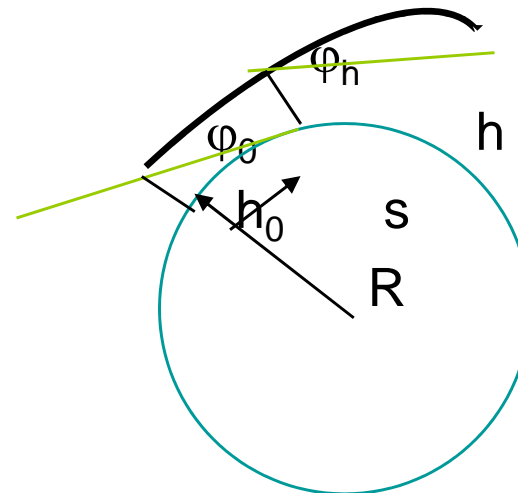
Assumindo isso, (1) reduz a

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



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, φ_0 é ângulo inicial de lançamento do feixe, φ_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 φ , (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 (via sondagens meteorológicas), φ_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.

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

$1/R$ para n constante com a altura

Para n variando com a altura,

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

$< 1/R$ já que $dn/dh < 0$

Para o caso especial onde $dn/dh = -1/R$, $d\varphi/ds = 0$. 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 conveniência, 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).

$$h = \{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin\theta\}^{1/2} - k_e R + h_0$$

Onde h é a altura do feixe como a inclinação do alcance como a inclinação do alcance r , θ 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_0) 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

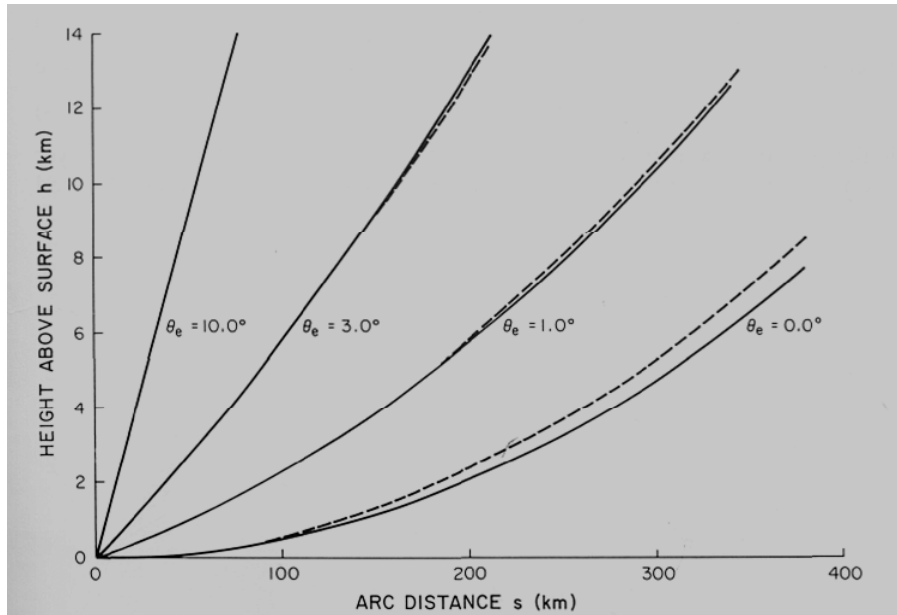


Fig. 2.8 Comparison of the ray paths for an $a_c = 4a/3$ model and an atmosphere with an exponentially dependent refractive index; —, exponential atmosphere; ---, 4/3 earth's radius.

