

第二章

天气雷达基本工作原理及 主要设备、参数

- 两个课程的核心问题
- 雷达能做什么
- 雷达的前世今生
- 气象雷达的分类、**波段**
- 气象雷达的发展历程（美国和中国的发展现状）

主要内容



- 一、天气雷达的基本工作原理
- 二、天气雷达的组成和主要技术参数
- 三、多普勒天气雷达工作原理

重点掌握：多普勒天气雷达最大不模糊速度及距离、多普勒频率 参数： PRF 、 PRT 、 h 、 θ 、 V_r 、 V_{rmax} 、 R_{max} 、 τ 、 f_D 及各计算公式



一、天气雷达工作原理

天气雷达工作原理：

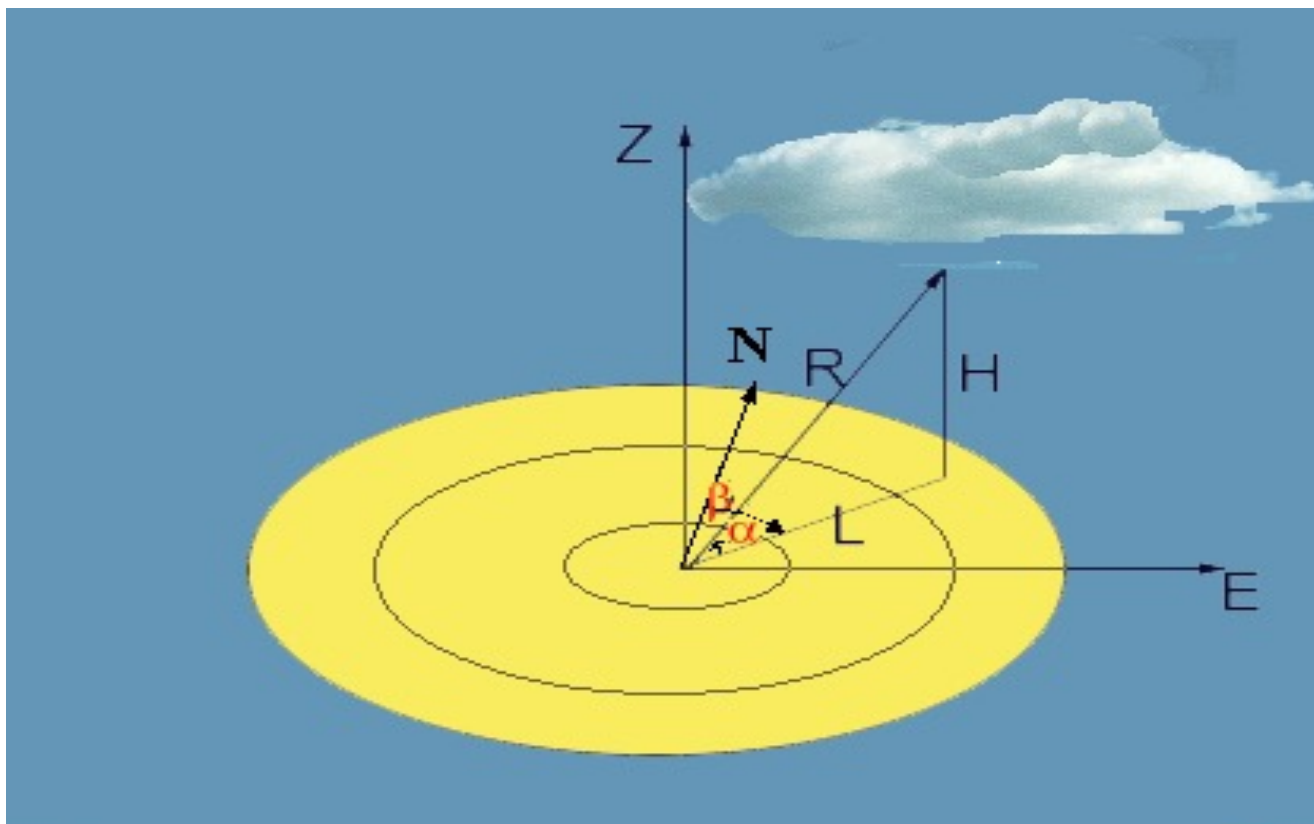


- 天气雷达**间歇性**地向空中发射电磁波列（称为探测脉冲），它以**近似直线**的**路径和接近光速**在大气中传播，在传播的路径上，若遇到了气象目标物，脉冲电磁波被气象目标物散射，其中散射返回雷达的电磁波（称为回波信号，也称为后向散射）在屏幕**回波图**上显示出**气象目标的空间位置和特征**

天气雷达工作原理：



天气雷达工作原理：



R为斜距, α 、 β 分别表示雷达天线的仰角和方位角

$$R = \frac{1}{2} C \Delta t \quad C = 3 \times 10^8 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-1}$$

Δt 以微秒为单位, 1 微秒 (μs) = 10^{-6} 秒

天气雷达的基本工作原理

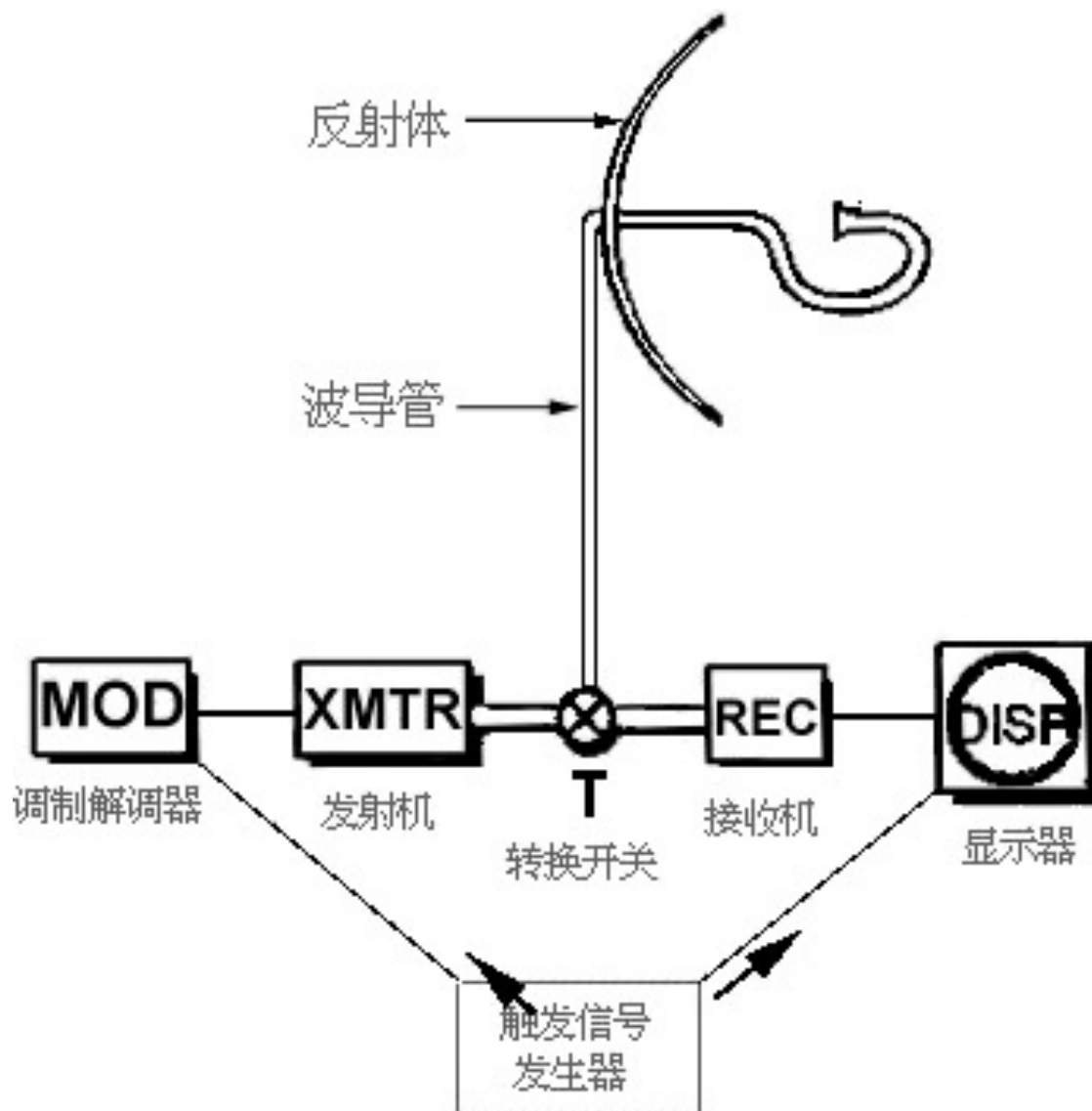
二、天气雷达的组成和主要技术参数

1、天气雷达的组成

2、天气雷达显示方式

3、天气雷达主要技术参数

1、天气雷达组成



2、天气雷达常用扫描显示方式

▲ 平面位置显示 (PPI)

▲ 距离高度显示 (RHI)

▲ 等高平面位置显示(CAPPI)

2、天气雷达常用扫描显示方式



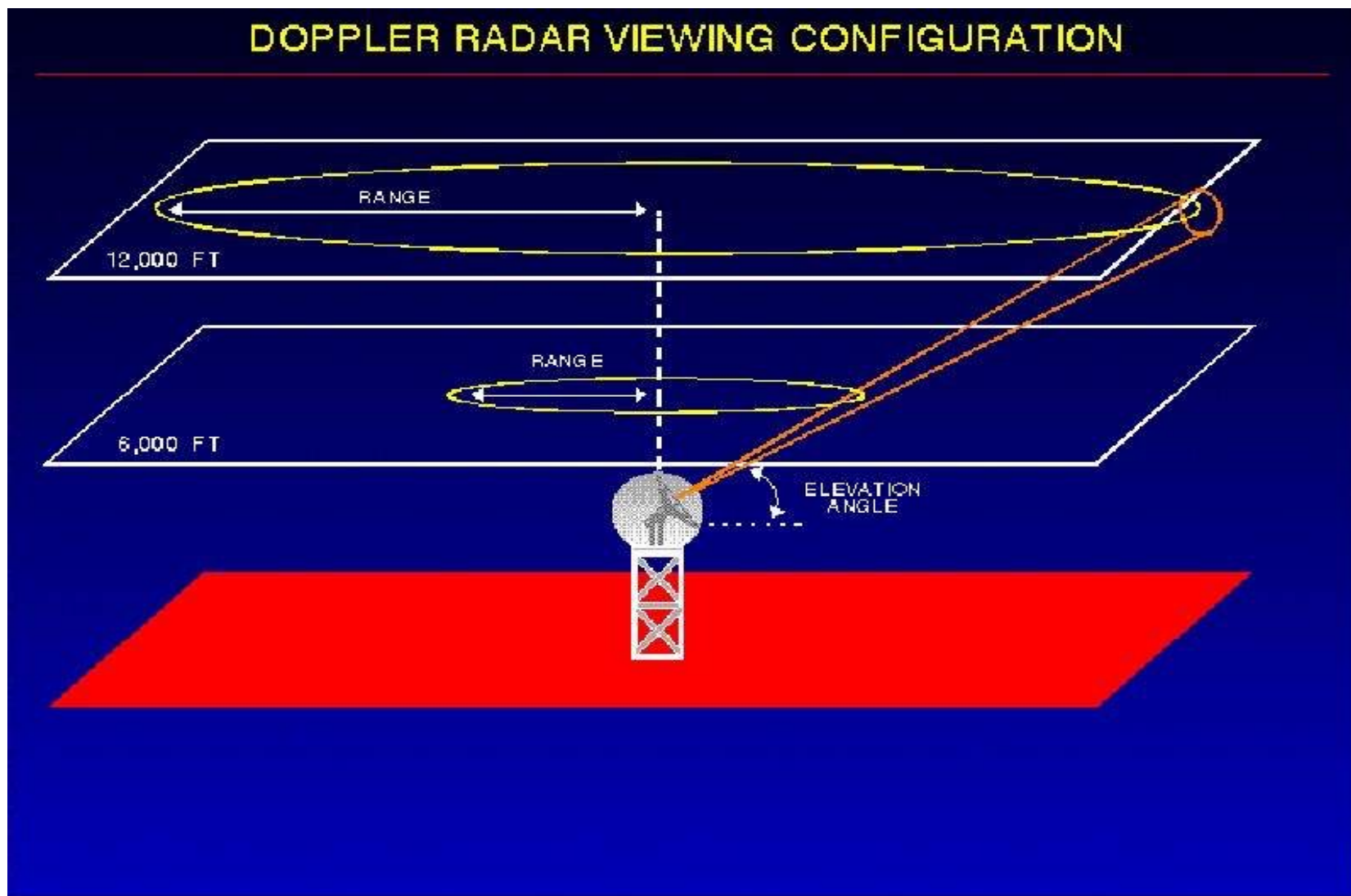
(1) 平面位置显示Plane Place Image (简称：平显 或 PPI)

雷达以某一仰角 α 作 $0^\circ \sim 360^\circ$ 扫描（一般为顺时针旋转）所得的信息在屏幕上显示。屏幕显示中心为雷达所在处；回波距离雷达的距离 R 是雷达实际测量距离（称为斜距），而不是水平距离。一般情况下， R 越大，回波离地面的高度越高。等 R 圈的离地高度相等

