

杨凡,顾松山,黄兴友,等. 利用雷达回波垂直廓线估测地物阻挡区域层状云降水的技术研究[J]. 南京气象学院学报,2009,32(1):145-150.

利用雷达回波垂直廓线估测地物阻挡区域层状云降水的技术研究

杨凡^{1,2},顾松山¹,黄兴友¹,孙琪^{2,3},吴林林^{1,4},夏文梅⁵

(1. 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044; 2. 青岛市气象局, 山东 青岛 266003;

3. 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044;

4. 安徽省气象局, 安徽 合肥 230031; 5. 江苏省气象科学研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:将雷达 50 km 探测半径的可视范围分为 4 个区域, 分别获取平均反射率因子垂直廓线, 确定与对应区域的雨量计匹配最佳的平均反射率因子廓线上的 Z 值; 同时获取雷达波束被阻挡地区各雨量计高空平均反射率因子垂直廓线, 并寻找该廓线与可视区域内的平均反射率因子垂直廓线相关性最好的廓线, 以及被阻挡区域的 Z 值对应的最佳匹配高度上的 Z 值, 对其进行降水估计。采用安徽合肥雷达站和雨量计站点资料进行试验, 并进行误差分析, 结果表明: 利用最佳匹配方法得出的平均反射率因子垂直廓线上的 Z 值对雷达波束被阻挡区域的降水估计效果有一定改进。

关键词:多普勒雷达; 平均反射率因子垂直廓线; 最佳匹配; 降水估计

中图分类号:P412.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-2022(2009)01-0145-06

Determination of Vertical Profiles of Reflectivity for Estimation of Stratiform Cloud Precipitation in Ground Clutter Areas

YANG Fan^{1,2}, GU Song-shan¹, HUANG Xing-you¹, SUN Qi^{2,3}, WU Lin-lin^{1,4}, XIA Wen-mei⁵

(1. School of Remote Sensing, NUIST, Nanjing 210044, China; 2. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China;

3. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NUIST, Nanjing 210044, China;

4. Anhui Meteorological Bureau, Hefei 230031, China; 5. Meteorological Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China)

Abstract: According to the concept of optimum space-matching between ground rain rate, I , and radar reflectivity factor, Z , for a certain vertical reflectivity profile, this paper presents a method to determine the optimally matched vertical profile of reflectivity for estimating stratiform cloud precipitation in ground clutter areas. The unblocked part of the vertical profile of reflectivity in ground clutter area is first used to find a best partial correlated vertical profile of mean reflectivity from the unblocked areas, and the both are combined to estimate the surface precipitation in the ground clutter area. The verification of estimation error against the raingauge-observed rain rate in the ground clutter area in the stratiform cloud precipitation event on June 18, 2004 in Anhui Province suggest that the method is applicable in operational rain estimation.

Key words: Dopplar radar; vertical reflectivity profile; optimum space-matching; rain estimation

0 引言

实时估测的区域降水量不仅对洪水监测、发布洪水警报有指导作用, 同时也是水文和数值预报模式最重要的初始实测资料之一。日前地面雨量站测量的雨强和雨量因站网密度过稀而往往缺乏代表性, 很难准确算出大范围的雨量。利用多普勒雷达

资料能够估计雷达扫描范围内的雨强、一定区域上的雨量分布和总雨量, 并及时取得大面积定量的降水资料。但雷达的探测能力不仅受雷达参数及各种衰减、折射和降水云性质等因素的影响, 而且也受到雷达站四周高大建筑物、地形(如山脉)的影响, 尤其受山区地形的影响更大。人们往往通过抬高雷达探测的仰角来减小山体对雷达波束的影响。很多学

收稿日期: 2008-03-28; 改回日期: 2008-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40475017; 40665001)

作者简介: 杨凡(1981—), 男, 云南昆明人, 硕士, 研究方向为雷达应用, yangfan2003y@nuist.edu.cn.

