

# 基于SRTM地形数据的天气雷达电磁波非常规遮挡回波补偿技术研究

胡启元<sup>1, 2</sup> 戚友存<sup>3, 4</sup> 王楠<sup>1</sup> 朱自伟<sup>3, 4</sup>

(1 陕西省气象台, 西安 710014; 2 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 陕西省气象局, 西安 710014;  
3 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环实验室, 北京 100101; 4 中国科学院大学, 北京 100864)

**摘要:** 为解决多普勒天气雷达电磁波因人造建筑物、森林等非地形因素造成的降水观测空间不连续问题, 基于精细的地形数据信息, 提出一种雷达电磁波非常规遮挡回波补偿技术。首先利用SRTM地形数据信息和雷达体扫信息, 计算雷达扫描最低有效混合仰角信息; 其次通过长时间雷达定量降水估计(QPE)累积, 识别非地形遮挡导致的降水空间不连续区域, 采用交叉方位角插值、更高一层仰角数据填补和线性加权滑动平均等方法, 形成最优无缝非常规电磁波遮挡回波补偿技术。选取2017—2019年陕西汛期降水过程, 采用最优无缝非常规电磁波遮挡回波补偿技术, 计算雷达无缝混合仰角反射率, 再通过固定的Z-R关系计算雷达QPE。最后通过定性评估分析发现, 经过雷达电磁波非常规遮挡回波补偿技术订正后的雷达QPE能够更好地描述地面降水空间分布, 并且通过与地面雨量计定量比较分析, 结果表明均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)都明显减小, 相关系数(CC)得到了明显提高。该雷达电磁波非常规遮挡回波补偿技术能够有效填补由雷达电磁波遮挡导致的降水空间不连续, 并较为准确地还原真实降水空间分布。

**关键词:** 雷达QPE, 非常规地形遮挡, 最优混合仰角

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.016

## A Radar Electromagnetic Beam Non-Standard Blockage Compensated Technology Based on SRTM Terrain Data

Hu Qiyuan<sup>1, 2</sup>, Qi Youcun<sup>3, 4</sup>, Wang Nan<sup>1</sup>, Zhu Ziwei<sup>3, 4</sup>

(1 Shaanxi Provincial Meteorological Observatory, Xi'an 710014 2 Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for The Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710014

3 The Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101 4 The University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864)

**Abstract:** In order to solve the problem of precipitation observation spatial discontinuity caused by artificial buildings, forests and other non-topography factors, one non-standard beam blockage compensated algorithm is proposed based on high resolution STRM DEM data. First, SRTM DEM data and radar volume coverage pattern (VCP) are used to calculate the radar beam blockage at each tilt, and then generate the lowest hybrid scan tilt; secondly, the precipitation spatial discontinuity caused by non-standard beam blockage is identified through long-term radar quantitative precipitation estimation (QPE) accumulation with one fixed Z-R relationship. And, then based on the identified non-standard beam blockage, the lowest hybrid scan tilt is updated; Finally, the updated hybrid scan tilt is used to generate hybrid scan reflectivity, and the azimuth cross interpolation and linear weighted mean will be applied on the hybrid reflectivity field to remove the discontinuity caused by non-standard beam blockage. In this paper, the precipitation events from 2017 to 2019 in flood season are selected, and the non-standard beam blockage compensated algorithm

is used to generate the seamless hybrid reflectivity. Then, the radar QPE is calculated with a fixed Z-R relationship. Through the qualitative analysis, it is found that the seamless radar QPE can better describe the spatial distribution of surface precipitation. The results show that the root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE) are significantly reduced, and the correlation coefficient (CC) is significantly improved. This nonstandard beam blockage compensated algorithm can effectively remove the spatial discontinuity of precipitation, and provide the real precipitation spatial distribution accurately.

**Keywords:** radar QPE, non-topography blockage, hybrid scan tilt

收稿日期: 2020年12月15日; 修回日期: 2021年2月22日

第一作者: 胡启元, Email: 243052965@qq.com

通信作者: 戚友存, Email: youcun.qi@igsnr.ac.cn

资助信息: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507505, 2018YFC1505803); 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA2006040101); 中国科学院百人计划; 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究课题基金(2021G-13)

## 0 引言

基于多普勒天气雷达观测数据的定量降水估测(QPE)产品是0~2小时定量短时临近(以下简称“短临”)降水预报(QPF)和强降水短临预警的重要基础,但在日常业务中雷达观测数据往往存在缺失或不完整现象,其原因一方面是由于雷达站点附近存在海拔高于雷达高度的复杂地形,其低仰角电磁波束可能会部分或全部被某处地形所遮挡<sup>[1]</sup>,另一方面由于城市建设程度日益加快,雷达站周边增加诸多如高楼大厦、通信塔或绿化树木等遮挡雷达电磁波的人造建筑物,使得雷达电磁波束发生遮挡,造成雷达反射率测量出现偏低或完全遮挡,进而导致定量降水估测产品降水率的低估或缺测。因此,需要通过研究雷达无缝混合仰角计算方法及雷达非常规遮挡订正技术,来正确计算雷达QPE所需的雷达回波反射率场。

最低混合有效仰角扫描反射率是指由雷达各方位角上未被严重遮挡的最低有效仰角反射率因子所组成的反射率平面分布,它能够比较准确地反映出最接近地面的真实降水强度和空间分布。美国国家强风暴实验室(NSSL)Fulton等<sup>[2]</sup>在1997年研究WSR-88D单偏振天气雷达降水估测算法流程时利用数字地面模型(DTM)数据设计了美国单偏振雷达混合仰角反射率计算方法,通过对输入反射率进行基于地形的混合仰角扫描预处理,尽可能降低地物杂波出现频次以及由于地形阻挡造成的降水反射率数据丢失情况;Bech等<sup>[3]</sup>利用西班牙巴塞罗那地区探空观测数据模拟雷达在低层大气中的传播特征,发现在不同雷达波束传播条件下采用对应的观测或预报的垂直折射率梯度(VRG)信息,能够有效校正单偏振雷达电磁波束被地形部分遮挡情况;Kucera等<sup>[4]</sup>利用地理信息系统(GIS)和高分辨率数字高程模型(DEM)进行部分或完全受遮挡雷达波束的识别和能量损失校正;Langston等<sup>[5]</sup>介绍了美国国家强风暴实验室开发的能够根据地形、雷达功率密度函数和波束传播路径来计算雷达混合扫描仰角的HybScan自动算法,并利用该算法及1弧秒DEM数据为全美所有WSR-88D雷达制作了波束遮挡区域及混合仰角参数集;Zhang等<sup>[6]</sup>在对美国Multi-Radar Multi-Sensor(MRMS)系统定量降水估测应用研究中介绍了无缝混合扫描反射率高度(SHSRH)概念及其在MRMS系统对垂直反射率廓线(VPR)的校正作用,而后者是近十年国外用来改进定量降水估测产品的效果较好的方法之一;Tang等<sup>[7]</sup>针对雷达电磁波受到的非常规遮挡情况设计制作了三种遮挡修订方法和用于业务使用的非常规遮挡修订参数方案,并且已经在美国本土130多部雷达进行