2、天气雷达常用扫描显示方式



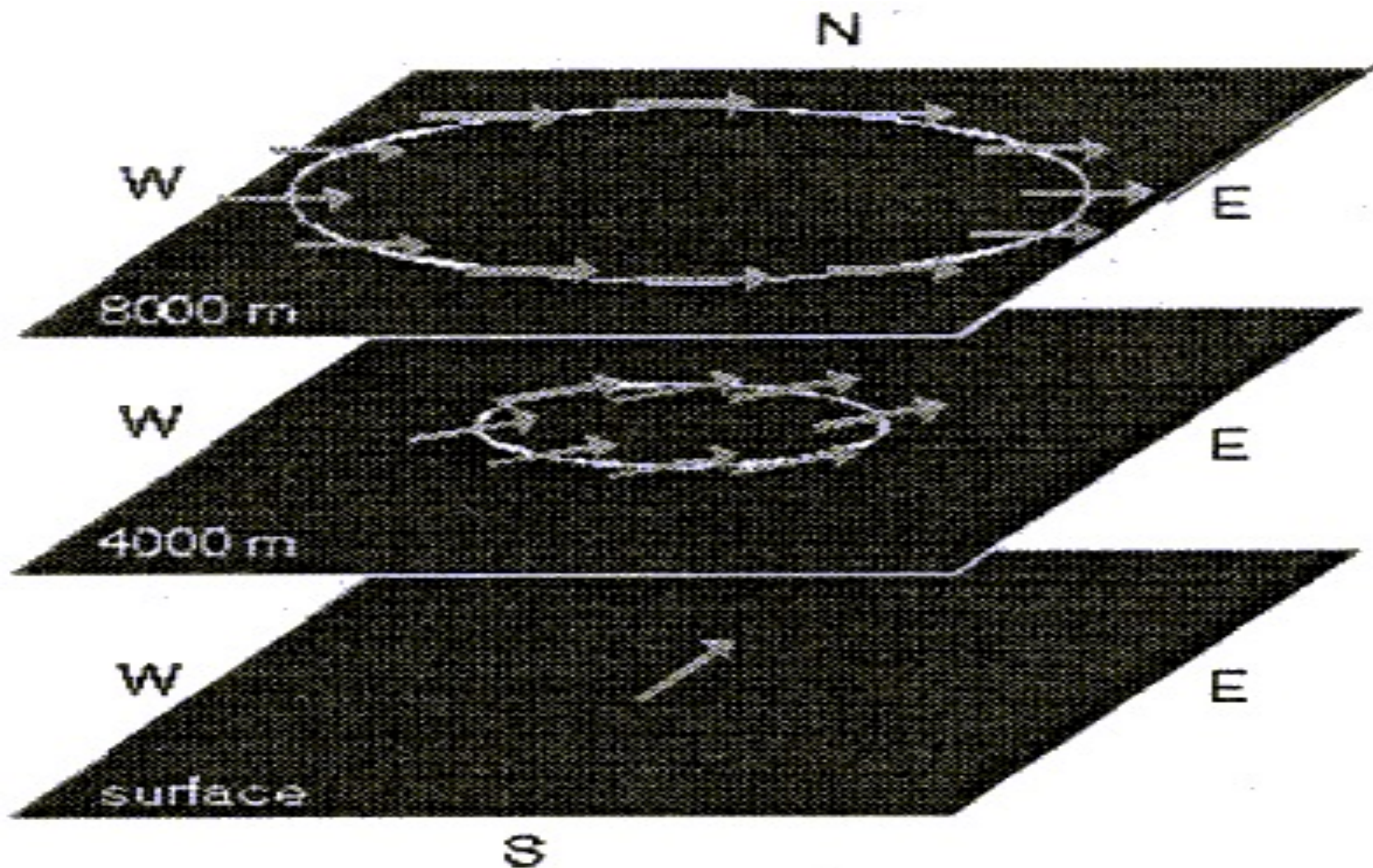
雷达的 PPI 扫描方式（平显）



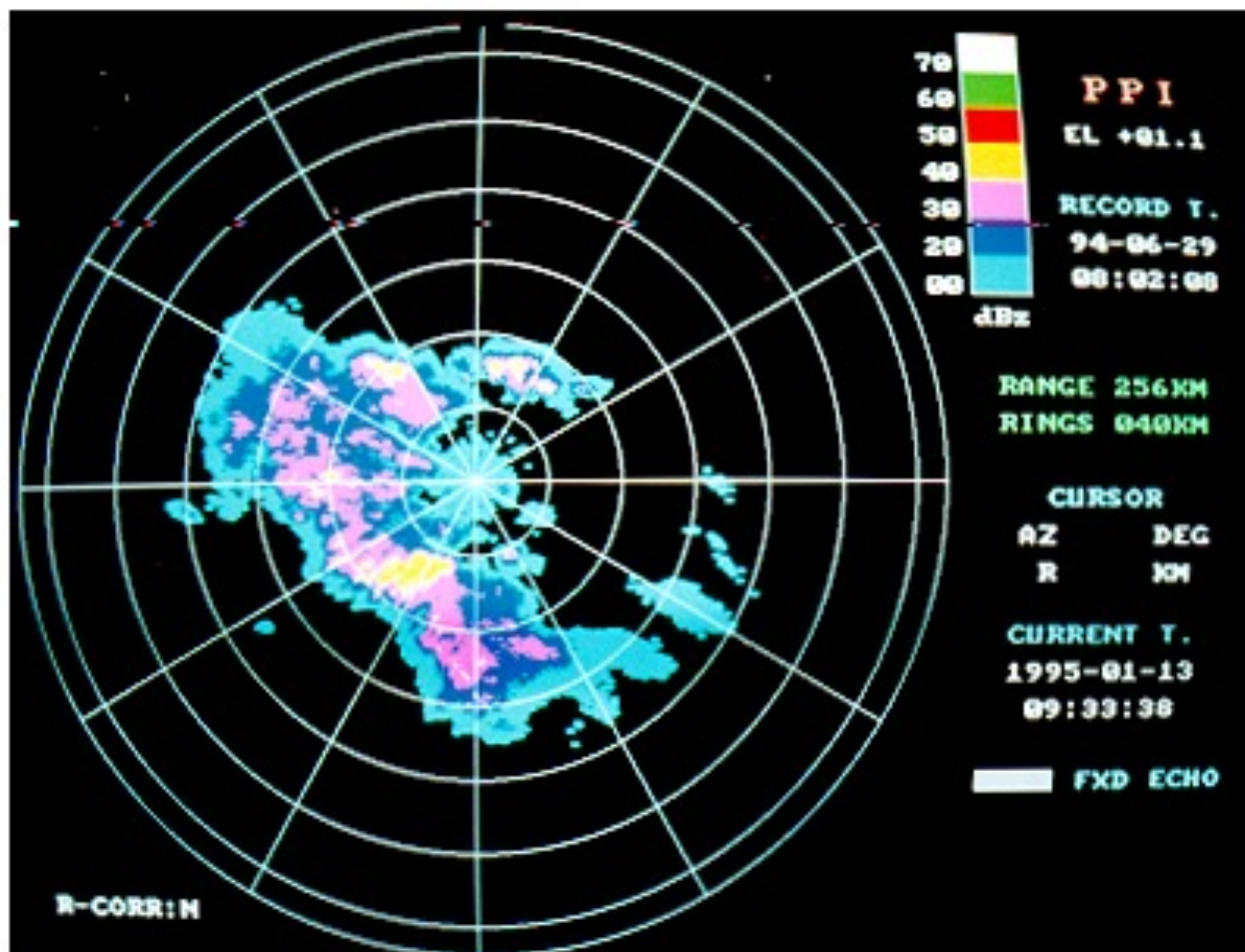
2、天气雷达常用扫描显示方式



PPI 显示结果的空间分布



2、天气雷达常用扫描显示方式



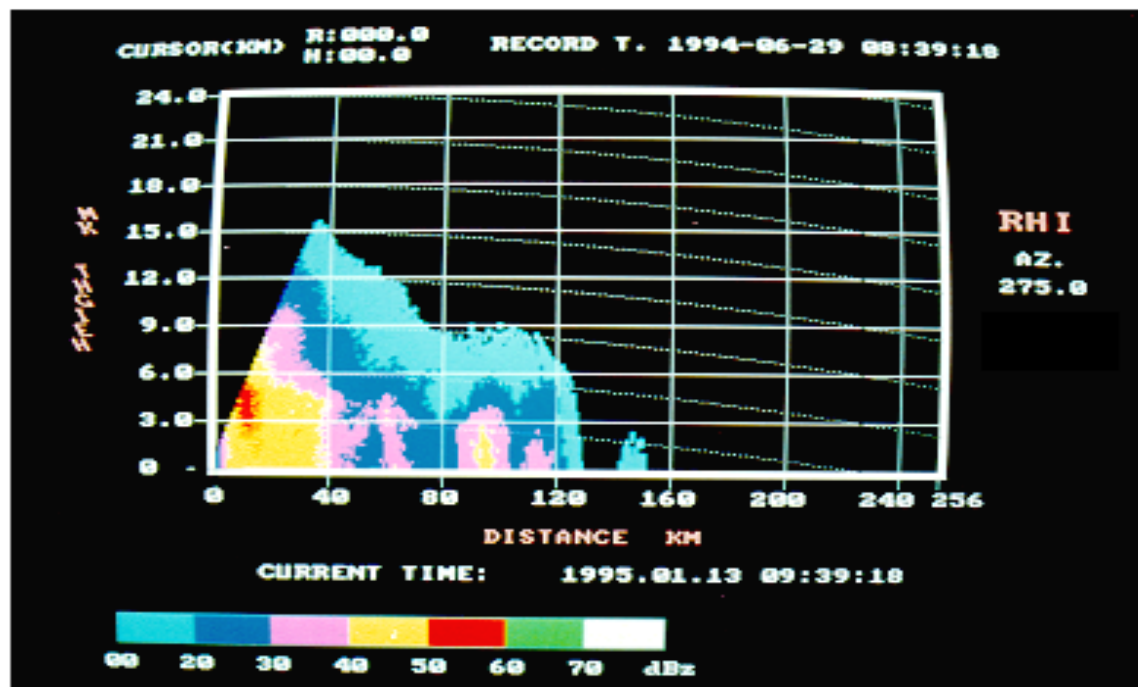
PPI 回波图

2、天气雷达常用扫描显示方式



(2) 距离高度显示RHI (高显) Radius High Image

雷达固定某方位角 β （一般以正北为 0° ，顺时针方向来计算方位角），天线俯仰扫描，显示回波区的垂直结构。



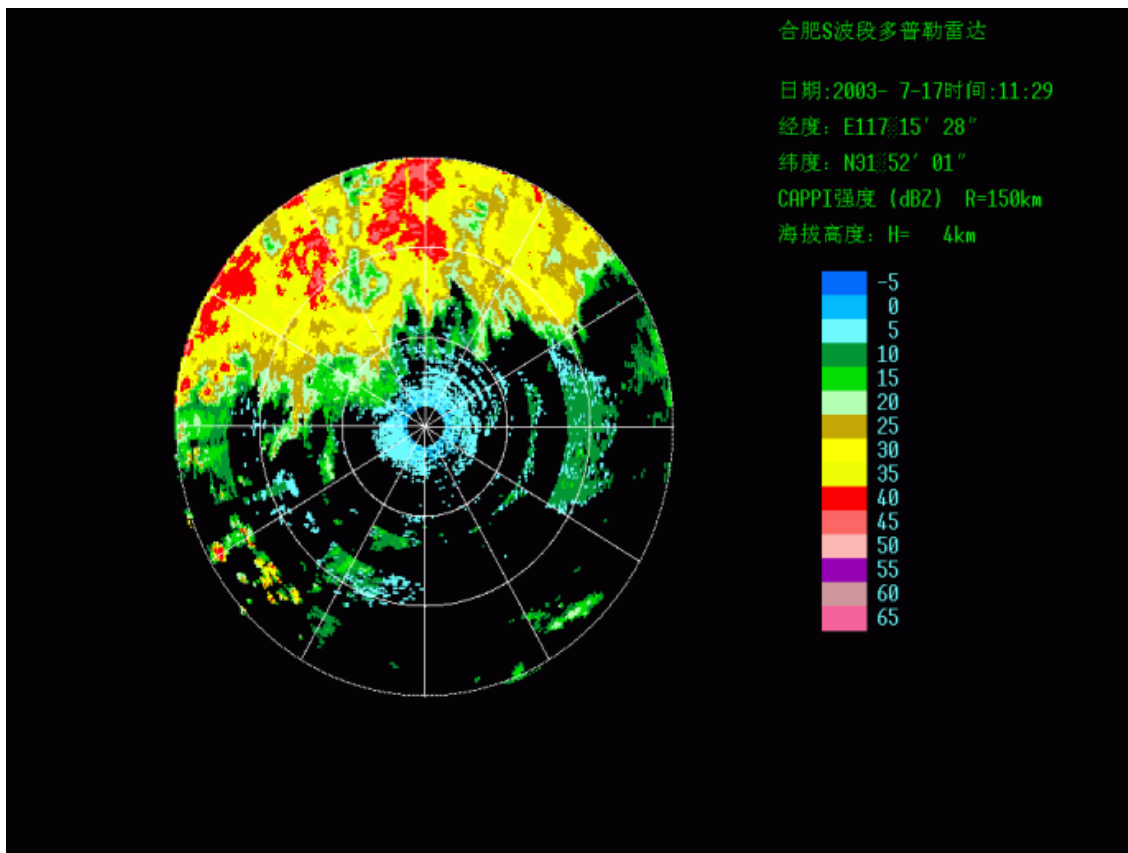
RHI 回波图

2、天气雷达常用扫描显示方式



(3) 等高平面位置显示 (CAPPI)

雷达以多个仰角分别以 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 扫描得到一个立体扫描资料，用内插技术得到距地面高度相等的等高平面位置图像。





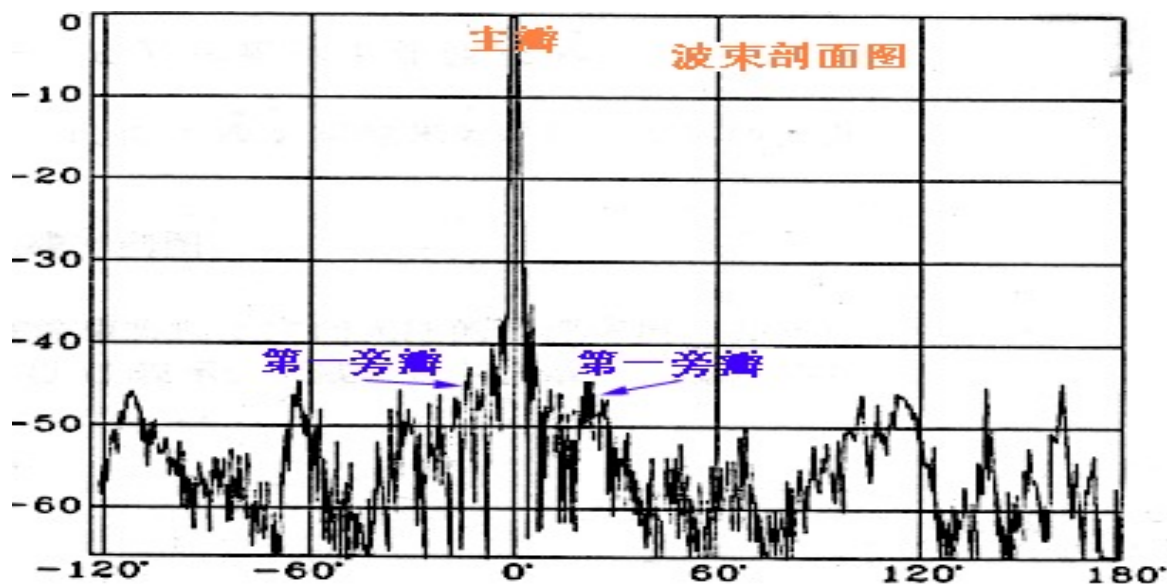
3、天气雷达主要技术参数

- 1)、波束宽度 θ
- 2)、天线增益 G
- 3)、天线有效面积 A_e
- 4)、脉冲长度 h 、脉冲宽度 τ
- 5)、脉冲重复周期 T (**PRT**: **P**ulse **R**epetition **T**ime)
- 6)、脉冲重复频率**PRF** (**P**ulse **R**epetition **F**requency)
- 7)、最大探测距离 $R_{\max}$

1) 波束宽度

定义：在天线方向图上，二个半功率点方向的夹角，称为波束宽度，用来衡量天线主瓣的宽度，是天线的一个重要技术参数。

水平 θ ，垂直 φ ，单位：度



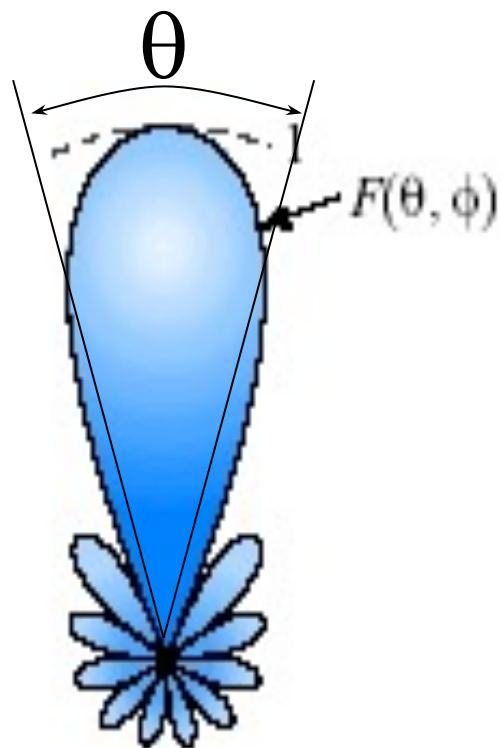
天线方向图

1) 波束宽度



天线的方向图定义

在半径恒定时接收功率描绘的图形称为**功率方向图**，而在半径一定时，描述电场空间与方向 (θ, ϕ) 之间场强的图形称为天线的**场强方向图或简称为方向图**。即为场强振幅的归一化方向性函数 $F(\theta, \phi)$ 的图形：



$$F(\theta, \phi) = \frac{|E(\theta, \phi)|}{|E_{\max}|}$$



1) 波束宽度

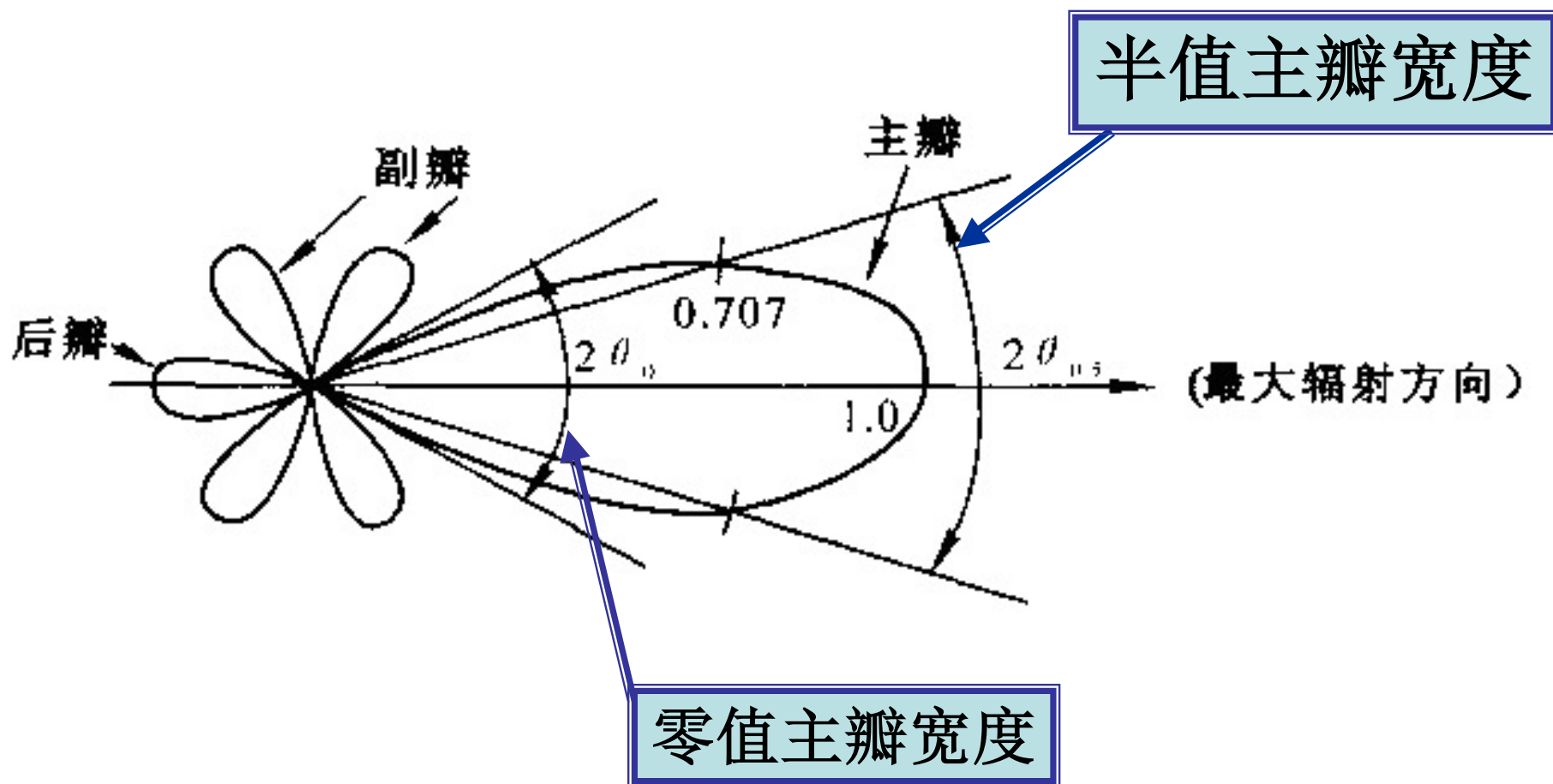
半功率主瓣宽度、零值主瓣宽度

- 主瓣最大辐射方向两侧的两个半功率点（即功率下降为最大值的一半，场强下降到最大值的 ）的矢径之间的夹角，称为半功率主瓣宽度或主瓣宽度，记为： $2\theta_{0.5}$ 或 $2\phi_{0.5}$

零值主瓣宽度：即全主瓣宽度，记为 $2\theta_0$ 或 $2\phi_0$

1) 波束宽度

天线方向图的波瓣





1) 波束宽度

水平 θ , 垂直 φ , 单位: 度

天气雷达天线通常采用圆形抛物面, $\therefore \phi = \theta$

$$\theta \sim \frac{\lambda}{d}$$

其中: θ : 雷达波束宽度 (度);

λ : 雷达波长 (cm);

d : 雷达天线抛物面反射体的直径(cm)

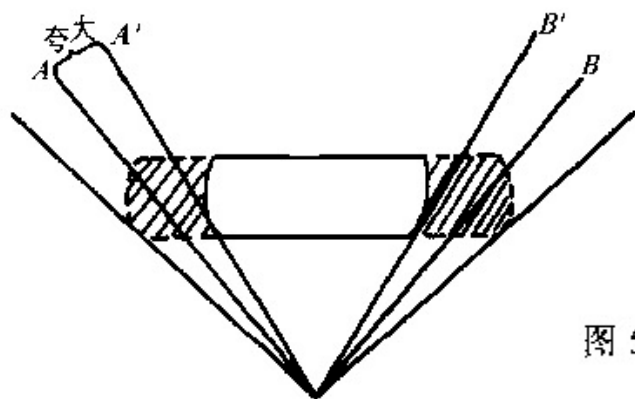
波束宽度的大小取决于抛物面反射体的直径 d 和雷达工作波长 λ , 一般 $<2^\circ$

