

卡尔曼滤波法在西峰雷达估测降水中的应用

徐 燕

(甘肃省庆阳市气象局, 甘肃 庆阳 745000)

摘 要:应用卡尔曼滤波校准法,利用地面自动雨量计的降水量值,对庆阳市 2007 年 7 月和 9 月 2 次降水过程中的 2 个雨量较明显时段的雷达估测值进行了校准分析,并与雨量计测量的雨量值进行了误差比较分析。结果显示:混合降水过程的校准效果要优于均匀降水过程。校准后,混合降水过程的相对误差从 166.4% 下降到了 7.6%,均匀降水过程的相对误差从 284.3% 下降到了 56.9%。由此可以看出卡尔曼滤波校准法能有效消除雷达估测降水过程中的各种随机噪声,并能提高雷达定量估算区域降水量的精度,同时还较好地保留了雷达探测降水的精细结构。

关键词:卡尔曼滤波;雷达;估测降水

中图分类号: P457.6

文献标识码: A

引 言

庆阳市位于甘肃省的东部,地处陕甘宁 3 省的交汇处。境内在镇原和西峰交界处的巴家咀水库属全国 12 座重点拦泥水库之一,被誉为黄土高原第一坝,它是黄土高原上集防洪、蓄水、发电、灌溉、供水、旅游等为一体的大型综合型水利工程。降水是水库蓄水的重要来源,对于 1 次降雨过程,降雨的时空分布特征是我们了解水库的水情、蓄位、洪水预报以及对工农业生产影响都具有重要的参考价值^[1]。但是仅靠分布在广阔地域上稀疏的气象站的雨量计资料是远远不够的。近年来,有许多学者利用较先进的多普勒雷达资料对雷达在定量估测降水中的应用做了大量的研究工作^[2-11],为降水预报提供了新的思路。本文将雨量计资料和雷达资料相结合,用雨量计的准确测值通过卡尔曼滤波法来实时校准雷达的测量结果,从而发挥雷达和雨量计各自的优势,为更准确的预报预测整个巴家咀水库流域的降水量提供更为精确的依据。

1 雨量计和雷达测量降水的优缺点比较^[12]

1.1 雨量计

它的优点首先是在有雨量计的地区,样本在时间上是连续的,其次它测量的是降到地面的降水,是

比较精确的。缺点是一个点上的雨量有很大的局地性,容易在空间上漏掉重要降水如强降水和暴雨中心。

1.2 雷达

雷达能估计扫描范围内各点的雨强和一定区域内的雨量分布和总雨量,且可以及时取得大范围定量的降水资料。一般认为雨量计的测值代表了地面降雨的真实情况,而雷达的测值存在着误差,这些误差既有雷达系统方面的也有属于气象方面的:

(1) 雷达系统的不稳定、定标不准确及因雷达工作波长的不同而导致的误差,还有因雷达站周围地物阻挡所造成的误差;

(2) $Z-R$ 关系的不稳定及垂直方向气流的影响造成了雷达定量测量降雨的较大误差;

(3) 电磁波在传播过程中的衰减以及 Z 值的垂直分布廓线的对降水影响,也就是说只有在近地面高度处测得的 Z 值才能反映地面的降雨情况。

综上所述,雨量计测雨具有局地准确但区域代表性差的特点,雷达能实时快速探测区域降水情况,但因局地影响因子较多,误差较大。因此使用卡尔曼滤波校准法对雷达的测值进行校准,并利用雨量计和雷达进行点与面结合的方法,充分发挥各自的优点,弥补不足,从而达到提高区域降水量探测精度的目的。

收稿日期: 2007 - 09 - 13; 改回日期: 2008 - 01 - 11

基金项目: 甘肃省气象局 2007 年青年科技开发基金资助

作者简介: 徐燕 (1977 -), 女, 宁夏固原人, 助理工程师, 主要从事中短期天气预报工作和预报方法的开发应用. E-mail: qxyuan414@163.com

