



讲座 第九讲 雷达定量测量降水

蔡作金 张淑君

天气雷达除了具有探测降水和警戒灾害性天气的能力以外，还具有定量测量降水的能力。它能够较迅速地获得大范围内的降水量分布。应用回波功率(P_r)—降水强度(I)统计关系式，可以定量地估算出降水强度的分布情况，这对于水文部门的洪水预报、水库的蓄放及江河流域水量的短时预报都是很重要的。六十年代以来，国外在雷达定量测量降水方面有许多研究，1966年美国国家强风暴实验室曾利用雷达测得的降水资料，经数字化处理后供业务上试用。七十年代初，我国也开始了这方面的工作。本文简要介绍如何利用天气雷达测量降水回波功率，并由此估算降水强度和降水量，以及雷达回波资料的数字处理等几个方面的问题。

一、雷达测量降水的基础理论

从单个目标物返回雷达的能量与目标物的后向散射截面成正比，当目标物的直径比雷达波长小得多时 ($\frac{\pi D}{\lambda} \ll 1$)，即符合瑞利散射条件，单个目标的后向散射截面可用下式表示：

$$\sigma = \pi^5 |K|^2 D^6 / \lambda^4 \quad (1)$$

式中 λ 为波长， K 是一个与目标物的复折射指数 m 有关的量， D 是水滴的直径。水滴的 $|K|^2$ 取 0.93，雪(即固态水)的 $|K|^2$ 一般取为 0.2。

由于降水和云体是由许多大小不等的降水质点组成的，所造成的后向散射截面为这些单个质点后向散射截面的总和，由(1)式可得到单位体积中降水质点总的散射截面表达式：

$$\sigma_{\text{总}} = \pi^5 |K|^2 \sum N_i D_i^6 / \lambda^4 \quad (2)$$

定义雷达反射因子(Z)

$$Z = \sum N_i D_i^6 \quad (3)$$

反射因子 Z 和降水或云滴谱和数密度有关，而不受雷达波长的影响。当降水质点的直径大于 0.04λ 时，瑞利公式作为精确的米散射理论的近似是不满足的，因此定义了等效反射因子 Z_e 。则 Z_e 与波长有关。

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5} |K|^2 \sigma \quad (4)$$

在实际测量中，根据回波功率和雷达参数计算出的回波强度 Z_e ，在降水中水滴直径不太大时 ($D < 0.04\lambda$)， $Z_e \approx Z_0$

从 Z 的定义可以看出， Z 仅与雨滴的直径(D)有关。降水强度 I 也与雨滴的直径(D)有关。 Z — I 之间的关系可由理论推导得到，也可以由实验统计关系得到。考虑到水的密度是 1，云雨的含水量是由单位体积中含有雨滴的多少、大小决定的，则降水强度 I 为：

$$I = \sum N(D) M(D) V(D) \Delta D \quad (5)$$

$N(D) \Delta D$ 的意义是单位体积中直径为 $D-D+\Delta D$ 间隔中雨滴数， $V(D)$ 为该直径区间内雨滴的下落末速度。 $M(D)$ 为该区间中的单个雨滴质量。假定：①降水是均匀分布的，②地面垂直气流很小，③符合瑞利散射，可以从理论上推导出 Z 和 I 的关系。

$$Z = 210 I^{14/9} \quad (6)$$

上式也可以通过测量雨滴谱求得。目前对雨滴的获取通常采用染色滤纸法和照相方法。取得雨滴谱资料以后，根据 Z 的定义计算出 Z 的数值，再根据不同大小雨滴降落末速度的实际数据，由(5)式计算出与 Z 值