一般天气雷达: $\theta = \Phi \approx 1.5^\circ$; 新一代多普勒天气雷达 $\theta = \Phi \approx 0.9^\circ \sim 1.0^\circ < 1^\circ$

第一旁瓣与主瓣功率之比越小越好, 一般较好的雷达应满足小于300~400倍

结论: λ 越短, d 越大, 则 θ 越窄, 雷达分辨率越高, 定向角度分辨率越高, 探测精度越高, 造价越高。

1) 波束宽度



波束宽度对探测降水区的影响

图 5.11 波束宽度与切向分辨率示意图

(1) 对强雷暴。这里所谓强是指像图 5.11 一样的情况, 即当波束半功率点处碰到降水区时, 在雷达显示器上即有回波反映。显然, 这时切向探测误差与单个强目标情况相同, 即 $\frac{\theta}{2} \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot R$

(2) 对特强雷暴。这里所谓特强是指波束到半功率点处还未碰到降水区时, 在雷达显示器荧光屏上就有回波反映。容易得到, 这时的切向探测误差应为 $> \frac{\theta}{2} \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot R$

(3) 对强度一般的降水区。这里所谓强度一般是指当波束半功率点处碰到降水区时, 在雷达显示器荧光屏上没有回波出现。只有当接近波束主轴地方碰到降水区时, 在荧光屏上才有回波反映。这时切向探测误差为 $< \frac{\theta}{2} \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot R$

(4) 对较弱降水区。这里所谓较弱是指当波束主轴处碰到降水区时, 在荧光屏上有回波反映, 这时将不产生切向探测误差。

2) 天线增益 (G 单位 : dB)



当辐射总功率相同时有：

$$G = \frac{\text{天线在最大辐射方向的能流密度}}{\text{各向均匀辐射天线的能流密度}} = \frac{S_{\max}}{S_{\text{平均}}}$$

G与波束的关系： $G = \frac{\pi^2}{\theta\phi} k$

其中k为随天线类型及形状改变的参数

对于圆形抛物面反射体 $\theta = \phi$, $k = 1$, $G = \frac{\pi^2}{\theta^2}$

由上可得： θ, ϕ 越小， G 越大



3)、天线有效面积 A_c

定义：指天线反射体能有效地接收回波信号的口径面积

$$P_r = S \cdot A_c$$

$$A_c = \frac{2}{3} A_p$$

$$G = \frac{8\pi}{3\lambda^2} A_p$$

其中：

P_r 为天线所收到的总回波功率；

S 为回波的能流密度；

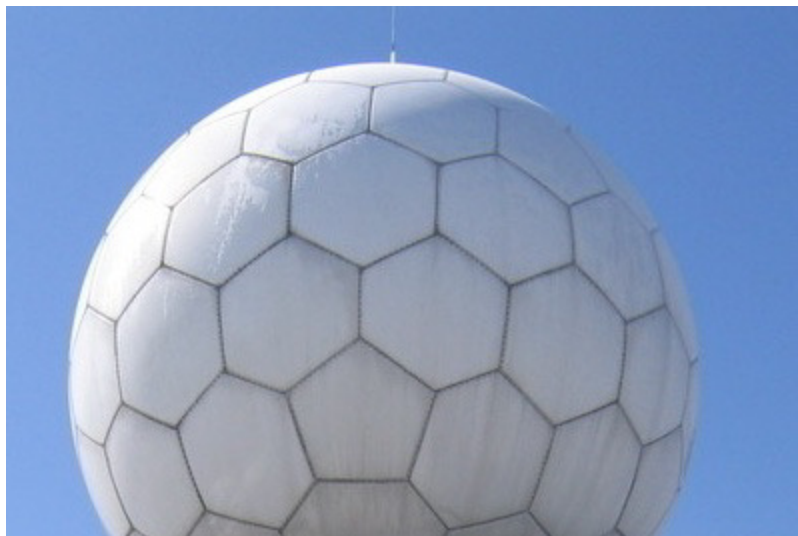
A_c 为天线的有效面积；

A_p 为天线的几何面积。

结论：天线尺寸越大，波长越短，天线增益越高（所以气象用厘米波长的雷达）。

3)、天线有效面积 A_c

天气雷达球形天线罩功能



六角形天线罩



西瓜皮形天线罩

- 一般天气雷达具有较大的天线且外加防风罩（增加抗风能力）

防风材料：玻璃钢

4)、脉冲长度和脉冲宽度



脉冲长度：一个脉冲的空间距离， h （米）

脉冲宽度：一个脉冲的时间， τ （ μs ）

$$h = \tau \times C$$

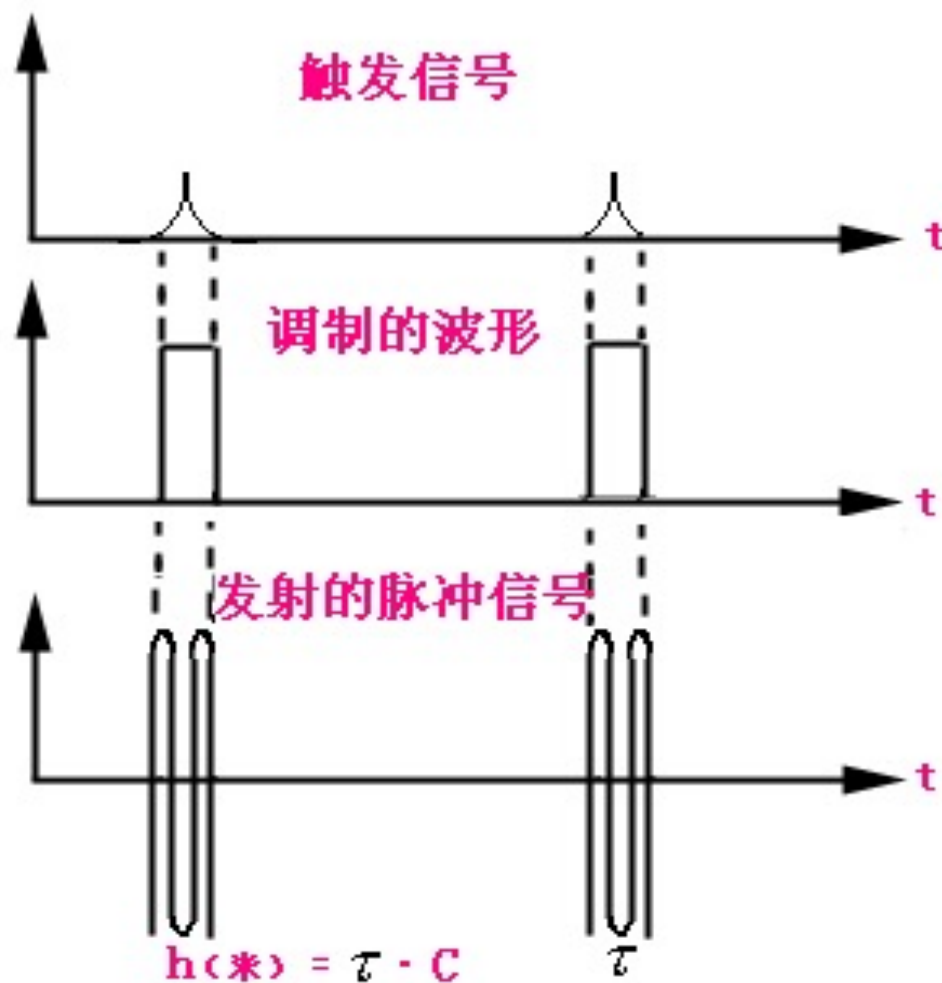
天气雷达盲区： $h/2$

**说明脉冲宽度直接影响探测距离和距离分辨能力，即盲区大小

取 $\tau=1\mu\text{s}$ ，则 $h=1 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8=300$ (米)，说明在半径150米这段区域中不能区别任何东西

结论：脉冲长度 h 越大，距离分辨率越差

4)、脉冲长度和脉冲宽度



波形调制图



5)、脉冲重复频率PRF

Pulse Repetition Frequency

- 定义：每秒钟产生的触发脉冲的数目。单位赫兹**HZ**

Pulse Repetition Frequency - PRF

PRF controls the Max Radar Range
and Max Unambiguous Velocities

PRF is the number of pulses per second transmitted by a radar





6)、脉冲重复周期T (或PRT)

- 定义：两个相邻脉冲之间的时间间隔。
单位：秒

$$\text{PRF}=1/T$$



7)、最大探测距离（单位：米）

$$\because R = \frac{1}{2} C \cdot \Delta t \quad (C \text{ 为光速: } 3 \times 10^8 \text{ m/s})$$

当 $\Delta t = T$ （脉冲重复周期）时， R 为最大值

$\therefore$ 天气雷达最大探测距离为：

$$R_{\max} = \frac{1}{2} C \cdot T$$

其中：C为光速，T为脉冲重复周期



3、天气雷达主要技术参数

常用天气雷达的主要技术参数

雷达型号	7 1 1	7 1 3	7 1 4
波长 (cm)	3.2	5.4	10.6
发射功率 K W	75	250	500
脉冲宽度 us	1	2	1
重复频率 H Z	400	200	200
灵敏度 dBm	-96	-106	线性-109
天线直径 m	1.5	3.7	4
波束宽度 (°)	1.5	1.2	2
天线增益 dB	40	40	37



3、天气雷达主要技术参数

几种多普勒雷达的主要参数

		WSR—88D	714SD	我国JY—24型	华奥CINRAD
天线	直径(米)	8.53	6.1	8.6	8.54
	半功率波束宽度	1	≤ 1.2	0.9	≤ 0.99
	增益(dB)	45	≥ 42	≥ 44	≥ 44
	第一旁瓣电平(dB)		-28	-27	-27
发射机	工作频率 GHz	2.8—3.0	2.88 ± 0.05	5.6—5.65	2.7—3
	波长cm	10.71	S波段	5.3	S波段
	脉冲宽度 μs	2, 0.6	1.3	2, 0.5	1.57, 4.71
	峰值输出功率	1000kw	500kw	500kw	650kw
	脉冲重复频率	250—1200	400, 600, 200	300—2400	318—1304
接收机	中频带宽	0.3		0.8—3 MHz	57.54 MHz
	最小可辨信号	-106.5dbm	-109		
	噪声系数	4dB	2.2	$\leq 3\text{dB}$	4.0

某一天气雷达**PRF=1000HZ**,求其脉冲重复周期及最大可测距离是多少?

解:

$$T = \frac{1}{PRF} = \frac{1}{1000} = 0.001(s^{-1})$$

$$R_{\max} = \frac{1}{2} C \cdot T = \frac{1}{2} \times 3 \times 10^8 \times 0.001 = 150(km)$$

说明: 可测得半径为**150km**之内的气象要素

课堂练习



若某天气雷达可测半径为**750km**， $\tau = 1 \mu s$ ，
求：脉冲重复频率、脉冲长度及雷达盲区。

解：

$$\because R_{\max} = \frac{1}{2} C \cdot T$$

$$\therefore T = \frac{2R_{\max}}{C} \text{ 又 } PRF = \frac{1}{T}$$

$$\therefore PRF = \frac{C}{2R_{\max}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 750 \times 10^3} = 200(HZ)$$

$$h = C \times \tau = 3 \times 10^8 \times 1 \times 10^{-6} = 300(m)$$

$$\text{盲区: } \frac{1}{2} h = 150(m)$$

1. 若雷达脉冲长度为 h ，则雷达在（ ）内探测不到任何目标物

- A) h B) $2h$ C) $h/2$ D) 盲区

2. 使用雷达的PPI资料时，不同斜距 R 处回波处于_____高度上；

3. 波束宽度指的是_____,它决定雷达的_____；

4. 设某天气雷达圆形抛物面天线的波束宽度为 0.5° ，若用该雷达探测斜距为100km的特强雷暴，试问该雷达由于波束宽度产生的切向探测误差至少应有多大？



三、多普勒天气雷达工作原理

- 1、多普勒天气雷达概述
- 2、多普勒雷达探测原理
- 3、多普勒天气雷达的最大不模糊速度与最大不模糊距离
- 4、距离去折叠和速度退模糊方法



1、多普勒天气雷达概述

常规数字化天气雷达利用的是降水回波的幅度信息，即利用信号强度来探测雨区的分布、强度、垂直结构等。

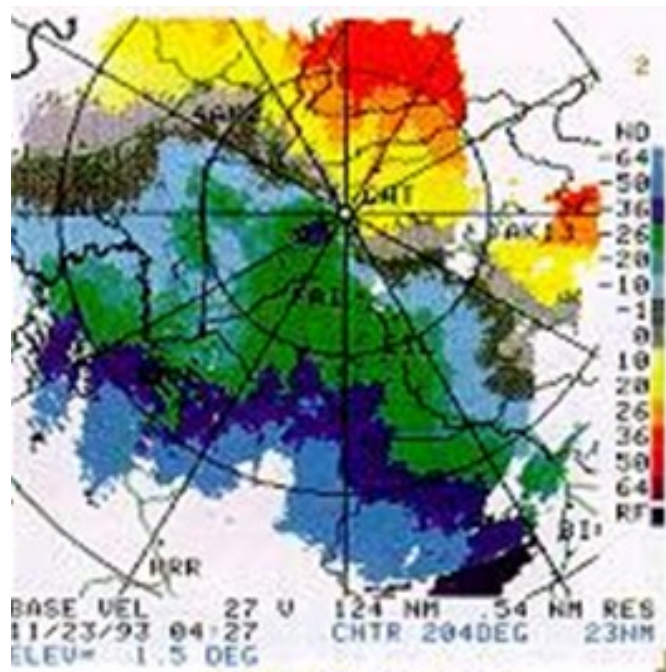
多普勒天气雷达除常规天气雷达功能之外，还可利用降水回波频率与发射频率之间变化的信息来测定降水粒子的径向速度，并通过此推断风速分布，垂直气流速度，大气湍流，降水粒子谱分布，降水中特别是强对流降水中风场结构特征。

1、多普勒天气雷达概述

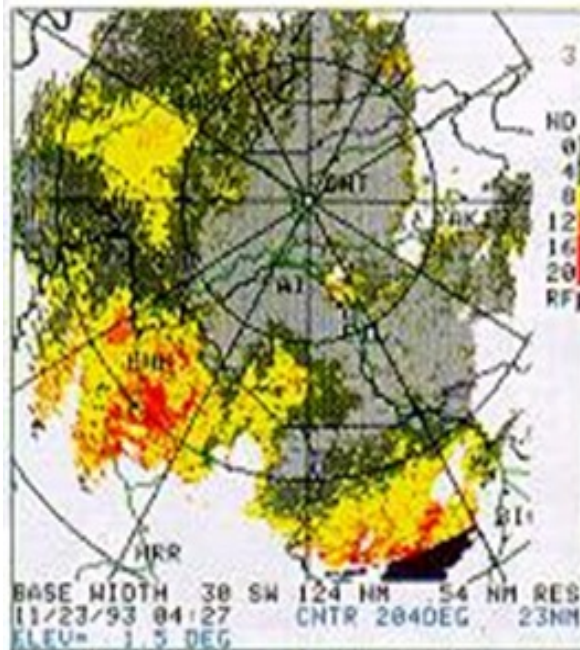


常规天气雷达仅能提供**反射率因子**资料。多普勒天气雷达将提供两种附加的基本资料，**径向速度和速度谱宽**，它们将增强对强风暴的探测能力，也能改进对中尺度和天气尺度系统的预报。

1、多普勒天气雷达概述



平均径向速度



速度谱宽

01/31/95 09:40
GURD 1 MAG=2X
RDA-PAPD 65/02/09H
2707 FT 147/29/56M
MODE B / 32
MAX= 29 DBZ

POLAR=30 NM 30 DEG
GURD 2 MAG=2X
RDA-PAPD 65/02/09H
2707 FT 147/29/56M
MODE B / 32
MAX=-100 KT 53 KT

POLAR=30 NM 30 DEG
GURD 3 MAG=2X
RDA-PAPD 65/02/09H
2707 FT 147/29/56M
MODE B / 32
MAX= 19 KT

POLAR=30 NM 30 DEG

速度谱宽数据，它是一个对速度离散量的度量。它可提供由于风切变、湍流和速度样本质量引起的平均径向速度变化的观测，也可用来确定边界（密度不连续面）位置、估计湍流大小等。

2、多普勒天气雷达工作原理

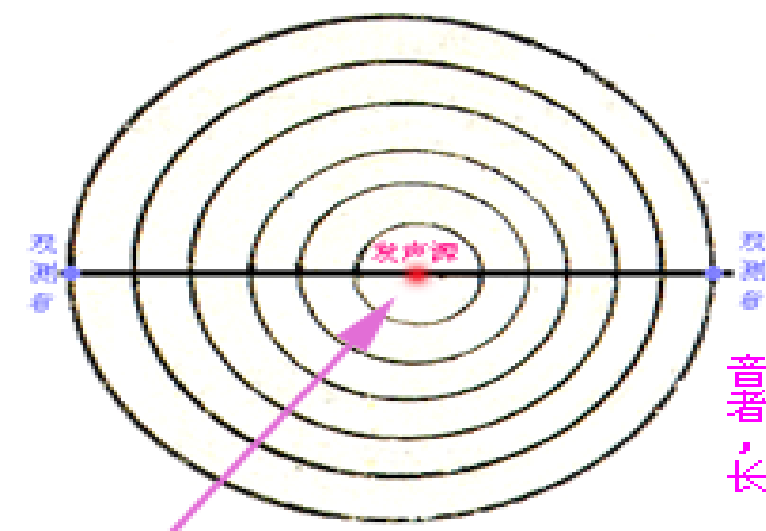


1) 多普勒效应

多普勒效应是奥地利物理学家**J.Doppler**1842年首先从运动着的发声源中发现的现象，定义为“**当接收者或接收器与能量源处于相对运动状态时，能量到达接收者（器）时频率的变化**”。