2 卡尔曼滤波校准法

2.1 卡尔曼滤波校准法原理

为了克服维纳滤波必须用到无限过去的数,不适用于实时处理这一缺点,20世纪60年代 Kalman把状态空间模型引入滤波理论,并导出了一套递推估计算法,后人称之为卡尔曼滤波理论^[13]。自从卡尔曼滤波理论出现以来,它已被广泛地应用到自动控制、信号处理、航天航海、水文气象等领域^[14]。卡尔曼滤波校准法是线形无偏最小方差递推滤波,它的估计性能是最优的,递推计算形式又能适应实时处理需要,故被称为最优滤波器。卡尔曼滤波校准法除了具有订正系统误差的能力外,也能有效地消除噪声的影响。因此,经卡尔曼滤波校准法校准后的雷达测值,其可信性进一步提高^[15]。

卡尔曼滤波校准法^[16]是通过对一个变量(偏差)的2个独立估计构成一种加权平均而得到的。选择合适的权重因子使得平均结果具有最小方差,这个平均结果就是卡尔曼滤波器的输出量。首先建立雷达—雨量计测雨系统中的2个方程——状态方程和测量方程:

$$B(k+1) = B(k) + W(k) \quad (1)$$

$$Y(k) = B(k) + M(k) \quad (2)$$

式中 $B(k)$ 是 k 时刻的状态变量或者称为状态偏差,如果说雷达和测值都是准确的,那么状态偏差 B 应该恒为 1,不随时间和空间变化,但在实际测量中,由于存在着诸多干扰因素的影响,使得 B 并不恒等于 1,而随时间 k 变化。(1)式表示的就是偏差值 B 这一状态变量随时间变化的状态方程。(2)式中 $Y(k)$ 是通过 k 时刻的雷达和雨量计的测量值而得到的,可称为测量偏差,这里 $Y(k) = R(k) / G(k)$, $R(k)$ 和 $G(k)$ 分别表示 k 时刻的雨量计测值和雷达测值, $W(k)$ 和 $M(k)$ 分别表示过程和测量的噪声,它们是均值为零的高斯白噪声。由于实际业务中,雷达和雨量计均工作在离散时间状态,为此上面2个方程是离散时间状态下的相应形式。结合他们的协方差来估算系统的最优化输出可以得出一组递推公式:

$$\hat{B}(k, k) = \hat{B}(k, k-1) + K(k) [Y(k) - B(k, k-1)] \quad (3)$$

$$\hat{B}(k, k-1) = \hat{B}(k-1, k-1) \quad (4)$$

$$P(k, k-1) = P(k-1) + Q(k-1) \quad (5)$$

$$P(k) = [1 - K(k)] P(k, k-1) \quad (6)$$

$$K(k) = P(k, k-1) / [P(k, k-1) + F(k)] \quad (7)$$

在式(3)~(7)中, $\hat{B}(k, k)$ 是基于 k 时刻测量值 $Y(k)$ 、 $K(k)$ 及 $(k-1)$ 时刻信息 $\hat{B}(k, k-1)$ 而求得的 k 时刻经滤波后的输出,即我们所需获得的校

准后的偏差估计 $\hat{B}(k, k)$; $\hat{B}(k, k-1)$ 是根据 $k-1$ 时刻经滤波输出的量 $\hat{B}(k-1, k-1)$ 而作出下一时刻 k 的偏差 $\hat{B}(k)$ 的预测估计值; $P(k, k-1)$ 表示对 $\hat{B}(k-1, k-1)$ 进行预测时所存在的误差方差; $P(k, k)$ 为 k 时 $B(k)$ 的经滤波后输出值 $\hat{B}(k, k)$ 与状态值 $B(k, k)$ 之间的误差方差; $K(k)$ 表示 k 时刻的滤波增益, $Q(k)$ 是状态噪声方差, $F(k)$ 是测量噪声方差。

