

新一代天气雷达背景场特征资料生成方法及检验

王琳¹, 谭学², 郑文¹, 戚建国¹, 刘铁林³

(1. 水利部水文局, 北京 100053; 2. 成都锦江电子系统工程有限公司, 四川 成都 610051;
3. 江西省水文局, 江西 南昌 330002)

摘要:地形对波束遮挡是影响雷达观测资料质量的重要误差源之一。国家防汛抗旱指挥系统二期工程建设了天气雷达应用系统, 系统利用新一代天气雷达背景场特征资料客观分析技术计算出雷达站周围环境对雷达波束造成遮挡影响的背景场特征资料(挡角图、等射束高度图和波束遮挡能量耗损率图)。详细介绍了新一代天气雷达背景场特征资料计算原理和方法, 并提出利用雷达回波概率特征方法, 将计算出的背景场特征资料与不同仰角雷达回波统计的概率空间分布进行对比分析, 验证了新一代天气雷达背景场特征资料的正确性, 为后期雷达波束能量遮挡进行定量订正提供依据。

关键词:天气雷达; 挡角; 等射束高度; 波束遮挡

中图分类号: P412.25

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2016)01-0027-05

1 引言

防汛抗旱业务工作需要及时准确的实况降水量, 地面雨量计观测降水量是目前常用的方法, 一般用一个雨量计观测的降水量值来代表几十~几百平方公里范围的降水量。由于真实的降水量场在空间分布上是不连续的、非线性的, 因此用雨量计观测值来代表一定范围降水量有较大局限性。某一区域内由多个雨量计组合观测得到降水量场是一个离散点数据场, 通常用插值或算数平均的方法来计算区域面平均降水量, 也存在较大的误差。中国气象局布网的新一代天气雷达(CINRAD)能够通过雷达回波反演计算出雷达扫描范围内(半径 150~300km)的降水量场, 其空间分辨率能达到 1km×1km, 能够有效弥补地面雨量计的观测局限, 为洪水预报提供较为精确的区域面降水量。由于雷达探测能力不仅受雷达参数、各种衰减、折射和降水云性质等因素的影响, 也受到雷达站四周高大建筑物、地形(如山脉)的影响, 为提高雷达估算降水量的精度, 需要分析晴空条件下雷达波束被地物遮挡影响的程度, 利用高分辨率地形数据计算雷达等射束高度图、挡角

图和能量耗损率等雷达背景场特征数据, 才能有效提高雷达基数据质量控制精度, 为精确估算降水打好基础。

一些专家分析地形对雷达波束的影响, 如法国的 Delrieu 等人^[1-2]结合 DTM(Digital Terrain Model)数据和雷达性能参数模拟雷达不同仰角 PPI 探测时的阻挡系数; 美国的 O'Bannon^[3]应用 DTM 数据, 建立起每部雷达的混合扫描查阅表(Hybrid Scan Look-up Table), 并以此为参考选择降水反射率因子, 这种方法作为美国 NMQ(National Mosaic and Multi-Sensor Quantitative Precipitation Estimation)系统^[4]的预处理步骤, 用以剔除明显遮挡效应的雷达径向数据, 提高雷达观测资料的质量; Bech^[5]则融合了探空中的温度、湿度、气压廓线资料, 模拟计算雷达波束阻挡系数。

国内, 中国气象局对天气雷达站址规定, 要求在雷达主要探测方向上(降水过程主要来向)的遮挡物对雷达波束的遮挡仰角不应大于 0.5°, 其它方向遮挡仰角一般不应大于 1°^[6]; 邓志等^[7]介绍了雷达等射束高度图的制作方法, 为单部雷达建站选址提供了依据; 万玉发等^[8]设计了利用地形高程数据绘制雷达单站的遮挡角

收稿日期: 2015-03-10

作者简介: 王琳(1972-), 男, 安徽萧县人, 理学士, 高级工程师, 副处长, 主要从事水文气象预测预报业务与业务系统建设开发工作。E-mail: wanglin@mwr.gov.cn