Modelo de Refração despadronizado

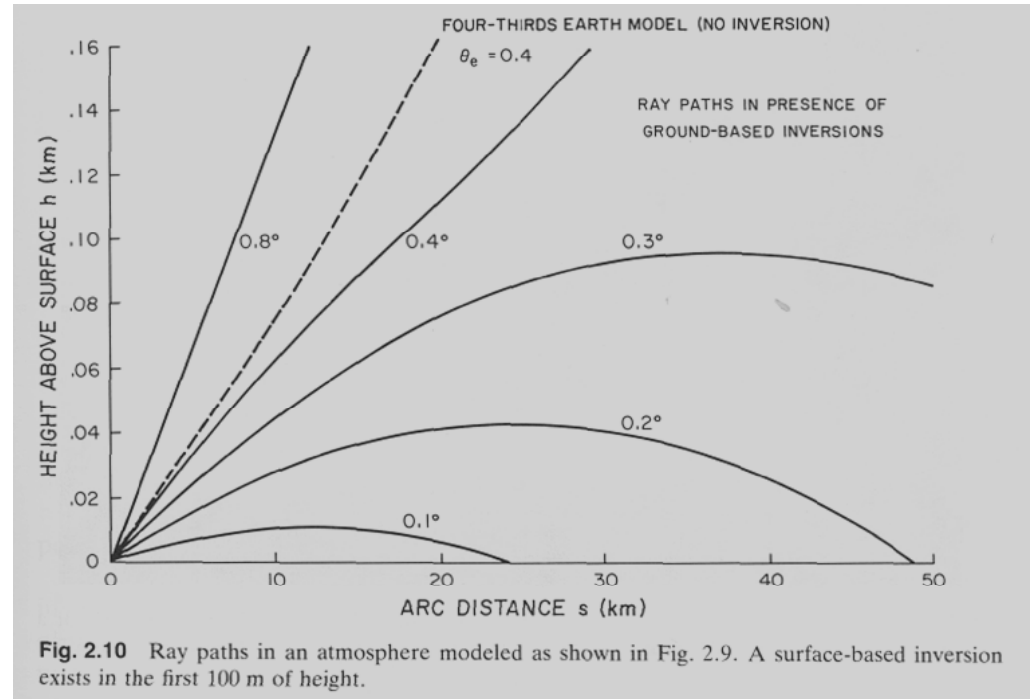


Fig. 2.10 Ray paths in an atmosphere modeled as shown in Fig. 2.9. A surface-based inversion exists in the first 100 m of height.

Doviak and Zrnic (1992)



PRINCÍPIOS DE RADAR

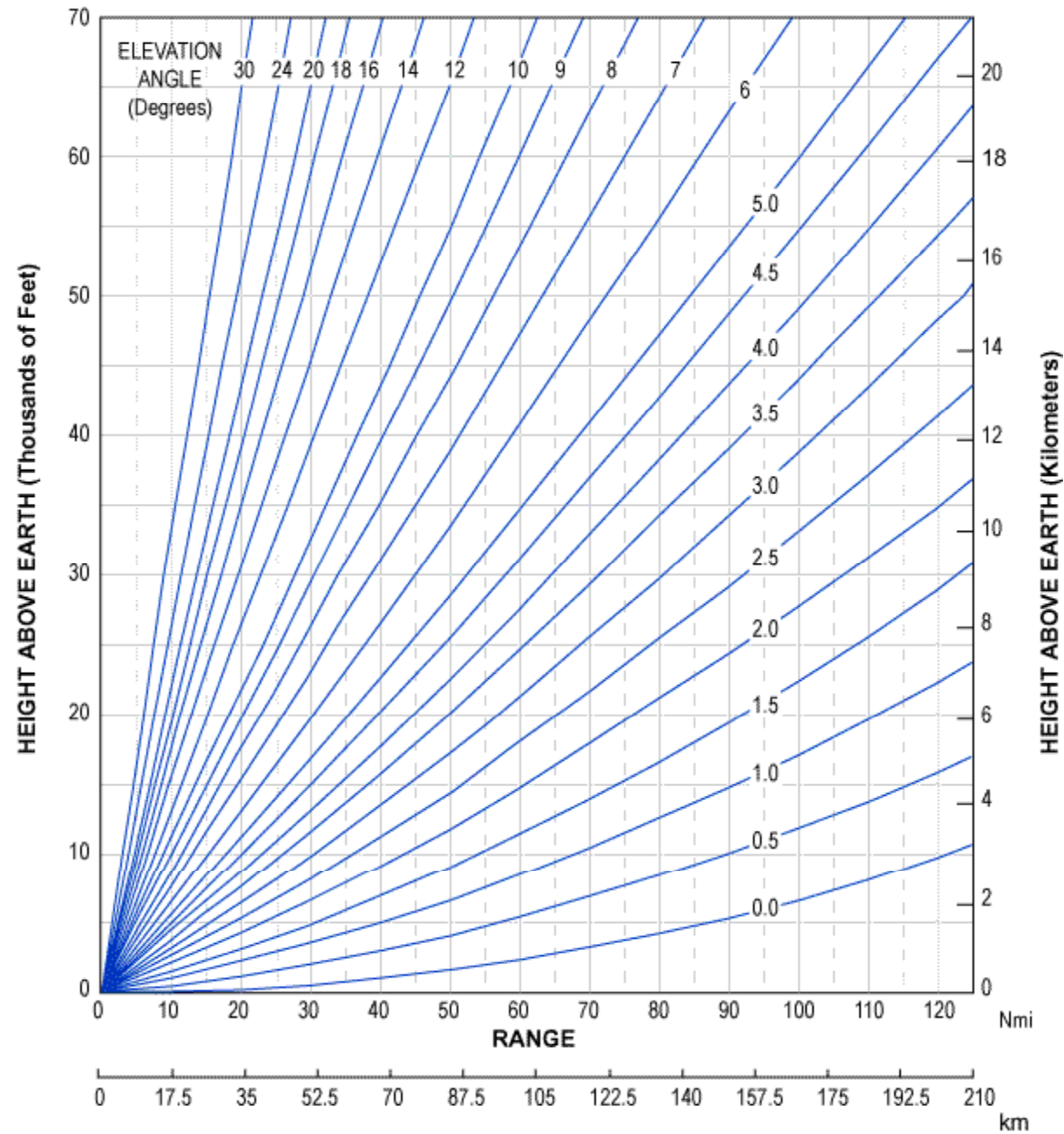


Gráfico do Alcance vs. Altura do feixe de altura central sob condições padrão de refratividade



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 frequentemente causada por resfriamento radiativo durante a noite, ou divergência de ar frio de uma tempestade.

