



PRINCÍPIOS DE RADAR

# ***FUNDAMENTOS DO RADAR***

## **CAPÍTULO 3**

**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



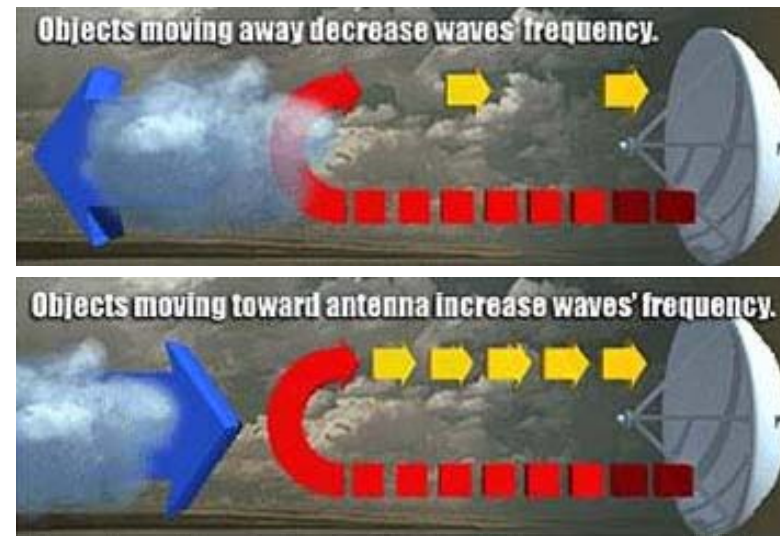
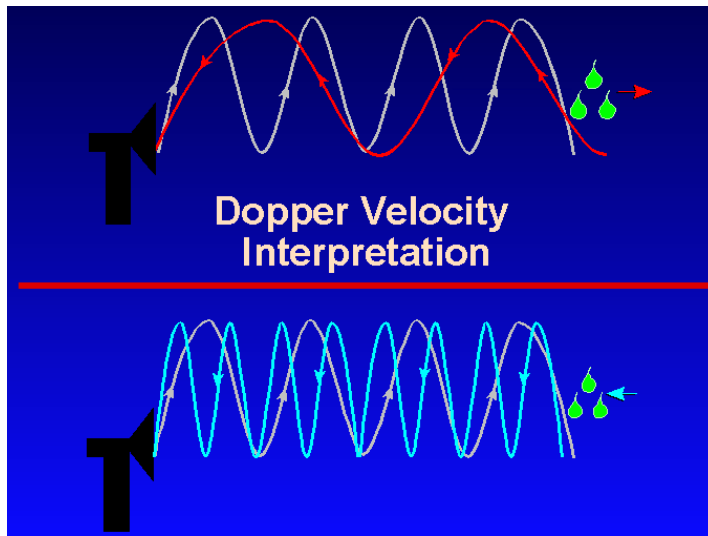
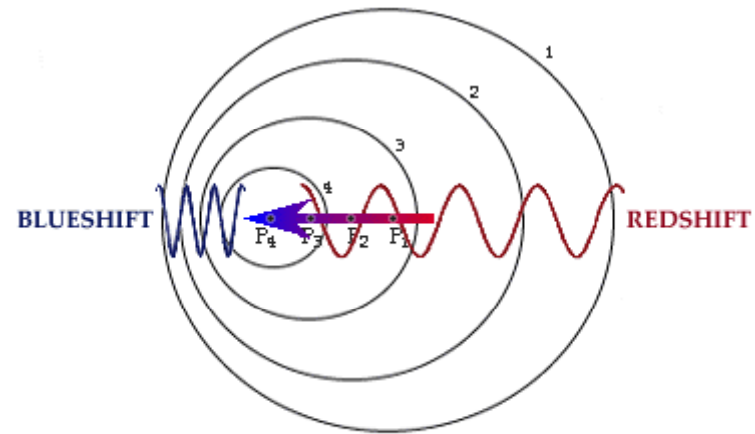
PRINCÍPIOS DE RADAR