图、等射束高度图的软件和多个雷达站的等射束高度拼图,为分析和评价候选站雷达有效视程和相关雷达网共同覆盖以及定量应用雷达资料提供了客观依据;张亚萍等^[9]提出计算雷达波束阻挡系数的平均值距离库填充法,并对平均值距离库填充法和最大值距离库填充法进行了比较;杨洪平等^[10]利用高分辨率地形高程数据计算波束阻挡率,并分析组网拼图有效数据区域以及波束部分阻挡时的回波强度订正方法,但并未考虑雷达的双重效应。以上工作并没有实际回波验证。随着雷达拼图工作的开展^[11-13],分析雷达波束阻挡情况变得更加重要。

本文首先介绍了计算三种背景场特征资料的原理和方法,提出利用雷达回波概率特征方法,以北京CINRAD/SA雷达为样本,统计该雷达不同仰角层的回波概率空间分布,并与背景场特征资料进行对比分析验证。

2 资料来源

本文使用的数字地形高度资料是航天飞机雷达地形测绘数据(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)3S数据,简称SRTM3。其中径向分辨率和纬向分辨率均为 0.0008333° ,以经度差 1.5° 、纬度差 1° 作为单元数据存储。每个单元数据包含文件头信息和高程数据矩阵,其中文件头信息包含左下角坐标、分辨率、行列数等信息,高程数据矩阵包含文件头所确定的网格范围每一个网格点上的高程值(以米为单位)。

雷达资料所选个例数据为北京CINRAD/SA雷达观测的原始体扫数据。

3 背景场特征资料生成原理与方法

3.1 雷达地形数据处理

从等经纬度网格存储的SRTM数据块中读取雷达站四周地形的海拔高度,以雷达站经纬度位置为中心,合成雷达四周极坐标地形分布。考虑到雷达波束有一定宽度,落到一个距离库中的所有高程值随着距离增大逐渐增多,本文采用了平均值距离库填充法,即当多个SRTM数据处在一个雷达地形坐标上时,该雷达地形坐标上的高度值取多个SRTM数据的平均值。

采用等效地球模式对雷达仰角和传播距离(见图1)进行简化计算。其中,O点为雷达天线反射体位置,其海拔高度为 h_r ;D点为等效地球体的中心位置,其等效地球半径为 R_m ;A点为雷达四周任一遮挡点,即任

一方位、距离上的雷达极坐标地形数据位置,其海拔高度为 h ,离雷达地表的水平距离为 S ,即B点到C点的距离; S_Z 为雷达天线上空高度 Z 处的水平探测距离; β_m 为等效地心角。其中, $\beta_m = \beta / k_m$, β 为地心角,且 $\beta = S / R_e$; $R_m = k_m R_e$, R_e 为地球半径,取值6371.1km, k_m 为等效地球半径系数,取标准大气 $k_m = \frac{4}{3}$ 。

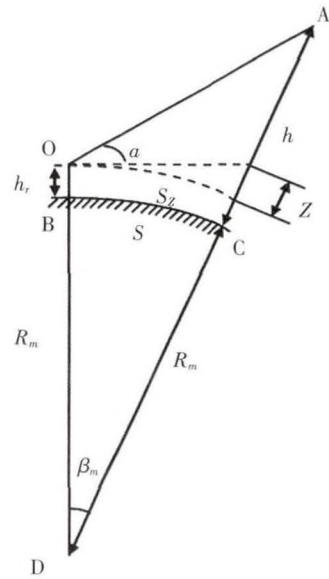


图1 等效地球体中雷达射线示意图
Fig.1 The radar ray in equivalent geoid

3.2 挡角图数据计算方法

挡角图表示雷达发射的波束不被四周地物遮挡的最小探测仰角。为了直观显示周边地形对天气雷达波束的遮挡情况,选取以雷达站为中心、每个方位上地形对雷达波束的最大遮挡仰角组成了挡角图数据。

其中遮挡仰角 α 的弧度值为:

$$\alpha = \arctg \left[\frac{(k_m R_e + h) \cos(\beta_m) - (R_m + h_r)}{(R_m + h) \sin(\beta_m)} \right] \quad (1)$$