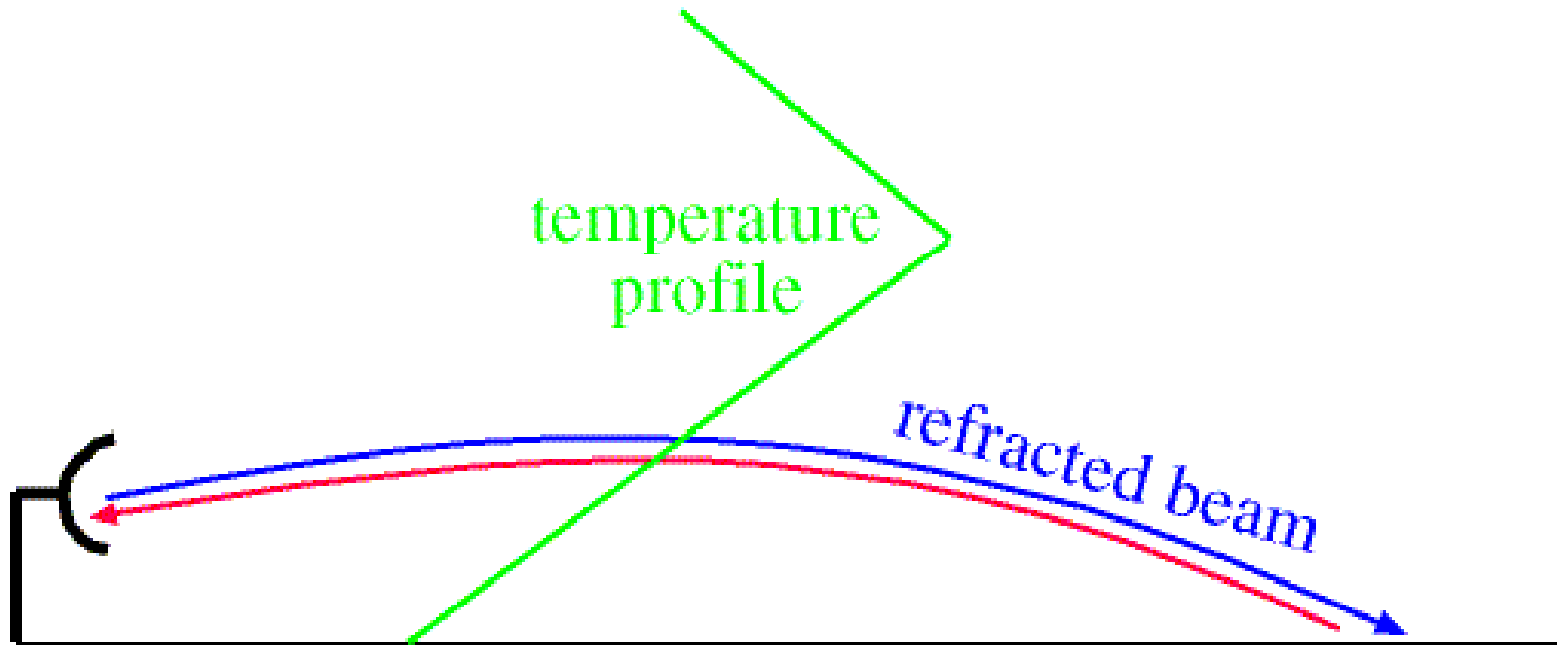
Como T aumenta com a altura, n decresce (rapidamente) com a altura (dn/dh é muito negativo).