应用,评估结果表明该方案能够有效减少和消除美国降水产品中各种受遮挡而不连续情况。国内也有部分学者利用混合仰角反射率进行雷达观测受遮挡修订的改进工作。肖艳姣等<sup>[8]</sup>在2008年利用1:25万的DEM数据计算湖北SB雷达波束阻挡率,以60%阻挡率为阻挡阈值得出湖北雷达混合扫描仰角参数,并通过等射束高度拼图数据计算混合反射率拼图产品,有效解决了反射率受地物阻挡问题,但在受非地形阻挡区域回波仍明显偏弱;戚友存等<sup>[9]</sup>2011年在研究不同雷达垂直反射率廓线(VPR)订正方案对雷达定量降水估测准确率的改进作用时设计了基于VPR订正方法的QPE算法,该算法提出了一个将两个相邻未遮挡仰角上的反射率数据进行融合来消除遮挡不连续的无缝混合反射率(SHSR)计算方法;杨泷等<sup>[10]</sup>利用杭州雷达受遮挡区相邻的无遮挡区的平均VPR遮挡模型,将高仰角无遮挡反射率因子线性插值到低仰角受遮挡区域,填补前、后结果评估结果表明填补后QPE降水量与观测量有很好一致性,填补后降水估算效果优于填补前;勾亚彬等<sup>[11]</sup>通过分析浙江6部雷达观测数据概率特征,提出了一个不依赖地形数据以及大气状态的基于概率统计的雷达部分遮挡识别方法,在雷达组网拼图计算时应用该方法,能够有效选择在同一区域中受遮挡较轻的雷达回波反射率因子进行拼图,增强雷达重叠区域内的组网拼图数据的质量。

目前国内外雷达业务系统中的雷达估测降水产品例如美国早期Stage II及Stage IV产品和目前MRMS系统Q3产品、中国全国组网定量降水(MQPE)产品和SWAN系统QPE产品等都已运用混合扫描反射率生成技术进行QPE业务改进工作,但与美国等发达国家相比我国仍存在一定差距<sup>[12]</sup>。美国Q3产品针对遮挡不连续情况不仅采用基于地形和无缝处理结合方法,并且通过计算融化层高度和订正雷达垂直廓线来找到存在有效反射率数据的最低有效仰角,进一步提高混合反射率精度<sup>[13]</sup>。国内2005年研发的MQPE产品虽然应用了混合反射率订正技术但没有利用地形信息,只是固定采集0.5°~3.4°四个仰角反射率,若遇到低仰角地形阻挡时采用阻挡物后方距离库上的反射率数值,因此结果存在较大误差<sup>[14]</sup>。SWAN系统QPE产品较MQPE产品增加了不同地形数据对混合反射率生成的应用,但未进行反射率无缝技术处理<sup>[15]</sup>,而且QPE业务产品仍存在由于非地形因素导致部分地区反射率不连续情况。因此本文研究针对因人造建筑物、树木等非地形因素造成的雷达电磁波受遮挡不连续现象,形成基于最优无缝混合扫描仰角的遮挡修订参考方案,通过对典型个例或汛期降水过程的定量、定性统计特

征来分析参考方案的应用效果, 解决陕西雷达因观测被遮挡而造成定量降水估测产品缺失或错误问题, 并在陕西短临预报业务系统中进行业务应用。

## 1 数据与方法

### 1.1 选取数据

本文使用数据主要包括DEM地形数据、雷达体扫观测和地面雨量计降水观测数据。DEM地形资料由美国航空航天局(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的中国境内航天飞机雷达地形测

绘使命(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)数据, 分辨率为 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$ ; 雷达体扫观测数据选取2017—2019年5—10月陕西7部C波段业务雷达逐6分钟实时基数据(图1a), 雷达最远探测距离400 km, 反射率和径向速度分辨率分别为0.5和0.125 km/h, 采用VCP21体扫模式, 9个有效仰角( $0.5^\circ$ ,  $1.5^\circ$ ,  $2.4^\circ$ ,  $3.4^\circ$ ,  $4.3^\circ$ ,  $6.0^\circ$ ,  $9.9^\circ$ ,  $14.6^\circ$ ,  $19.5^\circ$ ); 地面雨量计降水观测数据选取2017—2019年5—10月陕西1872个加密气象观测站逐小时降水量数据(图1b)。