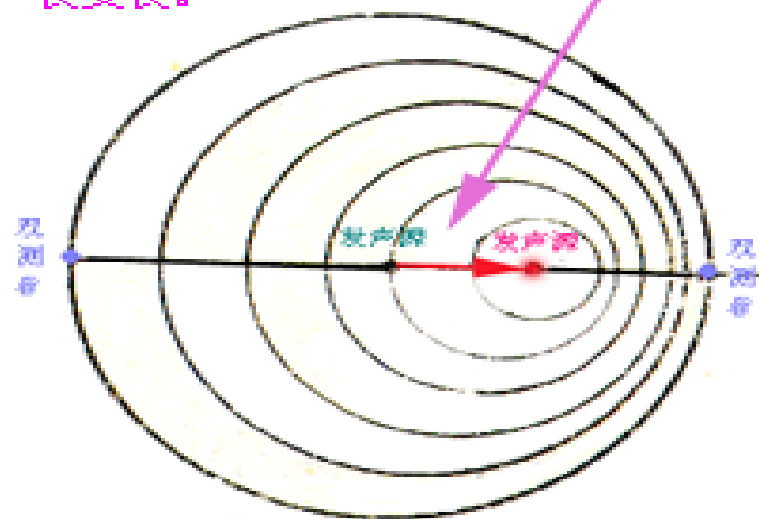


2、多普勒天气雷达工作原理



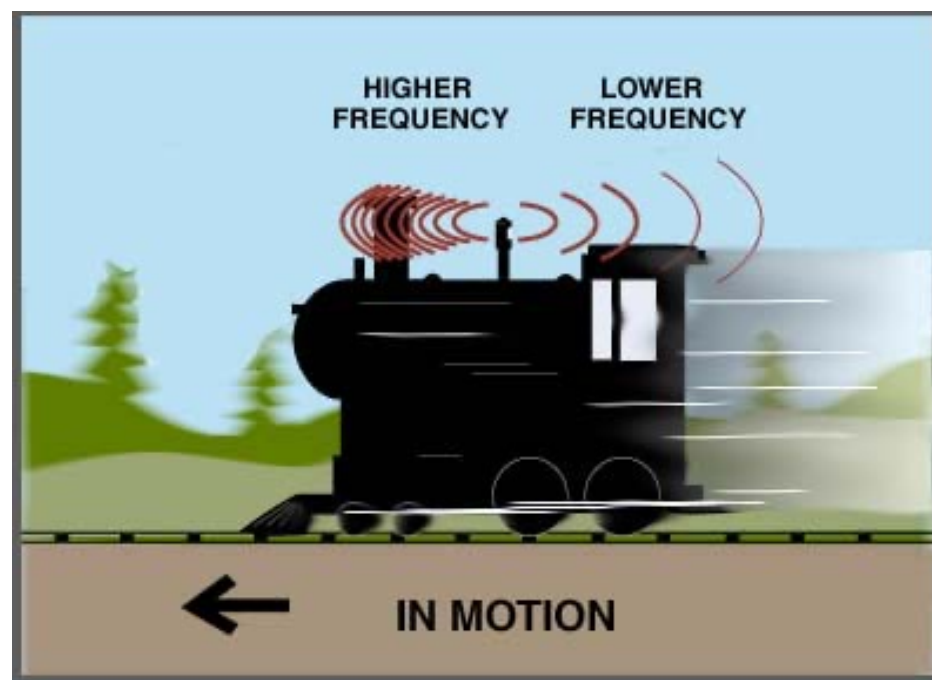
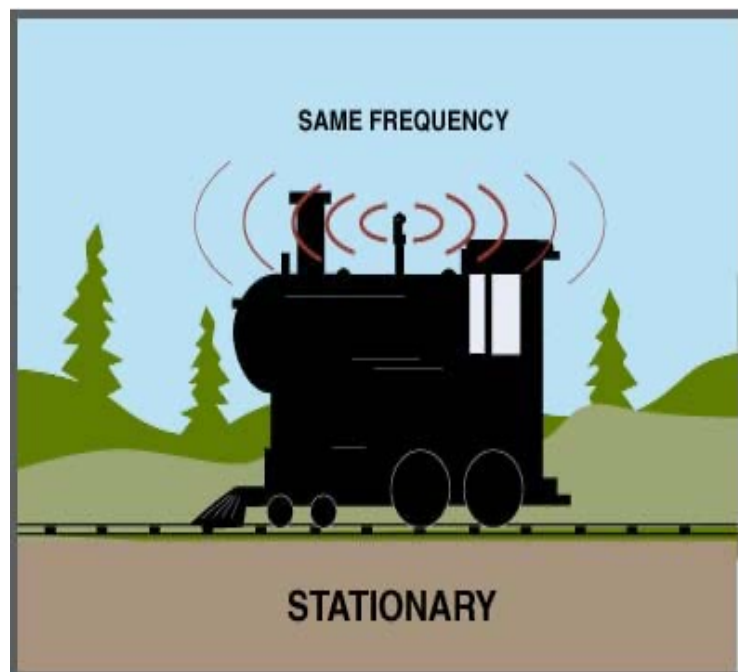
发声源静止不动时，在发声源左右两侧的观测者听到的音频是相同的（即波长相同），该音频就是发声源的固有频率。

发声源向右边移动时，发声源的固有音频维持不变，但是在发声源右边的观测者听到的音频增加，声波波长缩短；相反，左边的观测者听到的音频减小，声波波长变长。



多普勒效应示意图

2、多普勒天气雷达工作原理



一个例子是：当一辆紧急的火车（汽车）鸣着喇叭以相当高的速度向着你驶来时，声音的音调（频率）由于波的压缩（较短波长）而增加。当火车（汽车）远离你而去时，这声音的音调（频率）由于波的膨胀（较长波长）而减低。

多普勒频率 (f_D)



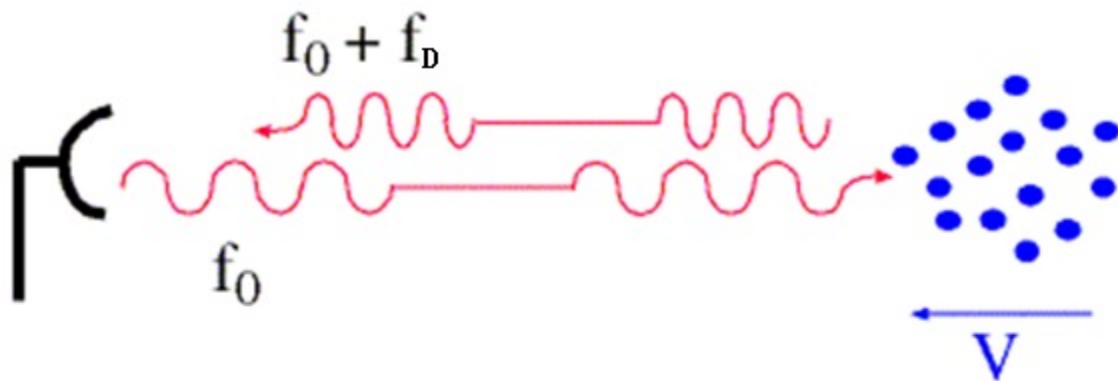
多普勒频率 f_D 定义:

目标物**相对**于雷达作**径向运动**引起回波信号的**频率变化**, 称多普勒频移, 亦称多普勒频率, 单位:赫兹 (Hz)。

发射频率 V_s 多普勒频移



发射频率



$f_0 = c/\lambda =$ transmitted frequency

$f_D =$ Doppler-shifted frequency

Note: $f_0 \gg f_D$

多普勒频移



多普勒频率 f_D 与目标物径向速度 V_r 的关系

$$f_D = \frac{2V_r}{\lambda}$$

其中： f_D 为多普勒频率(单位 Hz)

V_r :目标物的径向速度

(也称多普勒速度,单位 m/s)

λ :雷达波长(单位 m)



多普勒频率 f_D 与目标物径向速度 V_r 的关系

$$f_D = \frac{2V_r}{\lambda}$$

上式讨论：1>若气象目标物静止时, $V_r=0$,则 $f_D=0$;

2>当 $V_r \neq 0$ 时, f_D 与 V_r 成正比,与 λ 成反比。



多普勒频率 f_D 与目标物径向速度 V_r 的关系

不同雷达波长及不同径向速度所产生
的多普勒频率（单位Hz）

多普勒频率 径向速度 m/s \ 波长 cm Hz	1.8	3.2	5.5	10.0
0.1	11	6	4	2
1.0	111	62	36	20
10.0	1111	625	364	200
100.0	11111	6250	3636	2000

参见书表8.1

当波长为10厘米、径向速度为0.1m/s时，为2Hz。这说明当选用10cm雷达时，如要求其测速的分辨率为0.1m/s，则要求雷达发射频率的变化（或要求位相锁定电路中的频率变化不能超过1.9Hz(若到了2Hz就分不清是 f_D 还是 f_0 的变化。也就是说要求10cm波长的雷达发射3000MHZ频率的变化不能超过1.9HZ. 这一要求十分苛刻需要很高的技术水平才能达到.

多普勒天气雷达种类



- 自相干多普勒天气
- 全相干多普勒天气



多普勒天气雷达种类

- **相干波**: 两束振幅、频率和相位完全相同的电磁波称为相干波。
- **相干发射**: 发射出振幅、频率和相位完全一样的脉冲波, 所以各个脉冲之间是相干的。
- **全相干多普勒天气雷达**: 它的发射主控信号频率由稳定的晶体振荡器产生, 保证发射的高频相干。它的相干性能好, 地物消除能力强。
- **半相干(伪相干)多普勒天气雷达**: 它是通过对发射信号采样, 与本振混频以及锁相技术, 以保证中频相干, 达到测量频率变化, 它的发射部分采用同轴磁控管。它的相干性能差, 消除地物的能力较全相干多普勒天气雷达差。

脉冲对处理

- 假定每个脉冲发射时的初始位相均为 φ_0
- 第一个脉冲遇到距离为 r_1 的目标，返回到雷达的回波位相为：

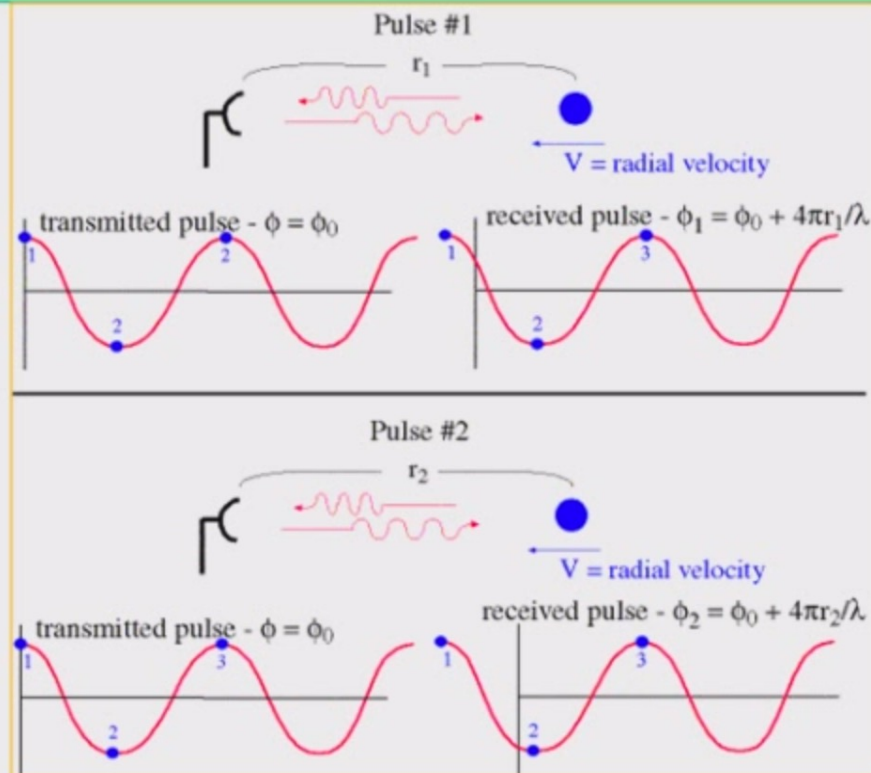
$$\varphi_1 = \varphi_0 - 2\pi \frac{2r_1}{\lambda}$$

- 一个脉冲重复周期PRT之后，第二个脉冲发出，到遇到目标时，该目标距雷达的距离为 $r_2 = r_1 + \Delta r$ ，则该目标物对于第二个脉冲的回波到达雷达时的位相为：

$$\varphi_2 = \varphi_0 - 2\pi \frac{2(r_1 + \Delta r)}{\lambda}$$

- 于是，相继返回的两个脉冲之间的位相差为： $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi \frac{2\Delta r}{\lambda} = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda}$
- 最终得到目标物沿雷达波束径向速度为：

$$V_r = \frac{\Delta r}{PRT} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi PRT} = \frac{\lambda \Delta\varphi \times PRF}{4\pi}$$



脉冲对处理

事实上，雷达最终给出的径向速度是从多个脉冲对得到的径向速度的平均值，称为**平均径向速度**，而相应的标准差称为**谱宽**。通常采用几十对脉冲的平均得到平均径向速度。

➤ 最终得到目标物沿雷达波束**径向速度**为：

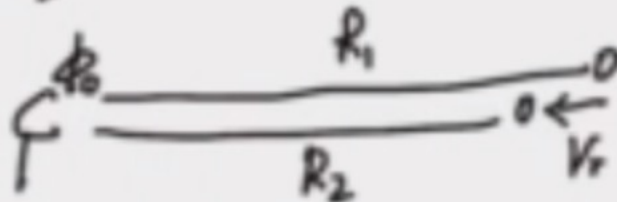
$$V_r = \frac{\Delta r}{PRT} = \frac{\lambda \Delta \phi}{4\pi PRT} = \frac{\lambda \Delta \phi \times PRF}{4\pi}$$

- 雷达的组成
- 雷达的显示方式: PPI, RHI, CAPPI
- 雷达主要技术参数: θ , G , h , τ , PRF、PRT、 $R_{\max}$ 、 V_r 、 f_D

回顾



$$f_D \sim V_r$$



$$\phi_1 = \phi_0 - 2\pi \frac{2R_1}{\lambda} \quad \textcircled{1}$$

$$\phi_2 = \phi_0 - 2\pi \frac{2R_2}{\lambda} \quad \textcircled{2}$$

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{2\Delta R}{\lambda}$$

$$2\pi f_D = \omega = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{\lambda \Delta t} \frac{2\Delta R}{\Delta t} = \frac{4\pi}{\lambda} V_r$$

$f_D = \frac{2V_r}{\lambda}$



3、多普勒天气雷达的最大不模糊速度 V_{rmax} 与最大不模糊距离 R_{max}

- 1)、 最大可测距离与距离折叠(模糊)
- 2)、 最大径向速度与速度模糊
- 3)、 多普勒两难
- 4)、 多普勒径向速度 V_r 、 真实径向速度 V_{rT} 互求

1)、最大可测距离与距离折叠(range folding)



- **最大可测距离：**最大可测距离是指一个发射脉冲在下一个发射脉冲发出前能向前走并返回雷达的最长距离，也称最大不模糊距离。

$$R_{\max} = \frac{c}{2 \times PRF}$$

其中， $R_{\max}$ 为最大不模糊距离， c 为光速， PRF 为脉冲重复频率

- **距离折叠（模糊）的产生：**超过最大探测距离的探测回波在屏幕上就会产生距离模糊。

距离模糊（折叠）



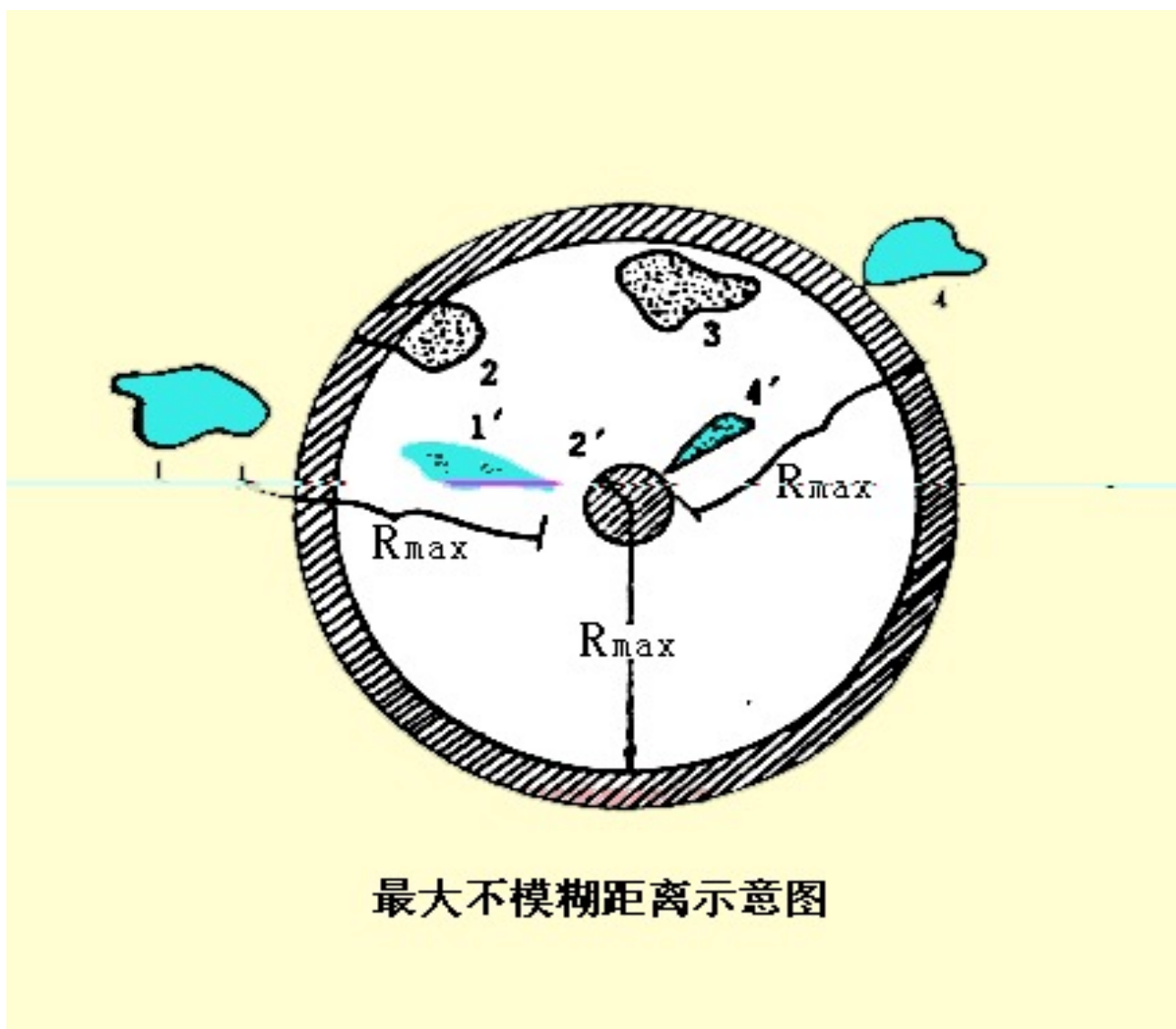
- 雷达测距公式 $R=0.5ct$ ， t 为脉冲发出到返回的时间。
- 雷达测距时间按照最新发出的脉冲从发出到返回的时间来计算。
- **距离模糊**是指雷达确定的目标物方位是正确的但距离是错误的。当目标物位于雷达最大不模糊距离之外时会发生这一现象，也就是说，目标物的定位是模糊的。换句话说，当目标物位于雷达的最大不模糊距离（ R_{max} ）之外时，雷达却把目标物显示在 R_{max} 以内的某个位置，我们形象地称之为‘距离折叠’。