3.3 等射束高度图计算方法

等射束高度图表示雷达站上空某一高度平面上,雷达波束能够探测的最大范围。根据雷达站四周地形和地物的阻挡作用,假设在标准大气折射条件下,绘制出各方向上雷达波束中心轴线能够到达某一规定高度的最大探测距离的连线图(绘制出雷达波发射径向上各方向波束中心轴线能够到达某一规定高度的最大探测距离的连线图,就称为等射束高度图,也称为雷达有效地理视距图。为了直观显示天气雷达的降水可探测范围及不同可信度区域,等射束高度图选取雷达天线

上空 1km、2km 和 3km 三个高度平面, 分别对应于雷达测量降水可信度由近及远的高、中和低三个区域。

如图 1 所示, 根据每个方位、距离上的遮挡仰角计算探测高度面上的水平距离 S_z , 选取在等高面上, 无遮挡的最大水平探测距离作为该方位的等射束高度边界。其中计算遮挡仰角 α 时, 由于 R_m 远远大于 h_r , 所以雷达天线上空高度 Z 处的水平探测距离 $S_z \approx S$ 。即水平探测距离 S_z 为:

$$S_z = \left[\arccos\left(\frac{R_m+h_r}{R_m+h_r+Z} \cos\alpha\right) - \alpha \right] R_m \quad (2)$$

3.4 波束阻挡率计算方法

常规天气雷达均采用了圆口径抛物面天线, 大部分电磁波能量集中在一个很窄的波束范围内朝一定方向辐射, 具有高度方向性, 也占据一定空间。当电磁波传播空间在某处存在地物时, 波束能量受到地物遮挡, 只有部分电磁波能量向远方传播, 导致远处有效照射体积变小, 回波强度测量值偏低; 如果地物阻挡能量超过一定的百分比值, 可导致远处回波强度无法测量。

根据雷达气象方程, 在距离 R 处无遮挡时, 气象目标物的回波功率为 P_r :

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{h}{2R^2} \eta \int_{\Omega} |f(\theta, \phi)|^4 d\Omega = k_0 A \frac{Z}{R^2} \quad (3)$$

式中: $k_0 A$ 一般称为雷达常数; $f(\theta, \phi)$ 为天线方向图函数, θ, ϕ 是以天线最大辐射方向 (即波束中心轴线方向) 为基准的水平 and 垂直坐标; $d\Omega = d\phi d\theta$ 为与天线最大辐射方向正交面元的立体角。

$$A = \int_{\Omega} |f(\theta, \phi)|^4 d\Omega = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |f(\theta, \phi)|^4 d\phi d\theta \quad (4)$$

若遮挡物在 θ 方位对雷达形成的遮挡角为 $a(\theta)$, 那么 A 值中遮挡部分的积分值 A_1 为:

$$A_1 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{a(\theta)} |f(\theta, \phi)|^4 d\phi d\theta \quad (5)$$

波束遮挡能量耗损率 ρ 的定义为 A_1 在 A 中所占的百分比, 即

$$\rho = \frac{A_1}{A} = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{a(\theta)} |f(\theta, \phi)|^4 d\phi d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |f(\theta, \phi)|^4 d\phi d\theta} \quad (6)$$

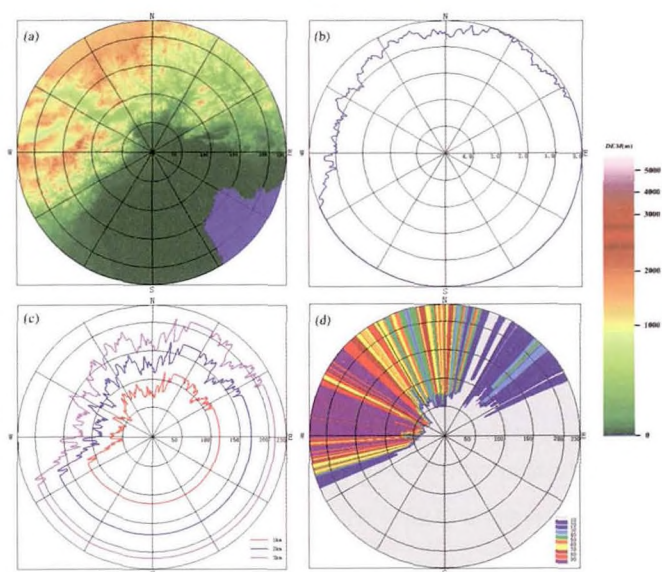
地物对雷达电磁波的遮挡情况分为部分遮挡和完

全遮挡。完全遮挡时, 雷达基本探测不到遮挡物之后目标物的回波强度; 部分遮挡时, 实际采样体积比相同距离上无遮挡时的采样体积小, 雷达探测的回波强度值偏低, 可以通过该方法加以订正。