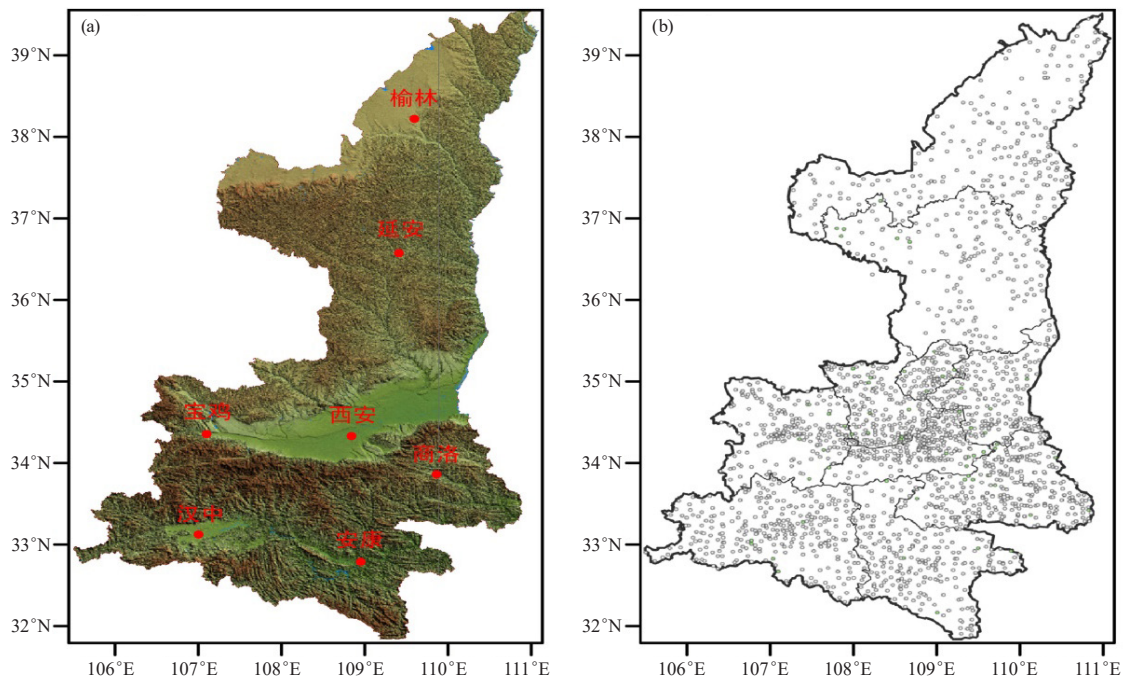


图1 陕西雷达站点分布与地形图 (a) 和地面雨量计观测站分布图 (b)

Fig. 1 Distribution of radar stations and topographic (a) and distribution of surface rainfall observation stations (b) in Shaanxi Province

### 1.2 雷达电磁波非常规遮挡回波补偿技术

多普勒雷达低层仰角电磁波束被遮挡原因主要包括因复杂地形遮挡和地物(树木、高楼、高速公路、高压线电塔等人造建筑物)遮挡, 本文将地形遮挡称为雷达电磁波常规遮挡因素(STANDARD BLOCKAGE, SB), 地物(非地形遮挡)遮挡称为雷达电磁波非常规遮挡(NON-STANDARD BLOCKAGE, NSB)。为解决这两类因素对雷达电磁波造成的遮挡问题, 本文基于陕西省7部多普勒天气雷达, 研发了雷达电磁波遮挡订正算法(图2), 首先利用2017—2019年5—10月逐6分钟雷达原始基数据通过Z-R关系计算得出雷达各仰角的累积QPE空间分布, 结合由陕西DEM地形数据及雷达不同仰角波束高度信息形成的最低有效仰角分布, 计算基于地形的混合扫描仰角的累积QPE空间分布; 其次在单雷达QPE

累积分布上查找识别出NSB区域, 根据NSB区域特征和大小研究制定三种修订方案进行分类修订处理, 并形成各雷达NSBM参考方案, 将参考方案再应用到QPE累积分布修订流程中, 得出基于地形遮挡和NSB共同修订的最优无缝混合仰角反射率及QPE产品; 最后通过在典型降水个例和所有降水过程中, 对各雷达的最优无缝混合仰角反射率QPE产品与观测范围内的地面雨量计实况资料进行定性、定量统计分析, 评估修订算法改进优劣和算法性能。

(1) 基于陕西DEM地形数据计算雷达最低有效仰角

计算雷达混合扫描仰角反射率的前提是计算出雷达不同仰角上电磁波受遮挡的百分比; 再根据计算得到的雷达电磁波遮挡百分比, 确定雷达在各方位角上的最低有效仰角。本研究中, 把单仰角电磁波束被地

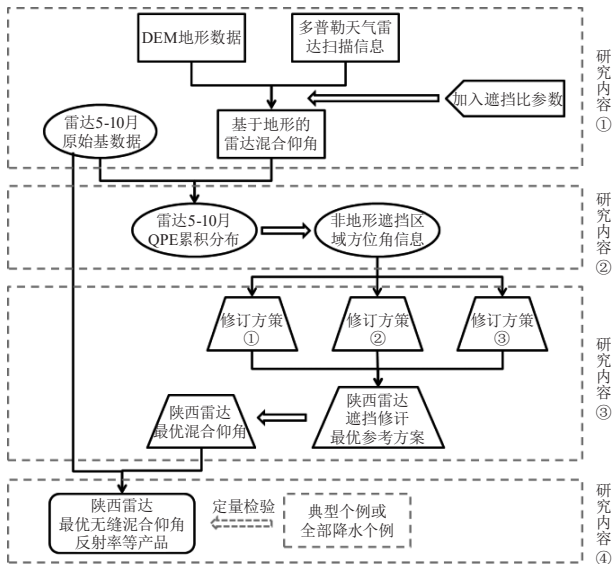


图2 陕西多普勒天气雷达电磁波非常规遮挡区域回波补偿方案技术流程示意图

Fig. 2 Flow chart of compensated scheme for electromagnetic beam non-standard blockage area in Shaanxi Doppler weather radar.

形遮挡的电磁波能量占总能量的百分比称为遮挡率，并且在雷达不同方位角上选取的雷达波束被遮挡率小于50%的最低仰角作为该方位角上的最低有效仰角，由此得出该雷达扫描平面内最低有效仰角分布。

### (2) NSB区域的识别定位

基于最低有效仰角分布，计算得到的雷达最低混合仰角反射率分布可以很好地改善由于复杂地形造成的SB情况。但在实际业务应用中仍存在由于地物导致的NSB情况，因此需要对NSB区域进行识别定位并进行订正。通常NSB区域可以从雷达各仰角单时次混合反射率PPI分布上识别出来，但由于有些情况下雷达电磁波遮挡不严重，通过单时次雷达反射率很难识别出来。因此本研究中，采用长时段的雷达混合反射率对应的QPE累积分布（采用 $Z=300 \times R^{1.4}$ 固定Z-R关系）来识别NSB区域。

### (3) NSB区域修订方法

识别出雷达NSB区域位置信息后，根据NSB区域不同特征采用三种修订方法进行遮挡不连续修订。

① 针对方位角宽度小于 $5^\circ$ 的NSB区域，采用交叉方位角插值法进行处理，算法见式(1)。造成这种方位角宽度 $<5^\circ$ NSB区域的原因通常是由于孤立的高层建筑或高大树木阻挡了低层仰角反射率，并且相邻NSB区域两侧的电磁波束能量没有受到任何遮挡影响。通过该方法进行遮挡修正后反射率或降水分布图像更加平滑，降水系统表现更加完整，但前提是假设