距离模糊（折叠）的理解

一个目标物位于 $R_{\max}$ 之后若干公里的话，它将错误地出现在距雷达同一公里远的位置上。
如果雷达的 $R_{\max}=250\text{km}$ ，那么位于 $0-250\text{km}$ 的目标物处于第一程； $251-500\text{km}$ 的目标物处于第二程等等，以此类推。一个实际位于 550km （超过 $2R_{\max}$ ）处的目标物，如果被 $R_{\max}=250\text{km}$ 雷达探测到，它在雷达上的显示位置是 50km ；一个实际位于 300km （超过 $1R_{\max}$ ）处的目标物，如果被 $R_{\max}=250\text{km}$ 雷达探测到，它在雷达上的显示位置也是 50km 。

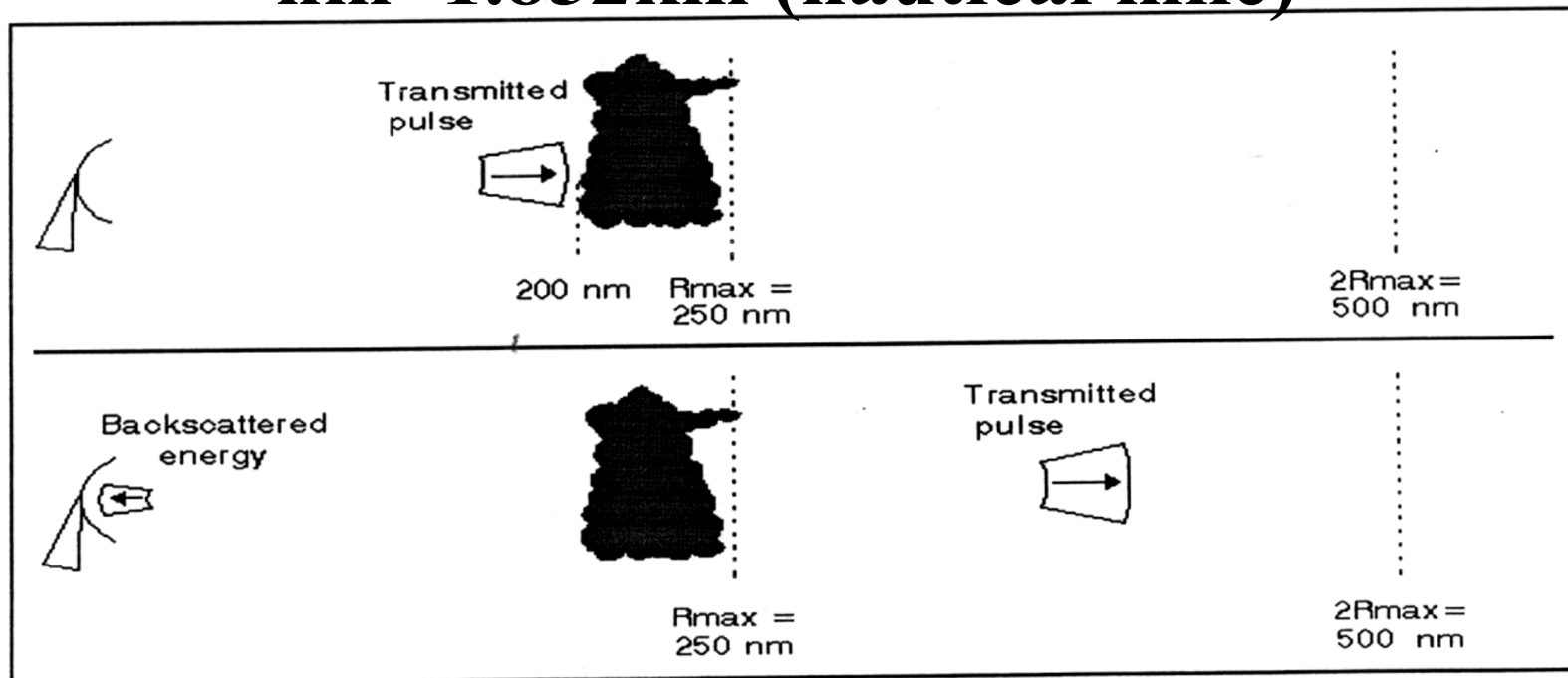
距离模糊（折叠）的理解



距离模糊（折叠）的理解

距离模糊（例子）

$\text{nm} = 1.852\text{km}$ (nautical mile)

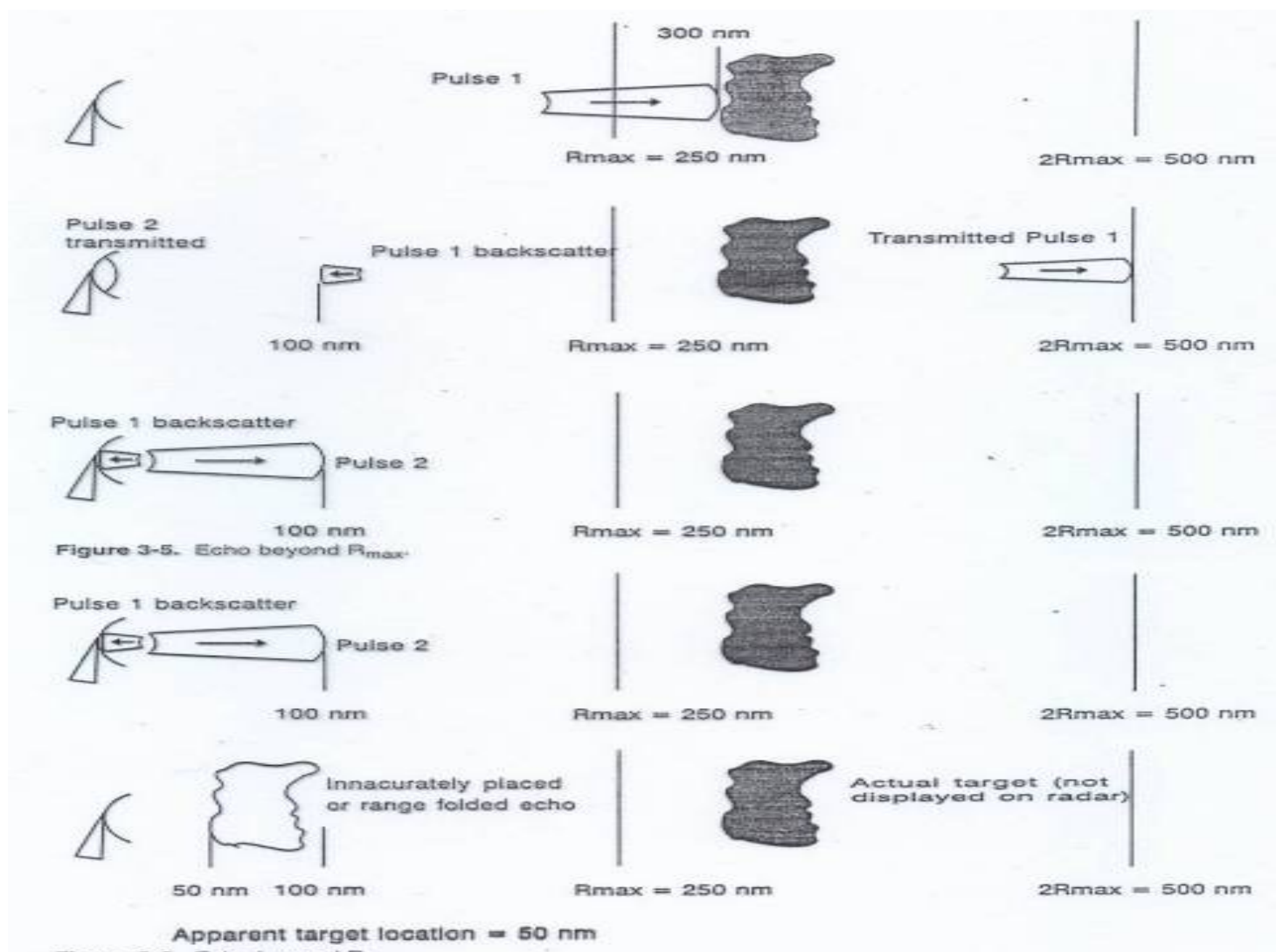


假设：某雷达最大探测距离是250nm

目标位于最大不模糊距离之内，没有距离折叠（模糊）发生。

距离模糊（折叠）的理解

例：目标位于最大不模糊距离之外时，发生距离折叠（模糊）



距离折叠回波的特点？

- 方位角是正确的
- 强度较弱
- 有时具有奇怪的多普勒速度

怎样排除距离折叠回波？

- 改变雷达机的脉冲重复频率 (PRF)

Use a different PRF every 2-3 pulses,
if the echo moves, it is bogus!

- 利用算法去距离模糊



2)、最大径向速度与速度模糊

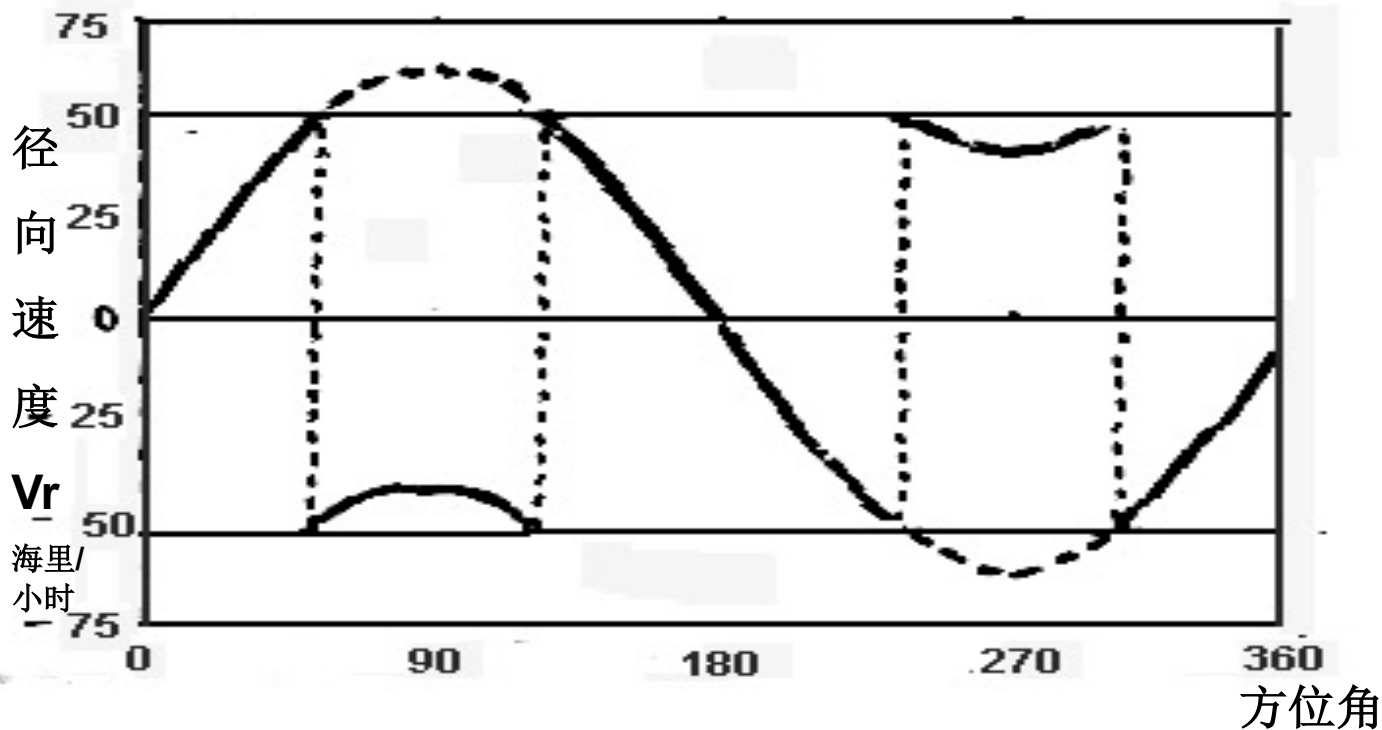
- 多普勒天气雷达速度模糊定义
- 最大径向速度与速度模糊

最大径向速度 V_{rmax}



最大径向速度是雷达能够不模糊地测量的最大平均径向速度（亦称最大不模糊速度），其对应的相移是180度。

图示：二维均匀风场,吹西风,某高度的径向速度随方位角分布图,±50海里/小时间隔为速度不模糊范围。



速度模糊示意图

最大径向速度 V_{rmax}



最大不模糊速度和速度模糊

- 多普勒天气雷达能够测量的一个脉冲到下一个脉冲的最大相移的上限是 $180^\circ(\pi)$ 。与 180° 脉冲对相移所对应的目标物径向速度值称为**最大不模糊速度** V_{max} 。
- 由 $V_r = \frac{\lambda \Delta \phi \times PRF}{4\pi}$ ，得：

$$V_{max} = \frac{\lambda \times PRF}{4}$$
- 如果目标运动的真实脉冲对相移小于 180° ，那么雷达对速度的第一猜值是**正确**的，或者叫做**不模糊的**。
- 如果一个目标物在两个脉冲的时间间隔期间移动的太远，它的真实相移超过 180° ，则将赋给它一个小于 180° 的相移值。那么速度的第一猜值是**不正确**的，或者说速度是**模糊的**。

多普勒天气雷达速度模糊的定义

某一PRF的采样频率，最多只能准确测量由 $V_{r\max} = \frac{1}{4} \lambda \times PRF$

计算出的 $V_{r\max}$ (或 $-V_{r\max}$)。若 $V_{rT} > V_{r\max}$ 或 $V_{rT} < -V_{r\max}$ ，则多普勒雷达将给出错误的速度信息，称为速度模糊。

✧ 零速度区（带）

*零速度区（零等速线）：由径向速度为零的点组成（零速度区肯定不模糊）；

零速度区（带）的意义

某点的径向速度为零，应是两种情形：

◆ 实际风速为零或很小

◆ 实际风向与雷达探测波束相垂直

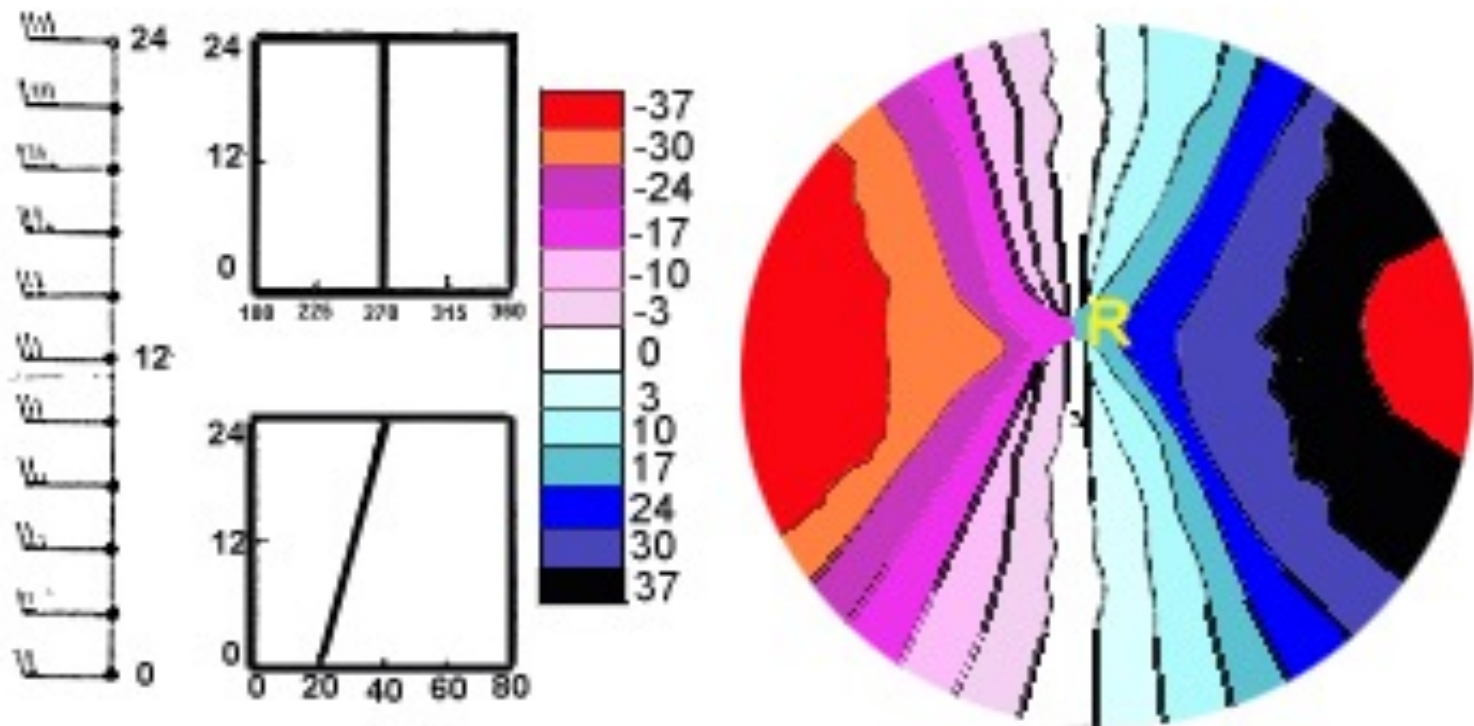
$$\begin{cases} V_T = 0 \\ V_T \perp V_r \end{cases}$$



