

基于天气雷达网三维拼图的混合反射率因子生成技术^{* 1}

肖艳姣^{1,2} 刘黎平² 杨洪平¹
XIAO Yanjiao^{1,2} LIU Liping² YANG Hongping¹

1. 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

1. *Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074, China*

2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2007-01-31 收稿, 2007-04-06 改回.

Xiao Yanjiao, Liu Liping, Yang Hongping. 2008. Technique for generating hybrid reflectivity field based on 3-D mosaicked reflectivity of weather radar network. Acta Meteorologica Sinica, 66(3): 470-473

Abstract Understanding the extent to which a radar view is blocked by surrounding obstacles plays an important role in the proper interpretation of reflectivity data, especially in the lowest antenna elevation angles, which provide the most useful information for rainfall rate estimation at ground level. A terrain-based hybrid scan of lowest radar beams that are not significantly blocked by terrain is one of the most important approaches to improve the precision of rainfall estimates. The purpose is to generate hybrid reflectivity field used for precipitation rate calculation from 3-D mosaicked reflectivity field of radar network with high spatial and temporal resolutions. First of all, beam occultation, which is the percent of the radar beam power lost due to beam blockage, is calculated using an algorithm that uses high resolution DEM (digital elevation model) data, radar beam pattern or power density function (Gaussian beam approximation), and radar beam propagation path (assuming radar beams propagate under standard atmospheric refraction conditions). The algorithm begins by remapping Cartesian DEM data to a high-resolution polar grid centered on a specified radar location. This high-resolution grid is user defined and used to perform beam occultation calculation. Here, a high grid resolution of $0.1^\circ \times 250$ m is the default setting. Comparison of model-calculated beam occultation with radar observations indicates very good qualitative agreement and strongly quantitative correlation. Secondly, hybrid elevation angles are generated using thresholds for beam bottom clearance (default 150 m) and occultation (default 60%), which define the criteria for a hybrid elevation angle, which is the lowest angle satisfying both requirements. Beam bottom clearance is the height that a radar beam's bottom passes above the terrain. To compute the hybrid elevation angle, the elevation angle of a beam that clears the terrain by the beam bottom clearance threshold is calculated. The beam occultation is calculated using the elevation angle as a first guess. If the occultation is less than the threshold (60%) then the hybrid elevation has been found. Otherwise, the elevation angle is increased and the beam occultation calculation is performed again. The elevation angle will be adjusted unceasingly in an iterative process (at interval of 0.1°) until finding the hybrid elevation angle. The algorithm is independent of radar types and of radar scan strategies. According to hybrid elevation angle, operational hybrid elevation angle and hybrid scan reflectivity are obtained from volume scan radar data. Then, the standard refractive index beam heights (4/3 earth) are calculated for hybrid elevation angles for every radar in radar network, which are combined to produce a mosaicked beam height map. For the grid cell with multiple radar coverage, the minimum beam height is to be taken. Finally, the hybrid reflectivity field based on the mosaicked beam height field and 3-D mosaicked reflectivity field of radar network is obtained, which is used for rainfall rate estimation at ground level.

Key words Beam occultation, Hybrid elevation angle, Mosaicked iso-beam height map, 3-D mosaic, Hybrid reflectivity

^{*} 资助课题: 国家重大基础研究项目(2004CB418305)和武汉区域气象中心科技发展基金课题(QY-Z-200706)。

作者简介: 肖艳姣, 主要从事雷达探测技术研究。E-mail: yanjiao.xiao@163.com

摘要 首先基于 1:25 万的 DEM(digital elevation model)数据、雷达站点信息、雷达波束高斯分布模式和标准大气情况下的波束传播路径计算了雷达的波束阻挡率,并把它与雷达实测的反射率因子分布情况进行比较,发现两者具有很好的定性一致性和很强的定量相关性;其次根据设置的波束阻挡率阈值和波束下限(波束底部越过地形的高度)阈值得到不受地形阻挡的最小扫描仰角在同一平面上的投影,即混合扫描仰角,这样计算出来的混合扫描仰角与雷达扫描方式无关,可用于不同扫描方式下的混合扫描反射率因子(没有波束阻挡的最低扫描仰角的反射率因子在同一平面上的投影)的获取;然后根据混合扫描仰角,利用标准大气情况下的雷达测高公式计算等射束高度,把来自雷达网中各雷达的等射束高度进行拼接得到等射束高度拼图,其中在各雷达重叠覆盖区,取最小的等射束高度;最后利用新一代天气雷达网三维拼图反射率因子数据以及等射束高度拼图数据得到天气雷达网的混合反射率因子,以便用于大范围降水估算算法中的降水率的计算。