降水回波强度在NSB区域的水平变化较小。

$$R_{A_z} = R_{A_{z1}} + \frac{R_{A_{z2}} - R_{A_{z1}}}{|A_{z2} - A_{z1}|} \times (A_z - A_{z1}), \quad (1)$$

其中： $A_{z1}$ 与 $A_{z2}$ 为NSB区域的上下边界方位角， $A_z$ 为 $A_{z1}$ 与 $A_{z2}$ 之间的某个方位角， $R_{A_z}$ 为方位角 $A_z$ 上的反射率值。

② 针对方位角宽度大于 $5^\circ$ 的NSB区域，采用更高层仰角反射率数据替代NSB区域数据方法，算法见式(2)。该类NSB在地物遮挡情况中占大多数，当出现该类NSB情况时说明该区域雷达低层电磁波束被高大建筑群或茂密植被带严重遮挡，并且由于无法忽视降水系统的大范围水平空间变化而不能采用方法①进行修订，因此需要采用更高层接近地面的反射率场进行填补替代。通过该方法可以有效地修正雷达大范围反射率或降水分布存在的遮挡不连续，但前提是在NSB区域中降水系统内部垂直变化较小，例如在取得的更高层反射率场上不存在明显亮带等。

$$R_{A_z}^e = R_{A_z}^{e+i}, \quad (2)$$

其中： $A_z$ 为NSB区域中的某个方位角， $e$ 是当前仰角， $e+i$ 是不受NSB影响的更高层仰角， $R_{A_z}$ 为方位角 $A_z$ 上对应仰角的反射率值。

③ 混合仰角反射率场进行SB处理和方法②修订后，可能还会存在由于相邻方位角采用不同仰角反射率而造成的回波强度不连续梯度，需要采用线性加权滑动平均法对其进行平滑处理，算法见式(3)。该方法并不直接对NSB区域进行修正，而是对基于DEM数据的标准混合仰角扫描反射率或者方法②生成出来的混合仰角反射率进行非自然边界平滑处理。

$$R_{A_z} = \frac{\sum_{i=-N}^N W_i \times R_{A_z} + i}{\sum_{i=-N}^N W_i}, \quad W_i = N + 1 - |i|, \quad (3)$$

其中： $A_z$ 为NSB区域边界的方位角， $i$ 是 $A_z$ 相邻方位角， $-N \leq i \leq N$ ，选取 $N=5$ （方位角 $A_z$ 前后5个相邻点）， $W_i$ 为线性权重， $R_{A_z}$ 为方位角 $A_z$ 上对应仰角的反射率值。

### (4) 定量统计分析方法

为评估遮挡修订前后算法改进优劣，选取典型个例和汛期降水过程进行均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和相关系数(CC)（公式4~6）统计特征分析，对基于最优无缝混合扫描仰角反射率的定量降水估测产品与地面雨量计进行修订算法评估。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{k=1}^N (r_k - g_k)^2}, \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^N |r_k - g_k|}{\sum_{k=1}^N |g_k|}, \quad (5)$$

$$CC = \frac{\sum_{k=1}^N (r_k - \bar{r}) \times (g_k - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (r_k - \bar{r})^2 \times (g_k - \bar{g})^2}}, \quad (6)$$

其中： $r$ 为雷达定量估测降水量， $g$ 为地面雨量计观测降水量。

## 2 基于最优无缝混合扫描仰角的雷达遮挡区域修订算法

### 2.1 陕西雷达受常规遮挡(SB)情况及改进结果评估

陕西7部CB波段多普勒天气雷达(榆林、延安、西安、宝鸡、汉中、安康、商洛)站点布设位置附近均受到不同程度的地形遮挡情况，其中商洛雷达低层电磁波束受遮挡最严重，榆林雷达受遮挡程度最小。以商洛雷达为例，图3a为商洛雷达2019年5月—10月 $0.5^\circ \sim 3.4^\circ$ 基于QPE累积降水的各方位角上最大径向探测距离( $L$ )分布，可以看出雷达 $0.5^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 仰角上 $L > 300$  km区域占总区域9%和31%，在 $2.4^\circ$ 仰角上 $L > 200$  km和 $3.4^\circ$ 仰角上 $L > 150$  km区域占比分别提

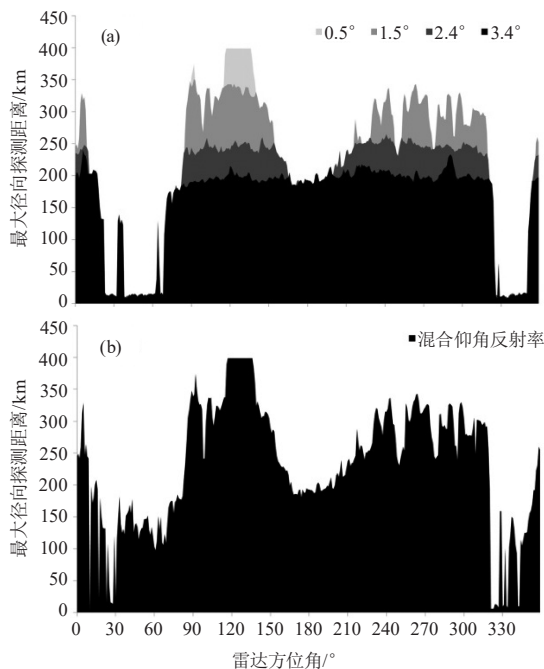


图3 商洛雷达2019年5—10月QPE累积降水各方位角上最大径向距离分布

(a)  $0.5^\circ \sim 3.4^\circ$ 仰角；(b) 混合仰角

Fig. 3 Maximum radial distance distribution of accumulated QPE in Shangluo radar from May to October 2019

(a)  $0.5^\circ$  to  $3.4^\circ$  elevation angle, (b) hybrid elevation angle

高至61%和78%，可见雷达有效可探测区域随着仰角抬高迅速增大，大部分地形遮挡情况存在 $1.5^\circ$ 仰角以下，但在商洛雷达东北部(约 $25^\circ \sim 80^\circ$ )和西北部(约 $330^\circ \sim 350^\circ$ )在 $3.4^\circ$ 仰角上仍存在明显遮挡不连续区域，直到抬高至 $6.0^\circ$ 仰角才能明显改善(图略)，这种复杂地形环境造成无法直接使用 $0.5^\circ$ 或 $1.5^\circ$ 仰角反射率进行定量降水估测，需要进行混合仰角处理后才能计算出雷达最接近地面的有效降水回波。

