

变分法在校准天气雷达测定区域降水量中的应用

傅德胜 戴铁丕

(南京气象学院)

提 要

本文介绍了变分法校准天气雷达测定区域降水量的原理和实施技术,运用数字化雷达的彩色分层图象资料计算了5次暴雨过程的区域降水量,并对计算结果做了初步分析和讨论。

70年代初人们开始运用天气雷达测定区域降水量后发现,直接使用未校准回波资料测量精度很低,于是提出了各种订正办法。如通过相关统计得到不同降水类型的Z-I关系,克服以某一固定的Z-I关系测定不同降水所带来的误差^[1];在测量区域上设置N个雨量计,用校准因子 \bar{F} 乘各点雷达实测值,得到订正后的雷达降水分布^[2]等,但误差有时依然较大。Sasaki把变分法引入气象领域^[3],Ninomiya和Akiyama根据变分法原理对一次暴雨过程作了分析,结果较好^[4]。本文简要介绍变分法校准天气雷达测定区域降水量的原理和测量技术,实际计算5次降水过程的区域降水量并作初步讨论。

一、基本原理

某一时刻,在网格点(i, j)上,雨量计-雷达订正因子为

$$\tilde{C}R(i, j) = R_g(i, j) - R_r(i, j) \quad (1)$$

其中 $R_g(i, j)$ 、 $R_r(i, j)$ 分别为雨量计和雷达实际测得的降水。

每个格点上,订正因子的实测值 $\tilde{C}R(i, j)$ 和分析值 $CR(i, j)$ 不完全相等,在整个测量区域两者之差的平方和

$$f(x, y, \tilde{C}R) = \sum_i \sum_j \alpha (CR - \tilde{C}R)^2 \quad (2)$$

相应的变分方程是

$$\delta J = \delta \sum_i \sum_j \left\{ \alpha (CR - \tilde{C}R)^2 + \lambda \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} CR \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} CR \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

α 、 λ 分别为观测权重和约束权重。解(3)式得

$$u_{i,j}^{v+1} = u_{i,j}^v + \frac{1+\beta}{4+\tilde{u}^2} \left\{ u_{i+1,j}^v + u_{i-1,j}^{v+1} + u_{i,j}^v + u_{i,j-1}^{v+1} - (4+\tilde{u}^2) u_{i,j}^v - F \right\} \quad (4)$$

式内 $u = CR(i, j)$, $u_{i,j}^v$ 为 u 的 v 次近似, β 是超松弛系数, $\tilde{u}^2 = \alpha d^2 / \lambda$, d 是网格距, $F = -\tilde{u}^2 \tilde{C}R$. 当 $v = 0$ 时, 根据经验或一些近似公式, 得到

$$u_{i,j}^0 = \frac{1}{8-\tilde{u}^2} \left[\left(\tilde{u} - \frac{4}{\tilde{u}^2} \right) F_{i,j} + (F_{i-1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}) + \frac{2}{\tilde{u}} (F_{i+1,j-1} + F_{i+1,j+1} + F_{i-1,j-1} + F_{i-1,j+1}) \right] \quad (5)$$

给定 λ 、 α 、 β 的值, 解(4)、(5)式, 即得到如下订正因子场

$$CR'(i, j) = \begin{cases} CR'(1,1), CR'(1,2), \dots, CR'(1,n) \\ CR'(2,1), CR'(2,2), \dots, CR'(2,n) \\ \dots\dots\dots \\ CR'(m,1), CR'(m,2), \dots, CR'(m,n) \end{cases}$$

$m \times n$ 为分析区域尺度。变分法校准后, 网格点 (i, j) 上雷达测量的降水量为

$$R'_r(i, j) = R_r(i, j) + CR'(i, j) \quad (6)$$

二、测量技术

变分法校准天气雷达测定区域降水量的基本思想是, 先求一个由雷达、雨量计资料决定的订正因子的泛函极值, 得到订正因子场, 然后用全场各点雷达测量的降水分别与订正因子场中各相应格点的订正值相加, 得到订正后的雷达降水分布, 再经时空累加, 即求出区域降水量。

