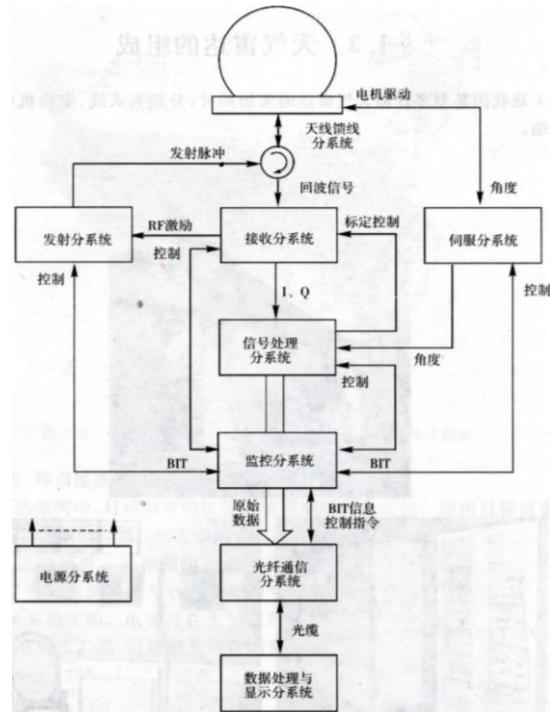


遥感气象学

1. 天气雷达系统有几大分系统？

天气雷达组成包括九大分系统：天线馈线分系统、伺服分系统、发射分系统、接收分系统、信号处理分系统、监控分系统、光纤通信分系统、数据处理及显示分系统、电源分系统。

(重点：发射、天线馈线、接收、伺服、信号处理、数据处理与显示、监控)



2. 雷达接收的信号是什么？

雷达接收的信号是发射出去的脉冲电磁波(一般是极化波)经目标物散射或反射的回波信号。

3. 雷达的最大探测距离？

雷达的最大探测距离由雷达发射脉冲重复周期决定，即：位于最大探测距离内的目标物回波信号，必须在下一个探测脉冲发射前回到雷达天线。

若记脉冲重复频率为 F ，脉冲重复周期为 T ，光速为 c ，则最大探测距离 $R_{max} = c \frac{T}{2} = \frac{c}{2F}$ 。

4. 何为雷达的有效照射深度？

雷达有效照射深度为雷达电磁波束中的各质点能同时散射能量返回天线的径向范围。(能有效接收回波信号的径向范围)

若记脉冲宽度为 T ，脉冲长度为 $h=cT$ ，则雷达有效照射深度为 $\frac{h}{2}$ 。

/*天线有效面积：天线反射体能有效地接收回波信号的口径面积。

天线有效面积小于等于天线几何面积，圆抛物面天线有效面积为几何面积的 $\frac{2}{3}$ 。*/

5. 何为雷达天线的主瓣？

雷达天线主瓣(主波瓣)是天线辐射电磁波能流密度最大的发射方向上的波瓣。

/*全向天线：辐射出去的电磁波能量在空间各个方向均匀分布的天线；

定向天线：辐射出去的电磁波能量在空间各个方向分布不均，并在某个方向能量最强的天线；

天线方向图：描述天线辐射的电磁波能量在空间的分布图，是立体图，但一般取为过原点的纵切剖面(垂直面)和横切剖面(水平面)的截面图，曲线上各点与坐标原点的连线长度表示辐射能流密度的大小。