2.2 参数的设置

卡尔曼滤波方程的解(3)~(7)是递推形式,而且仅与前一时刻的有关信息相联系。要获得 k 时刻的偏差滤波值 $\hat{B}(k, k)$,除了输入任给的初始值 $\hat{B}(0, 0)$ 和测量偏差 $Y(k)$ 外,还需输入噪声信息 $Q(k)$ 及 $F(k)$,本文采用 Sage-Husa 的自适应滤波算法^[13]求得:

$$\hat{F}(k+1) = \frac{1}{k+1} [k\hat{F}(k) + (k+1)^T (k+1) - P(k+1, k)] \quad (8)$$

$$\hat{Q}(k+1) = \frac{1}{k+1} [k\hat{Q}(k) + K(k+1) (k+1)^T (k+1) - k^T (k+1) + P(k+1) - P(k)] \quad (9)$$

$$\hat{\Gamma}(k+1) = \frac{1}{k+1} [k \cdot \hat{\Gamma}(k) + Y(k+1) - \hat{B}(k+1, k)] \quad (10)$$

$$\hat{q}(k+1) = \frac{1}{k+1} [k \cdot \hat{q}(k) + \hat{B}(k+1, k+1) - \hat{B}(k, k)] \quad (11)$$

$$(k+1) = Y(k+1) - \hat{B}(k+1, k) - \hat{\Gamma}(k+1) \quad (12)$$

将(3)~(7)式以及(8)~(12)式结合起来,交替地运行,就可获得对噪声的估计信息。其中 $\hat{B}(0, 0)$ 的值是任意给的, $P(0)$ 、 $Q(0)$ 、 $F(0)$ 本文分别取 0.1、0.25、0.1。与 $Y(k)$ 相比, $\hat{B}(k, k)$ 已经考虑了噪声的影响,它更接近于真实偏差,随着观测次数的增加,估计精度越来越高。将 $\hat{B}(k, k)$ 乘以影响区域内的雷达探测的降水强度 $I_g(i, j, k)$ 就可以得到该区域上校准后的雷达测值(其中 k 表示时刻)。

3 试验及结果

3.1 试验资料

对 2007 年庆阳市 2 次降水过程雨量相对较明显的集中时段进行分析试验。试验 1 用的是 2007 年 7 月 28 日 03~11 时的混合性降水资料。试验 2 是 9 月 6 日 14~22 时的均匀性降水资料。雷达反射率因子 Z 值是西峰 CNRAD/CD 雷达收集的 3 km 高度的 CAPP 资料,每 6 min 采样 1 次,雨量计采用了 2 次累计雨量值的 4 个县站和 12 个乡镇自动雨量计资料,每隔 1 h 上传 1 次雨量值。雨量计的测值是降雨量,

而雷达测值是反射率因子 Z ,为了统一比较,将雷达的测值每隔 6 min 记录一次, CAPP 资料是 1 km 的分辨率,使用平均区域 3 km \times 3 km 范围内 9 个点的 Z 值数据算术平均后经 $Z-R$ 关系转化为雨强,再将 1 h 内的雨强累加,得到雷达测量的 1 h 雨量值。本试验中使用的 $Z-R$ 关系是: $Z=200R^{1.6}$ 。

3.2 试验结果

试验 1 中将 7 月 28 日 3~11 时的任意 4 个自动站雨量计的降水量合计值与雷达估测的降水量合计值应用卡尔曼滤波法进行滤波校准,同时将这 4

个雨量站的卡尔曼滤波校准输出后的偏差估计值进行算术平均后分别乘以其余的 5 个站点的雷达估测值对其进行效果分析检验。同理将试验 2 中的 9 月 6 日 14~22 时的 3 个自动站雨量计合计值与雷达估测的降水量合计值应用卡尔曼滤波校准后,将输出的偏差估计值进行算术平均后分别乘以其余的 5 个站点的雷达估测值进行估测校准效果检验,再与雷达估测的降水量合计值进行比较,试验结果见表 1~3 及图 1。