对应的降水强度I的值，根据多次的滴谱资料可以计算出许多对Z—I值，得到Z—I关系式，一般可表达为：

$$Z = AI^b \quad (7)$$

式中A、b是由滴谱观测资料决定的常数。附表是一些地区实验工作中得到的结果。

附表

	观 测 点	Z—I 关 系	降 水 性 质
雨	华 盛 顿	214 I ^{1.58}	98份雨谱
	渥 太 华	200 I ^{1.60}	250 份雨谱
	悉 尼	127 I ^{1.20}	34份雨谱
	迈 阿 密	217 I ^{1.41}	877 份雨谱
	列 宁 格 勒	3.44 I ^{1.54}	雨
	澳 大 利 亚	127 I ^{2.87}	暴雨
	迈 阿 密	144 I ^{1.16}	611 份暴雨雨谱
	列 克 星 顿	162 I ^{1.60}	连阴雨
	东 希 尔	436 I ^{1.64}	
	莫 斯 科	289 I ^{1.59}	雨7—60毫米/小时
	德 里	342 I ^{1.42}	季风雨
	浦 那	66.5 I ^{1.92}	暖云降水
	北 京	264 I ^{1.59}	95份雨谱
雪	日 本	2150 I ^{1.8}	1 小时40分过程中观测到的 10天过程中观测到的。
	蒙特利尔	2000 I ^{2.0}	

分析附表资料可知，(7)式中的参数A、b的变化幅度是相当大的。仅对雨而言，A值的变化范围是3.44—436，b的变化范围是1.16—2.87。由此可见，Z—I关系式不是固定的，而是随地点、季节和降水类型不同有较大的差异。

根据1962—1963年在北京地区收集到100多份雨滴谱资料，对Z—I关系进行了计算，并将计算结果对照降水回波的性质进行分类，得出下面三种Z—I关系。

层状云降水 $Z = 188I^{1.68}$

积状云降水 $Z = 316I^{1.73}$

混合型降水 $Z = 237I^{1.46}$

根据1973年收集的4次降水过程共95份雨滴谱资料（对降水性质没有进行分类），用统计的方法求出Z—I关系：

$$Z = 264I^{1.89} \quad (8)$$

应用此式计算雨强和用直接测得的雨滴谱计算的雨强进行比较，其平均相对误差为18%（不包括机器校准误差），最大误差可达100%左右。由此可见，用任意一次降雨的雨滴谱资料求得的Z—I关系式，并不能很好地适用于其他降水。若用整个雨季的Z—I关系式，或根据降水性质分类的Z—I关系式来计算雨强，精度要高一些。

二、平均功率 \bar{P}_r 和Z值的测量

降水返回的回波功率和雷达参数、降水性质有关。在降水质点充塞满雷达波束，且不考虑衰减时，雷达气象方程为：

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3}{1024\ln Z} \cdot \frac{P_t \cdot h \cdot G^2 \cdot \theta \cdot \phi}{\lambda^2} |K|^2 \frac{Z}{r^2} \quad (9)$$

式中 P_t 为发射机峰值功率， h 为发射脉冲空间长度， G 为天线增益， θ, ϕ 为水平和垂直方向的天线波束宽度， λ 为雷达波长。在雷达参数校定以后，

$\frac{\pi^3}{1024\ln Z} \cdot \frac{P_t \cdot h \cdot G^2 \cdot \theta \cdot \phi}{\lambda^2} |K|^2$ 为一可计算求得的常数C。则方程(9)可化简为：

$$\bar{P}_r = \frac{CZ}{r^2} \quad (10)$$

式中的云雨回波距离r，可直接从雷达显示器上测得。如果能确定 \bar{P}_r 的大小，Z值就可确定了。再根据选定的Z—I关系式，便可以计算降水强度，将(7)式代入(10)式可得：