最大方向：主瓣；侧面：旁瓣/副瓣；相反方向：尾瓣。*/

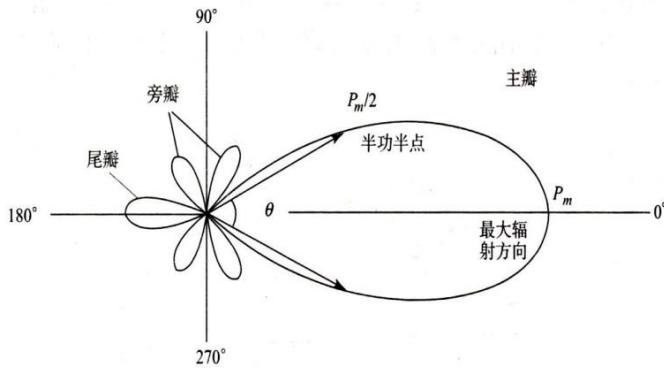


图 1.8 天线方向图

6. 何为天线增益？

天线增益是辐射总功率相同时，定向天线在最大辐射方向的能流密度与各项均匀辐射的天线的能流密度之比。（通常很大，用分贝数表示）

若记天线水平面上波束宽度为 θ ，垂直面上波束宽度为 φ ，则天线增益 $G = \frac{2\pi}{\theta\varphi}$ 。

/*波束宽度：天线方向图上，两个半功率点方向的夹角，通常取天线主瓣波束宽度。

波长越短、天线直径越大，波束宽度越小，角度分辨率越高，探测精度也越高。

记 λ 为波长， d 为反射体口面直径，圆抛物面型反射体波束宽度 $\theta = 70\frac{\lambda}{d}$ 。

圆抛物面天线有效面积 $A_e = \frac{G}{4\pi}\lambda^2$ ，天线尺寸越大、波长越短，天线增益越高。*/

7. 何为散射截面？如何标准化散射截面？

散射截面是粒子的总散射功率与入射波能流密度的比值，量纲为面积。散射截面值越大，说明粒子总散射能力越强。

标准化散射截面是粒子散射截面与集合截面之比， $Q_s^* = \frac{Q_s}{\pi r^2}$ 。

/*散射函数/散射方向函数：描述散射粒子向各个方向散射能力的大小，量纲为面积。

若记 S_i 为入射能流密度， S_s 为粒子散射电磁波的能流密度，则散射函数 $\beta(\theta, \varphi) = \frac{S_s}{S_i} R^2$ 。

散射截面 $Q_s = \frac{P_s}{S_i}$ ， $Q_s = \int_{4\pi} \beta(\theta, \varphi) d\Omega$ 。*/

8. 后向散射函数 $\beta(\pi)$ 与后向散射截面成何种关系？

天气雷达一般采用收发共用天线，雷达接收到的回波即为粒子的后向散射（ $\theta = \pi$ 方向）的那部分能量。

后向散射函数 $\beta(\pi)$ 与后向散射截面 σ 间的关系为 $\sigma = 4\pi\beta(\pi)$ 。

9. 按照瑞利散射理论，后向散射截面与雷达波长和粒子直径成何种关系？

若记雷达波长为 λ ，粒子直径为 D ，复折射指数 $m=n-ik$ （ k 为衰减系数），则有：

$$\text{瑞利散射后向散射截面公式: } \sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 D^6$$

后向散射截面与入射波波长的四次方成反比，与散射粒子直径的六次方成正比，还与散射粒子的复折射指数 m 有关。

10. 对同一波长雷达，为何大雨粒子的回波信号较弱降水粒子强很多？

根据瑞利后向散射公式可知，后向散射截面与粒子直径的六次方成正比，即同样波长的雷达

进行探测，粒子半径越大，后向散射截面越大，且增长显著。

降水强度越大时，雨滴一般也越大，故更容易被探测到。

11. 瑞利散射和米散射适用范围？

瑞利散射：大气中粒子直径比波长小得多的时候发生的大气散射现象。一般粒子尺度系数远小于1时的散射视作瑞利散射，小云滴、小雨滴对厘米雷达波的散射认为满足瑞利散射。

米散射：大气中粒子直径与波长相当时发生的散射现象。

$$/*\text{米散射后向散射截面公式: } \sigma = \frac{\pi r^2}{\alpha^2} |\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (a_n - b_n)|^2$$

其中， $\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$ 为尺度系数， a_n 、 b_n 为散射场系数。