具体步骤: 1. 输入数字化回波强度等级资料及相应的雨量计资料 本文回波资料系由武汉中心气象台提供的 WSR-81S 型数字化雷达的 ZPPI 彩色分层图象资料。回波强度分为 7 个等级, 每个等级对应一定的雨强范围(表 1), 分析时本文取中间值。雨量计

表 1 武汉 WSR-81S 雷达彩色分层等级及其对应的雨强范围

回波分层等级	1	2	3	4	5	6	7
衰减等级(dBz)	20.50	29.38	34.19	40.56	45.38	50.19	57.00
对应的雨强(mm/h)	0.7~2.54	2.54~4.8	4.8~12.3	12.3~23.6	23.6~48.3	48.6~123.9	>123.9

资料来自测量区域内 16 个校准雨量计(图 1)。2. 资料预处理 主要包括: 将回波强度等级转换为相应的雨强值; 求取雨量计-雷达订正因子。3. 解(4)、(5)式, 得到

订正因子场。 4. 校准雷达测得的降水。 5. 求取区域降水量。

在此基础上进行精度等分析。讨论误差时, 我们把雨量计网测得的雨量作为“真值”, 来检验校准前后雷达测量情况, 这就涉及到如何根据单点雨量计值来计算雨量计区域降水总量的问题。我们的做法是, 按照雷达探测的降水分布, 将单点雨量计值内插到全场格点上, 然后作时空累加。内插遵循以下原则

$$R'_g(i, j) = \frac{\sum_{l=1}^Q W_l R_g(i_l, j_l)}{\sum_{l=1}^Q W_l} \quad (7)$$

$$W_l = \exp[-r_l^2/4C] \quad (8)$$

式中, $R'_g(i, j)$ 为格点 (i, j) 上的内插值, $R_g(i_l, j_l)$ 为某个雨量计的实测值, W_l 是内插权重系数, Q 等于以 (i, j) 为中心、 R_g 为半径的扫描范围内所选到的雨量计的个数 (本文 $Q = 3$), r_l 定义为雨量计到格点 (i, j) 的距离, 常数 C 根据系统的空间分辨率确定^[5]。

三、个例分析

运用变分法原理, 对1987年5月12日、25日、7月22日、8月28日及1988年5月7日5次降水过程的雷达回波资料进行了校准, 求取区域降水量。

测量“窗口”位于测站南面60~180km、方位178~240°的范围内, 测量面积120×120km² (图1)。

表2给出了计算结果。其中 PR_g 为雨量计测得的区域降水量, 它是将相应时刻测量区域内16个校准雨量计站资料按(7)、(8)式内插后再时空累加获得的。 PR_{ro} 、 PR_{ra} 、 PR_m 分别是未校准、平均校准法校准及变分法校准后雷达测得的区域降水量。 ΔPR 等于绝对误差, 由雷达测值减去雨量计测值。相对误差 $f_o(f_a, f_m) = |\Delta PR / PR_g| \times 100$ 。

由表2可见: 1. 未校准前, 雷达与雨量计测量差异较大, 所述例中, 除5月7日过程外, 雷达估算的值 \geq 雨量计测量值的1.5倍, 特别是8月28日降水, 达到2.7倍。2. 变分法校准后, 5次降水过程的区域降水量相对误差下降幅度为23~141%。3. 平均校准法^[2]的相对误差总是高于变分法的。实际上, 降水是随机变化的、非均匀的, 校准量应是时空的函数。变分法校准充分考虑了降水的这种特点, 利用各雨量计与雷达测量值之差的方差, 在最小二乘意义上求出测量区域上各点的订正量, 比较符合客观。

下面以7月22日降水为例, 讨论变分法校准前后降水的分布情况。

图2a、2b、2c分别为雨量计测量和未校准及变分法校准时雷达测量降水量分布图, 不难看到:

1. 在图2b中, 有两条宽约35km的主降水带, 其内降水很不均匀, 有多个 ≥ 30 mm

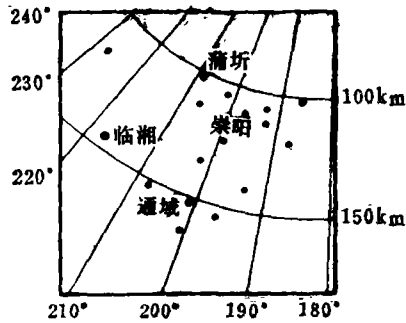


图1 分析区域及雨量站分布

表2 区域降水量比较

降水日期	1987.5.12	1987.5.25	1987.7.22	1987.8.28	1988.5.7	平均 相对误差
	16:00—19:30	18:00—23:50	5:00—7:10	20:30—24:00	00:00—01:00	
$PR_g (10^8 m^3)$	3.440	10.231	2.902	6.952	2.161	
未校准						
$PR_{ro} (10^8 m^3)$	5.292	15.221	4.781	18.429	1.376	
$\Delta PR (10^8 m^3)$	1.852	5.090	1.879	11.477	-0.775	73%
$f_o (%)$	53	50	69	165	33	
平均校准法校准						
$PR_{\Delta} (10^8 m^3)$	5.173	11.111	4.011	4.821	1.451	
$\Delta PR (10^8 m^3)$	1.733	4.880	1.049	-2.631	-0.710	41%
$f_{\Delta} (%)$	50	39	35	38	33	
变分法校准						
$PR_{rm} (10^8 m^3)$	4.401	12.072	3.581	5.353	1.880	
$\Delta PR (10^8 m^3)$	1.061	1.841	0.622	-1.599	-0.287	21%
$f_m (%)$	24	13	21	23	13	

的强降水中心, 而图2a中只有210°附近的一条降水带比较明显。同时, 测站正南面100~160km及测站西南170km处看不到图2b内所呈现的“雨团”结构。造成此现象的基本原因, 一是本次降水过程系锋面引起的对流性天气, 降水起伏较大; 二是测量区域边缘未设置雨量计(对照图1), 图2b中上述区域的降水系内插所得。因此, 雷达、雨量计测量降水各有千秋: 前者时空连续性好, 能探测到小尺度的降水分布, 但未校准时作定量测量降水误差大; 后者局地测量准确, 然而在站点密度限制和降水非均匀性的影响下, 某些降水中心往往被“漏测”。

2. 比较图2b和图2c, 两者的降水分布形势大体相似, 降水中心基本吻合。此外, 图2c中的降水中心强度与图2a很接近。这表明变分法校准时不但把雷达探测的结果造型成了雨量计测量的结果, 而且保留了雨量计之间雷达探测到的降水变化, 从而弥补了平均校准法校准时一些降水中心被平滑之缺憾(降水分布图略)。

为了进一步说明变分法方案的有效性, 我们还考察了1987年5月25日22时—23时降水随时间的演变(图3)及蒲圻、通城、崇阳3个雨量站的降水量(表3)。

图3a反映了校准前雷达所测降水的情况。图中一条 ≥ 2 mm/h的雨带从东南向西北方向伸展。22时前后, 出现了两个4mm/h的强降水区。尔后, 雨区逐渐向东北方向移动。23时左右, 该雨区移出测量区域。

图3b描述了变分法校准时雷达所测降水的演变过程。其雨区形状、降水结构、移动方向与图3a基本吻合。这从另一个侧面证明, 变分法校准能较好地体现雷达自身的探测特点。

由表3可见, 平均校准法校准时, 虽然对某个站而言, 雨量计、雷达两者的测量结果相当吻合(相对误差等于19.4%), 但平均相对误差却达到41%, 不准确程度依然较高。变分法校准后, 3个站中有两个站的相对误差低于平均校准法25%以上, 平均相对

