

闽中北前汛期多普勒雷达定量估测降水分析

陈秋萍¹ 余建华¹ 杨林增¹ 李建通² 林文卿³ 赖荣钦¹ 祖基煊¹

(1. 福建省建阳气象雷达站, 354200; 2. 福建省厦门市气象局; 3. 福建省南平市气象局)

提 要: 使用2002、2003年福建中北部27个气象站5—6月自记雨量资料及相应的雷达体扫资料, 通过用最优化法统计得出不同区域的Z-I关系, 并将统计结果用于2005年5—6月的降水估测。同时利用实时雨量资料采用卡尔曼最优(卡尔曼滤波+最优插值)、变分等估测方法对2005年几次混合型降水过程进行实时雨量校正, 用福建北部武夷山九曲溪流域雨量计检验校正后的雨量值, 并对上述几种方法的测量精度进行比较、分析。结果表明: 卡尔曼最优、变分法及100km距离范围内的最优化法的过程平均相对误差小于25%, 100km距离范围以外最优化法的过程平均相对误差明显增大, $Z=300I^{1.4}$ 估测的误差最大。

关键词: 多普勒雷达 定量估测 降水

Analysis of Quantitative Precipitation Estimation Based on Doppler Radar Data in Pre-rainy Season in Northern and Central Fujian

Chen Qiuping¹ Yu Jianhua¹ Yang Linzeng¹ Li Jiantong²

Lin Wenqing³ Lai Rongqin¹ Zu Jixuan¹

(1. Jianyang Meteorological Radar Station, Fujian Province, 354200;

2. Xiamen Meteorological Office; 3. Nanping Meteorological Office)

Abstract: Based on the Doppler radar data and the data from twenty-seven automatic weather stations from May to June in 2002 and 2003 in the northern and central Fujian, the statistical analysis of optimization is made to obtain the Z-I relation of different regions. The rainfall amounts in precipitation processes in 2005 are estimated. Using variational method and

optimum Kalman filter method (combine Kalman Filter with optimum interpolation), radar estimations are tested with rainfall data of Wuyishan Jiuquxi Valley in the northern Fujian. The accuracies for the methods are compared and analyzed. The results show that mean relative errors are less than 25% with variational method and optimum Kalman Filter method, it is also less than 25% from 0 to 100km with optimization method, however, it increase remarkably from 100 to 200km. Mean relative error is the greatest with the relation of $Z=300I^{1.4}$.

Key Words: Doppler radar quantitative estimation precipitation

引言

1990年代至今国内在利用常规天气雷达资料进行定量降水估测方面已做了大量工作,方法有很多,一种是 $Z-I$ 关系法^[1],另一种是基于雷达—雨量计联合探测的变分法^[2]、最优插值法^[3]、卡尔曼滤波^[4]等。目前CINRAD雷达估测降水统一使用 $Z=300I^{1.4}$,但由于降水与季节、地域、降水性质等关系很大,致使估测结果与实际雨量有较大的偏差,因而本文采用最优化法统计得出不同探测区域混合型降水的 $Z-I$ 关系,并将结果用于2005年5—6月几次混合型降水过程的降水估测。此外,利用实时雨量资料采用卡尔曼最优(卡尔曼滤波+最优插值,下同)、变分法等估测方法对上述几次混合型降水过程进行实时雨量校正,同时用福建北部武夷山九曲溪流域雨量计检验校正后的雨量值,并对上述几种方法的测量精度进行比较、分析。

1 资料

1.1 雨量站点分布

用于统计 $Z-I$ 关系的雨量站有27个,其位置如图1中“+”所示位置,由图1可见这些站点分布在雷达四周及其南侧的福建省境内。2005年用于实时校正雷达估测降水的自动雨量站也是这些站点,图中黑线为省界线,黑色曲线所围闭合线内为福建北部

武夷山九曲溪流域,面积约580km²,其中有9个自动雨量站(黑色“·”所示),不参加校正,作为检验雨量站,这些检验站位于雷达西北侧30~65km范围内,与校正站距离较远。

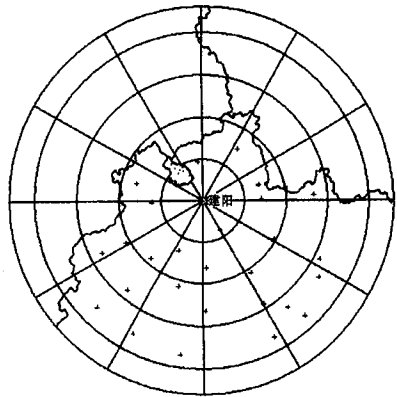


图1 雨量站点分布(探测半径230 km)