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



PRINCÍPIOS DE RADAR

REFRAÇÃO NÃO PADRÃO





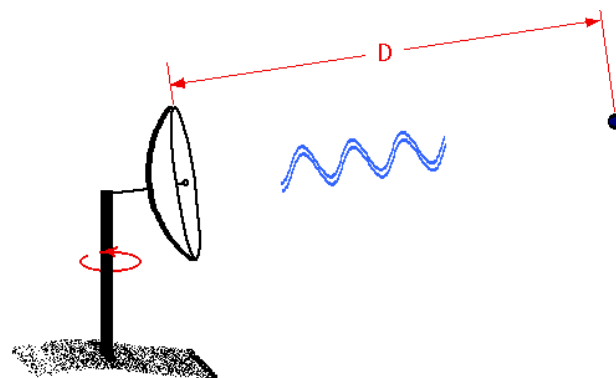
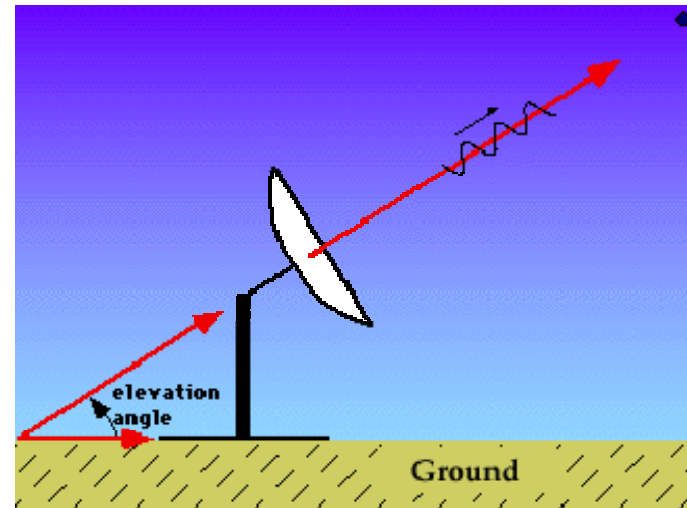
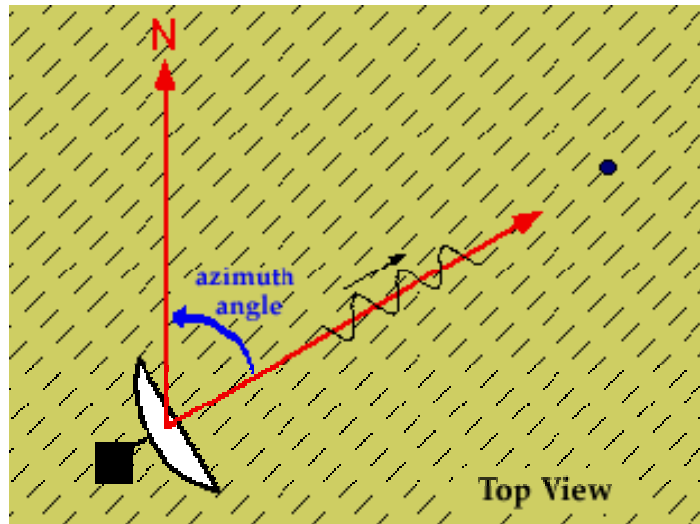
PRINCÍPIOS DE RADAR

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.

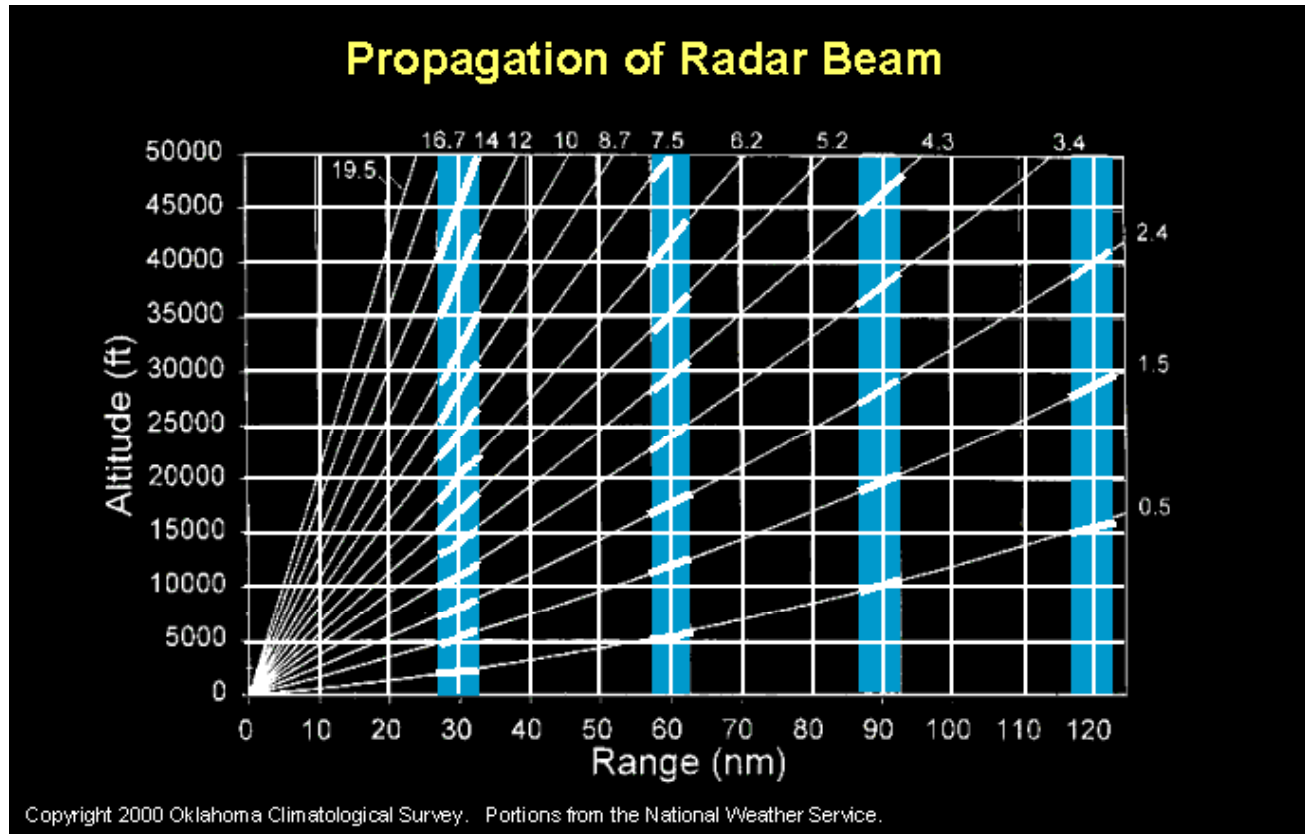
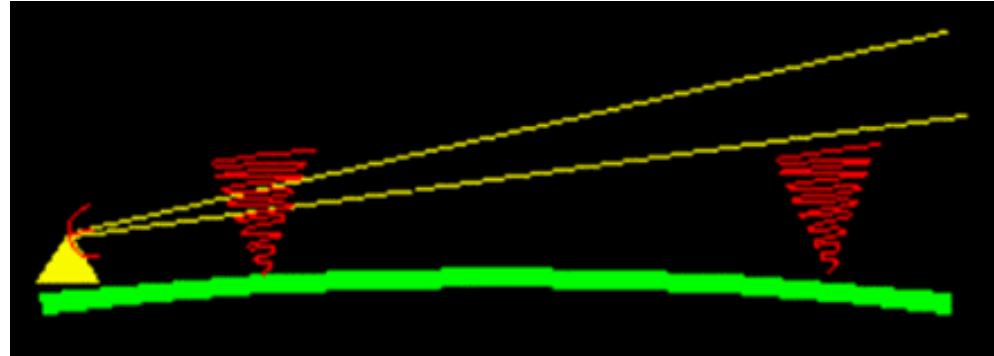
Scans de volume são usados para desenvolver visões tri-dimensionais do campo de refletividade e, em um Radar Doppler, o campo de velocidade radial associado com os alvos iluminados pelo radar.