者研究了如何利用雷达回波估测山峰阻挡区域的降水^[1-5]。张亚萍等^[6]进行了对雷达波束阻挡地区降水的订正研究,提出了计算波束阻挡系数的平均值距离库填充法,他们将波束距离 R 处相应波束区域划分为 31×31 的网格,以此计算雷达波束在该距离处的地物阻挡百分率,然后利用未被阻挡网格中心回波 Z 值填入阻挡的网格中估计降水。他们的方法取得一定的业务运行效果,但这一方法未考虑天气系统及复杂地形区域导致的降水不均匀性。Koistinen^[7]从 45 km 范围内获取了雷达反射率因子垂直廓线并对其进行 24 h 平均。Joss 等^[8]以 5 min 的时间间隔获取 70 km 范围内的雷达反射率因子垂直廓线。Germann 等^[9]结合 70 km 范围内的雨量计获取中尺度的反射率 β 廓线。他们的工作都是试图解决雷达反射率因子垂直廓线的时空变化问题。Andrieu 等^[10]和 Vignal 等^[11]运用统计学方法寻找的雷达反射率因子垂直廓线效果较好。他们主要是采用在近雷达区域获取雷达反射率因子垂直廓线,然后将其用于整个雷达扫描区域的降水估计。杜秉玉等^[12]对雷达反射率因子垂直廓线也进行了研究,基于廓线,利用某一高度水成物与地面雨量计最佳匹配的方法进行了反演降水的试验。

由于层状云降水相对比较均匀,被遮挡的方位角和仰角的区域空间中,可按雷达回波垂直廓线通过与地面雨量计最佳匹配而获得降水量估测。而对流云的 Z 值分布相当不均匀,也反映在垂直廓线上遮挡区和未被遮挡区之间的不一致。所以本文仅适

用于以层状云为主的降水过程。

基于杜秉玉等^[12]的研究思路,本文对雷达波束被阻挡区域的降水估计提出了新的方法。即按照地面降水与某一高度的雷达反射率因子存在最佳匹配关系,对以层状云降水为主的过程中,在降水过程开始时,按照雷达回波均匀程度把以雷达为中心的半径 50 km 可视范围分为 4 个区域,大约每 6 min(雷达体扫时间)分别获取每个区域的平均雷达反射率因子垂直廓线^[13],确定与对应区域的雨量计匹配最佳的廓线上的 Z 值;同时获取 50 km 雷达波束被阻挡区域的各个雨量计高空的平均雷达反射率因子垂直廓线,找出与波束阻挡区域各雨量计站点的平均雷达反射率因子垂直廓线相关性最好的可视区域的平均雷达反射率因子垂直廓线,利用相关性最好的可视区域平均雷达反射率因子垂直廓线上的匹配最佳的 Z 值对波束被阻挡区域的雨量计区域降水进行估计,并分析了误差。

1 研究区域概况

研究资料来源于安徽合肥的 S 波段多普勒雷达和相应雨量计的联合观测结果。仅靠雷达探测的回波强度估计阻挡区域的地面降水是不准确的,因为阻挡而导致了部分数据的缺测。图 1 中的西南方向雷达图像缺失部分即为雷达波束被建筑物阻挡形成的区域,阻挡角度约为 4° 。本文采用上述方法来估测阻挡区域的地面降水,为满足水文径流预报提供数据。

