

天气雷达定量测量区域降水量的 校准技术及误差分析

伍志方 戴铁丕 张培昌

(新疆气象科学研究所) (南京气象学院)

提 要

本文根据变分法和平均校准法原理,使用数字化天气雷达的回波资料和自动雨量计的雨量资料,定量分析了武汉地区1987年5月25日和5月12日两次降水过程,结果表明:平均校准方法能够减小测量误差,但降水峰值被平滑掉了。而变分校准方法,既把雷达观测到的结果造型成雨量计观测到的结果,又保留了雷达探测到的降水变化,相对误差小于10%。

一、引 言

雨量计能够比较准确地测量出其所在地的地面降水量,但代表性差。天气雷达能够及时提供时空连续变化的降水资料,但在估算区域降水量时存在着精度不高的问题。为了充分发挥各自的优点,提高测量区域降水量的精度,早在70年代初期, Wilson⁽¹⁾就指出,将分布稀疏的雨量计网同雷达结合在一起,用雨量计来校准雷达,使得测量误差比单独使用雷达的误差要小得多; Arandes⁽²⁾认为用一个体现了雨量计-雷达空间差异的订正因子,估算误差将进一步减小; Sasaki⁽³⁾在变分法的基础上,发展了一种客观分析的方法; Ninomiya和 Akiyama⁽⁴⁾运用此法进行了一次暴雨分析,得到了令人满意的结果。这种雨量计-雷达联合探测方案的实质,就是利用平面拟合技术,把雷达探测到的结果造型成雨量计观测到的结果,而保留了雨量计之间雷达探测到的降水变化。

本文就是利用上述探测方案,用雨量计的实测雨量校准雷达,计算区域降水量。比较了变分校准技术和平均校准技术,证实了变分校准比较理想,平均校准次之。尽管如此,该方法也比未经校准的雷达精度要高。最后对造成测量误差的可能原因进行了分析。

二、资料来源

使用的资料是武汉中心气象台的WSR-81S型数字化天气雷达的ZPPI和Column max彩色分层图像数字产品。ZPPI是在PPI上通过核查地物回波档案的方法消去地物回波的影响,由递增的近地面层不同仰角(0°、0.5°、1.0°、1.5°)的锥体扫描回波资料构成,以最低仰角扫描时所获取的降水资料为准。Column max可分为平面和垂直剖面两部分,是由0°—1.5°仰角的锥体扫描中各锥体内的最强回波和经过弱化处理的地物杂波组成。该系统已采用 $Z = 200I^{1.0}$ 的固定关系式,将雷达反射因子直接转换成雨强值。

该系统还配有自动雨量计校准子系统, 每个雨量计每隔10—20分钟累计一次雨量。分析区域位于雷达站南面60—160km, 180°—240°处, 内含16个自动雨量计(如图1),

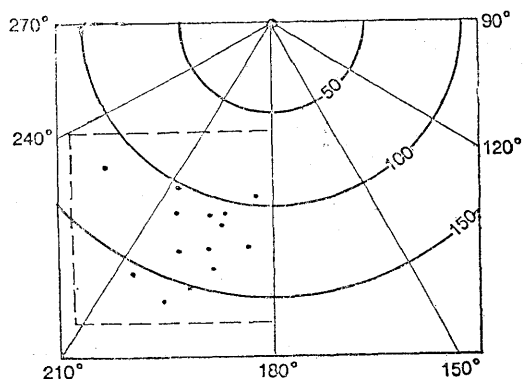


图1 自动雨量站分布图

圆心为雷达站, 黑点为自动雨量站, 虚线框为所取的分析区域

将其分成 $4 \times 4 \text{ km}^2$ 的小正方形网格, 格点数为 25×25 。

本文主要分析了1987年5月25日22:00—24:00一次较大范围暴雨、局地大暴雨或雷雨大风的天气过程, 同时计算了同年5月12日16:00—17:00、18:00—19:00的暴雨过程区域降水量。

三、校准技术

1. 平均校准技术

平均校准技术, 是在整个分析区域中, 只设一个订正因子:

$$\overline{G/I} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i/I_i \quad (1)$$

其中, N 为分析区域中雨量计的个数, G_i 、 I_i 分别为雨量计观测点上雨量计和雷达观测到的雨量值。用 $\overline{G/I}$ 与分析区域中各点的雷达观测值相乘, 得到区域降水量的分布。平均校准是一种最简单的校准技术, 要求的雨量计无需太多, 省时易推广, 但容易将降水中心平滑掉。