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.



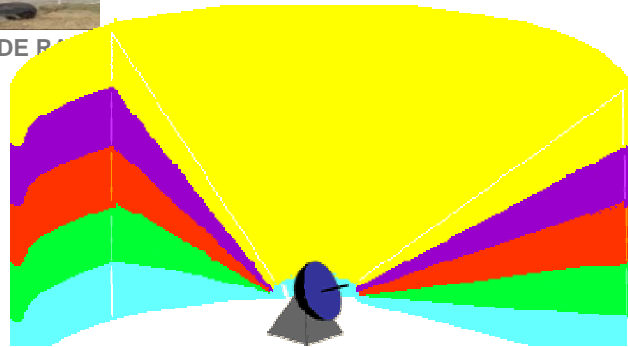
PRINCÍPIOS DE RADAR

ALTURA x ALCANCE DA INCLINAÇÃO





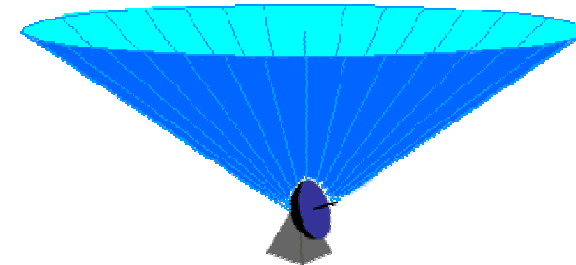
PRINCÍPIOS DE R



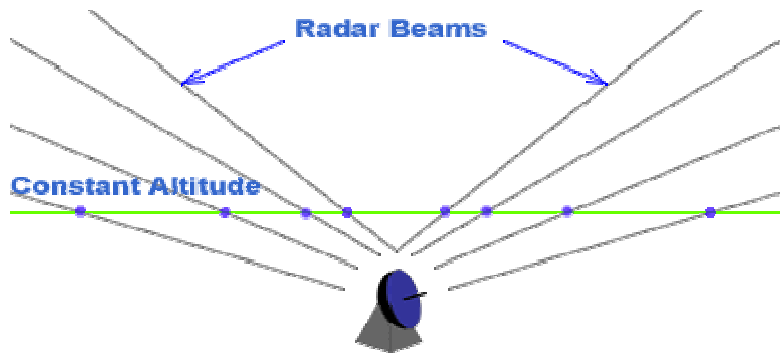
A cross section of a Clear Air Mode Volume Scan

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. O 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° e incrementado por 1° 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° e executa scans de volumes em cinco diferentes ângulos de elevação (Fig F1). Cada elevação subsequente é 1° maior que a última (scans são feitos em 0.5° , 1.5° , 2.5° , 3.5° and 4.5°).

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° e aumentando até 19.5° . Duas rotações completas são feitas para cada elevação.