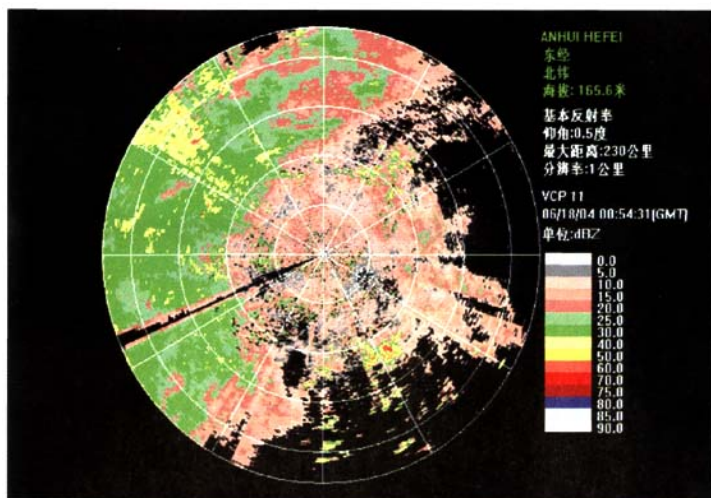


图 1 雷达 0.5° 反射率图

Fig. 1 Reflectivity of Heifei Radar at 0.5° elevation at 0054 UTC 18 June 2004

2 垂直廓线的产生

2.1 数据资料

安徽合肥S波段多普勒雷达是北京敏视达公司生产的第一部全相干雷达,基本性能与美国的WSR-88D一致。该雷达站(117.280 7° E, 31.868 4° N)的海拔高度是165.6 m,雷达的波束宽度为1°,最大探测距离为460 km。雷达完成一次体扫描平均需要6 min。本次选用的降水过程是用VCP11模式进行体扫描,一共有14个扫描仰角,分别是0.5°、1.45°、2.4°、3.35°、4.30°、5.25°、6.2°、7.5°、8.7°、10.0°、12.0°、14.0°、16.7°、19.5°。合肥雷达站的西南方向有建筑物阻挡。本文所用的雷达资料和雨量计资料都是以6 min频率采集的。

应用程序开发工具Visual C++ 6.0实现业务化显示雷达产品,其中雷达回波图以安徽合肥雷达站为中心,显示230 km范围内的雷达体扫描资料的基本反射率、组合反射率等雷达产品。在降水过程开始时,按照雷达回波均匀程度将雷达周围50 km可视区域划分为4个部分,并分别计算出4组平均雷达反射率因子垂直廓线(图2)。

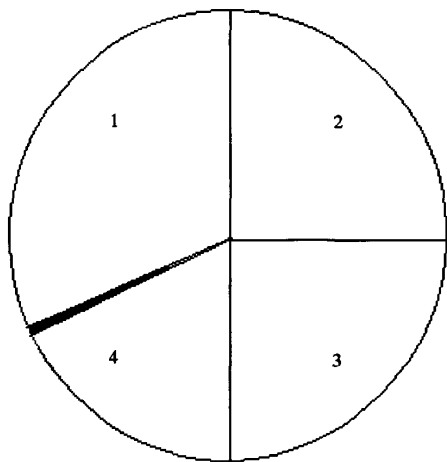


图2 雷达周围50 km可视区域划分的4部分

Fig. 2 Four parts of radar visible areas within 50 km and the ground clutter area (blackened)

由于试验需要大范围降水数据,所以采用2004年6月18日16—18时的雷达体扫描资料及雨量计资料。图2显示的是雷达周围50 km探测半径内的情况,黑色部分是阻挡区域,其中区域1是自阻挡区域上边界开始至正北方向的区域,区域2是自正北方向至正东方向的区域,区域3是自正东方向至

正南方向的区域,区域4是自正南方向至阻挡区域的下边界的区域。4个区域共分布36个雨量计,其中区域1中7个,区域2中9个,区域3中11个,区域4中7个,另外,阻挡区域内2个。

2.2 廓线的产生

合肥雷达站测得的2004年6月18日16—17时和17—18时的体扫资料,是一次以层状云为主的降水过程。从6月17日的天气形势进行分析,500 hPa形势场上,中国中东部地区处于西风槽控制下,来自乌拉尔山东侧的低涡携带冷空气在槽后西北气流引导下南下,东移南下的冷空气又加深了位于中国上空的西风槽,这是继上次(12—17日)的冷空气补充南下过程。由于前一天的冷空气补充南下,在6月18日,冷空气大举入侵我国,在黄淮、江淮西部一带和暖湿气流相互作用,产生强的辐合上升区,导致一次大范围的强降水过程。这连续的两股冷空气引发的降水强度和范围是本月最强的,依次引导降水带由西往东、自北向南移动。本文采用的雷达资料就是这次降水过程中的一个时段内获得的。