米散射公式是球形粒子散射的普遍公式，瑞利散射公式时其在粒子尺度远小于入射波波长的特例。*/

12. 什么是退极化比？

退极化比时正交极化信号强度 P_c 与平行极化信号强度 P_p 的比值。

$$\text{表示为分贝数时即 } D_p(\text{dB}) = 10 \lg \frac{P_c}{P_p}.$$

/*介质小椭球体（近似满足瑞利散射的旋转椭球体）散射功率正比于电偶极矩的平方，正比于椭球体体积，与椭球体形状、介电常数、相对入射波电场的取向有关。

长轴方向产生的偶极矩和散射功率较大；若长轴平行入射场的极化方向，则散射强度比同体积的球大，若短轴平行于极化方向时，散射强度将比同体积的球小。

平行极化分量：散射波电场与入射波电场平行的分量；正交极化分量：与入射波电场垂直的分量。*/

13. 雷达发射电磁波的衰减由那些因子造成？

雷达发射电磁波的衰减是由大气分子、云和降水粒子的吸收以及粒子散射造成的，衰减=吸收+散射。

$$/*\text{衰减系数 } k = -10 \lg \frac{P_r}{P_{r0}}$$

吸收作用：大气体分子（水汽、氧气）；散射作用：（液态）云滴、雨滴、雪、冰雹*/

14. 冰云和水云。谁的衰减大？

水云的衰减更大，冰云的衰减比液态云衰减小2-3个量级。

/*液态云的衰减作用随波长增加迅速减少，对10cm波长的雷达波几乎不衰减；液态云的衰减作用随温度降低而增大*/

15. 射线曲率与折射指数有什么关系？

若记射线曲率为K，折射指数为n，入射角为i，则雷达电磁波射线曲率与折射指数随高度变

$$\text{化的关系为 } K = -\frac{\sin i}{n} \frac{dn}{d\lambda}.$$

雷达探测天气时，天线仰角接近0°， $i \approx 90^\circ$ ，n取1.0003，则有 $K = -\frac{dn}{d\lambda}$ 。

射线曲率等于大气折射指数的垂直梯度。

16. 影响大气折射指数的因子有哪些？

影响大气折射指数的因子有大气温度、压强、湿度、（杂质、云雨滴等）。

$$\text{折射指数的N单位 } N = (n-1)10^6 = \frac{77.6}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right)$$

/*一般情况下，综合考虑气压与温度因素影响，大气折射指数随高度减小。*/

17. 标准大气情况下，雷达波束传播路径的特点？

标准大气情况下，雷达波束传播路径微微向地面弯曲，曲率在直线和地球曲率之间。

$$/*\text{标准大气情况，雷达测高公式: } H = h + R \sin \delta + \frac{R^2}{17000}.$$

18. 何为超折射？形成超折射的气象条件是什么？为何超折射传播又称为大气波导传播？

超折射：雷达波射线绝对曲率大于地球表面的绝对曲率时的折射。

形成超折射的气象条件：逆温显著、水汽压随高度减少迅速的大气，例如：大陆晴天夜晚（辐射超折射）、暖干空气移到冷水面上（平流超折射）、雷暴消散期（雷暴超折射）

由于超折射射线弯向地面，经地面反射后进入大气继续向前传播，又被大气折射弯向地面，这种过程多次重复，使射线在地面和某一大气层之间辗转地向前传播，这种情况与波导管中微波的传播相似，所以又称为大气波导传播。

/*正折射：标准大气折射、临界折射、超折射

临界折射：射线绝对曲率与地球表面的绝对曲率相同时的折射，电磁波环绕地表在一定高度上传播。

零折射：射线绝对曲率为零时的折射（均质大气折射）。

负折射：射线绝对曲率小于零时的折射，射线向上弯曲。（大气湿度随高度增加，温度递减率大于干绝热递减率时）*/

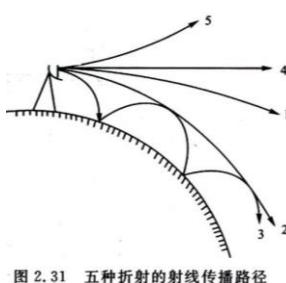


图 2.31 五种折射的射线传播路径

19. 气象雷达的主要参数？

气象雷达的主要参数有雷达发射功率、天线增益、波束宽度、脉冲长度、工作波长

/*详见气象雷达方程雷达参数项*/

20. dB 与 dBZ 有何区别？

dB：回波功率的大小（分贝数）， $dB = 10 \lg \frac{P_r}{P_{min}}$ ；

dBZ：反射率因子的大小（分贝数）， $dBZ = 10 \lg \frac{Z}{Z_0}$ ；

$dBZ = dB + 20 \lg R - 10 \lg \frac{C}{P_{min}}$ ，其中后两项分别为距离订正项和雷达参数订正项。

21. 多普勒频率与多普勒速度之间关系。

多普勒频率：目标物径向相对运动造成的雷达回波信号频率与发射频率间的变化量。

多普勒速度：目标物在雷达径向上的运动分速度， $V_r = \frac{r}{T}$

二者满足关系 $f_D = \frac{2V_r}{\lambda}$ 。

/*多普勒效应：当声源和观测者做相对运动时，观测者接收到的声波频率和声源频率不同，其频率变化量与相对运动速度有关。

多普勒变化/多普勒频移：由相对运动造成的频率变化，表现为江水例子对相脉冲波散射回波信号间的相位变化。*/

22. 多普勒雷达的工作方式分为哪两类？

多普勒雷达的工作方式分为自相干和全相干。

自相干多普勒雷达也称为中频锁相相干雷达，由磁控管通过方波脉冲进行调制发射的高频脉冲波，各个发射的脉冲间没有确定的相位关系；全相干多普勒雷达由晶体振荡器发出单频脉冲波，然后由方波脉冲进行调制成一系列的脉冲波发射。

