

变分校准法在山东半岛雷达估测降水中的应用

王建林 徐晓亮 毕 玮 凌 艺 李 斌

(山东省青岛市气象局, 266003)

提 要: 利用山东半岛地区2006年8月26日的强降水数据、青岛雷达基数据和自动站数据资料, 采用变分技术校准方法进行雷达定量估测降水, 结果表明: 校准后的雷达测量降水在保留原降水内部结构形式的基础上, 1小时估测降水误差明显减少。分析的降水优化场还可用于降水预报中, 提高降水预报准确率。

关键词: 青岛 雷达 降水 变分法

引 言

测量某一地区的降水量是现代多普勒雷达的主要功能之一, 在实际预报业务中发挥了重要作用。由于单独使用雷达反射率因子通过雷达方程($Z-R$ 关系)计算得到的定量估测降水量受到雷达参数、 $Z-R$ 关系的不稳定以及暴雨衰减增大等的影响, 气象工作者提出利用基准雨量计来实时校准雷达定量估测降水的方案, 即雷达-雨量计联合探测的方法。具体的方法有: 单点校准法、平均校准法、空间校准法、距离加权法、卡尔曼滤波法和变分法等。目前主要采用卡尔曼滤波法和变分法。变分校准方法雷达估测降水是利用以雨量站为边界条件和若干强弱约束条件的变分公式, 形成最优分析场来校正雷达估测降水的方法。1958年, Sasaki首次采用变分法进行客观分析, 1969年, 为了弥补缺测区域的资料^[1], 将动力方程引进泛函, 以达到抑制和过滤快波的目的; 1970年代初, Wilson提出平均校准法, 计算的精度有了明显提高, 但是这种方法使降水场平均化, 强弱降水区边界趋于模糊, 降水场失真^[2]; 戴铁丕

在此基础上又提出了“平均订正因子校准法”, 定量估测降水精度有了很大提高^[3]; Nomiya和Akiyama提出了一种计算雷达校准因子的变分方法^[4], 采用变分校准法联合雨量计和雷达进行降水估测, 实现了点面结合, 弥补不足, 基本保持雷达探测到的内部降水形式, 在计算机上运行速度较快, 符合气象业务需求, 是目前雷达定量估测降水中的一种比较成熟的方法^[5-7]。本文利用山东半岛地区2006年8月26日的强降水数据、青岛雷达基数据和自动站数据资料, 采用技术比较成熟的变分法来校准雷达定量估算降水, 并对校准前后的误差进行了对比。

1 变分校准法原理

变分法是以一虚拟的方式改变变数, 来寻求在一特定某函数内之各变数间的关系和各变数所必需满足的方程式, 以使得此特定函数在所要求的运算下, 所得的结果为一极值; 此运算须在符合某些边界和限制条件前提下进行。

校准因子由地面雨量计观测值 G 与地面校准点上空测得 Z 值通过 $Z-I$ 关系得到

的雷达估测值 I 之比,这样,我们同时有雷达回波及雨量计值的点 $k(k=1,2,3,\dots,n)$ 上的实测校准因子 $CR(k)$,内插到各网格点 (i,j) 上得到 $CR(i,j)$,然后去寻找一个最优的校准因子分析场 $\bar{C}R(i,j)$,它是通过对校准因子 $CR(i,j)$ 进行拟合而获得的。所谓最优,就是在各网格点上 $CR(i,j)$ 与 $\bar{C}R(i,j)$ 之差的平方和为最小。即 $\sum_i \sum_j [CR(i,j) - \bar{C}R(i,j)]^2 \rightarrow \min$

这在数学上,相当于泛函 $f(i,j,CR)$ 求极值,即变分问题。当用观测权重 α 去给定 CR 的平均观测精度,用约束权重 λ 去滤掉 CR 中可能出现的高频噪声时,求 $CR(i,j)$ 的变分方程可写成

$$\Delta f(i,j,CR) = \Delta \sum_i \sum_j \{ \alpha [CR - \bar{C}R]^2 \} + \lambda \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} CR \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} CR \right)^2 \right] = 0 \quad (1)$$