Em elevações menores, varreduras são geralmente separadas por 1° ; 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

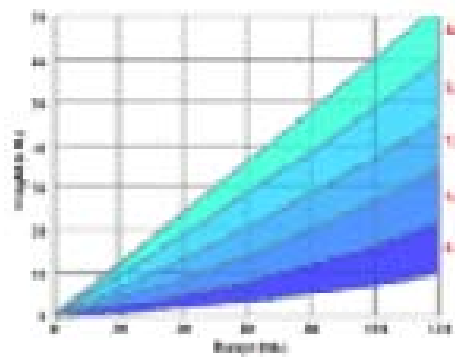
Volume Scanning Patterns

Precipitation Mode

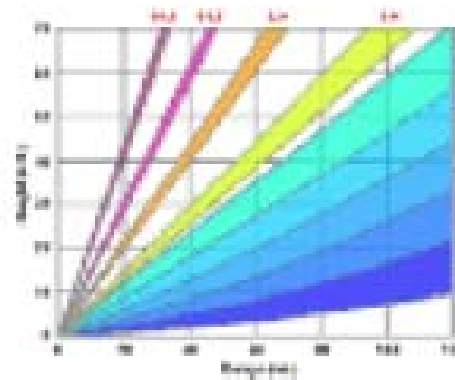
Clear Air Mode

Slow Scan

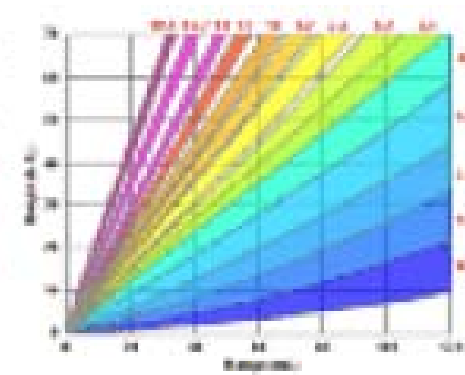
Fast Scan



10 min



6 min

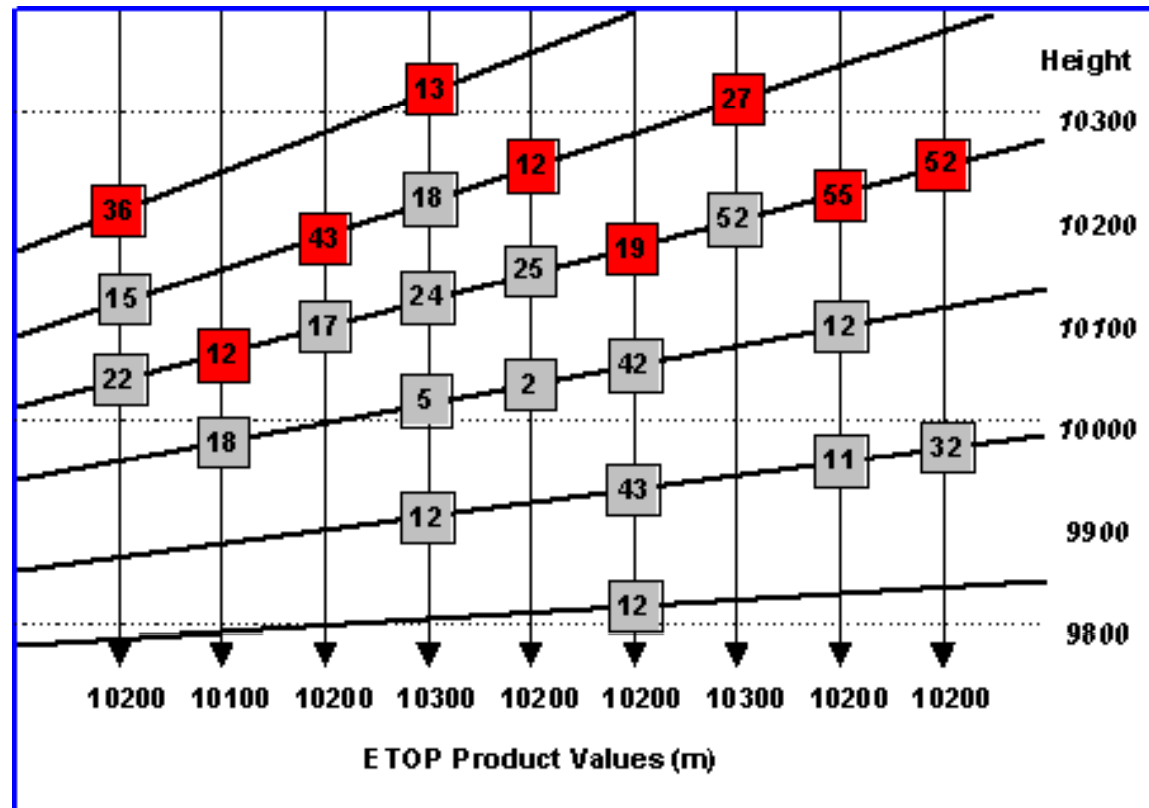


5 min



PRINCÍPIOS DE RADAR

ECHO TOP



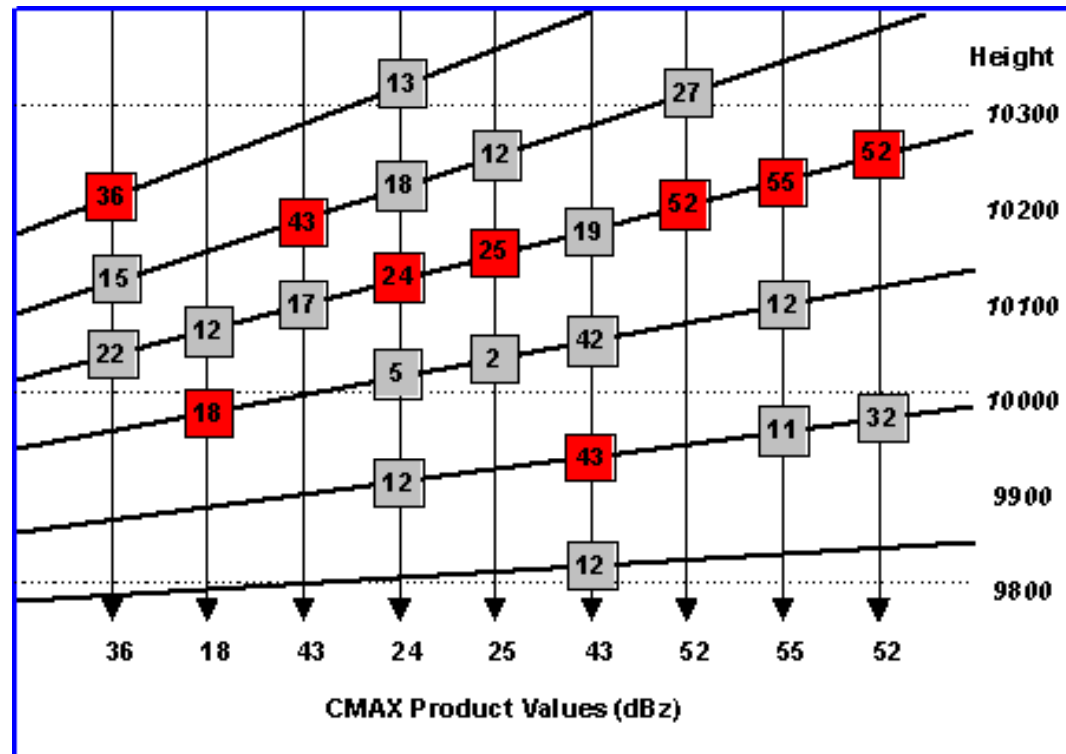