1.2 资料说明

统计 $Z-I$ 关系利用2002年、2003年福建中北部27个气象站5—6月自记雨量资料及建阳新一代天气雷达相应的6分钟1次的雷达体扫资料。2005年5—6月对3个暴雨过程用自动雨量站资料进行实时校正:5月26日16时—27日9时、6月18日20时—19日20时及6月20日20时—21日20时。5月26日为切变线南移经过时产生的降水,强降水区位于雷达站南侧50~150km区域,局部达大暴雨。后两个过程为静止锋切变线维持在福建中北部产生的大范围暴雨、局部

大暴雨过程。

2 最优化法与 $Z=300I^{1.4}$ 估测降水

将雷达探测区分为两个区域, I 区: 10~100km, II 区: 100~200km, 根据雨量点相对雷达站的距离分别读取不同仰角的 Z 值, 10~50km 读取 2.4° 仰角的 Z 值, 50~100km 读取 1.5° 仰角的 Z 值, 100~230km 读取 0.5° 与 1.5° 双仰角中大 Z 值 (基本上读取 1.5° 仰角), 使这些 Z 值大约在 2km 高度附近, 以此减小与地面降水的空间不一致性, 采用 9 点平均法读取 Z 值, 同时对其进行一些质量控制:

① 有雨量, 但无回波或有回波, 但无雨量数据弃用;

② 对较小降雨量数据弃用, 本文取阈值为 $0.8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$;

③ 设定强度上限为 60dBz, 强度 $> 60\text{dBz}$, 则以 60dBz 代替。

采用最佳判别函数^[5]

$$CTF = \min \left\{ \sum_i (R_i - G_i)^2 + (R_i - G_i) \right\} \quad (1)$$

G_i 为每小时实测雨量, R_i 为每小时雷达估测雨量。I 区、II 区分别用 176、86 组 (小时) 雷达、雨量计数据统计得出 5—6 月混合型降水的 Z - I 关系为 I 区: $Z = 112I^{1.55}$, II 区: $Z = 132I^{1.41}$ 。此处 I 的单位为 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, Z 的单位为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$, 计算雷达估测雨量时代入 $Z = AI^b$ 进行计算。

图 2 (见彩页) 是 6 月 18 日 20 时—19 日 20 时过程雨量及采用最优化 (I 区: $Z = 112I^{1.55}$, II 区: $Z = 132I^{1.41}$) 和 $Z = 300I^{1.4}$ 所得雷达估测过程累积雨量图 (东南偏东、西南、西北象限部分空区为地物遮挡造成, 而非无或弱回波区)。从图 2b、c 看出, $Z = 300I^{1.4}$ 估测的降水量偏小较多, 最优化更接近实况。开发的雷达估测降水系统由于考虑了测站周围的挡角因素, 1~50km 读取 2.4° 仰角的 Z 值, 50~230km 读取

1.5° 仰角的 Z 值, 采用 9 点平均法读取 Z 值进行降水估测 (图 2b、c), 而使 CINRAD 输出的降水产品图 (略) 上 50 km 外失真的无降水区或降水偏弱的状况得到极大改善。

表 1 为福建北部九曲河流域 2005 年 3 次混合型降水过程不同 Z - I 关系下所得面平均降雨量及相对误差, 表中 G_1 、 W_1 为采用算术平均法所得实测流域过程面平均雨量及相对误差, G_2 、 W_2 为采用泰森多边形法^[6] 所得实测流域过程面平均雨量及相对误差, G_{\max} 为站点过程雨量最大值, R 为雷达估测流域过程面平均雨量。从表 1 可看出算术平均法与泰森多边形法所得的面平均降雨量及相对误差相差不多。 $Z = 300I^{1.4}$ 所得面平均降雨量明显低估, 相对误差达 $-51.7\% \sim -61.7\%$; 用最优化法则更接近实测值, 相对误差在 $-18.0\% \sim -33.3\%$ 之间, 3 次过程均为低估, 低估的原因可能是由于该流域部分区域处于雷达站西北侧的地物遮挡区内 (见图 1、图 2) 使强度值偏低所致, 可以考虑对这些区域读取更高仰角的 Z 值进行区域雨量估测。