4 计算样例分析

4.1 背景场特征资料分析

以北京 CINRAD/SA 雷达为例, 利用上述计算方法生成挡角图、等射束高度图和一系列的波束遮挡能量耗损率图, 如图 2 所示。



(a) 极坐标地形图(蓝色为海面) (b) 挡角图
(c) 等射束高度图 (d) 0.5°仰角层波束遮挡能量耗损率图
图 2 北京雷达背景场特征资料
(a) The terrain in polar coordinates (blue shows the sea area);
(b) The barricaded elevation;
(c) The equivalent beam range at the same height;
(d) The beam blockage coefficient at 0.5° elevation
Fig.2 The background field feature data of the Beijing radar

从图 2a 可以直观看到雷达站四周地形, 该雷达的西北方位(250°~360°)有大片山脉, 海拔高度基本都在 1 000m 以上; 在 90°到 240°左右区域地势较为平坦, 海拔高度基本都在 100m 以下。图 2b 可知, 遮挡最为严重是该雷达的西北方位(250°~360°), 这是由西南-东北走向的山脉所致; 其次, 在东北方位(30°~60°)也有山脉对雷达波束产生遮挡; 其余方位的最大遮挡仰角都基本为 0°, 说明这些方位基本不受地物遮挡影响。从图 2c 可知, 雷达探测能力最弱的区域是西北区域, 这个区域雷达上空 1km 高度的水平探测最大距离

仅有 50km,3km 高度的水平探测最大距离也仅有 75km,其余方位的雷达探测能力比较好。等射束高度图中,在雷达有效探测范围外,可以近似看作探测盲区,与挡角图比较,它能够更直接地反映雷达站四周地物阻挡对雷达探测能力的影响。其中挡角图和等射束高度图直观反映了雷达站周边自然地表对雷达波束传播的影响,是天气雷达选址的重要依据,也是实现高精度雷达回波质量控制的重要基础信息。图 2d 可知:雷达在 0.5°仰角层时,250°~360°区域有很大的波束能量耗损率值,这与极坐标地形图、挡角图及等射束高度图能较好的对应;而且根据波束能量耗损率的大小对雷达回波强度进行波束遮挡订正,可以提高雷达定量估测降水的精度。

4.2 波束遮挡能量耗损率数据客观分析

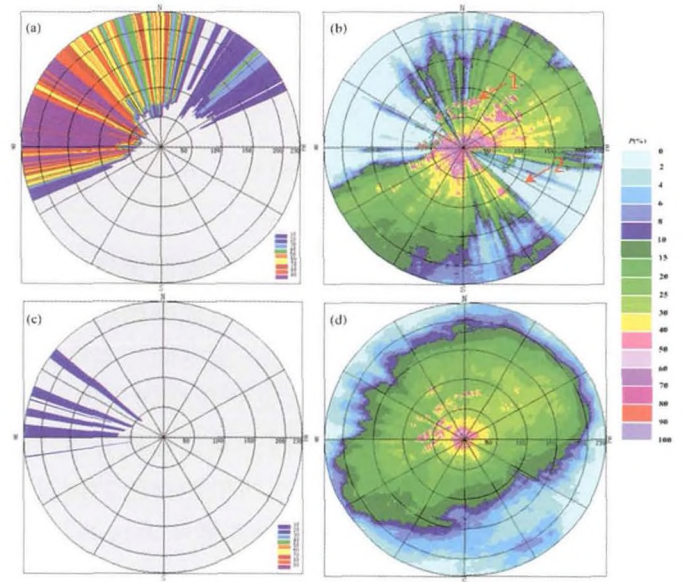
为了检验波束遮挡能量耗损率的可信度,本文使用实际的雷达回波资料进行样本统计并进行对比。以北京 CINRAD/SA 雷达观测的基数据建立一个样本数据集,共 1 679 个体扫资料,包含 2014 年 6 月 16~18 日降水过程,720 个体扫资料;2014 年 8 月 12~13 日降水过程,479 个体扫资料;2014 年 9 月 1~2 日降水过程,480 个体扫资料。利用公式(7)可以统计得到雷达探测范围内每个距离库出现大于阈值 $Z(10\text{dBZ})$ 的反射率因子的概率空间分布,如图 3 所示。

$$P(\alpha, r) = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Counter}(Z_i(\alpha, r) > Z_{\text{threshold}})}{N} \quad (7)$$