O produto ECHO TOP é o mais alto (em altitude) de retorno na célula. Tanto corrigido como não corrigido a refletividade pode ser usada para gerar esse produto.

O algoritmo ETOPS determina a altura dos ecos. 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



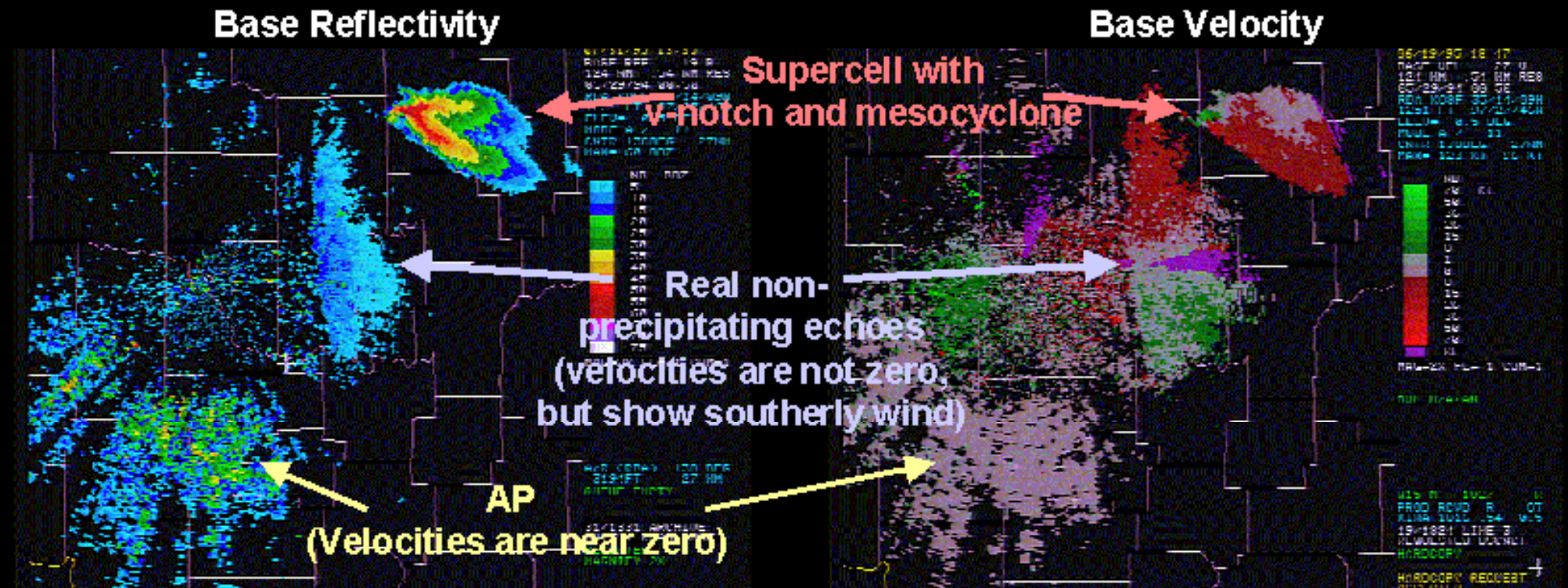
A máxima intensidade em uma coluna é uma indicação da máxima refletividade em cada célula. Alturas máxima e mínima podem ser definidas pelo usuário e padronizadas para zero e 30 quilômetros.