通过最低有效仰角参数选取方法计算得出的雷达基于地形混合仰角参数分布(图4)，可以看出除榆林雷达大部地区可直接采用 $0.5^\circ$ 仰角反射率进行QPE计算以外，其他雷达都需要取更高层或以上仰角：延安雷达北部、西南部、东南部和西北部局地需采用 $1.5^\circ$ 仰角；西安雷达东南部、西南部、西北部及宝鸡雷达西北部、西部需采用 $1.5^\circ$ 仰角，南部需采用 $2.4^\circ$ 仰角才能观测到有效反射率；陕南三市由于地处秦巴山区中，低层仰角反射率受遮挡更加严重，其中安康雷达大部地区需采用 $2.4^\circ$ 仰角，南部受山峰遮挡需采用 $4.3^\circ$ 仰角，汉中雷达除东部及西部局地以外均需采用 $1.5^\circ$ 以上仰角，商洛雷达各方位角上采用了从 $1.5^\circ \sim 3.4^\circ$ 差别明显的混合仰角，并且在汉中北部和商洛西北部、东北部有效最低仰角高度达到了 $4.3^\circ$ 或 $6.0^\circ$ 仰角。通过各雷达基于地形的混合仰角参数分布，能够有效订正受地形遮挡情况，对比图3a可以看出，商洛雷达进行混合仰角处理后其5—10月QPE累积降水(图3b)在大部分方位角上都能观测到有效回波，尤其在西北部受遮挡区域改进效果明显。

虽然理论上通过基于地形的混合仰角参数能够有效解决雷达低层降水回波受遮挡情况，但实际业务中计算出的混合仰角反射率分布仍存在部分区域缺失和局地不连续现象。图5给出了安康雷达2019年5—10月在进行SB情况修订前的 $2.4^\circ$ 仰角QPE累积分布( $0.5^\circ$ 和 $1.5^\circ$ 仰角可观测数据过少故不采用)和进行SB情况修订后的混合仰角QPE累积分布，可以看出采用混合仰角处理比直接采用 $2.4^\circ$ 仰角能够观测到更多降水，南部、东北部原本缺失的降水区域得到有效填补，但修订后的混合仰角QPE分布依然存在大量不连续区域：1) 西南部、偏西部存在方位角宽度约 $5^\circ \sim 10^\circ$ 的空白区域，其原因是由于过时DEM地形数据或者密集建筑群造成；2) 多处方位角宽度 $< 5^\circ$ 的分散的楔形不连续区域，多是由于孤立建筑物或高大树木造成；3)  $2.4^\circ$ 仰角QPE分布上部分区域如偏南部(如 $170^\circ$ 或 $190^\circ$ )虽然有降水数据，但明显低于附近方位角降水量，可能是由于电磁波束被地形部分遮挡导致观测数据偏低造成，这一部分本文不做讨论，按照遮挡不连

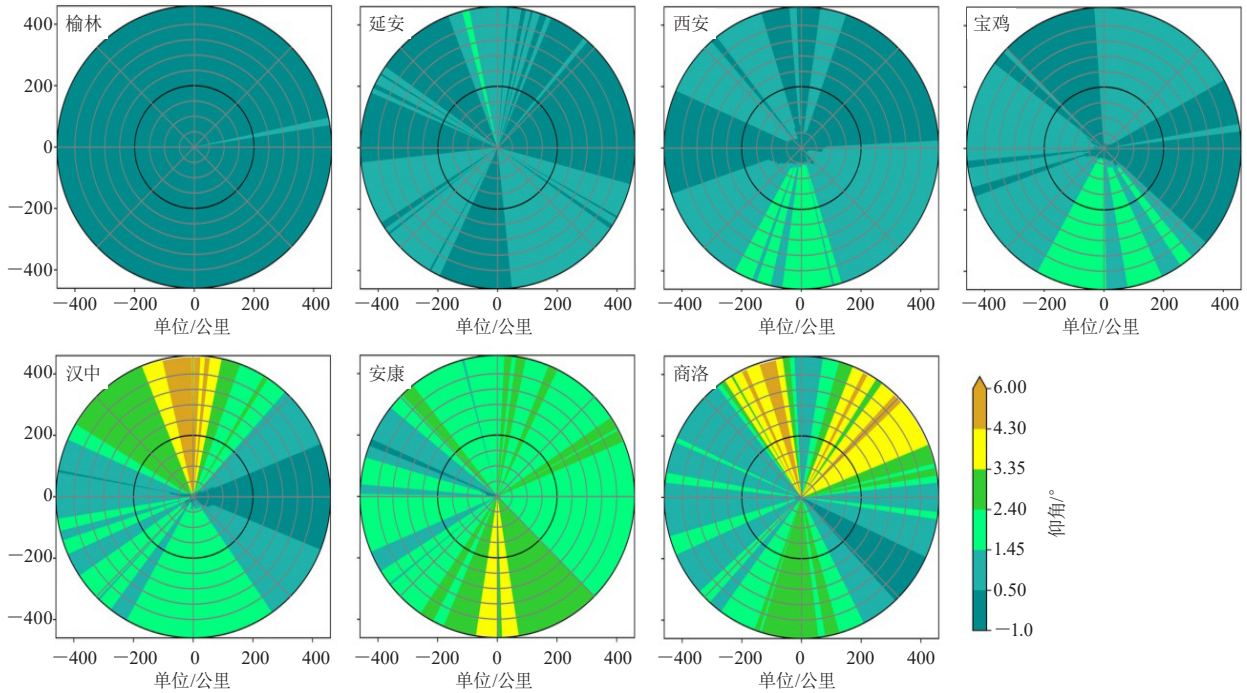


图4 陕西7部雷达基于地形资料的混合仰角参数分布

Fig. 4 Distribution of hybrid elevation angle parameters of seven radars based on terrain data in Shaanxi Province