2. 变分校准技术

变分校准实质上是对订正因子求泛函极

值, 得到订正因子场, 再与雷达测得的雨量相加, 便可得到降水量的分布。分析框图见图2。

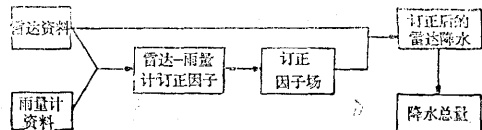


图2 分析框图

输入每一个图时的资料, 即雷达探测到的雨量 $PS_r(i, j)$ 和雨量计测量到的雨量 $PS_g(i, j)$, 在网格点 (i, j) 上, 雨量计-雷达订正因子为:

$$CR(i, j) = PS_g(i, j) - PS_r(i, j) \quad (2)$$

订正因子的实测值 $\tilde{CR}(i, j)$ 和分析值 $CR(i, j)$ 之差的平方和为:

$$f(x, y, CR) = \sum_{i,j} \alpha (CR - \tilde{CR})^2 \quad (3)$$

根据变分法原理, 要得到最佳的分析值, 必须使分析值与实测值之差从最小二乘意义上来说是最小的, 即其变分为0。为了抑制对分析不利的高频噪声, 在变分方程中加入了一个反映平滑约束的项, 则变分方程变为:

$$\delta_f = \delta \sum_{i,j} \left\{ \alpha (CR - \tilde{CR})^2 + \lambda \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} CR \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} CR \right)^2 \right] \right\} = 0 \quad (4)$$

数学上已经推导出^[5], 如果上述泛函有极值, 则满足欧拉方程, (4)式所对应的欧拉方程为:

$$\alpha (CR - \tilde{CR})^2 - \lambda \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} CR + \frac{\partial^2}{\partial y^2} CR \right) = 0 \quad (5)$$

在此, α 、 λ 分别称为观测权重和约束权重, 将它们合并成一个系数 $\mu^2 = \frac{\alpha}{\lambda} d^2$, d 为网格距, 本文取 $d = 4 \text{ km}$ 。通过对比试验, 发现当系数 $\mu^2 = 11$ 时, 使得订正后的雷达降

水量既不会出现畸变，又不至于漏掉降水强中心。

对于欧拉方程 (5) 的求解，采用超松弛迭代的数值解法，此法具有快速、省时、简便的特点，订正后的雷达降水量场：

$$PS(i,j)=PS_r(i,j)+CR(i,j) \tag{6}$$

四、个例分析

我们把1987年5月25日的降雨作为一个例子，从试验中发现，雨区的结构在22:00—23:00期间看得最清楚。按平均每10—20分钟的降水资料，做出雷达订正前后的降水序列图(图3、4)。由图可见，两图的雨区形状、移动方向相似，后者雨量为2.0的雨带范围扩大，降水中心强度增加，位置略偏后，同时其强度也与该地雨量计所测雨量近似相等。