关键词 波束阻挡,混合扫描仰角,等射束高度拼图,三维拼图,混合反射率因子

中图法分类号 P412.25

1 引言

在复杂地形地区,天气雷达常常受到四周地形引起的波束阻挡,这严重影响了低仰角扫描数据的使用,特别敏感的例子是雷达估算地面降水(Kitchen 等, 1994; Westrick 等, 1999; Pellarin 等, 2002)。不少学者研究过地形对雷达波束的阻挡(张亚萍等, 2002; Kucera 等, 2004; Krajewski 等, 2006)。美国国家强风暴实验室开发了一个自动混合扫描算法,用于单站雷达降水估算中(Fulton 等, 1998)。但是单站雷达在天气监测和预报能力方面有很多局限性,肖艳姣(2006)对这些局限性进行过分析,并对天气雷达网的三维拼图技术进行了研究。为了进一步开发应用雷达网三维拼图反射率因子数据,我们将从中提取用于降水估算的混合反射率因子。本文首先基于 1:25 万的 DEM 数据计算雷达波束阻挡率,得到混合扫描仰角;然后根据标准大气情况下的雷达测高公式,利用各个雷达的混合扫描仰角得到雷达网的等射束高度拼图;最后利用三维拼图反射率因子数据以及等射束高度拼图数据得到雷达网混合反射率因子,以便用于雷达网降水估算。

2 资料来源和预处理

地形高度数据来自国家测绘局的全国 1:25 万的 DEM 规则网格模型的 E00 格式资料。由于雷达是以极坐标方式扫描,波束阻挡是仰角、方位和斜距的函数,为了研究波束阻挡,需要把 DEM 数据重绘到以雷达为中心的极坐标格点上。用于获得混合反射率因子的三维拼图反射率因子数据来自经过质量控制后的合肥、宜昌、武汉、常德和长沙雷达网资料,三维拼图过程参见肖艳姣等(2006)的文章。

3 波束阻挡率

雷达波束被地形等障碍物阻挡的程度可用波束阻挡率来描述,它被定义为有效照射体积(波束)内因地形等障碍物阻挡而损耗的功率比。功率损耗与雷达功率密度函数有关,它是一个高斯分布函数,地形对波束中间部分的阻挡比对波束外部的阻挡更加减少波束功率。使用 DEM 数据,通过积分障碍物阻挡区投影到方位和仰角方向的波束就可计算波束阻挡率。高斯波束模式根据高斯分布的形状和特性为积分提供权重,波束阻挡率的具体算法参见文献(张亚萍等, 2002)。

以多个雷达站为例,对比分析了用 DEM 数据计算出来的波束阻挡率和实测的反射率因子 PPI 受阻挡的程度(图略),结果表明二者具有很好的定性一致性和很强的定量相关性。这说明用高分辨率的 DEM 数据、雷达波束高斯分布模式以及标准大气情况下的波束传播路径来计算波束阻挡率基本上是合理的。此外,需要注意的是:雷达波束的传播是由大气条件的垂直结构来确定的,而与大气的温度、气压和湿度有关的大气条件每时每刻都在变化,常常偏离标准大气,因而,实际的波束阻挡与用标准大气条件计算出来的理论波束阻挡或多或少会有一定的差异。例如,在一定的大气条件下,雷达波束会向地面弯曲,从而使实际的波束阻挡大于用标准大气条件计算出来的理论波束阻挡。

4 混合扫描仰角

所谓混合扫描仰角是指波束阻挡率小于给定的波束阻挡阈值 T 。(缺省阈值为 60%)并且波束底部越过地形的高度大于给定的波束下限阈值 T_b (缺省阈值为 150 m)的最低可用观测仰角。在计算混合

扫描仰角时,对于每个距离库,首先计算位于地形高度之上 T_b 所在处对应的仰角,以这个仰角作为第一猜值开始计算波束阻挡率,如果波束阻挡率小于 T_0 ,那么混合扫描仰角被找到。否则,把仰角以 0.1° 的步长向上递增,重复计算波束阻挡率,直到找到满足条件的仰角为止。

这样计算出来的混合扫描仰角与雷达扫描方式无关,可用于不同扫描方式下的业务动态混合扫描仰角和混合扫描反射率因子的获取。所谓业务动态混

合扫描仰角是指雷达在业务运行中在各距离库上大于等于混合扫描仰角的最小扫描仰角在同一平面上的投影。混合扫描反射率因子是指各距离库上业务动态混合扫描仰角上的反射率因子在同一平面上的投影。图 1 给出了宜昌雷达的混合扫描仰角(图 1a)和 2004 年 7 月 17 日 00:50 UTC 在 VCP21 扫描方式下的业务动态混合扫描仰角层(图 1b),所谓仰角层是指从最低仰角开始向上的第几个仰角,仰角越大,说明雷达波束受地形等障碍物的阻挡越严重。