3、速度模糊现象的主观识别

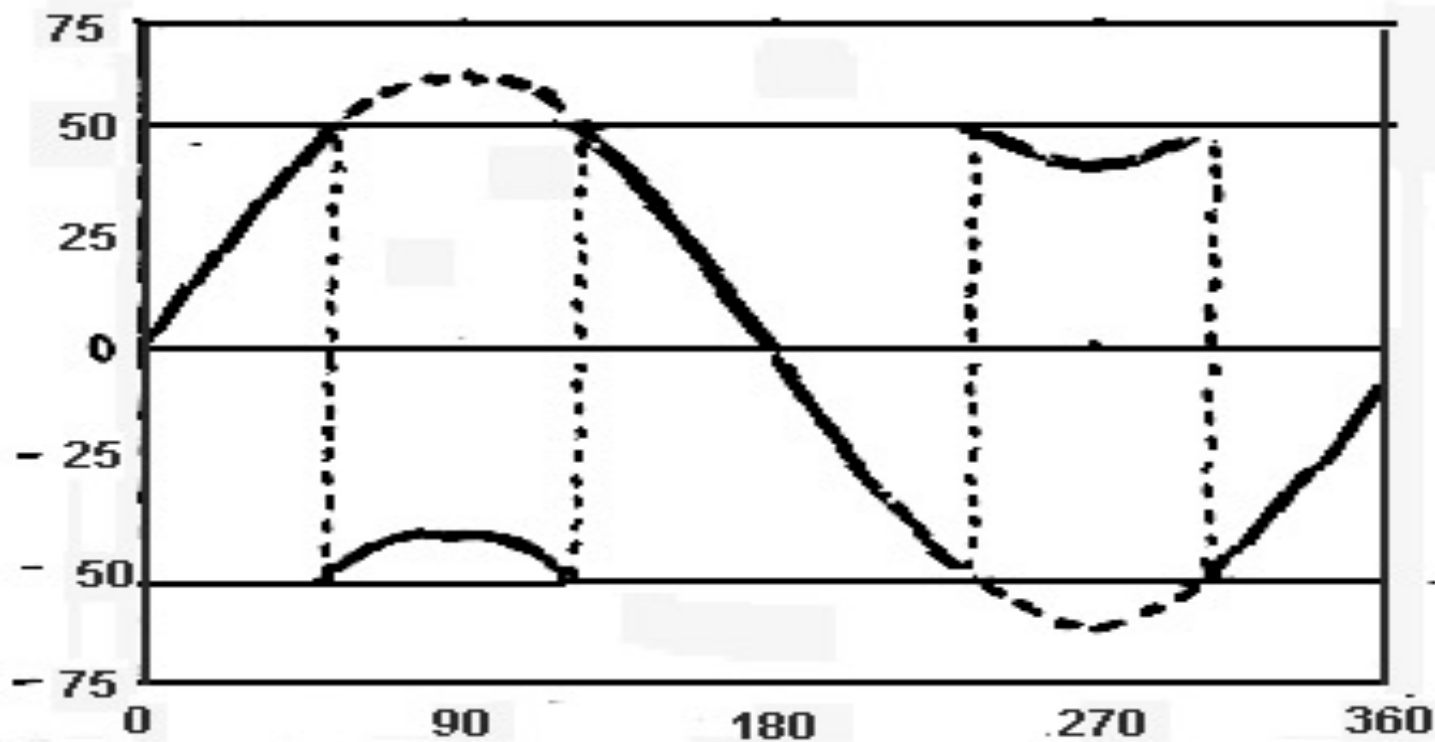
由零速度区（带）逐渐向邻近区域（径向）扩展，按风速连续性原则，除如小尺度的龙卷风等特强风切变情况外，径向速度 V_r 一般逐渐增加（减少），当增加（减少）到超过 $V_{rmax}(-V_{rmax})$ 范围时，**径向速度由正（负）的最大值突变为负（正）的最大值**。这种突变的边界就是速度模糊区的边界。

3、速度模糊现象的主观识别



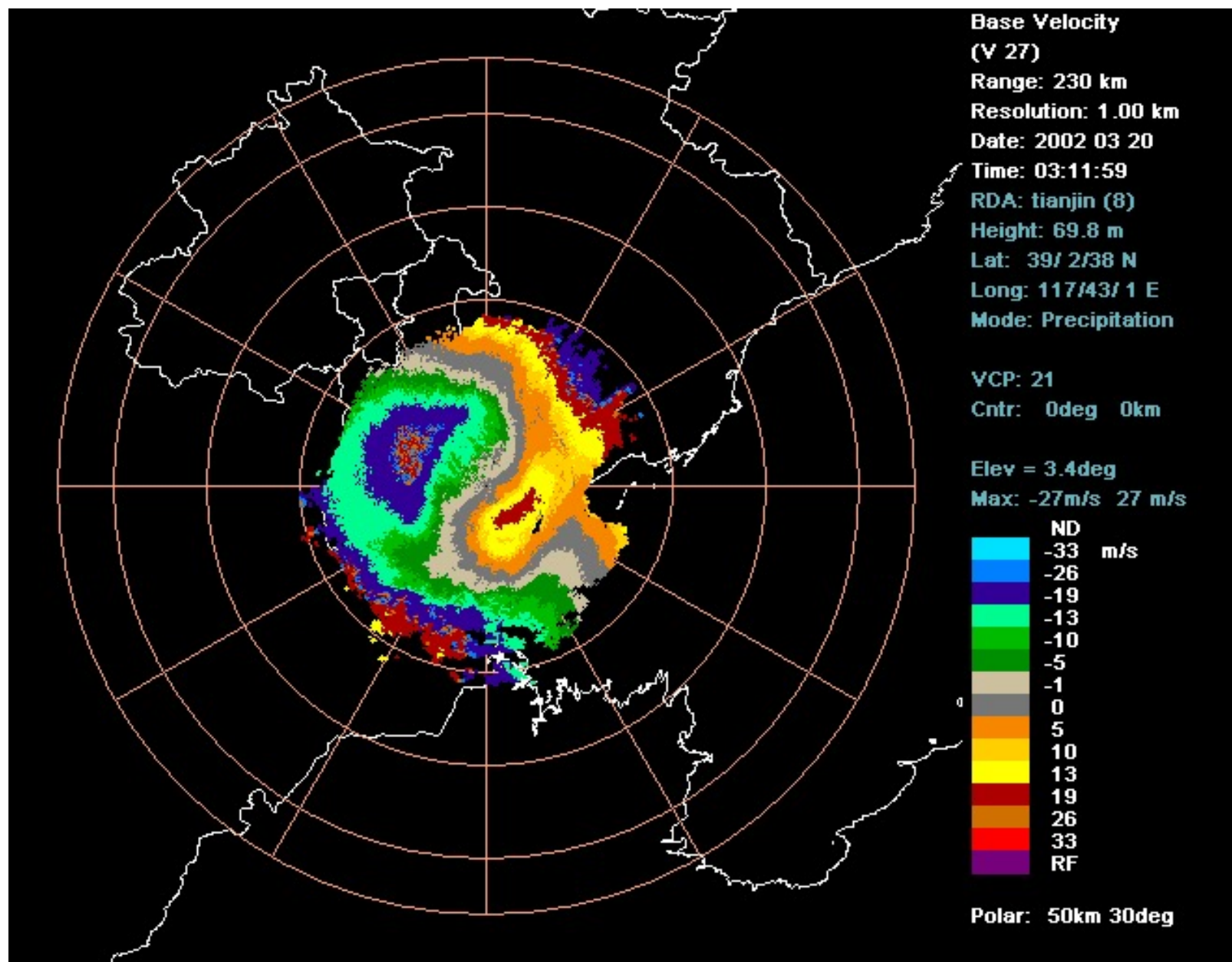
风速随高度变化的多普勒速度图

3、速度模糊现象的主观识别



速度模糊示意图

3、速度模糊现象的主观识别





多普勒两难



$$\therefore V_{r\max} = \frac{\lambda PRF}{4}, \quad \text{且} R_{\max} = \frac{c}{2PRF}$$

$$\therefore R_{\max} V_{r\max} = \frac{\lambda c}{8}$$

其中： $V_{r\max}$: 多普勒最大不模糊速度

$R_{\max}$: 多普勒最大可测距离

λ : 雷达波长； C : 光速

PRF : 脉冲重复频率

多普勒两难



由于没有唯一的PRF能使得 $V_{\max}$ 和 $R_{\max}$ 都能达到最大，所以要使用变化的PRF。例：每台WSR-88D使用不同的PRF，从一组8个PRF中选择。

PRF#	PRF (Hz)	$R_{\max}$ (nm)	$V_{\max}$ (kt/s)
1	322	252	16
2	446	151	22
3	644	128	32
4	857	95	43
5	1014	80	51
6	1095	74	55
7	1151	60	58
8	1252	53	64



多普勒径向速度 V_r 、真实径向速度 V_{rT} 互求

当真实的相位差 $\overline{\Delta\phi_T}$ 超过 $\pm\pi$ 范围，
则因为 $\overline{\Delta\phi_d}$ 只能取 $\pm\pi$ 范围内的值，将
产生模糊。按照 2π 周期的原则，这两
者之间的关系为：

$$\overline{\Delta\phi_T} = \begin{cases} \Delta\phi_d + 2n\pi & (\text{当}\Delta\phi_T > \pi\text{时}) \\ \Delta\phi_d - 2n\pi & (\text{当}\Delta\phi_T < -\pi\text{时}) \end{cases}$$

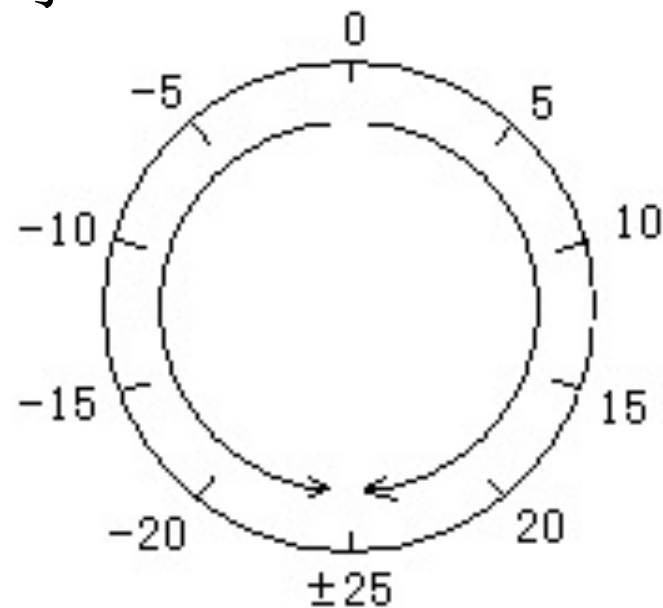
式中： n 为整数。

当 $0 < \overline{\Delta\phi_T} < \pi$ 时， $n = 0$ ；

当 $\pi < \overline{\Delta\phi_T} < 3\pi$ 时， $n = 1$ ；

当 $3\pi < \overline{\Delta\phi_T} < 5\pi$ 时， $n = 2$ 。(当 $\overline{\Delta\phi_T} < -\pi$ 亦如此类推)

速度模糊
示意图



多普勒径向速度 V_r 、真实径向速度 V_{rT} 互求公式



$$V_{rT} = \begin{cases} V_r + 2nV_{r\max} & V_{rT} > V_{r\max} \\ V_r - 2nV_{r\max} & V_{rT} < -V_{r\max} \end{cases}$$

式中： n 为整数。

当 $0 < \overline{\Delta\phi_T} < \pi$ 时, $n = 0$;

当 $\pi < \overline{\Delta\phi_T} < 3\pi$ 时, $n = 1$;

当 $3\pi < \overline{\Delta\phi_T} < 5\pi$ 时, $n = 2$

(当 $\overline{\Delta\phi_T} < -\pi$ 亦如此类推)

V_{rT} : 气象目标物真实径向速度

V_r : 多普勒径向速度

$V_{r\max}$: 最大不模糊径向速度

设多普勒天气雷达的可测最大径向速度 $V_{r\max} = \pm 25\text{m/s}$, 试计算:

- 1) 当 $V_{rT} = 30\text{m/s}$ 时, $V_r = ?$
- 2) 当 $V_{rT} = -30\text{m/s}$ 时, $V_r = ?$
- 3) 当 $V_{rT} = 80\text{m/s}$ 时, $V_r = ?$
- 4) 当 $V_{rT} = -55\text{m/s}$ 时, $V_r = ?$

解： 已知： $V_{r\max} = \pm 25m/s$

(1)当 $V_{rT} = 30m/s$ 时，气象目标远离 (away) 雷达移动，
 $n = 1$ ，则 $V_r = 30 - 2 * 1 * 25 = -20(m/s)$

(2)当 $V_{rT} = -30$ ，气象目标物朝向 (Toward) 雷达移动，
 $n = 1$ ，则 $V_r = -30 + 2 * 1 * 25 = 20(m/s)$

(3) $V_{rT} = 80m/s$ ，气象目标远离 (away) 雷达移动
 $n = 2$ ，则 $V_r = 80 - 2 * 2 * 25 = -20(m/s)$

(4)当 $V_{rT} = -55m/s$ 时，气象目标物朝向 (Toward) 雷达移动
 $n = 1$ ，则 $V_r = -55 + 2 * 1 * 25 = -5(m/s)$



4、距离去折叠和速度退模糊方法



速度退模糊Velocity dealiasing

- 在**RDA**中已去距离折叠，速度数据的距离（位置）是正确的。
- 速度退模糊算法本质上是根据连续性原则将每个速度初猜值与它的周围的相临速度值相比较；如果一个速度的初猜值与它的周围值显著不同，则该算法用另一个可能的值替换那个速度初猜值。
- 由于**PRF**和**Vmax**是已知的，所以计算速度初猜值的可能的替代值是确定的。
- 算法依赖于周围数据，建立在连续性基础上。