23. 非气象回波分为哪几类？

非气象回波分为地物回波、海浪回波、同波长干扰回波（其它雷达造成）、昆虫和飞鸟的回波。

24. 气象回波分为哪几类？

气象回波分为云的回波、雾的回波、晴空回波、降水回波。

25. 层状云降水回波特点是什么？对流云降水回波特点是什么？锋面降水回波特点？

层状云降水一般为稳定性降水，范围大、持续时间较长、强度均匀、随时间变化缓慢。

稳定性降水回波特征为：平显上，回波范围大，呈片状，边缘零散不规则，强度不大，但分布均匀，无明显强中心（适当抬高天线仰角有回波强度比内外圈强的环形回波区）。高显上，回波顶部较平整，无明显对流单体突起，底部及地，强度分布均匀，一般内部有一条与地面大致平行的相对强回波带（零度层亮带）。

对流云降水范围小、强度大、分布不均匀、持续时间短、随时间变化明显。

对流性降水回波特征为：平显上，回波通常由一个或多个回波单体组成，这些回波单体随着不同的天气系统排列成带状、条状、离散状或其他形状；回波单体边界清晰、棱角分明，单体中心强度较大，强度分布层次分明，水平尺度几千米到30-40km。高显上，单体剖面形状一般为柱状，单体内部强度梯度大，一般有明显强中心；回波高度较高；近雷达一侧可能有云砧回波。