# VELOCIDADE RADIAL



PRINCÍPIOS DE RADAR

# O EFEITO DOPPLER

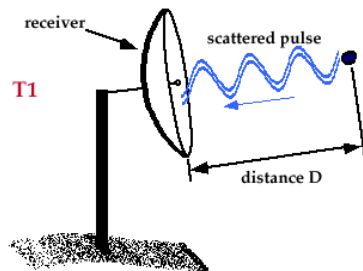




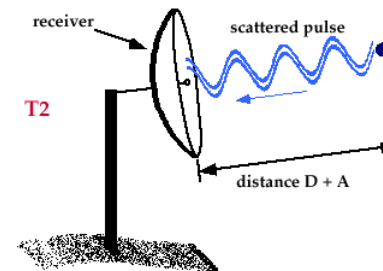
PRINCÍPIOS DE RADAR

## 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.

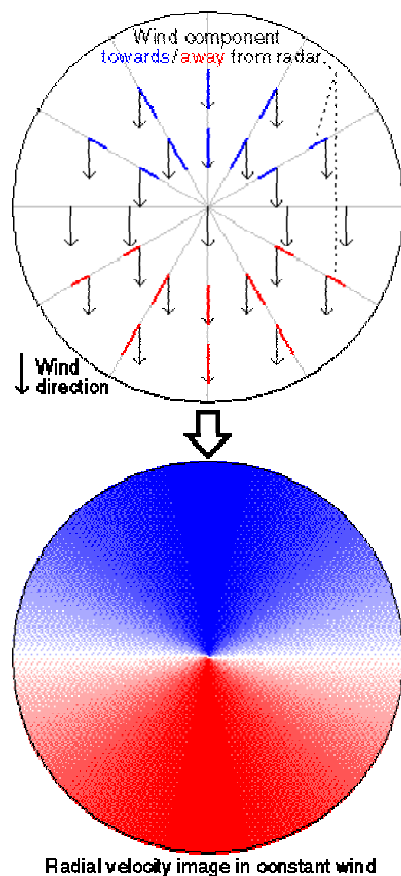
A distância do radar  $r$  e o ângulo de elevação do nível de PPI correspondente dará a altitude do alvo visualizado  $z = r \sin \alpha$ .

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).

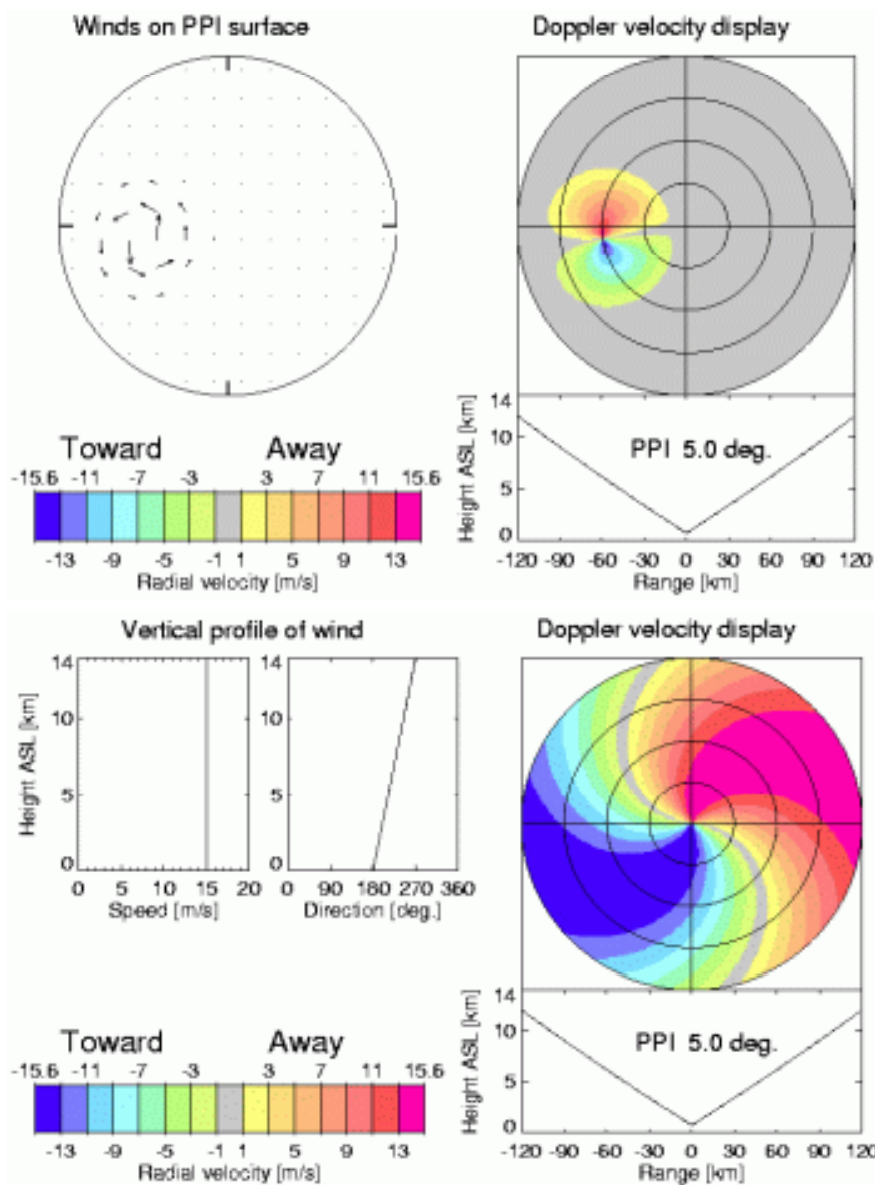
Se tomarmos como exemplo um vento constante de norte, velocidades altas de aproximação serão observadas quando o radar olhar para norte, velocidades altas se afastando quando olhar ao sul, e velocidade igual a zero quando olhar a oeste ou leste.