于是寻找函数 CR 就变成求解上述变分方程。求解的经典方法是去解与变分方程相对应的欧拉方程

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

这是一个非线性偏微分方程,不可能有解析解,只能将其写成差分格式的方程后求解数值解。对于这种二阶椭圆形方程组,本文采用超松弛叠代法求解收敛快,叠代次数少。另外偏微分方程的定解问题必须包含边界条件。在本问题中,可以令边界 Γ 上有: $CR|_{\Gamma} = \bar{C}R|_{\Gamma}$,或在扩展一圈的边界 Γ^* 上,有 $CR|_{\Gamma^*} = 0$,即在此边界上不必作订正。

2 采用变分校准的流程和算法

采用变分校准法估测降水,需要同时输入由雷达反射因子与降水强度 $Z-R$ 关系式转化得到的雷达初估测场资料与自动站测量的雨量资料。虽然自动站雨量资料可能会产生一定的误差,但自动站资料越精密,站数越

多,采用的“真值”就越合理。计算机读入这些数据后,选定参数,采用超松弛叠代法求方程(2)式,计算差分方程得到函数 $\bar{C}R(i,j)$ 最优分析场,把雷达的初估测场与 $\bar{C}R(i,j)$ 最优分析场的相乘得到最后的估测降水场,再进下一时次的校准流程。

3 实例检验

3.1 资料选取

本文计算资料采用的是2006年8月26日04—12时的降水过程。2006年8月26日08时,500hPa副热带高压南压,588脊线压到 $12^\circ N$ 附近,华北北部的西风槽经过了山东中部,山东半岛逐渐被槽前西南气流控制。受高空引导气流的影响,山东半岛的降水云团明显加强。850hPa切变线从河南地区向东北延伸到渤海湾,辐合带扩展到山东东部大部分地区,切变线南侧的西南气流较强,成山头地区的最大风速为 $18.0 m \cdot s^{-1}$ 。从雷达回波来看,8月26日04时,山东地区已有大片回波,大部分集中在鲁中及鲁西北地区,最大回波可达78dBz,在青岛地区有小范围的强对流云产生,不断向西北方向发展。8月26日07时,半岛地区几乎全部出现降水(图1,见彩图第26页),在半岛北部和青岛地区出现类似飑线的对流带,青岛即墨站处于对流带的北端,对流带在未来3个小时内持续经过此地,形成“列车效应”,有些自动站出现 $100.0 mm \cdot h^{-1}$ 以上强降水。2006年8月25日至8月26日山东省境内为持续阴雨天气,并出现了大范围的强降雨,局部出现特大暴雨(图2)。根据雨量站分布(图3),采用雷达基数据的2.0高km的CAPPI资料,估测降水有效范围取150km以内。

3.2 结果分析

首先对雷达、自动站资料进行网格化分析,雷达混合扫描不同距离处仰角的选取基

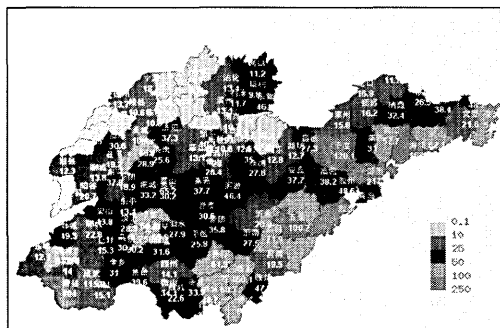


图2 2006年8月25日08时至26日20时
山东省累计降水量分布图(单位:mm)

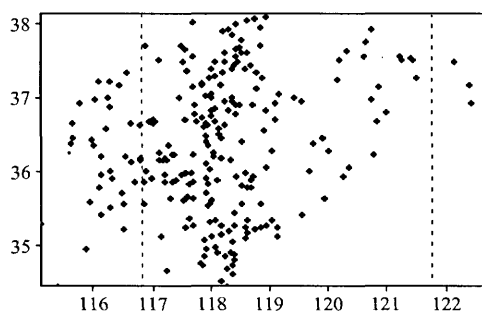


图3 山东省气象雨量站分布图

本采用4层扫描,雷达方程参数 $a = 300$ 、 $b = 1.4$,雷达 CAPPI 选取 2.0km 高度场,插值成直角坐标系 $1 \times 1\text{km}$ 。用1小时间隔来采样自动站雨量站资料,将站点资料用内插方法插值成 $1 \times 1\text{km}$ 格距。