距离去折叠（算法）

- 无回波叠加情形

第一步：确定真实距离和可能距离

第二步：确定是否有回波叠加

第三步：去折叠（**unfolding**）

- 有回波叠加情形

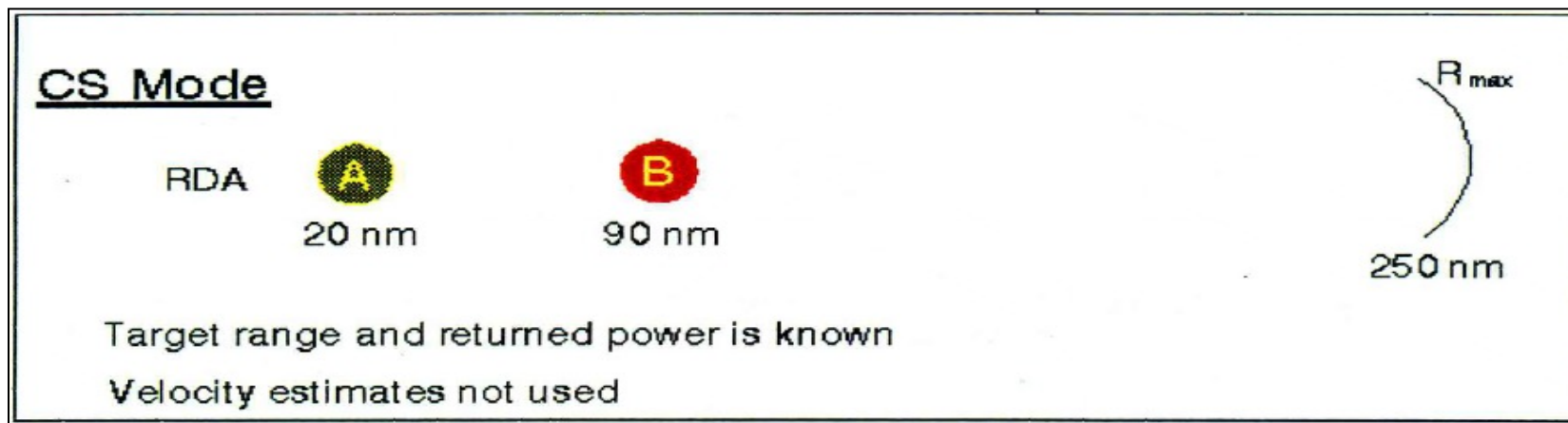
第一步：确定真实距离和可能距离

第二步：功率比较

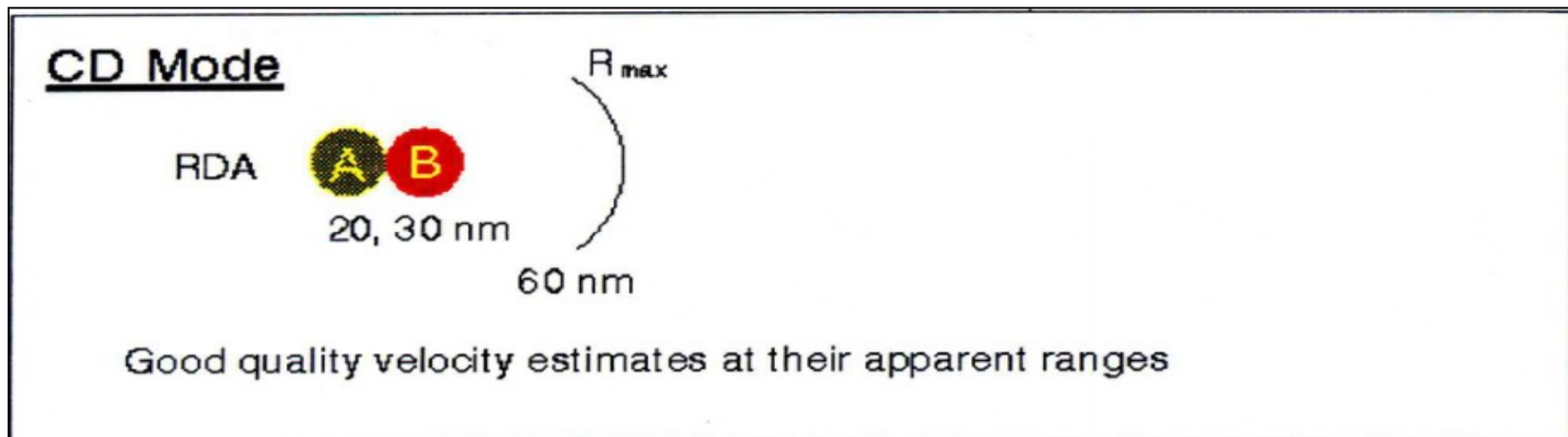
第三步：去折叠：速度赋值与紫颜色的指定

距离去折叠：无回波叠加情形

第一步：确定真实距离和可能距离

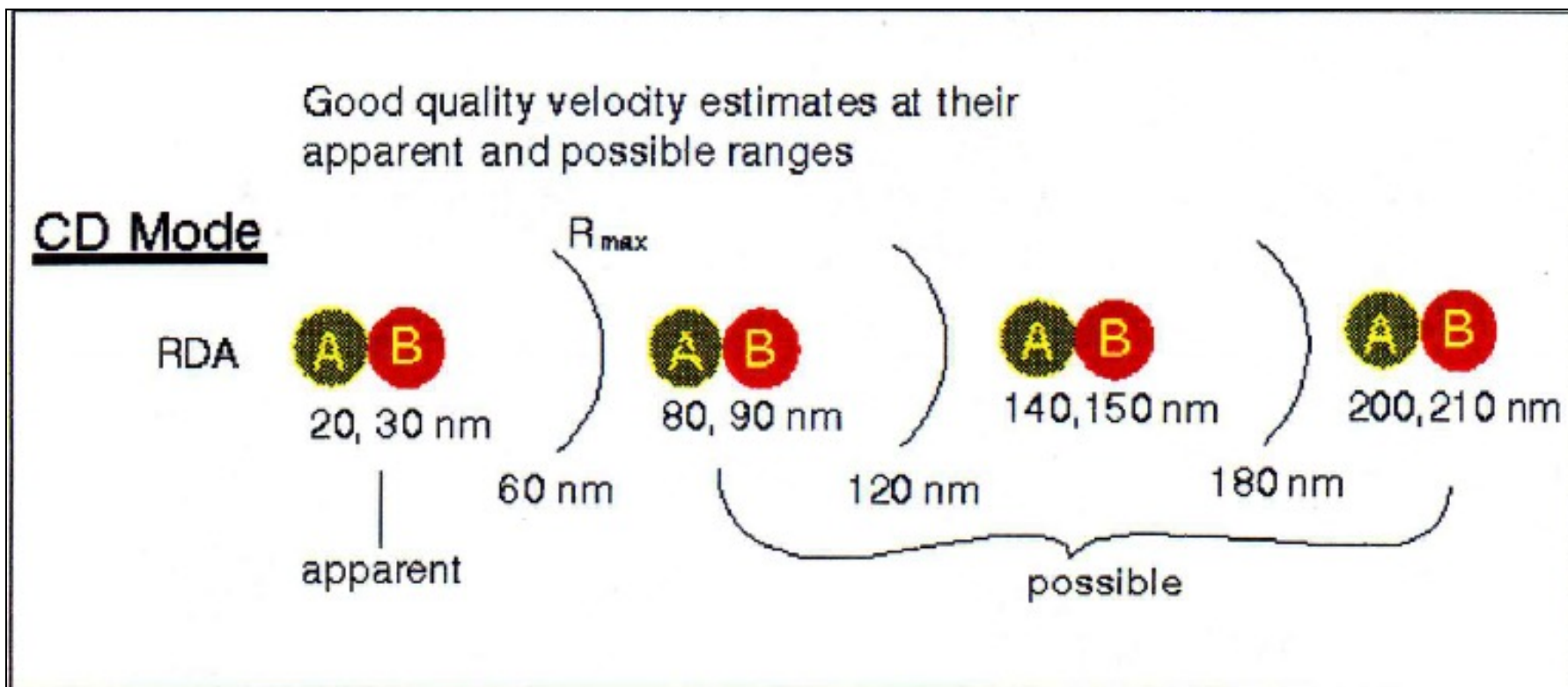


CS模式下，PRF小，可确定A、B真实距离，但速度数据差。



CD模式下，PRF大，速度、谱宽可信，且显示A、B在回波图上的距离（视在距离）。

距离去折叠：无回波叠加情形



CD模式下，根据视在距离，算法可预先计算出每一目标在之后的程（如第二、第三程等）中的所有可能的位置。

第二步：确定是否有回波叠加

算法确定当使用**CD**模式时，是否有回波折叠进相同的距离库中（即有回波叠加），如果没有则转入第三步。如果有，则将转入有回波叠加时的情形

To "unfold" velocity data, compare apparent and true ranges.

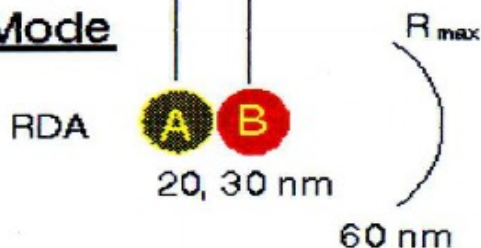
CS Mode



yes no

Was there something at this range?

CD Mode



CD数据中的速度值的视在距离与该距离处的相应的CS数据进行比较

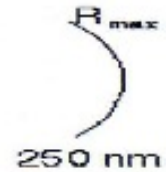


第三步：去折叠（unfolding）

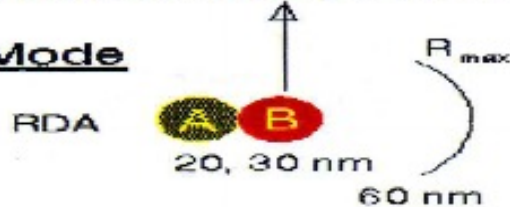
收集高**PRF(CD)**数据。速度和谱宽数据将是准确的，但是，由于**Rmax**短，将被折叠第一程回波中，去折叠步骤包括：

- 1) 检测**CS**数据（功率和距离），一个距离库接一个距离库地将**CD**数据（速度和谱宽值）与**CS**数据进行比较。
- 2) 如果对应于**CD**数据中某个速度值的视在距离处，相应的**CS**数据中没有目标与之对应，则将该速度值的其它可能的距离与**CS**数据比较，以确定对应该速度值的真实距离。

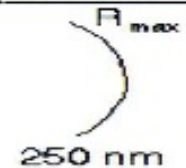
CS Mode



CD Mode



CS Mode



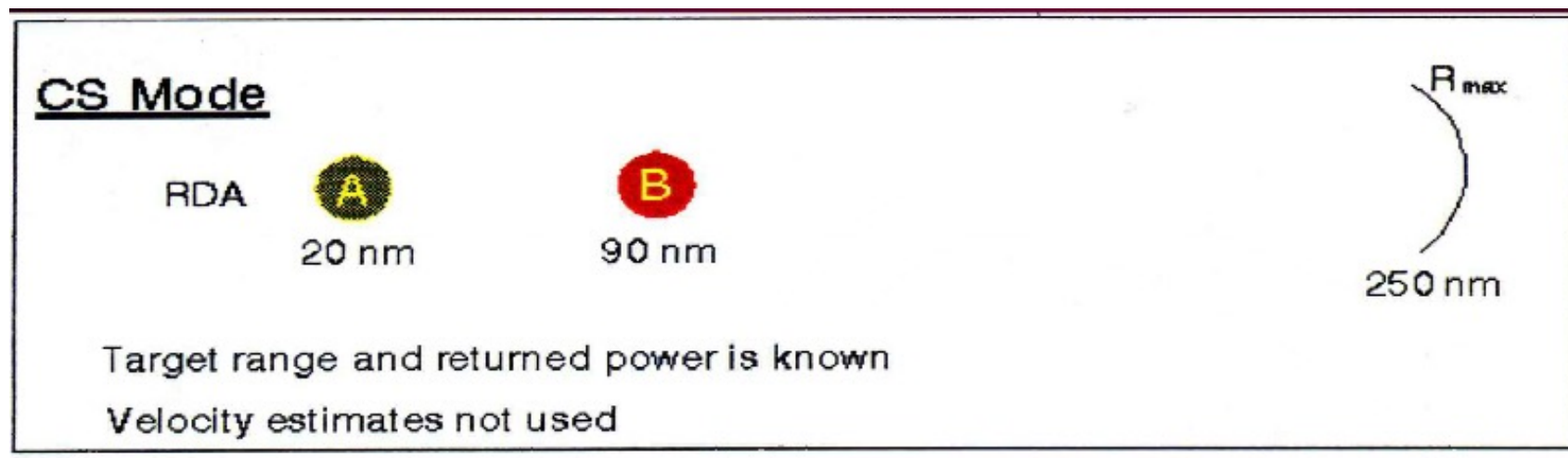
CD Mode



距离去折叠算法：有回波叠加情形

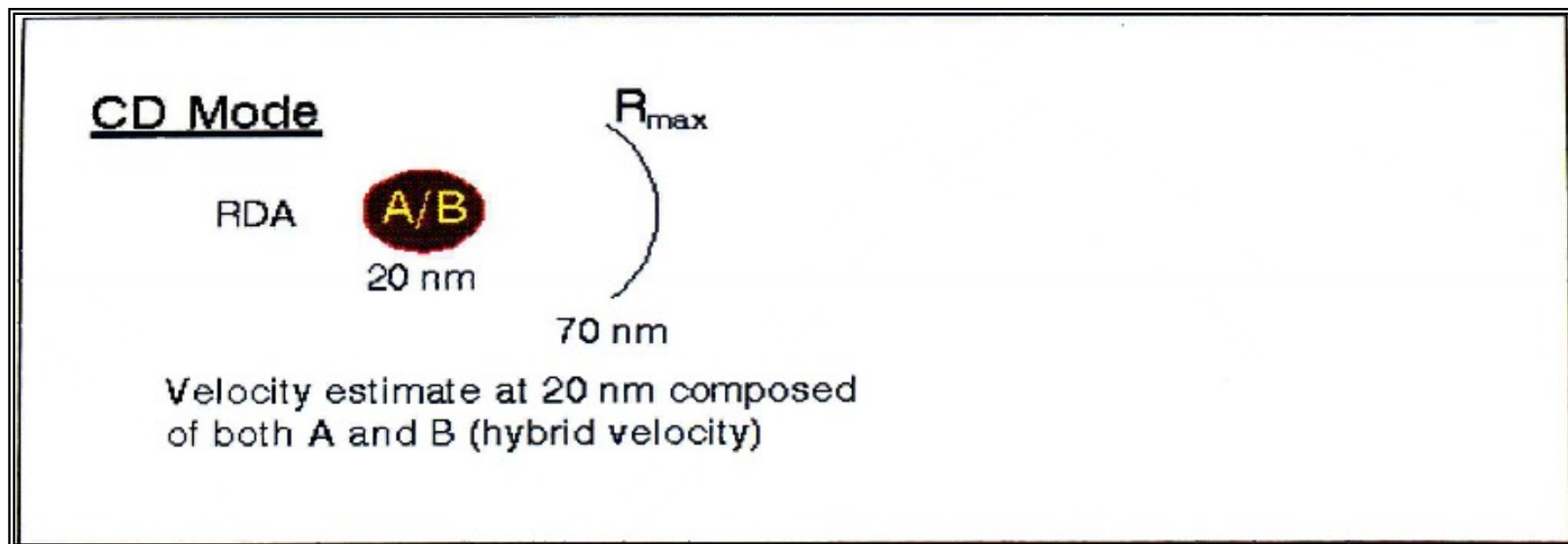


第一步：确定真实距离和可能距离



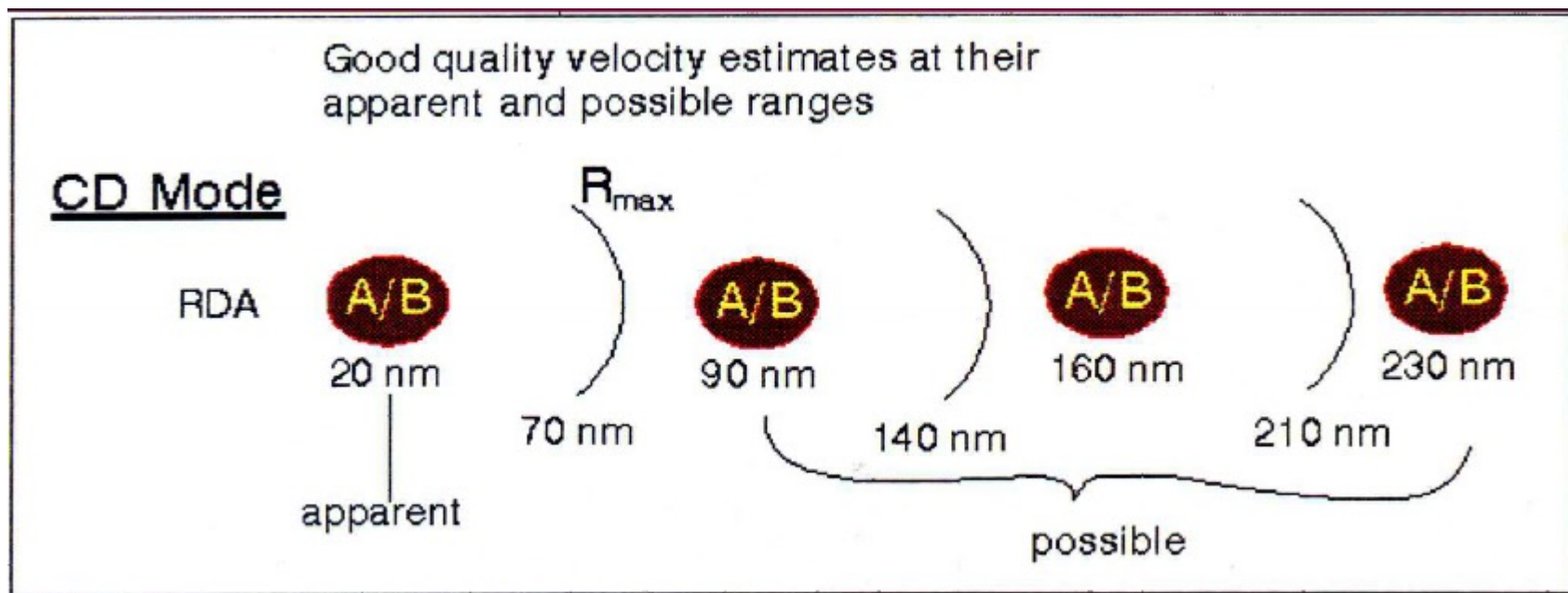
使用CS模式（低PRF），沿径向观测，可确定每个目标的位置和回波功率。

第一步：确定真实距离和可能距离



计算在**CD**模态下每个目标的视在距离。注意回波发生叠加。

第一步：确定真实距离和可能距离

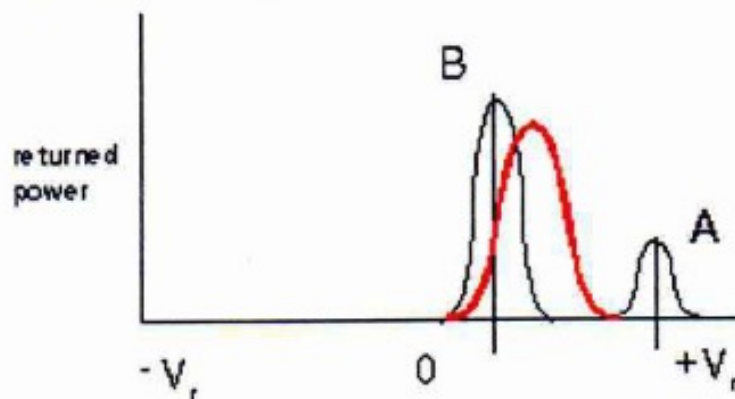


在CD模态下每个目标的视在距离和可能距离。这些距离在收集CD数据前就已经确定了。注意重复的回波叠加。

第二步：功率比较



Since returns have same apparent range, A & B not analyzed separately



First guess velocity more representative of B than A.

来自目标A和目标B的回波信号同时到达RDA，它们被看成是一个单独的目标。图中目标B的回波功率高于目标A回波功率，而速度估计是以回波功率为权重的。因此当造成回波叠加的二个或更多个目标中的一个目标(如B)的回波功率远大于其它目标的回波功率时，将混合的速度估计值赋给该目标（如B）是一个精确合理的估计。



第三步：去折叠：速度赋值与紫颜色的指定

- 用**CS**模态采集数据时每个目标的回波功率是已知的，所以可以确定二个或更多折叠进相同库的回波的功率比（以**dB**表示较高值与较低值之比）。**dB**可按式计算

$$dB = 10 \log \left[\frac{P_{high}}{P_{low}} \right]$$

- 如果功率比超过**TOVER**(一个可调参数，其缺省值为**5dB**),则速度和谱宽数据将被赋给返回最大功率的目标，而另一些目标将被赋给紫色。如果功率比没有超过**TOVER**，则所有产生叠加的回波的目标将被赋给紫颜色。



第三步：去折叠：速度赋值与紫颜色的指定

TOVER值的影响

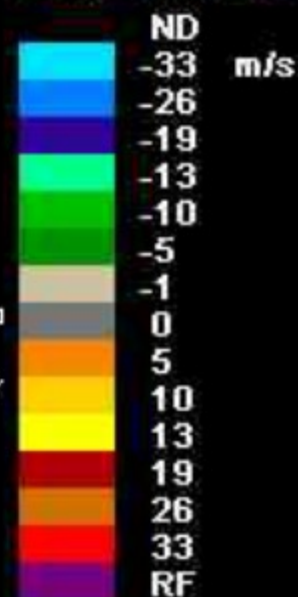
- **高TOVER值**（例如**10dB**而不是**5dB**）可改进速度和谱宽数据赋值的精度。不过，高**TOVER**值将导致产生面积较大的紫色区域。
- **低TOVER值**（例如**5dB**而不是**10dB**）将导致紫颜色的区域明显较少。不过，速度和谱宽的估计的精度将降低。与**10dB**的**TOVER**值相比，**5db**的**TOVER**值对某个回波所作的任何速度估算将有更大的偏差。