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.

***Isótopas 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.

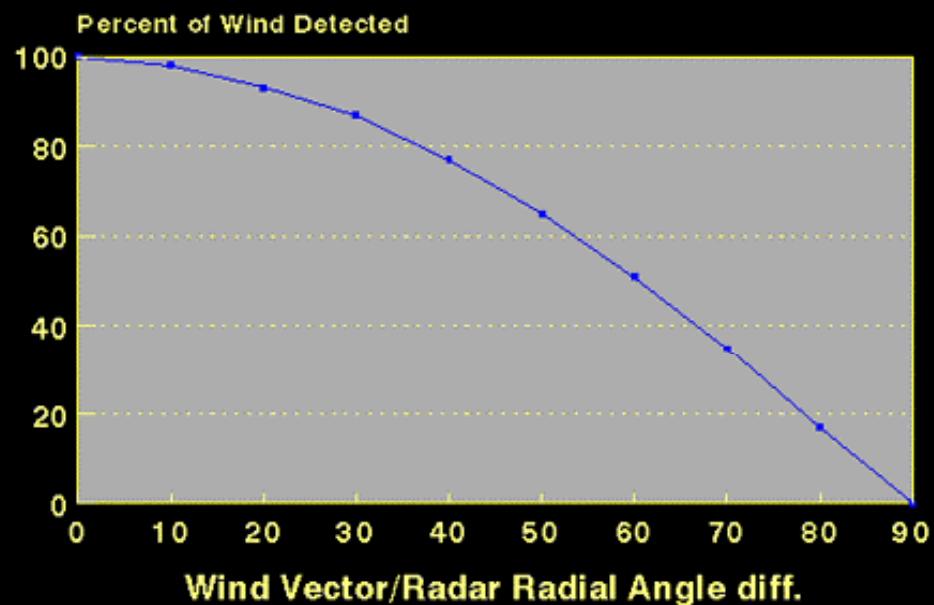
Simulações de velocidade aliased e descontinuidade frontal do campo de vento foram também realizadas.

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.