由雷达校准前估测降水分布(图1,见彩图第26页)可见,这次降水造成降水量的分布极不均匀,大致有2个降水中心,图1中a、b分别标出1、2两个中心点,根据图示,变分校准前雷达估测降水与地面自动站测量的降水分布形式大致吻合,雷达探测的降水分布中、小尺度结构比雨量站测得多,降水中心强度与位置较雨量站降水中心偏强、偏北。通过变分校准方法找到最优场,计算出雷达校准后的降水场。图4a(见彩图第27页)给出了雷达变分校准后的1小时降水雨量的分布图与未进行校准雷达估测降水分布对比图,从中可以看出,变分校准前后两种计算方法都可以将降水的内部结构清晰表现出来,

降水形式大致接近,但是校准后降水强度中心更接近于地面雨量站的降水强度中心。进一步分析图4可以看出,校准后的雷达测量降水场与未进行校准的雷达降水强度分布相比,某些降水中心偏强,某些偏弱,整体是偏弱的趋势。利用该变分法可以校正多普勒雷达算法中大雨高估的不足,减小了雷达估测降水的误差。

接下来利用变分校准法得到的最优分析场应用到其他方面,直接计算出上一时刻联合地面雨量站资料分析的最优分析场,来应用到下一时刻,这样下一时刻的降水场等于雷达初估测值乘以上一时刻的最优分析场。图4还给出了校准后雷达降水估测值与雨量计降水值的对比图,从中可以看出,除了个别点,平均误差由原来的53%减小到21.6%,降水精度较以前有了明显提高,利用这种思路,可以将这种方法用于降水预报,因雷达定量降水预报没有雨量站来校准,采用实况校准得到的最优分析场直接用于预报场,雷达估测降水预报的效果应会更好。

如果采用10分钟或者30分钟进行及时订正,或者其他时间段自动站的采样时间,本文未作讨论,是否会提高雷达估测降水的精度,还有待进一步研究。

3.3 误差分析来源

分析此误差来源,可能有以下造成:

- (1)与雨量计报告时间内插相联系的误差;
- (2)风对雨量计开口的影响;
- (3)由通信或雨量计硬件造成的误差;
- (4)雨量计定位的经纬度误差;
- (5)天线指向角的不适当标定误差。

4 结论

本文就雷达联合雨量计估测降水采用了技术比较成熟的变分法对山东半岛附近的一次大到暴雨个例进行了分析,初步得到以下

结论:

(1)在校准雷达估测降水前后降水形式场大致接近,与地面雨量站对比,能更好地表述较精细的降水分布形式,保持了降水的内部结构的准确性。

(2)在这次山东半岛强降水过程中,变分校准雷达联合雨量计降水1小时订正结果有所提高,校准后的降水场分布、位置、强度更接近于实况地面雨量站,降水失真得到缓解。

(3)雷达估测降水通过校准后得到的最优分析场可用于降水预报,提高雷达降水预报的准确率。

雨量站测量降水具有局地性,联合雨量站的变分法进行校准雷达估测降水,具有一定的区域代表性,点面结合,符合气象业务的

需求,是今后进行降水测量的主要方向之一。

参考文献

- [1] Sasaki, Y.. Some basic formulas in numerical variation analysis[J]. Mon. Wea. Rev., 1970, 98: 875-883.
- [2] Wilson, J. W.. Radar Measurement of rainfall sammary [J]. Bull, Amer, Soc., 1979, 60 (9): 1048-1058.
- [3] 戴铁丕,傅德胜. 天气雷达-雨量计网联合探测区域降水量的精度[J]. 南京气象学院学报, 1990, 13 (4): 592-597.
- [4] Ninomiya, K1 And Akiyama, T11Objective analysis of heavy rainfalls based on radar and gauge measurement [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 1978, 50: 206-210.
- [5] 雷达气象学,气象出版社.
- [6] 王叶红,赵玉春. 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] 俞小鼎,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006.