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



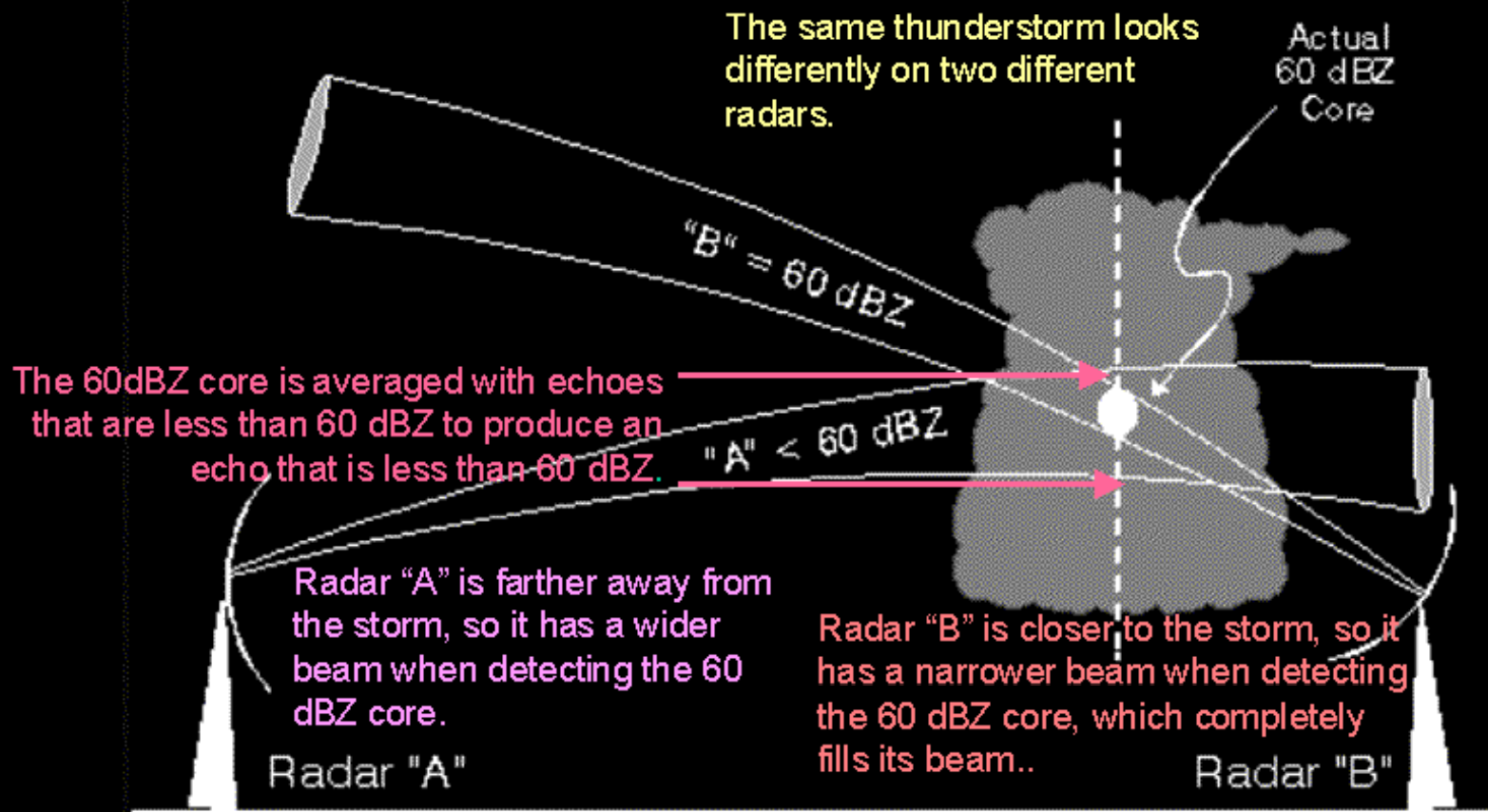
AP is caused by ground returns when the radar beam bends and strikes the earth's surface at a relatively large distance from the radar. *Base* velocities of AP echoes are usually near zero and AP usually only appears on the lowest tilts.

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



PRINCÍPIOS DE RADAR

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.