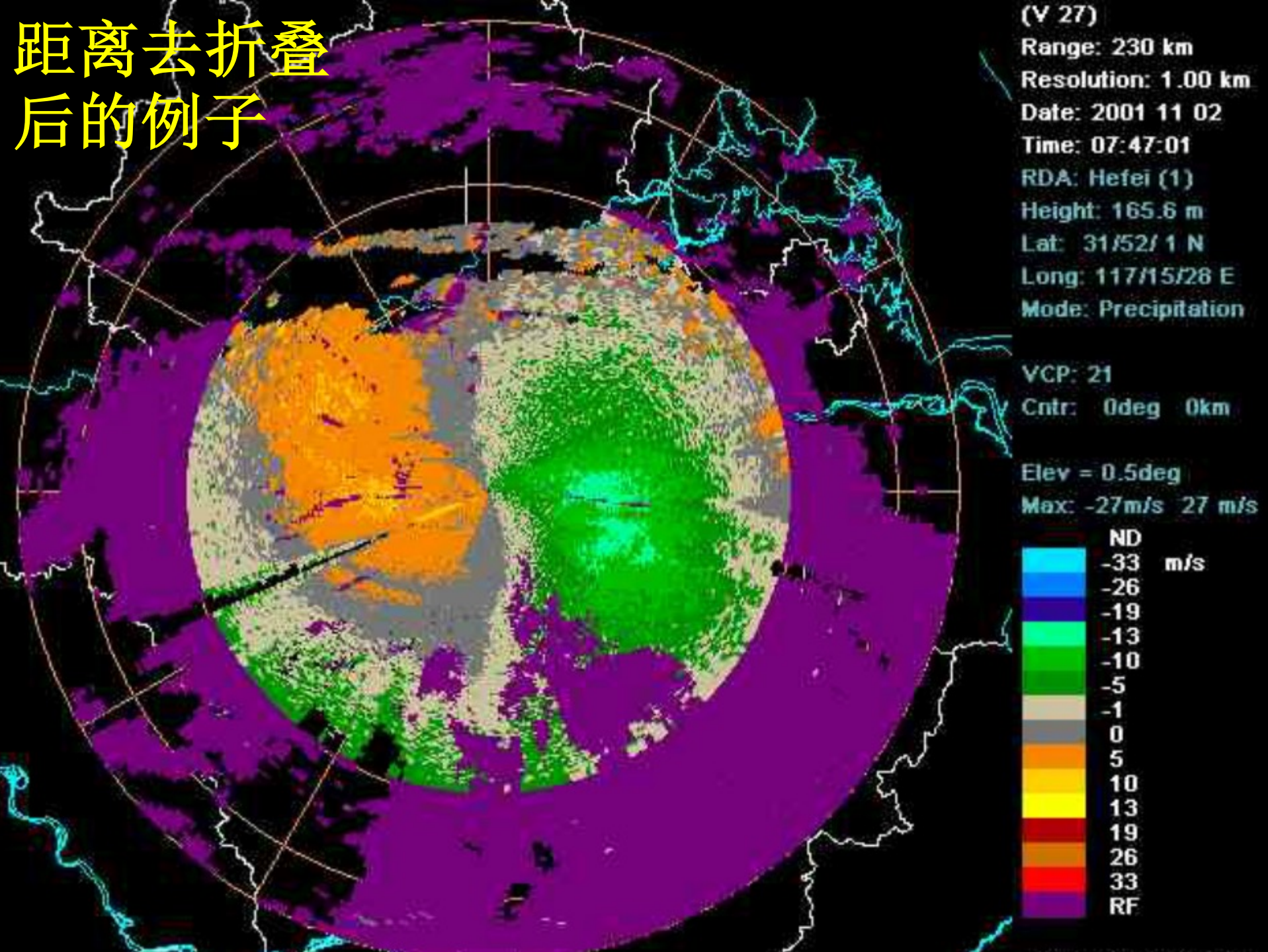
距离去
折叠后
的例子

(V 27)
Range: 230 km
Resolution: 1.00 km
Date: 2002 03 29
Time: 08:50:05
RDA: tianjin (8)
Height: 69.8 m
Lat: 39/ 2/38 N
Long: 117/43/ 1 E
Mode: Precipitation

VCP: 21
Cntr: 0deg 0km

Elev = 0.5deg
Max: -27m/s 27 m/s







距离去折叠算法的优点和局限性

优点:

1) 可确定最大不模糊距离外的速度和谱宽

距离去折叠算法显示CD模态下最大不模糊距离外的准确率的速度和谱宽数据。如果存在回波叠加，则产生叠加的回波之一的目标将被赋给速度和谱宽数据，条件是它们的功率比超过 $TOVER$ ；而其它回波对应的目标距离处将被指定为紫色（距离模糊）

2) 减缓多普勒两难

采用距离去折叠算法使得可以用低PRF模式（CS）精确地确定目标距离和用高PRF模式（CD）准确测定速度和谱宽数据。



距离去折叠算法的优点和局限性

局限性:

1) 某些气象条件较之其它更易于引起距离折叠

任何造成大量回波沿径向排列的天气事件将使CD模态下回波叠加现象异常严重，因而距离模糊数据也大量出现。在爬线过RDA的情形下，距离模糊特征（标注为RF）出现的机会最大。在所有情形中，因为距离去折叠算法涉及回波功率的比较，故第一程内目标的回波最可能被赋值给速度数据，更大量的紫色标注(RF)出现在第二程内。

2) 速度和谱宽数据或许无法确定

当回波叠加时，如果它们的功率比不超过TOVER，就得不到速度和谱宽数据。产生回波的目标距离处将被标注为紫色（距离模糊）

3) 在RDA处改变TOVER值

通常TOVER不能在使用中改变。它是一个RDA的可调参数，不能在PUP或UCP改变。它必须在RDA现场改变。通常由维护人员进行。



速度谱宽资料应用

某些天气的典型值：

- 1)层状云降水：谱宽值较低，0—3.5m/s;
- 2)强雷暴区或低层出流边界：谱宽值>4m/s;
- 3) 0°C层附近：干湿雪、雨滴共存，下落速度差异大，谱宽值约为4m/s;

检验平均多普勒速度的可信度：

一般谱宽较大时，可能对估算平均多普勒速度的准确性有较大的影响。引进与谱宽及信噪比有关系的指标“信号质量指数”SQI，若SQI低于某一指标值，则数据不可靠，弃之。

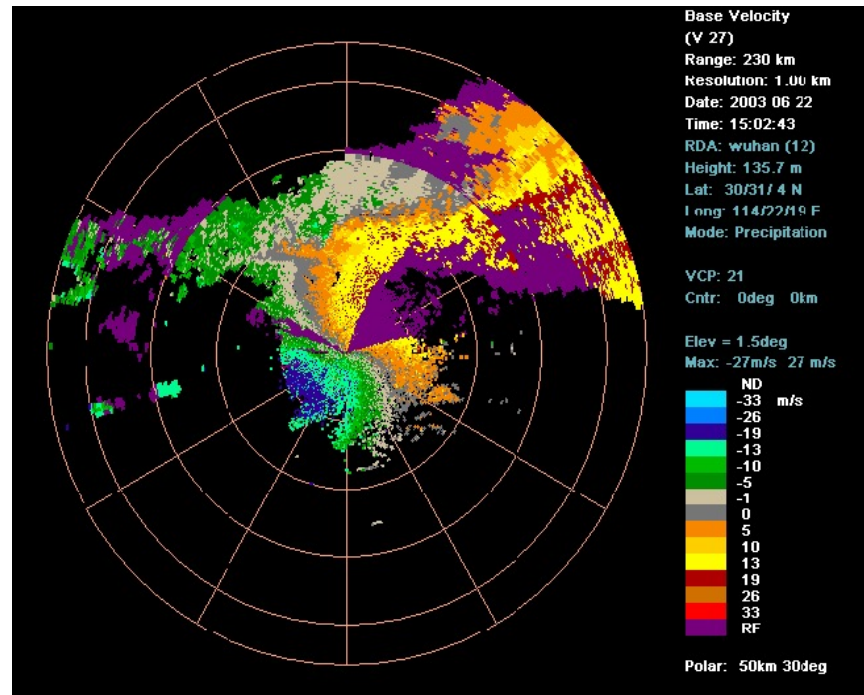
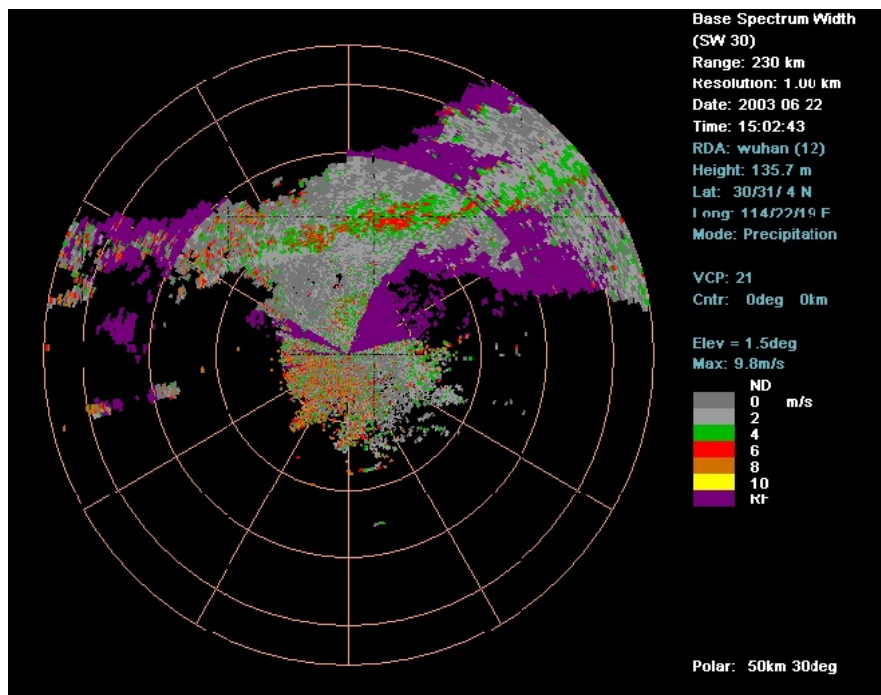
识别多普勒速度场中的风切变区

识别强湍流区

具体应用还需结合当地的地形和天气等实际情况

速度谱宽资料应用

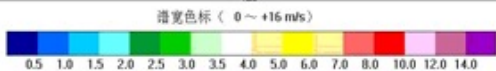
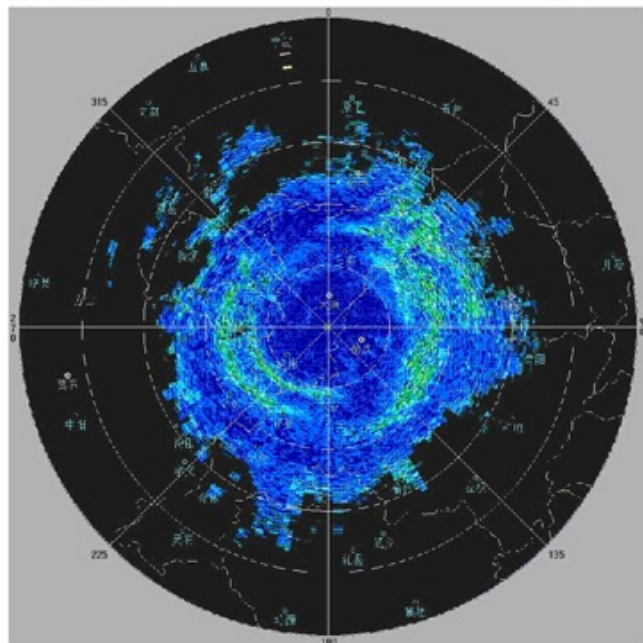
下面左图（谱宽图）中谱宽较大的位置和右图（速度图）中锋面位置一致吗？



速度谱宽资料应用

下面左图（谱宽图）中谱宽较大的位置和右图（速度图）中风切变层位置一致吗？

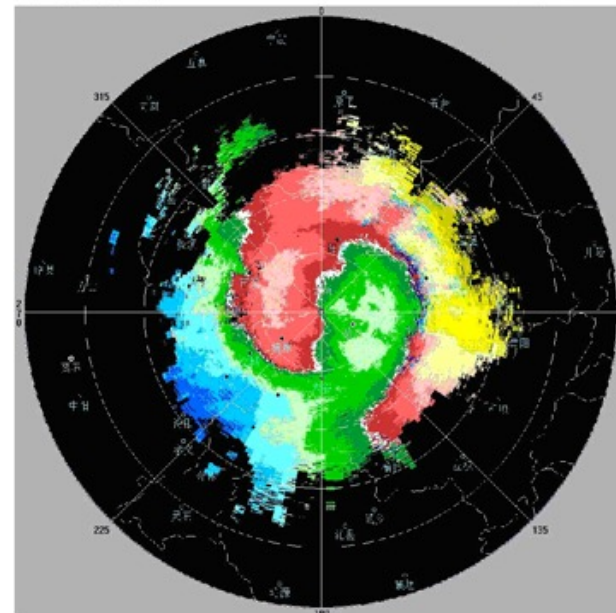
仰角 3.4 度的谱宽 VPPI 扫描 2003 年 07 月 13 日 16:08:34



国家名: 中国 省名: 山西 站名: 太原雷达站 区站号: 53772
 天线位置: 东经 112° 33' 40" 北纬 37° 44' 5" 海拔高度: 732.000 米
 开始时间: 2003 年 07 月 13 日 16:01:28 结束时间: 2003 年 07 月 13 日 16:08:34
 距离量程: 150 公里 脉冲宽度: 1 微秒 极化方式: 水平
 重复频率: 900 赫兹 (双重频 32) 地物对消: 有 (滤波器 2) STC 控制: 有
 处理方式: 64 点 PPP

2003071316.08V

仰角 3.4 度的速度 VPPI 扫描 2003 年 07 月 13 日 16:08:34



国家名: 中国 省名: 山西 站名: 太原雷达站 区站号: 53772
 天线位置: 东经 112° 33' 40" 北纬 37° 44' 5" 海拔高度: 732.000 米
 开始时间: 2003 年 07 月 13 日 16:01:28 结束时间: 2003 年 07 月 13 日 16:08:34
 距离量程: 150 公里 脉冲宽度: 1 微秒 极化方式: 水平
 重复频率: 900 赫兹 (双重频 32) 地物对消: 有 (滤波器 2) STC 控制: 有
 处理方式: 64 点 PPP

2003071316.08V

1. 已知广州番禺天气雷达的脉冲重复频率为1000HZ，脉冲宽度为1微秒，求其最大探测距离 $R_{\max}$ 、最大不模糊速度 $V_{\max}$ 、

2. 论述“多普勒两难”

1、判断下面说法是否正确？为什么？

$$\therefore V_{r \max} \propto PRF$$

$\therefore$ 在 λ 一定前提下：

要 $\uparrow V_{r \max}$, 则要 $\uparrow PRF$

$\therefore$ 若 $\lambda = 10cm$, $V_{r \max} = \pm 250m/s$

则要求 $PRF = 10000Hz$ 即可

2、若要选择造价比较合适，又能满足最大不模糊速度为 $\pm 20\text{m/s}$ 和最大不模糊距离为 100km ，那么你认为应选择哪个波段的多普勒雷达为宜？

A) X波段

B) C波段

C) S波段

D) K波段

3、脉冲重复频率PRF是：

- A) 天气雷达工作频率
- B) 每秒钟产生触发脉冲的数目
- C) 回波频率
- D) 电波频率

4、天线波束宽度为：

- A) 最大发射功率方向角
- B) 主波瓣的宽度
- C) 主波瓣上两个半功率点
方向的夹角
- D) 旁瓣的大小

5、多普勒雷达波束宽度通常不超过1度，太宽则影响

- A) 测距精度
- B) 测角精度
- C) 测回波强度的精度

7、脉冲宽度为：

- A) 脉冲的重复次数
- B) 脉冲振幅的大小
- C) 脉冲在空间占有的长度或脉冲的振荡
持续时间
- D) 脉冲效率

8、脉冲宽度的大小对什么有影响？

- A) 测距精度
- B) 测角精度
- C) 回波强度
- D) 测角和测速的精度

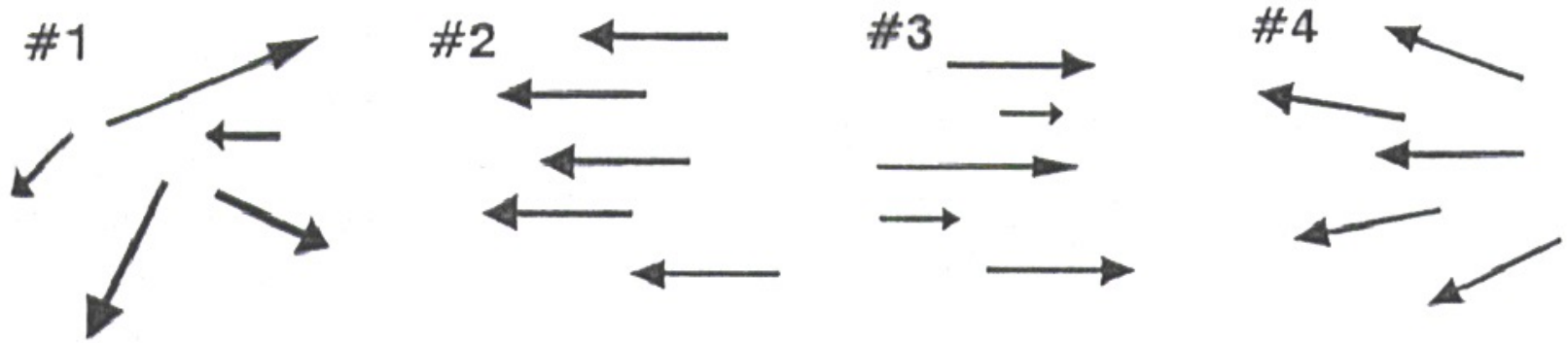
9、关于多普勒速度谱宽的定义，下面哪项说法是不正确的？

A)、某一个点的速度谱宽，实际上是指以这个点为中心的抽样体积内所有质点自身的多普勒速度与多普勒速度平均值偏差的平均程度。

B)、多普勒速度谱宽表示在一个距离库内速度离散的程度，也就是距离库内速度估计方差的度量。

C)、某一个点的速度谱宽，实际上是指以这个点为中心的所有质点所包含的范围。

10. 下图中有四种速度分布场，请分别指出谱宽为零和谱宽最大的速度分布场。



- A) #1号速度分布场的谱宽为零, #2号谱宽最大
- B) #1号速度分布场的谱宽为零, #4号谱宽最大
- C) #2号速度分布场的谱宽为零, #3号谱宽最大
- D) #2号速度分布场的谱宽为零, #1号谱宽最大



随堂练习

若 $V_{r\max} = \pm 30\text{m/s}$, 试计算:

- 1) 当 $V_{rT} = 20\text{m/s}$ 时, $V_r = ?$
- 2) 当 $V_{rT} = 70\text{m/s}$ 时, $V_r = ?$
- 3) 当 $V_{rT} = -70\text{m/s}$ 时, $V_r = ?$
- 4) 当 $V_r = 5\text{m/s}$ 时, $V_{rT} = ?$
- 5) 当 $V_r = -5\text{m/s}$ 时, $V_{rT} = ?$

- 最大不模糊距离 距离模糊（折叠）
- 最大不模糊速度 速度模糊
- 距离去折叠、速度退模糊
- 多普勒两难

本章结束，谢谢！