$$\bar{P}_r = \frac{CAI^b}{r^2} \quad (11)$$

实际工作中，我们往往是直接测量 \bar{P}_r 的大小，再由 \bar{P}_r 的大小估算降水强度的大小。

1. \bar{P}_r 的测定方法

(1) A/R显示器比较法 在A/R显示器上，纵坐标表示信号幅度，横坐标表示信号的距离。用一已知功率的信号对纵坐标的标尺进行定标，则降水信号的功率便可得

知。但由于降水回波信号幅度的涨落比较大，运用这种方法常难以精确测量，所以目前已很少采用。

(2) 最小可测信号法 这是目前在天气雷达上经常采用的一种方法。首先，必须对雷达接收机最小可测信号进行测量，测量方法有两种：一种是标准信号源法，即从微波信号源中输出一个与雷达发射波长相同的经过脉冲调制的已知功率的微波信号，然后改变输入信号幅度，直到信号刚好能从接收机的噪声背景中分辨出来，这时输入的微波信号峰值功率，即为雷达接收机的最小可测功率 $P_{r\min}$ 。另一种方法是测量接收机噪声系数 N_F ，根据 $N_F - P_{r\min}$ 换算关系式，换算成雷达接收机的最小可测功率。测量时将荧光屏上的噪声调整得刚好出现时，这时降水回波边缘的功率即等于雷达的最小可测功率。然后利用雷达接收机的衰减设备对降水回波进行分级衰减，可得到不同等级的等回波功率曲线。利用公式。

$$\bar{P}_r = P_{r\min} \cdot 10^{N/10} \quad (12)$$

便可计算回波区中各点的回波功率。式中 N 为雷达接收机增益衰减器的衰减值，单位为分贝。根据公式 (10) 或 (11) 就可算出回波强度和降水强度。图 1 是利用分级衰减法获得的一张降水回波的等回波功率分布图。这样得到的等回波功率分布图，由于各点距雷达的距离不同，各点回波强度 (Z)、降水强度 (I) 也不相同，则必须逐点进行计算，

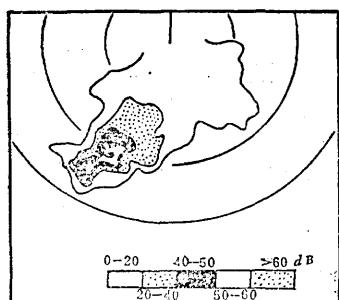


图 1 JMA-109 天气雷达降水回波功率分布图 距离每圈20公里

方可给出降水强度分布图。为了直接获得降水强度的分布，天气雷达上常采用距离订正装置，即将回波功率按距离负二次方的关系进行订正，显示出的图像为回波强度的分布。国产 713 天气雷达装有距离订正装置，可直接显示回波强度的分布。

2. 视频积分处理和分层显示技术

降水云体中，降水质点运动是随机的，使得返回雷达的信号幅度出现强烈的涨落现象。回波强度的均方差 σ^2 达 31 dB^2 ，其标准差为 5.57 dB 。因此，用上述逐级衰减测量降水回波强度的方法，会带来较大误差。为了消除降水回波信号的涨落现象，实现对回波信号较准确的测量，常采用对回波信号进行积分处理的平均方法，取得准确的测量，然后再对测量值进行分层显示。对回波进行这样处理和显示的设备称为视频积分分层机。我国生产的 713、714 天气雷达都配备有这种设备，这种设备能够迅速地获得大范围内较准确的回波强度分布。雷达天线一次扫描中，荧光屏上显示出灰、亮、黑、灰、亮、黑、灰不同的色调，表示各种降水强度的回波分布。图 2 是一张多层次显示的回波图像，第一层（灰层）的回波强度为 $20-30 \text{ dBz}$ ，第二层（亮层）为 $30-40 \text{ dBz}$ ，第三层（黑色）为 $40-50 \text{ dBz}$ 。如果按照公式 $Z = 264I^{1.39}$ 换算成降水强度，则第一层为 $0.2-2.7 \text{ 毫米/小时}$ ，第二层为 $2.7-11.5 \text{ 毫米/小时}$ ，这样可直接得到降水率大小的分布情况。