大约每6 min产生一个体扫描数据集,距离分辨率为1 km。分别取4个区域的每个区域任意选定位置处上空的雷达各仰角(共14个仰角)扫描的雷达反射率因子值及其周边相邻的8个库点的数值,对数据中的奇异点进行剔除,再由测高公式^[14]来计算海拔高度(其中合肥雷达站海拔高度为165.6 m),得到该区域上空大约每6 min的平均雷达反射率因子垂直廓线(图3)。由于对廓线进行了平滑处理,所产生的廓线与雷达实测廓线有一定误差,因此用该廓线订正距离雷达站100 km外的区域的降水就不准确了^[15],所以本文只考虑订正50 km范围内的降水。假设以层状云为主的同一次降水过程中雷达反射率因子垂直廓线是基本相同的。为了分析误差情况,所选取的阻挡地区雷达反射率因子廓线在雨量计上空。

由图3可见,层状云降水回波中有零度层融化带。这是一次自西向东移动的降水过程,所以区域1(图3a)的平均雷达反射率因子垂直廓线较其余3个区域(图3b,c,d)的平均雷达反射率因子垂直廓线更接近层状云的平均雷达反射率因子垂直廓线。

2.3 订正降水的效果检验

2.3.1 Z-I关系

用于本文试验的雨量计分布于安徽合肥雷达站50 km范围内的可视区域及雷达波束被阻挡的区

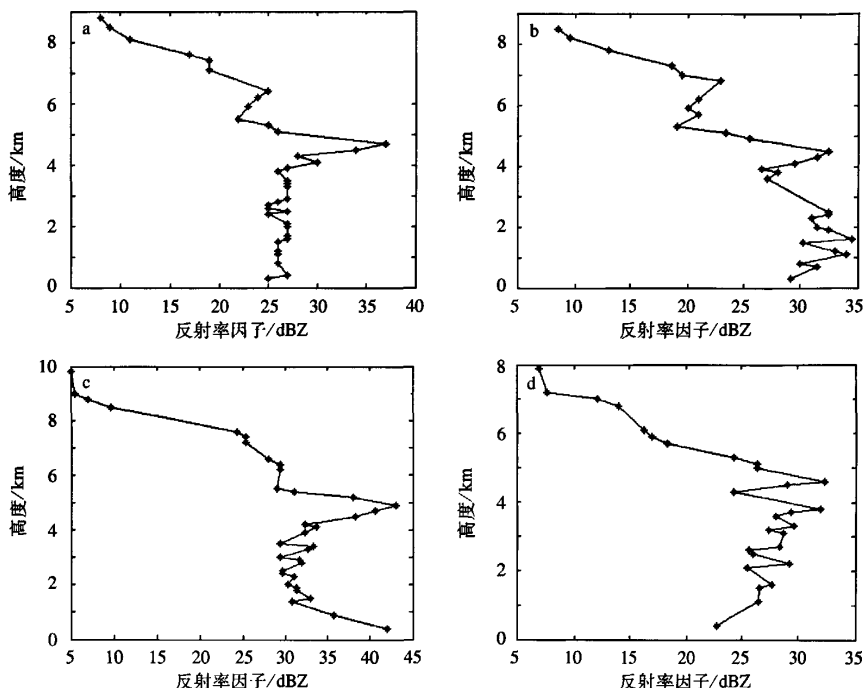


图3 2004年6月18日16时00分—16时06分的雷达反射率随海拔高度变化的垂直廓线

a. 区域1; b. 区域2; c. 区域3; d. 区域4

Fig. 3 Vertical profiles of reflectivity from 1600 to 1606 UTC on 18 June 2004 in areas (a)1, (b)2, (c)3, and (d)4

域,共36个。对于这次以层状云为主的降水过程,本文采用测量层状云降水的 $Z-I$ 关系进行降水估计,即

$$Z = 200I^{1.6} \quad (1)$$

2.3.2 寻找廓线的相似性

为了试验本文的处理方法,选取了合肥雷达站50 km范围内的区域降水资料进行研究。雷达波束阻挡区域的2个实时雨量计用于获取地面降水情况。为了求得阻挡区的平均雷达反射率因子垂直廓线,将阻挡区上空可测部分的平均雷达反射率因子垂直廓线与其他4个区域相同高度以上的平均雷达反射率因子垂直廓线进行比较,用方差最小作为判别标准,而获得阻挡区与4区之一匹配的平均雷达反射率因子垂直廓线,进而由此区域的廓线作为阻挡区由地面至高空的平均雷达反射率因子垂直廓线。表1是2004年6月18日16—18时层状云降水过程中阻挡区的2个雨量计上空的匹配廓线情况。