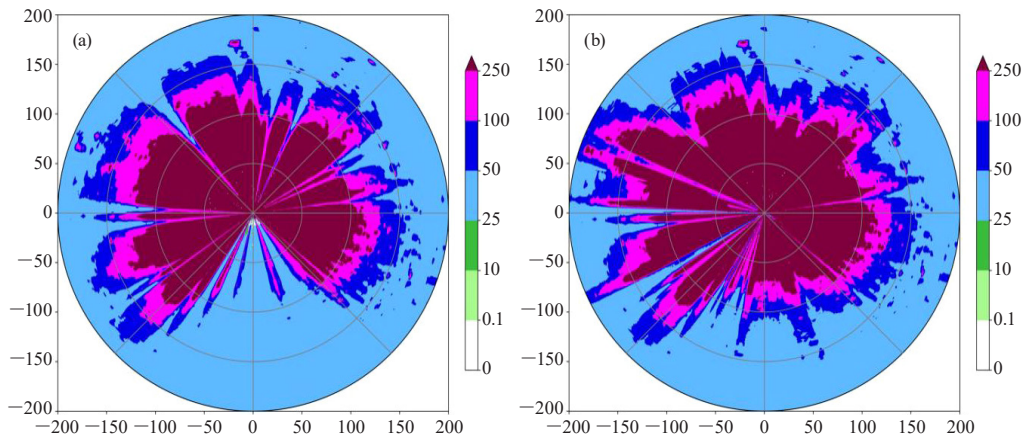


图5 2019年5—10月安康雷达QPE累积分布

(a) 2.4°仰角QPE分布; (b) 经过SB修订后的混合仰角QPE分布

Fig. 5 QPE cumulative distribution of Ankang radar from May to October 2019

(a) QPE distribution at 2.4° elevation, (b) Hybrid elevation QPE distribution revised by SB scheme

续情况进行修订。

## 2.2 陕西雷达受非常规遮挡 (NSB) 区域修订方法及改进结果评估

对雷达NSB区域进行修订之前需要按照NSB修订方法进行分区处理。由于雷达各体扫模式的起始体扫高度存在差异, 对不同体扫模式下需采用对应的修订处理, 陕西CB雷达普遍采用VCP21模式, 因此本文针对7部雷达分别制作适用于VCP21模式的NSB修订参考方案, 实现在业务应用中能够实时自动修订而不需要再进行人工干预。利用经过SB修

订的陕西7部雷达2019年5—10月逐6分钟QPE累积分布, 计算确定出NSB区域位置信息, 按顺时针方向定义 $A_{z1}$ 为NSB区域起始方位角,  $A_{z2}$ 为NSB区域终止方位角,  $R_1$ 为起始径向距离,  $R_2$ 为终止径向距离, 根据2.2节NSB修订方法, 分类采用不同执行方案, 其中针对方法2在NSB修订参考方案上定义EleNum为所取更高仰角的数量(0代表采用其他方法, 1代表需在原仰角上再抬高一个仰角, 以此类推), 由此可以得出每部雷达的NSB修订参考方案(表1, 以安康为例)。

按照安康雷达NSB修订参考方案, 继续对2.1节

表1 安康雷达NSB修订参考方案  
Table 1 Reference scheme for NSB revision of Ankang radar

安康		VCP21				
序号	起始方位角 ( $A_{z1}$ )	终止方位角 ( $A_{z2}$ )	起始径向距离 ( $R_1$ )	终止径向距离 ( $R_2$ )	需抬高仰角数 (EleNum)	执行方案
1	1-3, 6-8, 12-13, 15-17, 19-22, 26-28, 56-57, 61-62, 67, 81-84, 109-112, 117-121, 124-126, 128-131, 134-135, 167-172, 178-180, 189-195, 197-199, 202-204, 208-213, 216-219, 224, 230-236, 238-241, 260-266, 271-275, 284-287, 308-310, 316-317, 321-322, 329, 343, 345-346, 352-353		0	400	0	1
2	146	147	0	400	0	3
3	147	158	0	400	1	2
4	158	159	0	400	0	3
5	193	201	0	400	1	2
6	205	213	0	400	1	2
7	235	236	0	400	0	3
8	237	246	0	400	1	2
9	268	269	0	400	0	3
10	269	276	0	400	1	2
11	277	278	0	400	0	3
12	291	294	0	400	1	2

经过SB修订的QPE累积分布进行NSB修订, 得出最终基于最优无缝混合扫描仰角遮挡修订算法的定量降水估测产品(图6), 结果表明修订效果明显, 修订后水平方向不连续区域明显减少, 可观测到回波降水范围基本覆盖所有地区。通过安康雷达2019年6月5日8时—11时逐小时混合反射率在NSB修订前、后对比结果来分析改进效果, 图7a、7c、7e、7g为未经过NSB修订混合反射率分布, 随着回波从西南向东北发展, 雷达西北部和西南部狭长的楔形遮挡不连续现象非常明显, 而对应时次的图7b、7d、7f、7h中上述不连续区域经过NSB修订得到了明显改进, 使整个

过程中混合仰角反射率表现出了较好的连续和平滑特征。值得注意的是图7c和7d上09时次在雷达东南部 $120^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 附近回波相比紧邻两侧回波强度偏弱, 如果只从单时次的回波特征来看可能是由于电磁波束部分被遮挡造成的回波强度不连续, 但从下几个时次(10时和11时)可以看出随着回波移动该区域回波强度与两侧基本一致, 实际上并不存在不连续情况。上述现象说明从单时次反射率或QPE降水分布上无法准确识别出NSB区域, 因此需要采用长时段反射率分布或累积QPE分布来进行识别遮挡不连续位置。

### 3 修订效果评估

#### 3.1 降水个例改进效果

从2.2节安康一次降水过程雷达反射率演变的定性评估可以看出, 经过最优无缝混合扫描仰角处理遮挡不连续后的降水回波覆盖面和平滑程度较改进前有明显提高, 为了进一步定量评估改进前、后效果, 选取了延安、宝鸡、西安、汉中、安康、商洛6部雷达在2017年—2019年6次对流降水或稳定降水过程进行效果评估。选取的对流降水过程包括延安2019年7月21—22日、汉中2019年8月9日, 稳定降水过程包括西安2019年9月14日、宝鸡2017年6月3—4日、商洛2017年6月4日、安康2018年6月18日。