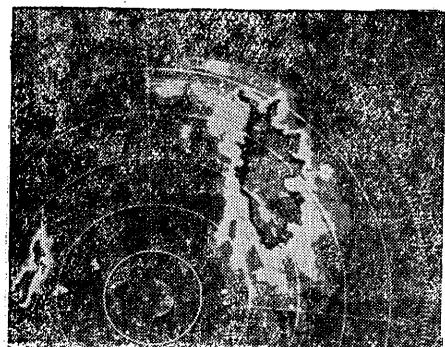


图 2 1980年6月14日21时30分 PPI 多层显示照片 距离每圈20公里，间隔10dB距离订正

3. 利用单点雨量计校正雷达测量降水

多层显示的降水回波图能够直接表示降水强度的大小，但由于 $Z-I$ 关系的不确定性，所以对每一次降水过程要进行精确的测量是很困难的。雷达测量降水的精度受到许多因素的影响，如雷达参数的不稳定以及参数测量中的系统误差，反射因子(Z)和降水强度(I)之间的关系随雨型及季节的变化而异等。为了提高雷达测量降水的精度，常在雷达测量范围内设一些自动雨量计对雷达测量值进行校准。即雨量计自动将测量到的雨量值发送给雷达站，来修正雷达对该点的测量。这种实时修正雷达测量结果的方法，可以大大提高雷达测量的精度。

1982年，气象科学研究院进行了单点雨量计和雷达测量降水强度的比较试验工作，并研究了用雨量计来校准雷达测量的方法。试验中，使用经过改装的翻斗式雨量计，并改变雨量计的走纸速度，提高了雨量记录的分辨力。雷达回波信号则通过长纸带记录器记录。然后进行比较。从图3可以看出，雨量计和雷达测量的降水强度基本趋势是一致的，但雷达测量的降水强度比雨量计测量的降水强度小，这是由于基值的校准误差造成的。当以雨量计某两个时刻的测量值作为准确值来修正雷达的测量值后，可以发现雷达测量值和实际的降水量非常一致。从14时15分至14时52分这一时段内，雷达测得的总降水量为4.8毫米，雨量计上累计雨量为4.7毫米。就这一时段而言，相对误差仅为2%，

对降水强度测量的标准差为2.3毫米/小时。

三、雷达回波数字处理技术

依靠雨量计校准后，天气雷达可以对降水进行较准确的测量。但在实际使用中，由于信息量太大，资料难以实时处理，以致在实际业务工作上应用还存在相当大的困难。随着计算机的普遍使用，由天气雷达与计算机组成的数字化雷达探测系统，有可能妥善的解决这一困难。

天气雷达资料的数字处理需要解决两方面的问题。一是天气雷达探测到的回波信息经过Dvip(数字视频积分器)的A/D(模拟/数字)转换，数字积分后输入到计算机。二是根据研究工作和日常业务工作的需要，编制各种处理程序，处理雷达提供的数据，转换成各种实用的量，如回波强度、垂直积分液态含水量、短时效降水预报及洪水警报等。

目前，国内已进行雷达探测资料的数字处理工作的研究。气象科学研究院已研制了数字化视频积分分层机(Dvip)，该设备将雷达回波信息经过A/D转换成数字信号，然后进行数字积分平均。对PPI回波图进行极坐标网格化，以距离和方位进行分割，把距离分成100个库，距离库长1公里或2公里。方位分成182个库，方位间隔为 1.98° ，雷达扫描一周，共得到 182×100 的二维数组，即18200个网格，对每一个网格上的雷达回波进行距离和方位积分，积分结果表示的数字就是相应位置的回波强度值。把这种方式排列的数据经过计算机可以打印出以方位为纵坐标、距离为横坐标的坐标图，常称为B—扫描图。

在实际应用中，希望每个数据点代表的取样面积相等，输出的格式采取直角坐标的形式。这样就需要把B—扫描形式的数据格式转换成直角坐标形式，通常直角坐标网格取 2×2 平方公里或 4×4 平方公里两种格式，每个直角坐标网格的回波强度以直角坐标网格四周的极坐标数据插值求得，如图4。