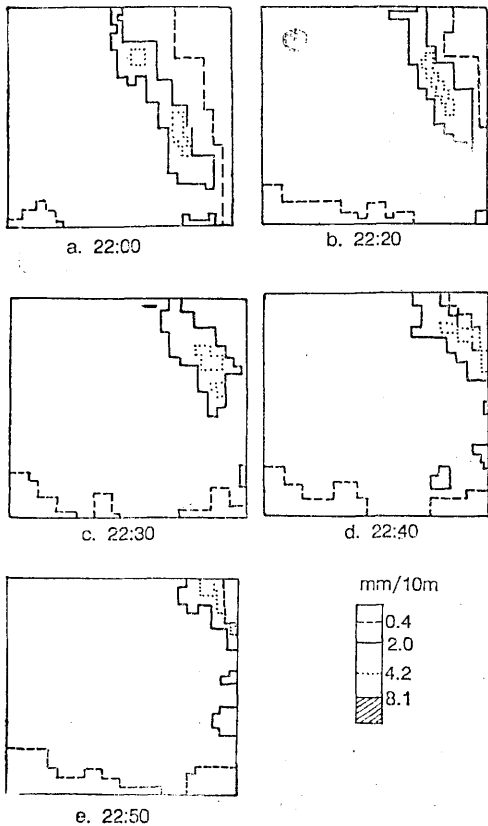


图3 雷达降水量分布序列图

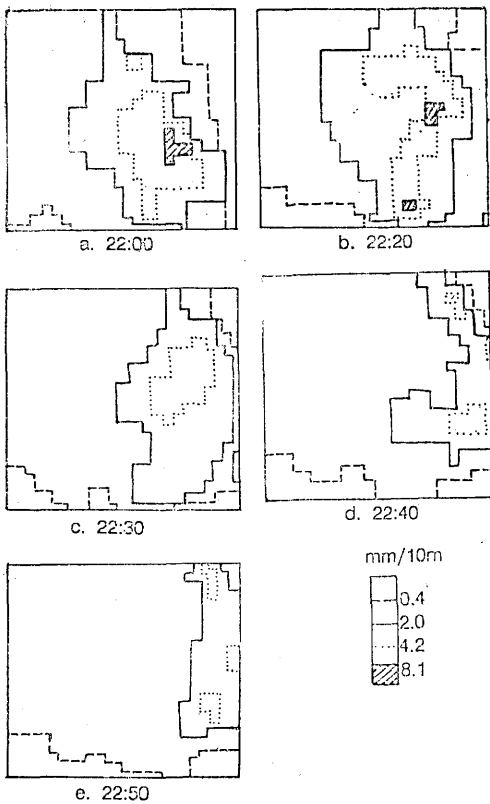


图4 变分法订正后降水量分布序列图

表1 1987年5月雷达、雨量计测得的区域降水量比较

时 间		12日t ₁	12日t ₂	25日t ₃	25日t ₄
雨量计网测量值(千吨)		99.77	36.42	111.41	150.60
校准前	雷 达 值(千吨)	17.69	11.49	34.14	49.62
	绝对误差(千吨)	82.08	23.92	77.27	100.97
	相对误差(%)	82.3	65.7	69.4	67.0
平法均订校正后	雷 达 值(千吨)	159.15	48.73	170.28	215.04
	绝对误差(千吨)	-59.39	-12.37	-58.86	-64.44
	相对误差(%)	-59.5	-34.0	-52.3	-42.3
变订分正法后	雷 达 值(千吨)	81.38	34.19	103.90	140.96
	绝对误差(千吨)	18.39	2.22	7.50	9.64
	相对误差(%)	18.4	6.1	6.7	6.4

* 密度为1个/625km²；t₁、t₂、t₃、t₄分别代表16:00—17:00、18:00—19:00、22:00—23:00、23:00—24:00的时段。

由此可知, 雷达能够准确地判断雨区的移动方向和移速, 探测范围大, 但在测量区域降水量时, 相对误差已达69.4%。经过平均校准后, 雷达测量误差减小, 但相对误差仍有52.8%。经过变分法校准后, 降水量的分布在形状上与雷达探测到的相似, 降水中心的位置, 前者比后者落后, 而强度与雨量计测量到的近似相等, 相对误差大大减小, 由原来的69.4%下降到6.7%。

为了进一步说明变分方法是有效的,我们观察了本分析区域中蒲圻、崇阳、通城三站22:00—23:00的降水量。把地面自记雨量计的雨量作为真值,用平均校准方法和变分方法校准后的降水量与之比较,计算各自的相对误差,列在表2中。从单站来看,平均校准法校准后的雷达降水量比自记雨量计测量到的均偏大,三站的平均相对误差达

表2 雷达降水量相对于地面自记雨量计降水的估算误差

站 名	蒲 折	崇 阳	通 城	平均相对误差 (%)
平均校准法订正后估算误差 (%)	-36.5	-49.4	-1.7	-29.2
变分法订正估算误差 (%)	-7.6	3.8	-5.0	-2.9

29.2%。

虽然对单站而言,二者是相当吻合的(相对误差仅1.7%),但就三站而言,不真实程度依然较高。变分法校准后的雷达降水量与地面自记雨量计的降水量相比较,有大有小,而且对于每个单站,相对误差的绝对值比前一种方法的都要小,使得三站的平均相对误差也小得多,只有2.9%。显然经过变分法校准后的降水量与实际的降水量比较吻合。

五、产生误差的几个原因

雷达测量区域降水量时,产生误差的原因很多〔6〕,本文仅根据具体情况,分析几种造成误差的可能因素。

1. $Z-I$ 关系变化误差

$Z-I$ 关系中的系数 A 和指数 b 是随地点、季节、降雨类型和降雨阶段而变的。当 Z 值按照固定的 $Z=200I^{1.6}$ 计算雨强 I 值时,有可能出现较大的误差。为了避免这种误差,应在本站找到不同雨型的 $Z-I$ 关系式。