对上述过程以均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和相关系数(CC)为检验指标, 以使用固定 $Z=300 \times R^{1.4}$ 关系得出的雷达估测降水量与对应的地面降水量作为检验要素, 以各雷达存在的非常规遮挡区域作为评估空间范围, 进行逐小时混合反射率

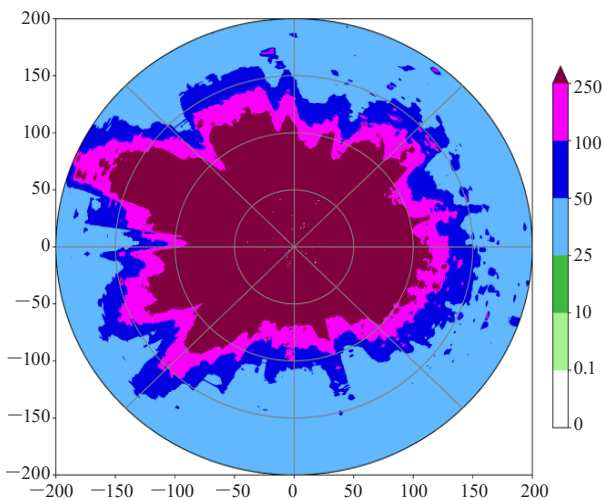


图6 经过NSB修订后的安康雷达2019年5—10月QPE累积分布

Fig. 6 QPE cumulative distribution of Ankang radar from May to October 2019 revised by NSB scheme

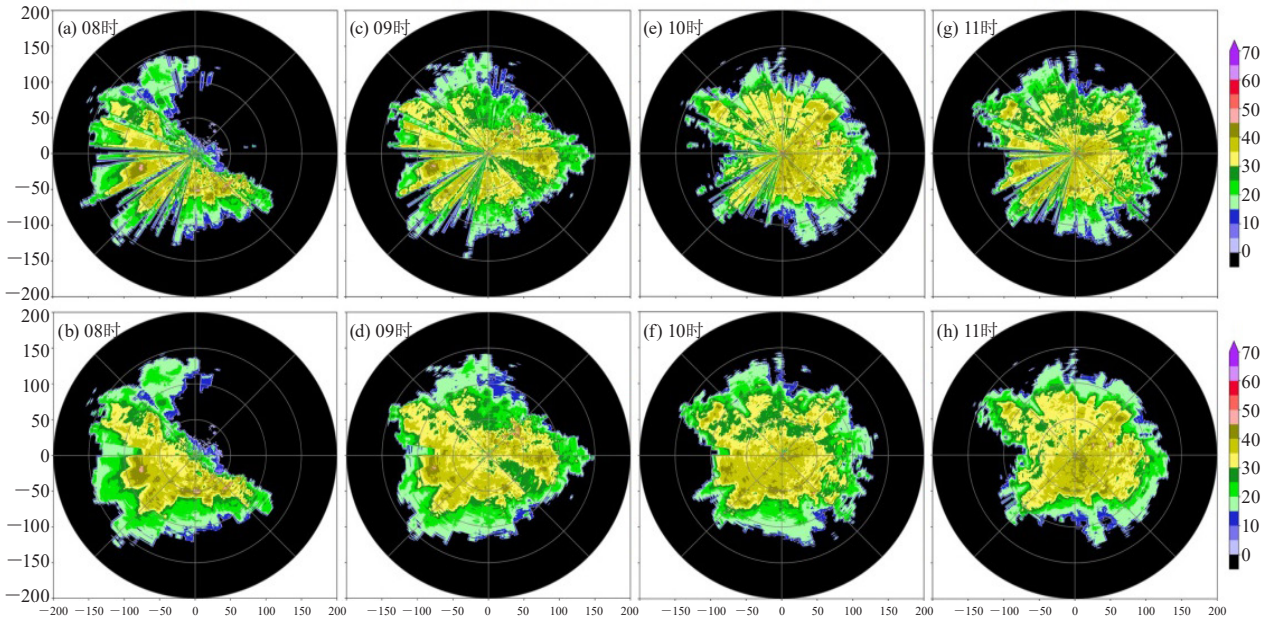


图7 安康雷达2019年6月5日08—11时逐小时修订前混合仰角反射率 (a, c, e, g) 和修订后混合仰角反射率 (b, d, f, h) (单位: dBZ)

Fig. 7 The comparison of Ankang radar hourly hybrid reflectivity before (a,c,e,g) and after (b,d,f,h) revision from 08:00 to 11:00 on 5 June 2019 (unit: dBZ)

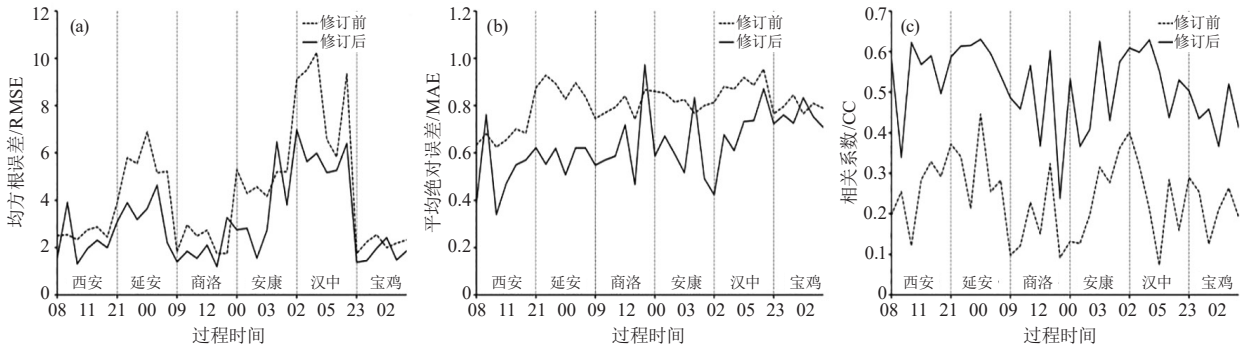


图8 各雷达在典型个例过程中均方根误差 (a)、平均绝对误差 (b) 和相关系数 (c) 在修订前、后对比情况 (实线为修订前, 虚线为修订后)

Fig. 8 The comparison before and after revision of the root mean square error (a), mean absolute error (b) and correlation coefficient (c) of each radar

(The solid line is before revision, the dotted line is after revision)