式中: $Z_{\text{threshold}}$ 为算法设置的阈值; $Z_i(\alpha, r)$ 为第 i 个样本在极坐标 (α, r) 上的反射率因子; Counter 为计算器。连续 N 个样本,可以统计得到雷达探测范围内每个距离库大于阈值 Z 的概率空间分布 $P(\alpha, r)$ 。

由图 3b 可知,在 0.5°仰角层时,由于地物一直存在,所以箭头 1 指向区域的概率值较大;在 105°~135°和 260°~310°方位区域概率分布几乎接近于 0,基本属于严重遮挡区域或完全遮挡区域;在 135°~170°、330°~10°等方位概率值偏小,但不接近于 0,说明这些区域属于部分遮挡区域;剩余方位区域基本为无遮挡区域。但结合图 3a 发现,在东南方向(90°~170°)区域波束遮挡能量耗损率接近 0,基本属于无遮挡区域,与概率空间分布图中箭头 2 指向区域比较,明显不一致,从实际周围环境查看,该区域属于建筑物遮挡。除此之外,波束遮挡能量耗损率图与实际雷达回波资料统计的概率空间分布有很好的一致性。

由图 3c 可知,在 1.4°仰角层时,在蓝色区域的方向有部分遮挡,与图 3d 中概率空间分布的凹型区域基本对应一致;同时也发现,受到建筑物遮挡的东南方位,在 1.4°时雷达波束也受到了一定的遮挡。



(a) 0.5°仰角波束遮挡能量耗损率图
 (b) 0.5°仰角雷达回波的概率空间分布(阈值 10dBZ)
 (c) 1.4°仰角波束遮挡能量耗损率图
 (d) 1.4°仰角雷达回波的概率空间分布(阈值 10dBZ)

图 3 北京 CINRAD/SA 雷达
 (a) The beam blockage coefficient at 0.5°elevation;
 (b) The statistical probability distribution of radar echo at 0.5° elevation; (c) The beam blockage coefficient at 1.4°elevation; (d) The statistical probability distribution of radar echo at 1.4°elevation
 Fig.3 Beijing CINRAD/SA radar

5 结论

本文详细介绍了新一代天气雷达背景场特征资料生成原理和方法,并提出利用雷达回波概率特征方法,通过建立北京 CINRAD/SA 雷达样本数据集,统计得到在不同仰角层的概率空间分布,并与背景场特征资料进行对比检验及分析,结果表明:

(1)通过实际雷达回波的对比检验分析,依靠数字地形高度数据,自动绘制雷达背景场特征资料与实际雷达回波资料统计的概率空间分布有很好的一致性。充分说明了新一代天气雷达背景场特征资料能够直观反映雷达站周边自然地表对雷达波束传播的影响,可以用于对雷达波束能量遮挡进行定量订正,提高雷达基数据的质量控制精度,也可以作为天气雷达选址的重要依据。

(2)利用数字地形高度数据计算的背景场特征资

料只能反映地形的遮挡,不能真实反映实际周围建筑物等的影响,而市区的雷达会受到高大建筑物的影响,所以后期将地形数据和建筑物数据进行叠加处理,可进一步分析雷达波束遮挡的影响。

参考文献:

- [1] Delrieu, G., J. D. Creutin, H. Andrieu. Simulation of radar mountain returns using a digitized terrain model[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1995,12:1038-1049.
- [2] Delrieu, G., S. Caoual, J. D. Creutin. Feasibility of using mountain return for the correction of ground-based X-band weather radar data [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1997,14:368-385.
- [3] O'Bannon, T. Using a terrain-based hybrid scan to improve WSR-88D precipitation estimates[A]. Preprints, 28th Conf. on Radar Meteorology[C]. Austin, TX, Amer. Meteor. Soc., 1997:506-507.
- [4] Zhang, J. Coauthors. National mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system: description, results, and future plans [J]. *Amer. Meteor. Soc.*, 2011,92:1321-1338.
- [5] Bech J, Gjertsen U, Haase G. Modelling weather radar beam propagation and topographical blockage at northern high latitudes[J]. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 2007b,133:1191-1204.
- [6] 中国气象局. 新一代天气雷达观测规定 [S]. 北京: 中国气象局, 2005. (China Meteorological Administration. A New Generation of Weather Radar Observation Rules [S]. Beijing: China Meteorological Administration, 2005. (in Chinese))
- [7] 邓志, 刘文文. 雷达等射束高度图制作方法 [J]. *气象*, 1999,25(11):47-49. (DENG Zhi, LIU Wenwen. Drawing radar chart with iso beam height[J]. *Meteorological Monthly*, 1999,25(11):47-49. (in Chinese))
- [8] 万玉发, 杨洪平, 肖艳娇, 等. 多普勒天气雷达站址视程的客观分析技术[J]. *应用气象学报*, 2000,11(4):440-447. (WAN Yufa, YANG Hongping, XIAO Yanjiao, et al. An objective method for analyzing the horizon of Doppler weather radar stations [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2000,11(4):440-447. (in Chinese))
- [9] 张亚萍, 刘钧, 夏文梅, 等. 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*, 2002,25(5):640-647. (ZHANG Yaping, LIU Jun, XIA Wenmei, et al. The calculation of beam blockage coefficients in estimating regional precipitation with radar [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2002,25(5):640-647. (in Chinese))
- [10] 杨洪平, 张沛源, 程明虎, 等. 多普勒天气雷达组网拼图有效数据区域分析[J]. *应用气象学报*, 2009,20(1):47-55. (YANG Hongping, ZHANG Peiyuan, CHENG Minghu, et al. The valid mosaic data region of the CINRAD network [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009,20(1):47-55. (in Chinese))
- [11] 肖艳娇, 刘黎平. 新一代天气雷达组网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. *气象学报*, 2006,64(5):647-657. (XIAO Yanjiao, LIU Liping. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006,64(5):647-657. (in Chinese))
- [12] 张志强, 刘黎平, 王红艳, 等. 华北区域四部雷达探测强度与定位一致性分析[J]. *气象*, 2008,34(9):23-27. (ZHANG Zhiqiang, LIU Liping, WANG Hongyan, et al. Analysis on the consistency of intensity and positioning in four radars of north China [J]. *Meteorological Monthly*, 2008,34(9):23-27. (in Chinese))
- [13] 杨杰, 刘黎平, 勾亚彬. 影响浙江地区降水估测几个因素的分析[J]. *气象*, 2014,40(5):589-597. (YANG Jie, LIU Liping, GOU Yabin. Analysis of several factors affecting precipitation estimate in Zhejiang [J]. *Meteorological Monthly*, 2014,40(5):589-597. (in Chinese))

Verification of Background Field Feature Data of CINRAD

WANG Lin¹, TAN Xue², ZHENG Wen¹, QI Jianguo¹, LIU Tielin³

(1. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China; 2. CECJinjiang Info, Industrial CO., LTD., Chengdu 610051, China; 3. Hydrology Bureau of Jiangxi Province, Nanchang 330002, China)

Abstract: The terrain fluctuation is one of the most important error sources of radar observation, which will cause the data distortion at and behind the observing site on the radar beam path. The second-stage National Flood Control and Drought Relief Command System Project constructed weather radar application system. A method for analyzing objectively the weather radar stations can calculate and display the barricaded elevation map, the equivalent beam range map at the same height and the beam blockage coefficient map. This paper introduced computing principles and methods for background field feature data of CINRAD. An algorithm was developed to compute probability distribution of radar echo. By comparing and analyzing the background field feature data and different elevation statistical probability distribution of radar echo, it verified the correctness of background field feature data of CINRAD. In the next step, which will provide the basis for quantitatively correction of the beam blockage region.

Key words: weather radar; barricaded elevation; beam range at the same height; beam blockage