表 1 2 次降水过程的雷达估测值及卡尔曼滤波校准值误差比较

Tab 1 Errors comparison between estimated values by radar and calibrated values by using Kalman filter in the two rainfall processes

| | 7月 28 日 3~11 时混合降水 | | | | 平均 | 9月 6 日 14~22 时均匀性降水 | | | 平均 |
|---------------|--------------------|-------|-------|------|-------|---------------------|-------|-------|-------|
| | 周家 | 湫头 | 长庆桥 | 肖金 | | 罗山 | 曲子 | 城壕 | |
| 雷达估测绝对误差 /mm | 76.8 | 45.9 | 66.2 | 12.7 | 50.4 | 60.2 | 43.9 | 44.6 | 49.6 |
| 雷达估测相对误差 /% | 128.6 | 162.8 | 352.1 | 22.0 | 166.4 | 161.8 | 258.2 | 433.0 | 284.3 |
| 卡尔曼校准绝对误差 /mm | 5.1 | 3.8 | 0.4 | 3.5 | 3.2 | 20.0 | 21.4 | 44.6 | 28.7 |
| 卡尔曼校准相对误差 /% | 8.5 | 13.5 | 2.1 | 6.1 | 7.6 | 49.2 | 99.4 | 22.3 | 56.9 |

表 2 7 月 28 日 3~11 时卡尔曼滤波偏差平均对其余 5 站的雷达估测值校准后的误差比较

Tab 2 Errors comparison between the average deviation by Kalman filter and the calibrated values of radar data in other 5 stations from 03:00 to 11:00 July 28

| | 盘克 | 庆城 | 合水 | 宁县 | 正宁 | 平均 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 雷达估测绝对误差 /mm | 25.5 | 29.2 | 22.5 | 79.7 | 49.4 | 41.3 |
| 雷达估测相对误差 /% | 130.8 | 108.6 | 166.7 | 408.7 | 152.9 | 193.5 |
| 卡尔曼偏差平均校准绝对误差 /mm | 0.8 | 0.6 | 2.9 | 23.8 | 1.1 | 5.84 |
| 卡尔曼偏差平均校准相对误差 /% | 4.1 | 2.2 | 21.5 | 122.0 | 3.4 | 30.6 |

表 3 9 月 6 日 14~22 时卡尔曼滤波偏差平均对其余 5 站的雷达估测值校准后的误差比较

Tab 3 Errors comparison between the average deviation by Kalman filter and the calibrated values of radar data in other 5 stations from 14:00 to 22:00 September 6

| | 桐川 | 蔡口集 | 驿马 | 太平 | 盘克 | 平均 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 雷达估测绝对误差 /mm | 29.2 | 38.3 | 26.4 | 23.9 | 60.7 | 35.7 |
| 雷达估测相对误差 /% | 159.6 | 194.4 | 112.8 | 194.3 | 359.2 | 204.1 |
| 卡尔曼偏差平均校准绝对误差 /mm | 25.8 | 9.9 | 3.1 | 31.8 | 22.0 | 18.5 |
| 卡尔曼偏差平均校准相对误差 /% | 140.9 | 50.3 | 13.2 | 258.5 | 130.2 | 118.6 |

从表 1 中可以看出,在未进行校准前,7 月 28 日的混合性雷达估测值偏离雨量计测值较大,平均相对误差达到了 166.4%,用卡尔曼滤波法校准雷达估测值后平均相对误差下降到了 7.6%,而 9 月 6 日均匀性降水雷达估测值偏离雨量计值的平均相对误差居然达到了 284.3%,用卡尔曼滤波法校准雷达估测值后平均相对误差下降到了 56.9%,通过对