2.3.3 确定匹配最佳的雷达反射率因子值

根据降水云体中某一高度上的水成物分布与地面降水有最佳空间匹配关系,首先找出该次降水过

程中的平均雷达反射率因子垂直廓线上各点的 Z 值,按照(1)式转换为雨强 I_1 值,得出的该雨强值与地面实际雨强 I_2 之间的最佳匹配的点,即满足 I_1 与 I_2 差值最小的条件,即(2)式中的 V_{CTF} 值最小。然后将平均雷达反射率因子垂直廓线上各点的 Z 值按(1)式得到的 I_1 再进行时间累加得到廓线上各点对应的降水量 A_j 值,然后将 A_j 值与地面实际6 min的降雨量代入(2)式^[14]进行判断。 V_{CTF} 表达式为

$$V_{CTF} = \min \left[\sum_{i=1}^n (A_j - G_i)^2 + (A_j - G_i) \right] \quad (2)$$

其中: G_i 为地面6 min的降雨量, $i=1,2,\dots,n$, n 为50 km范围内可视区域内的地面雨量计站个数,共有36个; $j=1,2,\dots,m$, m 为平均雷达反射率因子垂直廓线上的资料点数。与每小时 V_{CTF} 值最小时相对应的高度上的 Z 记为 Z_{CTF} 。表2给出了2004年6月18日16—17时和17—18时每隔6 min的 V_{CTF} 值和 Z_{CTF} 值,其中按照被阻挡区域与未阻挡区域廓线的相似性的计算结果对应求出了上述值。

表2所示的 V_{CTF} 值的变化情况,即按表1规则估算的被阻挡区域的 Z_{CTF} 值以及与此对应的雷达反射率因子值。本文所确定的与地面雨量计匹配最佳

表 1 两次降水过程中与波束阻挡区域雨量计相似性最好的可视区域

Table 1 Radar visible areas (see Fig. 2) wherein vertical profiles of reflectivity are best comparable with the profiles (unblocked part) over raingauge 1 and 2 in the ground clutter area in 1600—1800 UTC on 18 June 2004

时间段	雨量计 1	雨量计 2
16:00—16:06	区域 1	区域 1
16:06—16:12	区域 2	区域 2
16:12—16:18	区域 1	区域 1
16:18—16:24	区域 2	区域 4
16:24—16:30	区域 2	区域 2
16:30—16:36	区域 2	区域 2
16:36—16:42	区域 2	区域 2
16:42—16:48	区域 2	区域 2
16:48—16:54	区域 2	区域 3
16:54—17:00	区域 1	区域 1
17:00—17:06	区域 4	区域 3
17:06—17:12	区域 2	区域 2
17:12—17:18	区域 3	区域 1
17:18—17:24	区域 2	区域 4
17:24—17:30	区域 1	区域 4
17:30—17:36	区域 2	区域 1
17:36—17:42	区域 3	区域 4
17:42—17:48	区域 4	区域 4
17:48—17:54	区域 2	区域 3
17:54—18:00	区域 3	区域 4

的廓线上的值所对应的高度值与杜秉玉等^[12]所得结论相同,即不同回波强度对应的高度是一致的。其中,当满足条件的区域的雨量计站点没有降水记录时,就获取相似性计算结果中方差第二小的区域计算 Z_{CTF} 值,以弥补因资料缺失带来的计算上的误差。

2.3.4 降水估计及效果检验

假设同一次以层状云为主的降水过程中雷达周围 50 km 半径范围内的每次体扫描的雷达反射率因子垂直廓线基本相同,用得出的最佳匹配的廓线上的值对该区域内表 2 中的 Z_{CTF} 值,按照(1)式转换为雨强,再按时间累加得到降水量对雷达波束被阻挡区域的 2 个雨量计的降水量分别进行订正。由上面所述的 V_{CTF} 值求取的物理含义可以知道,表 2 中的 Z_{CTF} 值为该时间段平均雷达反射率因子廓线上的反射率值按照(1)式计算出来的降水量与地面雨量计的记录值最接近的雷达反射率因子值。本文用空间最佳匹配思想计算出来的每 6 min 的 Z_{CTF} 值,