3 几种方法雷达估测降水结果分析

使用黄淮项目开发的部分雷达估测降水算法软件: 卡尔曼最优、变分法等对 3 次混合型降水过程进行实时雨量校正。用九曲河流域雨量计作为检验站检验校正后的雨量值, 并对上述几种方法的测量精度进行比较、分析。文中用于进行实时雨量校正的卡尔曼最优法, 是将卡尔曼滤波与最优插值法相结合的方法。卡尔曼滤波实际上是一个平均校准因子, 但是考虑了时间连续性, 进行了时间空间滤波。最优插值法兼具雨量计在点上测量的高精度和雷达测量对降水场结构的客观描述的优势。因此卡尔曼滤波以后再进行一次空间的滤波 (插值), 这样可以弥补空间的不足。

为了评估雷达-雨量计估测降雨精度,

表1 九曲河流域面平均雨量估测误差

流域面积 580km ²	Z=300I ^{1.4}						最优化		
	G _{max} /mm	G ₁ /mm	G ₂ /mm	R/mm	W ₁ /%	W ₂ /%	R/mm	W ₁ /%	W ₂ /%
5月26日14时—27日8时	19.0	17.8	18.0	6.9	-61.2	-61.7	12.6	-29.2	-30.0
6月18日20时—19日20时	178.0	122.7	124.8	53.1	-56.7	-57.5	83.2	-32.2	-33.3
6月20日20时—21日20时	33.0	26.7	27.5	12.9	-51.7	-53.1	21.9	-18.0	-20.4

定义雷达-雨量计差统计量如下：

过程平均相对误差（绝对值）

$$W_{abs} = \frac{1}{n} \sum_i |R_i - G_i| / \bar{G} \quad (2)$$

过程平均偏差

$$B = \sum_i G_i / \sum_i R_i \quad (3)$$

过程平均相对均方根差

$$RMS = \left(\frac{1}{n} \sum_i (R_i - G_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} / \bar{G} \quad (4)$$

$$Y = \frac{\frac{1}{d} \sum_i G_i R_i - \frac{1}{d} \sum_i G_i \frac{1}{d} \sum_i R_i}{\left[\left[\frac{1}{d} \sum_i G_i^2 - \left(\frac{1}{d} \sum_i G_i \right)^2 \right] \left[\frac{1}{d} \sum_i R_i^2 - \left(\frac{1}{d} \sum_i R_i \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

G_i、R_i及 \bar{G} 分别为实测、雷达估测过程雨量及实测过程平均雨量，n为区域内雨量站数。

对于1小时平均相对误差及平均相对均方根差，也用上面公式，只是将式中(R_i-G_i)项过程差值改为1小时差值对所有小时数进行积分求均值， \bar{G} 则改为实测1小时平均雨量，这里n为区域内所有小时数。

定义1小时相关系数

其中d表示小时，i表示雷达-雨量计的序数。

根据上述公式计算了2005年5月26日16时—27日9时、6月18日20时—19日20时、6月20日20时—21日20时3个混合型降水过程校正站及检验站的1小时及过程站点平均相对误差（绝对值）、平均相对均方根差等统计量，结果见表2、表3，表中KOP、VAR及CINRAD分别代表卡尔曼最优、变分法及CINRAD雷达采用的Z=300I^{1.4}关系。

从表2、表3中可以看到，校正站不同分区1小时相对误差卡尔曼最优与变分法结果相差不大。而过程相对误差则基本上是I区略小于II区，两个分区过程平均相对误差均比1小时平均相对误差减小约7%~16%，过程相对均方根差也明显减小，过程平均偏差为0.85~1.22；最优化法（I区）过程相对误差较小，与前两种方法相近；Z=300I^{1.4}过程相对误差最大，雷达估值严重

低估，这是由于降水与季节、地域、雨型有很大关系，统一使用一种Z-I关系，会造成较大误差。

校正站最优化及Z=300I^{1.4}关系的过程相对误差，前者的误差小于后者，尤其是I区的特别明显，误差约小15%~30%，而II区也小6%~16%。从表2、3可看出，不论1小时还是过程，两种估测方法I区的误差均明显小于II区，实测雨量与估测雨量间的相关性也高很多。这是由于雷达与地面实际测量的空间不一致造成，随着探测距离增大，雷达波束抬高，雷达有效照射体积的位置随着升高，使反射率因子Z值与降水强度G之间的相关性降低所致。