锋面降水也属于稳定性降水，回波特点和上述层状云降水很像。

26. 风速随高度增加、但风向不变时，多普勒速度图像的特点是什么？

风速随高度增加时，零速度线近似为直线，与风向垂直，不同颜色不再收敛于原点，代表径向速度最大值的颜色位于风的去向，代表径向速度最小值的颜色位于风的来向。

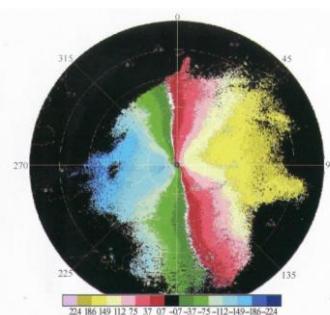


图 3.7 实测的风向不变、风速随高度增加的速度图

27. 风速随高度先增后减时，多普勒风速图像特点是什么？

风速随高度先增后减时，零速度线近似为直线，与风向垂直，中间距离圈处获得最大径向速度值，正负速度中心对称分布，表现为近似椭圆形的亮斑，称为牛眼。

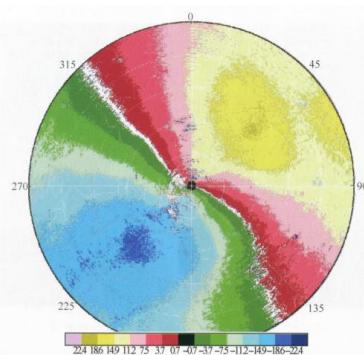


图 3.9 实测的风向不变、风速随高度先增后减的速度图

/*风向、风速随高度都不变：零速度线近似为直线，与风向垂直，不同颜色呈扇形分布，收敛于原点。



图 3.5 实测的风向风速不随高度变化的速度图

风向随高度顺转、风向随高度逆转：

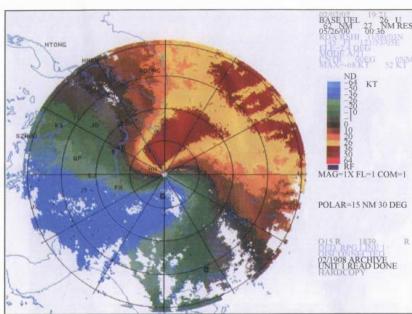


图 3.11 实测的风速不变、风向随高度顺转的速度图

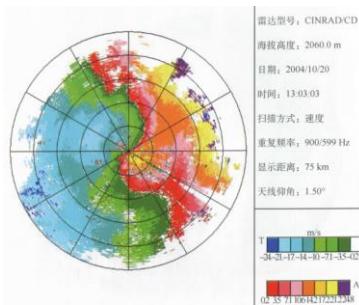


图 3.13 实测的风速不变、风向随高度逆转的速度图

风向随高度急剧变化：

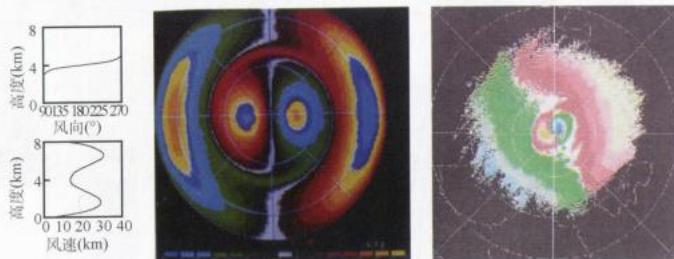


图 3.22 风向突变 180°的模拟图和实测速度图

其余情况可自行根据特征组合。*/

28. 当 $d \ll \lambda$ 时的散射，称为什么种散射？当 $d \approx \lambda$ 时的大球形质点的散射称为什么种散射？

$d \ll \lambda$ 时，发生瑞利散射； $d \approx \lambda$ 时，发生米氏散射。

29. 多普勒雷达最基本的产品是什么？

多普勒雷达最基本的产品包括：反射率因子、平均径向速度、谱宽。

30. 雷达气象方程各项意义是什么？

$$P_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \frac{p_t h G^2 \theta_1 \phi_1}{\lambda^2} \frac{1}{R^2} \varphi \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 Z \cdot 10^{-0.2 \int_0^R K dR}$$

在上式所示的气象雷达方程中有：

P_r ：回波功率；

$\frac{1}{2 \ln 2}$ ：有关天线增益 G 的修正；

$\frac{\pi^3}{512}$ ：由瑞利散射模式计算有效体积内的散射截面总和引起的常数；

$\frac{p_t h G^2 \theta_1 \phi_1}{\lambda^2}$ ：雷达参数（发射功率 P_t ，脉冲长度 h ，天线增益 G ，天线在水平、垂直面上的波束

宽度 θ_1 、 φ_1 , 雷达的工作波长 λ);

R: 目标到雷达的距离;

φ : 充塞系数 (有效照射体积中云和降水占的体积除以有效照射体积);

$|\frac{m^2-1}{m^2+2}|^2$: 介电常数项 (大气折射指数);

Z: 气象目标的反射率因子 (单位体积中云和降水粒子直径六次方的总和);

$10^{-0.2 \int_0^R k dR}$: 衰减因子的订正。

/*瑞利条件下, 气象雷达方程可简写为 $P_r = \frac{C}{R^2} Z$, 其中 C 与雷达参数和粒子相态有关。*/

31.超级单体风暴、冰雹云在雷达上的分别结构特征是什么?

超级单体风暴:

- 1.相应高度平显上, 超级单体呈圆形或椭圆形的单体结构, 典型水平尺度为 20-30km 长、12-15km 宽, 中高层能观测到下方有云砧回波伸展;
- 2.中层, 超级单体前进方向右侧有持久的有界弱回波区 (BWER), 能伸展到风暴高度的一半到三分之二, 通常由下往上向左侧倾斜, 该区域右侧有钩状回波;
- 3.最大雷达回波强度在 BWER 区上方, 最大回波强度梯度区紧靠在 BWER 区左侧;
- 4.低层探测不到 BWER 区, 存在弱回波区, 最大回波强度平面位置位于 BWER 区中, 紧靠低层最大强度梯度边缘。

冰雹云:

- 1.平显上, 冰雹云回波在远离雷达一侧出现 V 型缺口, 低层入流一侧出现凹向云内的入流缺口, 云体右侧、右后侧出现钩状回波, 抬高天线仰角能看到回波内部存在尺度很小的有界弱回波区 (BWER), 旁瓣可能探测到内部有旁瓣假回波, 有时会出现细长钉子状的三体散射回波。
- 2.高显上, 冰雹云回波表现为高耸的纺锤状回波柱, 低层入流处存在弱回波区, 旁瓣可能探测到尖顶状假回波, 而三体散射回波则体现为火焰回波。

/*普通单体风暴: 初始回波高度较高 (6-9km), 强回波中心值大于 50dBZ, 强回波中心高度也较高;

多单体风暴: 一般前进方向右侧有新单体产生进入, 发展增强成为主要单体, 老单体在另一侧减弱消散;

*/