比可以发现雷达对于混合性降水过程的估测值比均匀性降水过程的估测值相对误差要小的多。表 2 和表 3 分别是用本次降水过程的任意几站的卡尔曼滤波法输出偏差的算术平均值对其进行校准,然后进行效果检验,从表中同样可以发现混合性降水的校准效果比均匀性降水的校准效果要优。

图 1a 是雨量计测量的累计雨量图,可以看出此

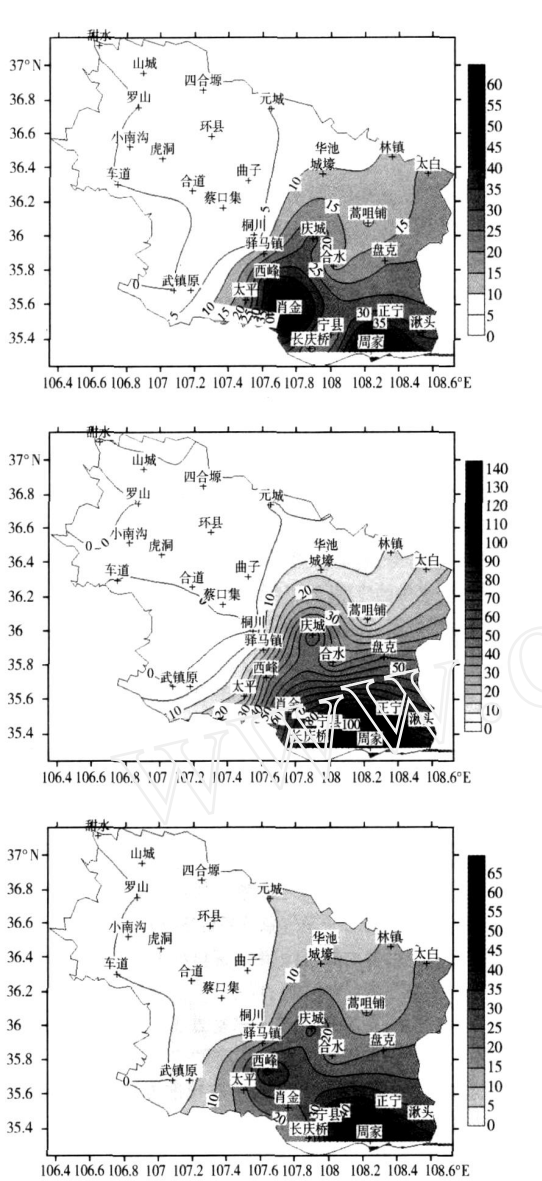


图 1 2007年 7月 28日 03:00~11:00的降水场(单位:mm)
 (a)雨量计测得的累计雨量分布;(b)雷达估测的累计雨量分布;(c)卡尔曼滤波偏差平均校准后雷达估测降水分布

Fig 1 Precipitation distribution from 03:00 to 11:00 July 28, 2007 (Unit mm)

(a)measured by rain - gauge,
 (b)estimated by radar and (c) calibrated by kalman filter

次雨量集中时段的降雨累计值在庆阳市的南部有 2 个降雨强度较大的中心;图 1b是未订正前雷达估测的累计雨量图,虽然仍保留了南部的降水强度中心,但是相比较雨量计测值而言精度却明显有所下降;图 1c是订正后的累计雨量图,基本上反映了雷达估算降水的结构,同时还结合了雨量计测值局地