检验站1小时相对误差以变分法最小，卡尔曼最优与最优化法次之，Z=300I^{1.4}最大，1小时相关系数在0.75以上。过程相对误差卡尔曼最优、变分法、最优化法相差不大，误差值在10.2%~22.6%，过程偏差为0.86~1.13，过程相对误差比1小时

表 2 几种方法 1 小时估测结果比较

		校正站											
		$W_{abs}/\%$				Y				RMS/ $\%$			
		KOP	VAR	最优化	CINRAD	KOP	VAR	最优化	CINRAD	KOP	VAR	最优化	CINRAD
5.26	1 区	26.5	33.4	29.4	40.5	0.94	0.94	0.94	0.94	47	60	43	67
	2 区	26.1	29.4	63.8	64.8	0.81	0.79	0.39	0.39	58	61	97	104
6.19	1 区	24.0	23.9	34.2	35.4	0.91	0.96	0.94	0.94	70	46	54	75
	2 区	22.6	31.0	58.4	61.3	0.97	0.93	0.72	0.72	43	60	110	130
6.21	1 区	20.7	22.2	35.9	42.4	0.95	0.95	0.88	0.88	34	35	53	70
	2 区	23.4	28.2	65.5	70.2	0.97	0.95	0.60	0.60	38	49	116	134
		检验站											
		$W_{abs}/\%$				Y				RMS/ $\%$			
		KOP	VAR	最优化	CINRAD	KOP	VAR	最优化	CINRAD	KOP	VAR	最优化	CINRAD
5.26		36.3	32.4	37.8	47.7	0.75	0.79	0.80	0.81	54	45	47	61
6.19		28.8	22.7	29.4	38.0	0.89	0.94	0.92	0.92	60	43	51	73
6.21		35.0	28.1	33.3	39.4	0.76	0.81	0.81	0.82	52	41	44	53

表 3 几种方法过程估测结果比较

		校正站											
		$W_{abs}/\%$				B				RMS/ $\%$			
		KOP	VAR	最优化	CINRAD	KOP	VAR	最优化	CINRAD	KOP	VAR	最优化	CINRAD
5.26	1 区	16.4	21.0	7.8	37.5	0.94	0.85	0.95	1.60	26	45	9	50
	2 区	18.0	18.0	41.1	57.5	1.22	1.22	1.33	2.35	34	36	64	75
6.19	1 区	14.2	7.0	13.2	28.4	0.99	0.94	0.89	1.40	22	10	16	32
	2 区	14.8	16.9	44.8	51.6	1.06	1.02	1.31	1.99	22	27	65	81
6.21	1 区	11.8	6.6	14.2	37.5	1.02	1.02	0.99	1.60	17	11	18	50
	2 区	16.6	19.2	55.2	65.3	1.05	1.06	1.56	2.78	26	30	91	114
		检验站											
		$W_{abs}/\%$				B				RMS/ $\%$			
		KOP	VAR	最优化	CINRAD	KOP	VAR	最优化	CINRAD	KOP	VAR	最优化	CINRAD
5.26		16.9	13.5	10.2	46.8	1.13	1.12	1.05	1.88	25	18	13	49
6.19		18.7	13.6	16.1	36.9	1.10	1.05	1.05	1.58	26	18	20	43
6.21		22.6	14.1	15.8	36.6	0.86	1.01	0.92	1.58	27	16	19	39

相对误差约减小 9%~20%，RMS 也明显减小； $Z=300I^{1.4}$ 误差最大。

检验站与校正站（I 区）1 小时及过程相对误差比较，除少数减小外，多数增大，特别是过程较明显，且相关系数降低，表明校正站的数据平均质量比检验站好。

为了了解较短时段的雷达估测误差，本文对九曲流域内 9 个检验站 6 月 18 日 20 时—19 日 20 时、6 月 20 日 20 时—21 日 20 时分别计算 3 小时站点平均偏差、平均相对误差及估测 3 小时平均雨量，结果见图 3

(a~f)。由图 3 可见，3 小时平均相对误差两个过程均以变分法为最小，平均相对误差最大分别为 29.8%、38.5%，平均值分别为 20.2%、26.8%； $Z=300I^{1.4}$ 所得的相对误差最大，平均相对误差最大分别为 65.6%、67.7%，平均值分别达 35.6%、40.5%；卡尔曼最优误差稍小于最优化法。平均偏差（图 3c、d）上，两次过程卡尔曼最优、变分法、最优化法的偏差在 1 附近波动；而 $Z=300I^{1.4}$ 偏离 1 较多，偏差最高达 3.10。3 小时平均雨量（图 3e、f）前三种