2. 时空取样不一致造成的误差

雷达测量的是空间有效照射体积中的降水强度,雨量计总是安装在地面上测量该空间对应的地面上的降水强度。雷达即使在进行水平探测时,在100km以外,波束离地面也在1km以上,在这个高度范围内,由于雨滴在下落过程中,穿过低云层,特别是小雨穿过含水量较大的低云层后,凝聚和碰并作用,使雨滴直径增大,雨强增大,这样雷达探测到的降水量低于地面雨量计测量到的

降水量。

3. 空气水平运动的影响

分析成熟雷暴单体的水平和垂直风场结构,可以知道,下沉气流区一般在云体的后部。当雷暴刚进入成熟阶段,下沉气流区与地面降水是一致的。由于空气的水平运动,特别是伴随着大风时,云体向前移动迅速。当雨量计测量到云体降水时,该云体已向前移动了,此时雷达探测到的回波,实际上是雨量计前方有效照射体积内的云体的回波功率。所以雷达和雨量计所测降水中心位置不一致,后者的位置比前者略微偏后的现象就不难解释了。

4. 雨量计网本身的测量误差

测量区域降水量时,一般用高密度的雨量计网所测的区域降水量,近似作为真值,来估算雷达的测量误差,因此有必要研究雨量计网本身的测量误差。本文用密度约为1个/625km²的雨量计网测定各站的降水量,再按雷达探测到的降水量分布形式,分别对每个雨量计所代表的范围进行加权平均,计算出区域降水量,这样本身就会留下15%左右的误差。

六、结 论

本文分析比较了变分方法和平均校准方法校准雷达估算区域降水量的效果,分析了产生误差的可能原因,得到了比较有意义的结果。

1. 经过平均校准法订正后,雷达测量误差有所减小,但仍存在一定的误差。用变分方法校准后,不但使雷达观测到的结果与雨量计的测量结果在数量上相等,而且降水分布仍保留雷达探测到的情况,相对误差大大减小。

2. 用变分法校准后,所得到的降水量序列图能够清楚地揭示出雨区的特征。

3. 由于雷达定量测量降水时的大部分误差是随机的,可正可负,因此延长累加

时间, 正负随机误差可以抵消。缩短雷达探测时间间隔, 有可能提高测量精度。

4. 雨量计站网的合理分布, 对于比较准确地测量降水中心的位置和总降水量, 改善测量精度有较大的帮助。

致 谢

在完成本文的工作中, 得到了葛文忠副教授和武汉中心气象台同志的大力帮助, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- (1) Wilson, J.W., Radar Measurement of Rainfall Summary, Bull. Amer. meteor. Soc., Vol.60, No.9, 1048—1058, 1979.
- (2) Brandes, E.A., Optimizing Rainfall Estimates and the Aid of Radar, J. Appl. Meteor. Vol.14, No.9, 1339—1345, 1975.
- (3) Sasaki, Y., Some Basic Formalisms in Numerical Variational Analysis, Mon. Wea. Rev., 98, 875—883, 1970.
- (4) Ninomiya, K. and Akiyama, T., Objective Analysis of heavy Rainfalls Based on Radar and Gauge Measurements, J. Meteor. Soc. Japan, 50, 206—210.
- (5) 吉林大学数学系, 变分法, 《数学分析》, 387—402, 人民教育出版社, 1978.
- (6) Zawadzki, I., Factors Effecting the Precision of Radar Measurement of Rain, Conf. Radar meteor. 22nd, 251—256, 1984.

Adjustment technique and Error analysis of the regional precipitation detected quantitatively by weather radar

Wu Zhifang

(Xinjiang Institute of Meteorology)

Dai Tiepi Zhang Peichang

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

Two precipitation processes, occurred on 25 May and 12 May 1987 respectively in Wuhan area, were analysed quantitatively by means of variation and average adjustment technique using digital radar echo and rainfall data collected with auto-raingauges. The results have shown that the average adjustment technique would reduce errors of radar measurement, but the peak values of precipitation were smoothed out. The variation technique is used to fit the distribution measured by radar into that by auto-raingauges but keep the precipitation detected by radar in its original pattern. The relative error is less than 10%.