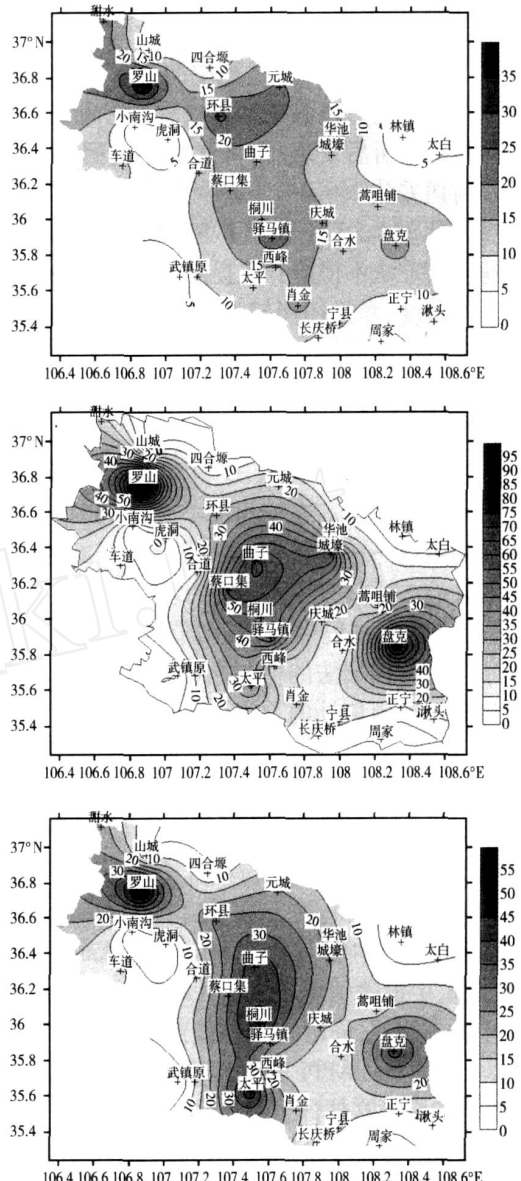


图 2 2007年 9月 6日 14:00~22:00降水分布(单位:mm)
 (a)雨量计测得的累计雨量分布;(b)未校准时雷达估测到的累计雨量分布;(c)卡尔曼滤波偏差平均校准后的雷达估测累计雨量分布

Fig 2 Precipitation distribution from 14:00 to 22:00 September 6, 2007 (Unit mm)

(a) measured by rain - gauge,
 (b) observed by radar and (c) calibrated by Kalman filter

准确的特点,使估测误差大大减小。相比较而言,图 2中的均匀性降水累计量值的校准效果要差一些,图中仅是大致地反映出了雨量计测量的累计雨量图的 4个较强中心,这与上面提到的校准效果混合性降水优于均匀性降水的结论是一致的。但是可以看出的是校准后的相对误差仍然是大大减小了。

4 小结与讨论

(1)通过对 2 次降水过程中的雨量较明显时段的雷达估测值进行卡尔曼滤波校准并与雨量计的测值进行对比分析后发现:第 1 次雷达估测值通过校准后相对误差从 166.4% 下降到了 7.6%,第 2 次的相对误差从 284.3% 下降到了 56.9%。可以看出卡尔曼滤波校准法不但能有效提高雷达定量估测区域降水量的精度,而且还能较好地体现雷达测量降水场空间分辨率高的特点。同时卡尔曼滤波校准法还具有校准系统偏差的能力,能有效地抑制雷达估测降水过程中产生的随机噪声。

(2)卡尔曼滤波校准法逻辑清晰、算法简捷,具有快速处理的特点。在输出滤波量的同时,也给出了滤波的精度——体现在滤波方差中。此外,卡尔曼滤波校准法还具有预测的能力。

(3)在试验过程中发现,初值的数值以及参数对卡尔曼滤波校准法的估测精度影响较大;同时本试验只是对有雨量计的地方进行校准,对没有雨量计的地方可以使用内插法进行校准但是发现误差较大,目前还不能使用。

(4)试验发现混合性降水的卡尔曼滤波校准法比均匀性降水的卡尔曼滤波校准法的相对误差要小的多,这个问题值得进一步研究。

(5)本试验中使用的雷达资料是 3 km 的 CAPP1 资料,试验中雷达估测出来的 1 h 雨强值都大大高于雨量计的测值,同时本人还使用了 PPI 的 1.5 仰角资料,来对比 CAPP1 的估计值,发现 1.5 仰角的 PPI 值仍然是过高估计了雨量值。如果排除了零度层亮带的影响,则可以说明本试验中使用的 $Z = 200 R^1.6$ 的统计关系式不适用于本地气候的降水过程,对于 1 km 和 2 km 的 CAPP1 资料值得做进一步的试