估测方法与实况吻合较好，尤以变分法与实况吻合最好，而 $Z=300I^{1.4}$ 偏离实况较多，

且均为低估，从图 3 还可发现大的估测误差出现在平均雨量较小时。

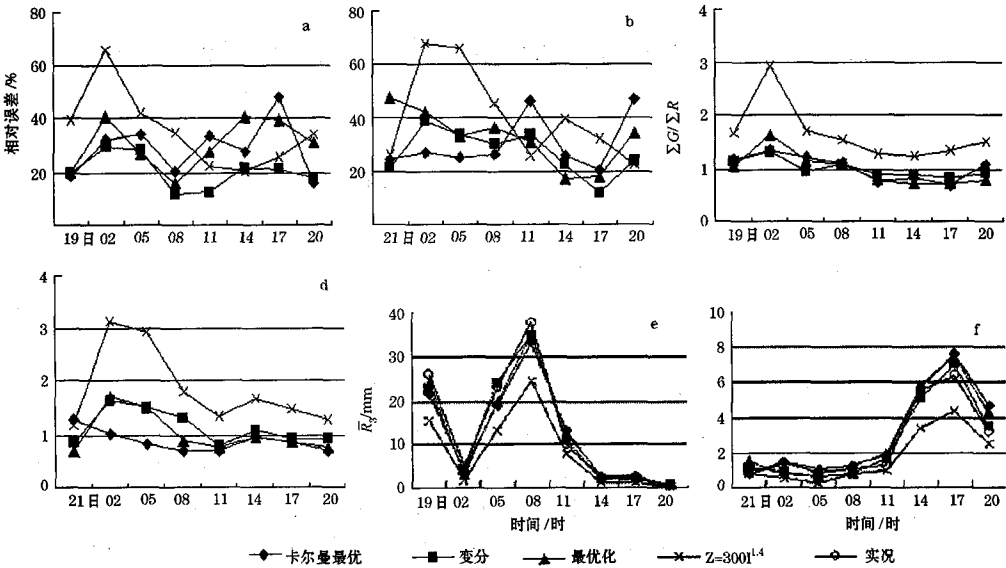


图 3 6 月 19 日、21 日九曲河流域 3 小时估测结果比较

4 结 语

(1) 校正站不同分区卡尔曼最优与变分法 1 小时相对误差较小，最优化法次之， $Z=300I^{1.4}$ 关系误差最大。卡尔曼最优、变分法与最优化法 (I 区) 过程相对误差较小，小于 25%； $Z=300I^{1.4}$ 关系相对误差最大。

(2) 校正站 I 区最优化法过程相对误差比 $Z=300I^{1.4}$ 关系约小 15%~30%，而 II 区也小 6%~16%。不论 1 小时还是过程，I 区的误差均大大低于 II 区，因此在未进行垂直廓线订正情况下，这两种方法只能对 I 区 (100km 范围内) 才能有较高的估测精度。

(3) 检验站过程相对误差变分法、卡尔曼最优与最优化法相差不大， $Z=300I^{1.4}$ 最大。前三种估测方法过程相对误差与 1 小时相对误差比较，约减小 9%~20%。

(4) 检验站与校正站 (I 区) 1 小时及

过程相对误差比较，除少数减小外，多数增大，特别是过程较明显，且相关系数降低，表明校正站的数据平均质量比检验站好。

参考文献

- 刘娟, 宋子忠, 刘东风等. 分级 Z-I 关系及其在淮河流域雷达测雨中应用. 气象科学, 1999, (2): 213~220.
- 伍志方, 戴铁丕, 张培昌. 天气雷达定量测量区域降水量的校准技术及误差分析. 气象, 1991, 17 (10): 9~14.
- 李建通, 张培昌. 最优插值法用于天气雷达测定区域降水量. 台湾海峡, 1996, (3): 255~259.
- 尹忠海, 张沛源. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量. 应用气象学报, 2005, 16 (2): 213~219.
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001: 181~184.
- 方慈安, 潘志祥, 叶成志等. 几种流域面雨量计算方法的比较. 气象, 2003, 29 (7): 23~26.
- 郑媛媛, 谢亦峰, 吴林林等. 多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验. 热带气象学报, 2004, 20 (2): 81~86.