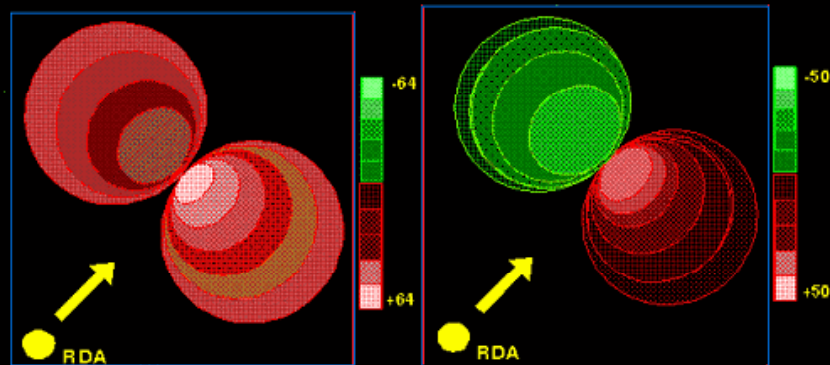
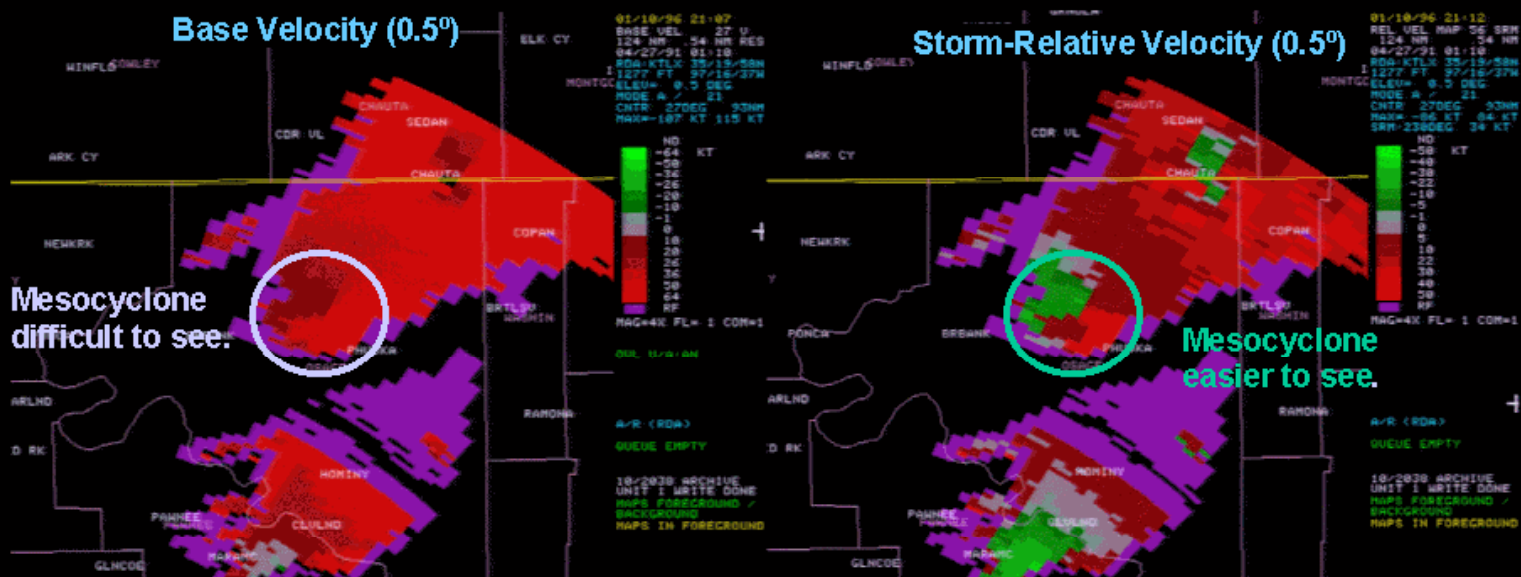
Além dessas limitações, informação Doppler é de grande valia para previsores de tempo especialmente em tempo severo onde:

- 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



Storm Motion 230/40 kts

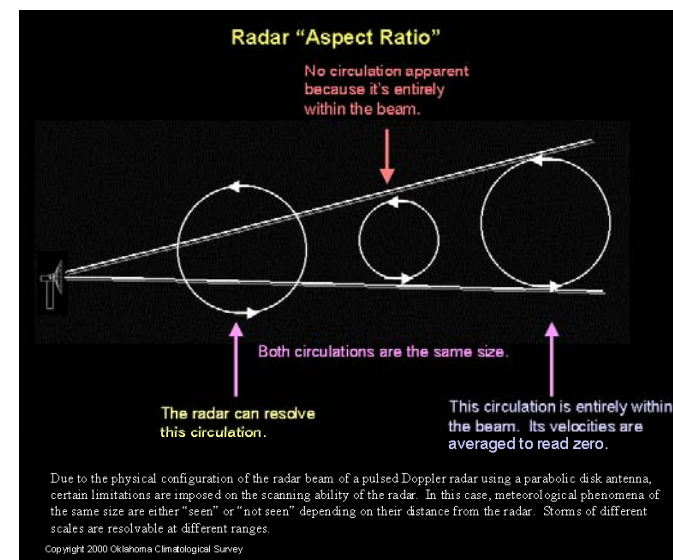
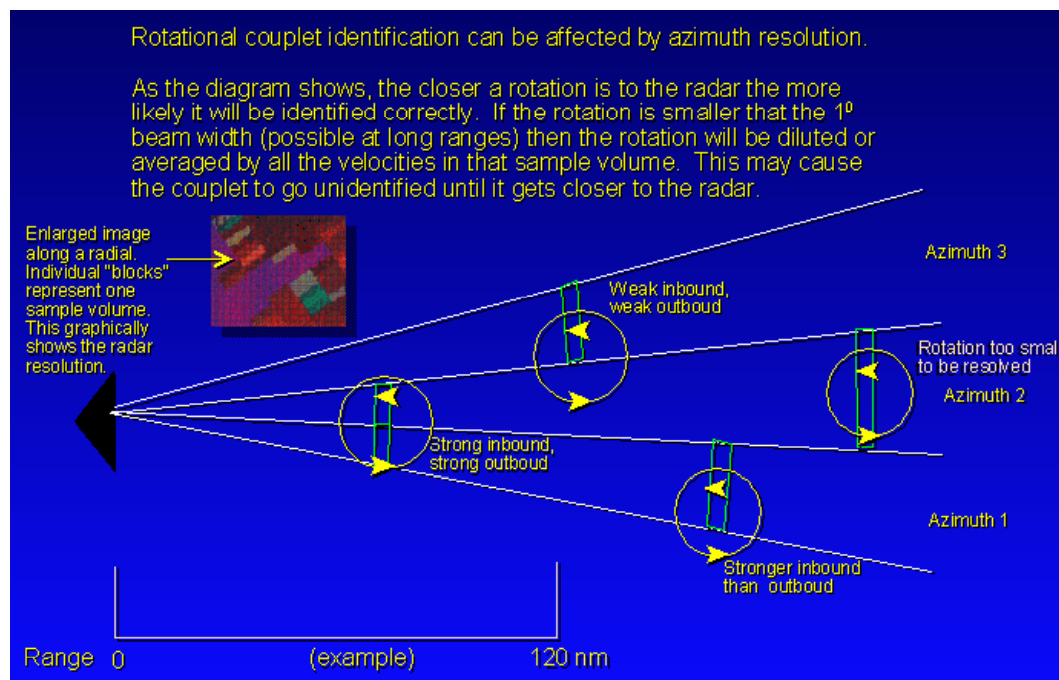
When storms move quickly, their own motion can mask circulations within in the storm, as shown in the base velocity product. The motion of the storms can be removed, to make the storm-relative product. The storm-relative velocity indicates the velocity within the storms as if they were stationary.

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



PRINCÍPIOS DE RADAR

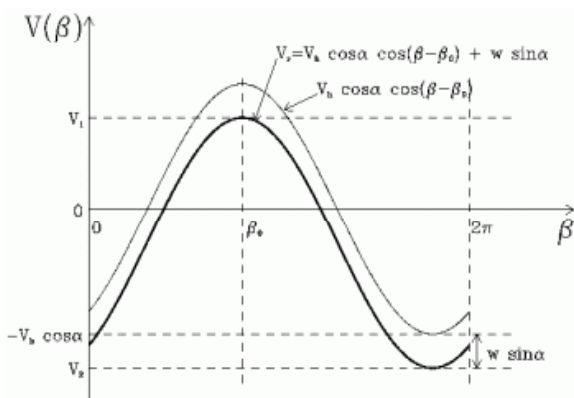
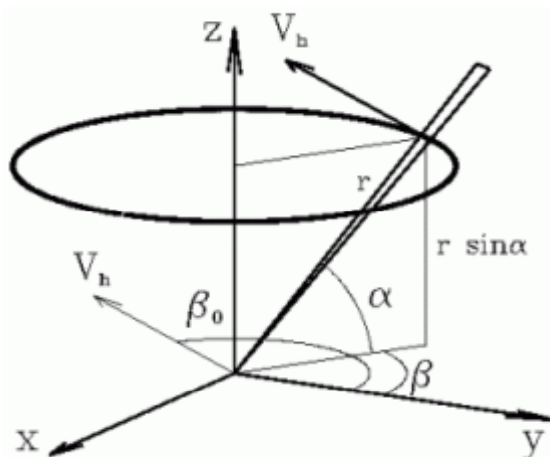
## RESOLUÇÃO AZIMUTAL