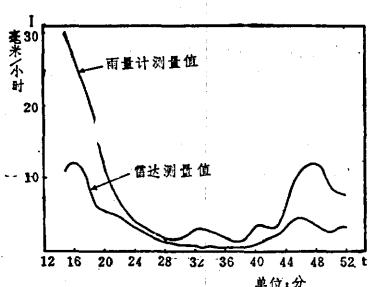


图3 雷达测量的降水强度和雨量计记录的降水强度比较

四、结束语

无论在我国还是在国外对雷达测量降水的问题都进行了大量的理论工作和实验工作，都说明了应用雷达方法测量降水强度和降水量具有明显的优点。但由于许多因素影响，使得雷达测量降水的精度较低。但随着近些年来电子技术的发展，如信息的迅速传递，计算机广泛使用，使得雷达获取的大量降水回波信息能够实时处理，使雷达测量降水工作前进了一大步。如美国、日本、英国等一些国家已把雷达测量降水的结果应用到实际业务工作中去。我国雷达气象事业也发展得较快。目前已研制了数字化视频积分机，能够配合计算机实时处理降水回波信息，可望在今后几年内逐步投入业务使用。

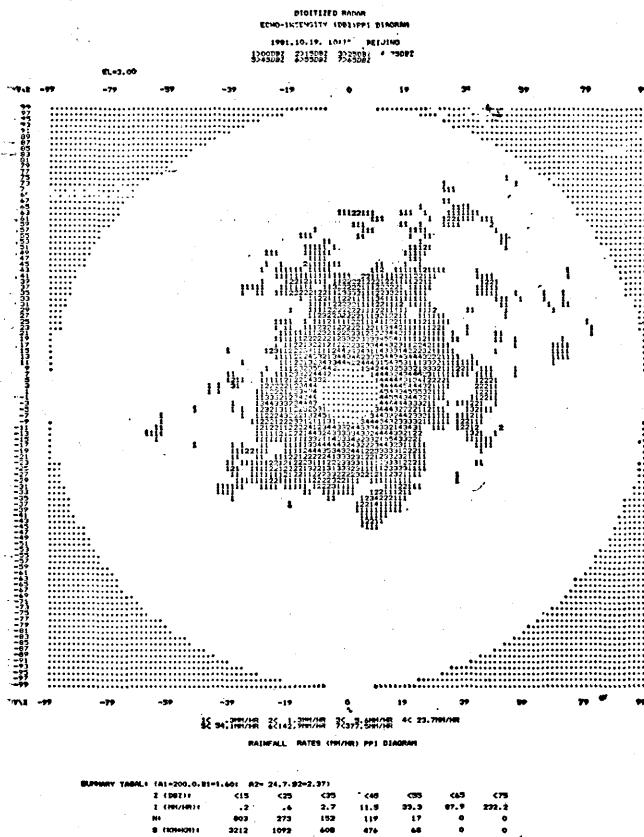


图4 北京1981年10月19日10:19数字
化雷达回波图 探测半径100公里

在得到直角坐标中每个网格中的回波强度分布以后，可进一步引用回波强度和降水强度的Z—I关系式计算出每个网格的降水强度，乘以每个网格的面积，再把每个网格累加，就能得出区域瞬时降水量($R = \sum I_{ids}$)。按一定时间间隔取样，把得到的瞬时降水量随时间积分，就可以得到局地或过程降水量：

$$R_{\text{总}} = \int R(t) dt$$

根据水文部门的需要，如河流的水位，水库的蓄放，可编制特定的程序，计算降水过程的总量，打印出雨量图。若通过图像传输或彩色显示器实时传递和显示可为水文、气象部门的超短期降水预报服务。

《动力气象》和 《数值天气预报》 讲座预告

为了适应当前和今后天气预报业务工作的需要，给台站的气象科技业务工作人员提供学习和参考材料，应读者要求，本刊将从1983年第4期和第6期先后开始刊登《动力气象》和《数值天气预报》两个讲座。该讲座邀请中国科学院大气物理研究所的研究人员及有关单位的科技人员撰写，内容适合广大气象台站预报人员阅读参考。各省、市气象局等单位若需刊登上述讲座的《气象》杂志，请提前到当地邮局订阅，过时无法增补。

本刊编辑部