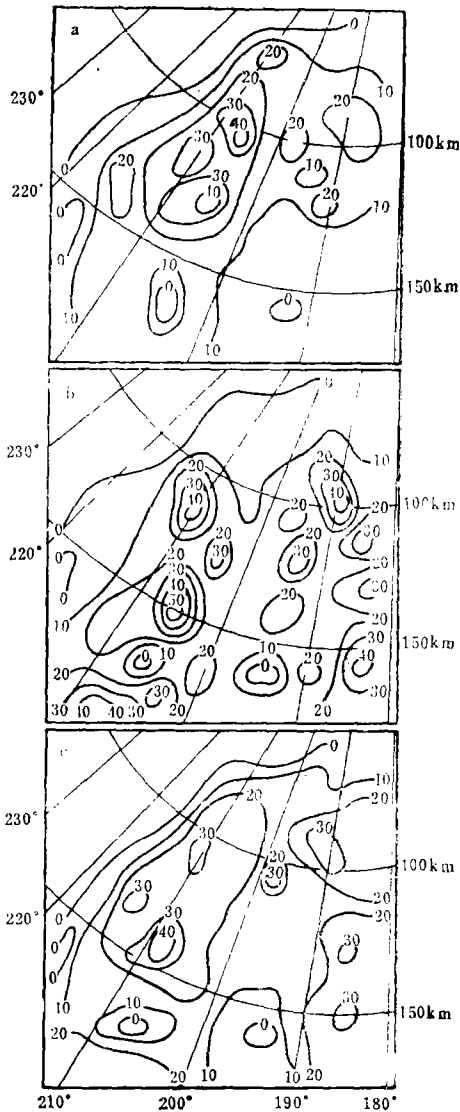


图2 1987年7月22日5时—7时10分降水量分布(图中距离同图1)

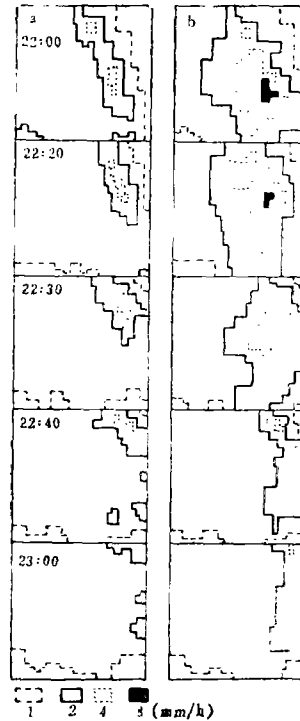


图3 1987年5月23日22—23时降水随时间的演变

表3 雷达测量单站降水量相对地面雨量计测量的相对误差(%)

自记雨量站	蒲圻	崇阳	通城	平均相对误差
平均校准法校准	49.2	54.3	19.4	41.0
变分法校准	24.1	21.2*	25.7	23.7

* ΔPR < 0, 即雷达测量值 < 雨量计测量值

误差仅为23.7%。

综上所述, 变分法校准效果良好。

四、小 结

1. 变分法校准考虑了降水的时空变化, 从极值的观点使实际订正量与理论订正量更接近一致。

2. 在本文例中, 经变分法校准后, 雷达所测区域降水量与雨量计所测区域降水量相比较, 测量精度远高于平均校准法。同时, 其保留了雨量计之间雷达测得的降水的小尺

度特征。

3. 变分法校准使用常规数字化雷达现有的分层图象产品, 而校准效果较优, 是目前提高雷达定量测量区域降水量精度的一种较理想的方案。

4. 在实际应用中, 变分法校准要求测量区域内必须配备供校准用的自记雨量计网, 雨量计资料要及时地(最好与雷达回波资料同步)传送到处理中心。这样, 方可迅速获得区域降水总量及降水量分布等信息。

承蒙南京大学葛文忠副教授、武汉中心气象台金鸿祥高级工程师及项经魁、万玉发等同志的大力支持与帮助, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Joss, J.K. et al., J. Appl. Meteor., Vol. 17, 1054—1061, 1978.
- [2] 张培昌等, 雷达气象学, 159, 气象出版社, 1988.
- [3] Sasaki, Y., J. Meteor. Soc. Japan, 36, 77—88, 1958.
- [4] Ninomiya, K. and Akiyama, T., J. Meteor. Soc. Japan, 50, 206—210, 1972.
- [5] 伍志芳等, 用变分法校准天气雷达测定区域降水量的数值计算和精度分析, 气象科学, 9(3), 1989.

APPLICATION OF THE VARIATIONAL METHOD IN THE CALIBRATION OF REGIONAL RAINFALL MEASUREMENT BY WEATHER RADAR

Fu Desheng Dai Tiepi

ABSTRACT

The basic principle and realization technique of the variational method used in calibrating weather radar regional rainfall measurements are introduced. Based on the layered color image data obtained by the digitized weather radar at Wuhan, the regional rainfall occurring in 5 rainstorms in 1987 and 1988 are calculated with this method. Thereafter, preliminary analysis and discussion are made of the calculation results.