PRINCÍPIOS DE RADAR

## Visualização da Velocidade Azimutal – Método VAD (VVA)



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  $t$ .

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

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



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 sua "primeira dica" 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  $26.25 \text{ ms}^{-1}$  (ou ~ 51 kt).



PRINCÍPIOS DE RADAR

## DILEMA DOPPLER

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

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

**Range folding** é a colocação do eco pelo radar em uma localização na qual o azimute está correto, porém cujo 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 de modo a permitir um intervalo de tempo maior para o receptor, aliviará o problema da ambiguidade (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, uma 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.

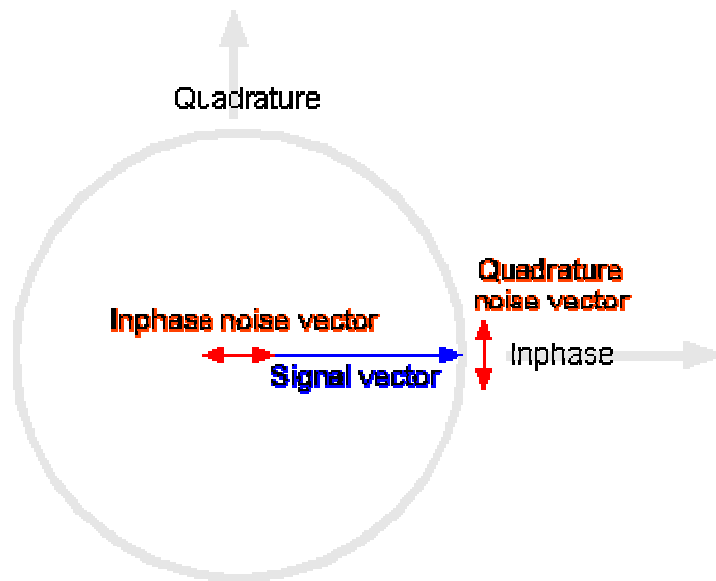


PRINCÍPIOS DE RADAR

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) » Ruído Quadrature / Signal*

$$\sigma_{\text{ruído}}^2 = N$$

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

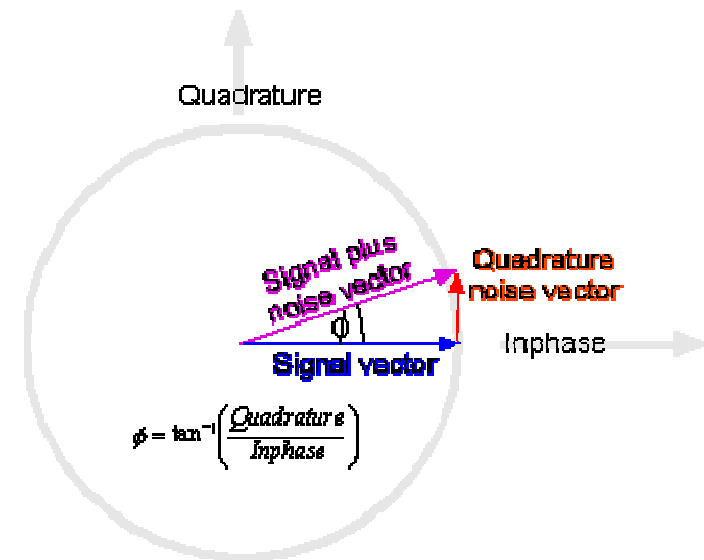
$$\sigma_B = \sigma_I = \sqrt{N/2}$$

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

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.