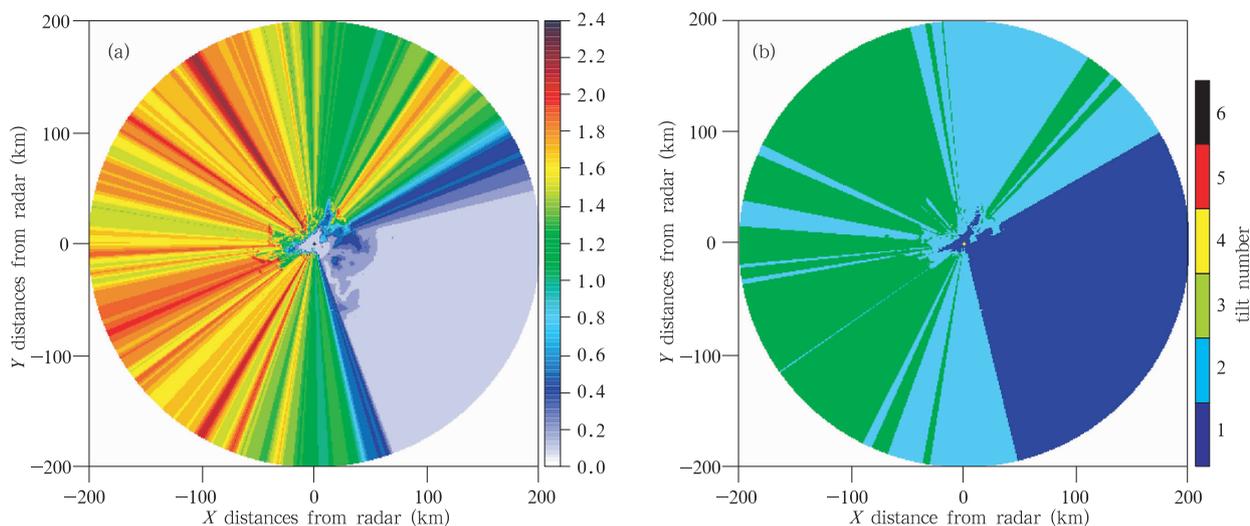


图 1 宜昌雷达混合扫描仰角(a)和 2004 年 7 月 17 日 00:50 UTC 的业务动态混合扫描仰角层(b)

Fig. 1 Hybrid scan elevation angles (a) and operational hybrid scan tilt numbers at 00:50 UTC 17 July 2004 for Yichang radar (b)

5 雷达网的等射束高度拼图和混合反射率因子

由业务动态混合扫描仰角得到的混合扫描反射率因子可用于单站雷达降水估算算法中的降水率的计算。但是要从雷达网的三维拼图反射率因子数据中提取用于降水估算的混合反射率因子,就需要进一步了解雷达网的探测能力,也就是要得到雷达网的等射束高度拼图。

在复杂地形地区,天气雷达常常遭受四周地形引起的波束阻挡。为了正确使用、分析雷达资料,具体地、定量地了解雷达站在各个方向的探测能力很有必要。等射束高度图就是为这个目的提出来的(张培昌等,2001)。它是在一定折射条件下,考虑测站四周地形等障碍物阻挡,绘出的各个方向上、各种斜距下波束中心轴线能够到达的最低高度等值线图。在已知雷达站混合扫描仰角的情况下,根据标

准大气情况下的雷达测高公式就可以计算等射束高度。鉴于等射束高度是由混合扫描仰角得到,我们也把它称为混合扫描高度。雷达站海拔高度越高,波束受地形阻挡越严重,那么波束到达同一高度的距离就越近。等射束高度拼图(也称为混合扫描高度拼图)可由雷达网中各雷达的等射束高度图拼接得到,其中在各雷达重叠覆盖区,取最小的等射束高度。图 2 给出了由合肥、宜昌、武汉、常德和长沙雷达构成的区域雷达网的等射束高度拼图,它反映了区域雷达网探测最低高度降水的能力,低于混合扫描高度的降水区因波束阻挡不能被雷达网探测到或被探测到的回波强度明显偏弱。

为了进一步开发应用雷达网三维拼图反射率因子数据,我们将从中提取用于降水估算的混合反射率因子。混合反射率因子是把三维拼图反射率因子数据中所有单位柱体内高度大于等于混合扫描高度的最低高度的反射率因子投影到一个平面上得到

的。图3给出了由合肥、宜昌、武汉、常德和长沙等5部雷达构成的区域雷达网2004年7月17日16:30 UTC的混合反射率因子。低于混合扫描高度的反射率因子数据因地物造成的雷达波束阻挡而偏小,因而不能用于降水估算。基于雷达网的三维拼图反射率因子数据的混合反射率因子的获取是减小雷达波束受地物阻挡影响,提高雷达网降水估算精度的重要步骤之一。