验应用。

致谢:感谢庆阳市气象局郭江勇副研究员和张洪芬高工的帮助和指导,感谢兰州干旱气象研究所王素萍对本文的支持。

参考文献:

- [1] 尹忠海,王飞,唐明晖. 变分校准法估测洞庭湖区域降水技术研究[J]. 广西气象, 2005, 26(增刊): 110 - 111.
- [2] 张亚萍,程明虎,夏文梅,等. 天气雷达回波运动场估测及在降水临近预报中的应用[J]. 气象学报, 2006, 64(5): 631 - 646.
- [3] 李建通,郭林,杨洪平. 雷达-雨量计联合估测降水初值场形成方法探讨[J]. 大气科学, 2005, 29(6): 1010 - 1020.
- [4] 官莉,王振会,裴晓芳. 雷达估测降水集成方法及其效果比较[J]. 气象科学, 2004, 24(1): 104 - 111.
- [5] 裴晓芳,王振会,李建通,等. 主特征提取法在天气雷达降水估测集成分析中的应用[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(2): 270 - 274.
- [6] 王叶红,崔春光,赵玉春,等. 变分技术在校准数字化天气雷达定量估测降水中的应用[J]. 气象, 2001, 27(10): 3 - 7.
- [7] 张天峰,王位泰,吴爱敏,等. 庆阳一次强暴雨天气过程雷达回波特征[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 61 - 65.
- [8] 武麦凤,毛玉琴. 一次强飑线过程的卫星云图及天气雷达回波特征分析[J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 45 - 50.
- [9] 张天峰,王位泰,杨民,等. "2005. 5. 30 庆阳特大冰雹新一代天气雷达回波资料分析[J]. 干旱气象, 2006, 24(1): 34 - 37.
- [10] 孙旭映,王劲松,王静. 火箭增雨效果雷达回波分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(3): 39 - 41.
- [11] 李国昌,李照荣,李宝梓. 冰雹过程中闪电演变和雷达回波特征的综合分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(3): 26 - 33.
- [12] 邓雪娇,吴兑,黄浩辉. 自记雨量资料订正雷达估测降水方法简介[J]. 广东气象, 1998(2): 17 - 18.
- [13] 许明,刘建业,袁信. 自适应卡尔曼滤波在惯导初始对准中的应用研究[J]. 中国惯性技术学报, 1999, 7(3): 14 - 16.
- [14] 尹忠海,张沛源. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 213 - 214.
- [15] 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[J]. 热带气象学报, 2004, 20(2): 192 - 197.
- [16] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社, 2000. 190 - 193.

Application of Kalman Filter in Precipitation Estimation by Radar

XU Yan

(Qingyang Meteorological Bureau of Gansu Province, Xifeng 745000, China)

Abstract: The calibrated analysis of the precipitation estimation by radar was made using Kalman filter method based on precipitation data measured by rain-gaug in two rainfall processes occurred in July and September of 2007 in Qingyang of Gansu Province, and the errors were also analyzed by comparing the measured data by rain-gauge. The results show that the effect of calibration in the precipitation process from 03:00 to 11:00 July 28 surpasses that in rainfall process from 14:00 to 22:00 September 6, and the relative error dropped from 166.4% to 7.6% and 284.3% to 56.9% after calibration, respectively. The random noises in the process of rainfall estimation by radar can be effectively eliminated and the precision of quantitative estimation can be enhanced by the Kalman filter method for the regional precipitation, meanwhile, the fine structure of precipitation exploration by radar can be retained better.

Key words: Kalman filtering; radar; rainfall estimation