表 2 一次层状云降雨为主的 V_{CTF} 和反射率 Z_{CTF}

Table 2 V_{CTF} and Z_{CTF} during a stratiform cloud precipitation event in 1600—1800 UTC on 18 June 2004

时段	雨量计 1		雨量计 2	
	V_{CTF}	Z_{CTF}/dBZ	V_{CTF}	Z_{CTF}/dBZ
16:00—16:06	0	23.0	0	23.0
16:06—16:12	0.025	28.0	0.025	28.0
16:12—16:18	0.010	23.3	0.010	23.3
16:18—16:24	-0.001	23.0	0.032	27.0
16:24—16:30	0	23.0	0	23.0
16:30—16:36	-0.055	23.5	-0.055	23.5
16:36—16:42	0.006	25.0	0.006	25.0
16:42—16:48	0.002	25.8	0.002	25.8
16:48—16:54	0.000	23.0	-0.176	24.3
16:54—17:00	0.104	28.0	0.104	28.0
17:00—17:06	0.052	25.7	-0.987	31.3
17:06—17:12	-0.343	25.5	-0.343	25.5
17:12—17:18	12.678	27.8	0.156	29.3
17:18—17:24	-0.828	18.2	-0.171	30.0
17:24—17:30	-0.094	25.3	0.010	29.7
17:30—17:36	-0.846	18.3	-0.301	22.7
17:36—17:42	5.799	31.0	0.039	27.3
17:42—17:48	-0.053	29.7	-0.053	29.7
17:48—17:54	-0.858	15.3	-0.049	29.6
17:54—18:00	4.050	24.7	0.020	26.7

对本次每 6 min 的雷达波束被阻挡的部分的地面降水进行订正,最后利用雷达波束被阻挡区域内的 2 个雨量计的观测值对经过订正后的雷达波束被阻挡 50 km 区域的地面降水进行效果检验。利用(3)式进行误差估计。

$$E_{FS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i^{est} - G_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i}} \quad (3)$$

其中: G_i 为第 i 个雨量计所观测到的非零降水量,每 6 min 读取一次值; R_i^{est} 为平均廓线估测到的在第 i 个雨量计附近的每 6 min 一次的降水量; n 为雨量计的个数。

本文计算了 2004 年 6 月 18 日 16—17 时和 17—18 时一次以层状云降水为主要过程的相对标准误差 FSE(fractional standard error, E_{FS}) 值(图 4)。

由图 4 可看出,在此次层状云降水的第 1 个时间段(2004 年 6 月 18 日 16—17 时),在波束阻挡区域的两个雨量计区域降水估计的误差值较小,总体估计的效果较好,除两个时刻误差较大外,其他的误

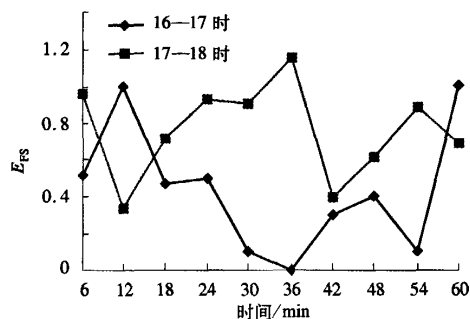


图 4 反射率因子垂直廓线上的最佳匹配值订正被阻挡区域的降水量与该区域的雨量计实际值对比的 E_{FS}

Fig. 4 Fractional standard error of the precipitation extrapolated using the optimally matched vertical profile of reflectivity to the raingauge-observed precipitation in the ground clutter area in Fig. 2

差都在 50% 以下;在第 2 个时间段(2004 年 6 月 18 日 17—18 时)的误差值较第 1 个时间段稍高,都在 70% 左右。在这次层状云降水过程中的第 1 个时间段中,大面积较均匀的层状云降水开始移近雷达站,所以在这一时间段的开始时期的 E_{FS} 值较小;而第 2 时间段,雷达回波图上显示,雷达周围 50 km 半径范围内的大面积的层状云降水渐渐消散,并开始移出该区域,所以在此时间段的 E_{FS} 值有所增大,甚至出现 E_{FS} 值达到 115%。