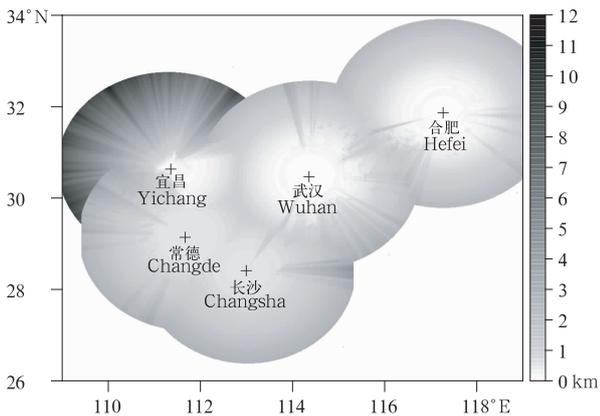


图2 区域雷达网的等射束高度拼图
Fig. 2 The composite image of iso-beam height of regional radar network

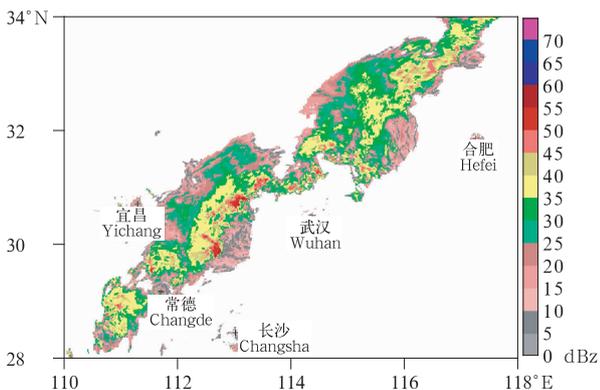


图3 基于区域雷达网三维拼图反射率因子数据的混合反射率因子
Fig. 3 The hybrid reflectivity based on 3-D mosaicked reflectivity field of regional radar network

6 结论

(1) 基于1:25万的DEM数据、雷达波束高斯分布模式以及标准大气情况下的波束传播路径计算出来的雷达波束阻挡率和雷达实测的反射率因子PPI被阻挡程度具有很好的定性一致性和很强的定量相关性;

(2) 根据考虑了雷达波束阻挡的混合扫描仰角绘制的等射束高度拼图反映了雷达网探测最低高度降水的能力,低于等射束高度的降水区因波束阻挡不能被雷达网探测到或被探测到的回波强度明显偏弱;

(3) 利用等射束高度拼图数据和三维拼图反射率因子数据获得雷达网的混合反射率因子是减小雷达波束受地物阻挡影响,提高雷达网降水估算精度的重要步骤之一。

References

- Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D-J, et al. 1998. The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea Forecasting*, 13:388-395
- Kitchen M, Brown R, Davies A G. 1994. Real-time correction of weather radar data for the effects of bright band, range and orographic growth in widespread precipitation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 120:1231-1254
- Kucera P A, Krajewski W F, Young C B. 2004. Radar beam occultation studies using GIS and DEM technology: an example study of Guam. *J Atmos Oceanic Tech*, 21(7): 995-1006
- Krajewski W F, Ntelekos A, Goska R. 2006. A GIS-based methodology for the assessment of weather radar beam blockage in mountainous regions: two examples from the US NEXRAD network. *Computers & Geosciences*, 32:283-302
- Pellarin T, Delrieu G, Saulnier G M, et al. 2002. Hydrologic visibility of weather radars operating in mountainous regions: Case study for the Arde'che catchment (France). *J Hydrometeorol*, 3: 539-555
- Westrick K J, Mass C F, Colle B A. 1999. The limitations of the WSR-88D radar network for quantitative precipitation measurement over the coastal western United States. *Bull Amer Meteor Soc*, 80(11): 2289-2298
- Xiao Yanjiao, Liu Liping. 2006. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 64 (5): 647-657
- Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. 2001. *Radar Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 70-73
- Zhang Yaping, Liu Jun, Xia Wenmei, et al. 2002. The calculation of beam blockage coefficients in estimating regional precipitation with radar. *J Nanjing Insti Meteor* (in Chinese), 25(5): 640-647

附中文参考文献

- 肖艳姣, 刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究. *气象学报*, 2006, 64 (5): 647-657
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. *雷达气象学*. 北京: 气象出版社, 70-73
- 张亚萍, 刘均, 夏文梅等. 2002. 雷达定量估测区域降水波束阻挡系数的计算. *南京气象学院学报*, 25(5): 640-647