用张亚萍等^[6]的结论,近距离采用 3.35° 仰角,随距离增加逐渐采用较低仰角,仰角转换发生在 19.30 和 67 km 处。本文进行降水估算精度对比的雨量计,一个距离雷达 45 km,一个距离雷达 27 km。分别计算 2004 年 6 月 18 日 16—17 时和 17—18 时的一次以层状云降水为主过程的相对标准误差 FSE。在此次层状云降水的第 1 时段,与实际雨量计对比, FSE 偏差最大为 509.9%,最小为 105.4%;在第 2 时段, FSE 偏差最大为 105.4%,最小为 5%。由于本文研究区域为距离雷达站较近区域,而张亚萍等^[6]没有考虑雷达站周围高大建筑物的影响,这可能是引起 FSE 值偏大的主要原因。由此可见,本文所用方法对距离雷达 50 km 以内的雷达波束阻挡方面的降水估计误差小,对估测大面积、不是十分均匀的层状云降水效果较好。

3 小结

利用在降水过程中每个体扫获取的距离雷达 50 km 半径范围内的雷达平均反射率因子垂直廓

线,对于该过程中对应时间段的地物阻挡区域的降水估计,在大面积不太均匀的层状云降水过程中,雷达波束被阻挡区域的每 6 min 的降水估计误差值都比较小。由于本文试验的样本有限,尚需更多数据对本方法进行检验和完善。

参考文献:

- [1] 戴铁丕,袁招洪,王自发,等.用 CAPPI 的资料估算区域降水量和雷达反射率因子垂直廓线初探[J].南京气象学院学报,1995,18(1):119-125.
- [2] 顾松山,张培昌,孙海冰,等.雷达定量估测区域降水量的外场试验流程[C]//中国气象学会大气专业委员会大气探测论文集.北京:中国气象学会,1994:56-65.
- [3] 周彪,纪会英,汤达章.雷达定量测量区域降水量的试验研究[J].南京气象学院学报,1998,21(1):152-159.
- [4] 何宇翔,张亚萍,刘术艳,等.天气雷达定量估测降水量不同方法效果评估[J].南京气象学院学报,2004,27(6):743-752.
- [5] 邵玲玲,黄炎.WSR-88D 雷达降水产品的优化[J].气象,2004,30(5):24-29.
- [6] 张亚萍,刘钧.雷达定量估测区域降水波束阻挡系数的计算[J].南京气象学院学报,2002,10(5):640-647.
- [7] Koistinen J. Operational correction of radar rainfall errors due to the vertical reflectivity profile[C]//25th Int Conf of Radar Meteor. Boston: AMS, 1991:91-94.
- [8] Joss J, Lee R. The application of radar-gauge comparisons to operational precipitation profiles corrections[J]. J Appl Meteor, 1995,34(12):2612-2630.
- [9] Germann U, Joss J. Mesobeta profiles to extrapolate radar precipitation measurements above the Alps to the ground level[J]. J Appl Meteor, 2002,41(5):542-557.
- [10] Andrieu H, Creutin J D. Identification of vertical profiles of radar reflectivity for hydrological applications using an inverse method: I -Formulation[J]. J Appl Meteor, 1995,34(1):225-239.
- [11] Vignal B, Andrieu H, Creutin J D. Identification of vertical profiles of reflectivity from volume scan radar data[J]. J Appl Meteor, 1999,38(8):1214-1228.
- [12] 杜秉玉,高志球.雷达反射率因子垂直廓线研究和多种遥感资料综合估计降水[J].南京气象学院学报,1998,12(4):729-736.
- [13] 史锐,程明虎,崔哲虎,等.用反射率因子垂直廓线联合雨量计校准估测夏季区域强降水[J].应用气象学报,2005,16(6):737-745.
- [14] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2001:122-123.
- [15] Vignal B, Galli G, Joss J, et al. Three methods to determine profiles of reflectivity from volumetric radar data to correct precipitation estimates[J]. J Appl Meteor, 2000,39(10):1715-1726.

(责任编辑:倪东鸿)