修订前、后评估对比分析。通过图8可以看出, 各雷达非常规遮挡区域内大部分时间RMSE、MAE、CC在修订后比修订前表现更好, 其中汉中、延安、安康三市改进效果最为明显, 平均RMSE从修订前6.214减小到4.236, 平均MAE由0.861降低至0.627, 相关系数CC由0.238提高至0.514, 非常规遮挡区域的QPE雨量与地面雨量偏差离散度得到有效抑制, 两者相关性提高53%。评估结果表明在固定Z-R关系下, 经过NSB修订后的雷达估测降水量与地面降水量之间的误差更小, 估测降水分布比修订前更接近于地面降水分布, 同时在延安和汉中对流降水过程中相同Z-R关系下修订后

的RMSE、MAE和CC比修订前有更好表现, 这说明NSB修订处理能有效改善强对流降水过程中由于遮挡导致强降水回波缺失现象, 使得更多与地面降水量线性相关度高的降水回波被填补进混合反射率中。

为更客观评估雷达估测降水的改进效果, 将延安、汉中、安康个例过程中回波覆盖面积最大时刻(延安7月21日23时、汉中8月9日4时、安康6月18日0时)的修订前、后估测降水量与实况降水量进行定量对比。图9a、9b、9c显示了修订前、后发生变化的估测降水站点, 修订后站点QPE降水更趋近分布在等比例线附近, 与地面雨量线性相关程度更好, 对应的趋

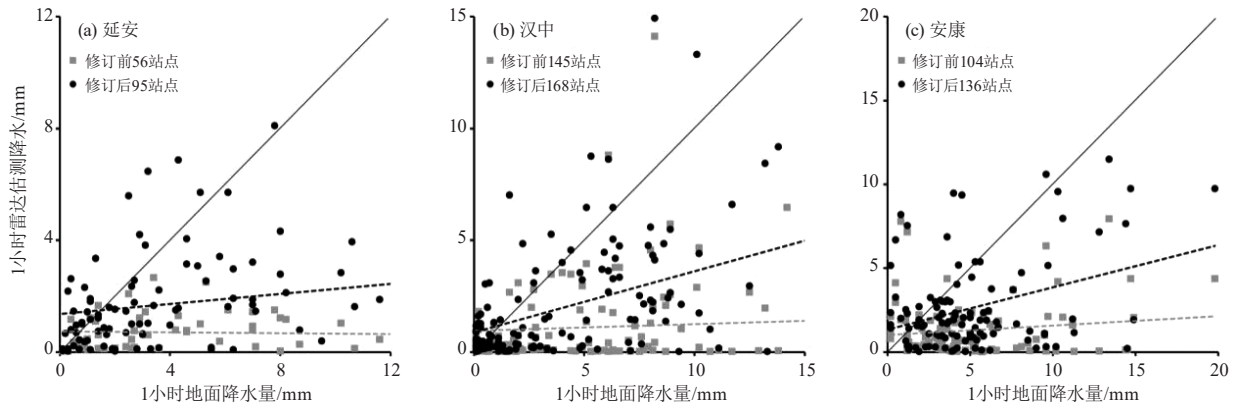


图9 延安、汉中、安康雷达1小时雷达估计降水量与地面降水量比较

(a) 延安7月21日23时; (b) 汉中8月9日4时; (c) 安康6月18日0时

(灰方块为修订前结果, 黑圆点为修订后结果; 灰虚线为修订前 $R^2$ 趋势线, 黑虚线为修订后 $R^2$ 趋势线)

Fig. 9 The comparison of 1-hour radar estimated precipitation with surface precipitation in Yan'an, Hanzhong and Ankang

(a) 23:00 BT, July 21, Yan'an, (b) 04:00 BT on August 9, Hanzhong, (c) 00:00 BT, June 18, Ankang (the gray box is the result before revision, the black dot is the result after revision, the gray dotted line is the  $R^2$  trend line before revision, the black dotted line is the  $R^2$  trend line after revision)

势线(黑色虚线为修订后, 灰色虚线为修订前)在修订后拟合程度更高; QPE偏小而地面雨量偏大的点显著减小, 说明修订后的降水回波在不受遮挡影响情况下更接近理想情况下代表地面降水的最低降水回波。各雷达在修订后可观测到QPE站点数超过修订前站点数, 进一步说明原本被遮挡的降水回波在进行NSB修订后可以被观测到。

### 3.2 所有降水过程定量评估

对2019年5月—10月6部雷达观测范围内所有降水过程进行统计分析, 同样以各雷达存在的非常规遮挡区域作为评估空间范围, 各雷达长时段序列统计结果(图略)显示在稳定性降水过程中修订后RMSE明显优于修订前, 在对流性降水过程修订后RMSE有所减小但不明显; MAE统计结果显示经过遮挡修订后大部分降水过程中部分时段的高误差现象得到了有效抑制, 并且约有75%降水过程MAE较修订前降低; 相关系数CC由修订前的69.7%降水过程为正相关提升至修订后的93.5%降水过程为正相关。表2为全部降水

表2 2019年5—10月陕西各雷达平均RMSE、MAE和CC  
Table 2 Average RMSE, MAE and CC of radar in Shaanxi from May to October 2019

雷达 站点	小时降水 样本数	5—10月平均RMSE		5—10月平均MAE		5—10月平均CC	
		修订前	修订后	修订前	修订后	修订前	修订后
延安	949	4.506	2.994	0.956	0.565	0.23402	0.59949
宝鸡	1592	2.705	1.695	0.849	0.674	0.18669	0.42639
西安	1507	2.114	1.573	0.847	0.61	0.20359	0.53544
汉中	2003	5.623	2.472	0.948	0.593	0.17817	0.54191
安康	1375	5.211	3.282	0.972	0.56	0.14552	0.43389
商洛	1444	2.276	1.758	0.917	0.712	0.18121	0.41813

过程计算得出的修订前、后平均统计结果, 汉中平均RMSE和平均MAE减小最多, 改进提高效果最明显, 延安平均CC提高幅度最大, 该统计结果可以应用于业务逐6分钟混合仰角反射率产品检验中, 作为参考样本实时评估产品改进效果。

## 4 结论

本文通过分析陕西多普勒天气雷达因人造建筑物、森林等非地形因素造成的降水观测空间不连续问题, 基于精细的地形数据信息, 提出了一种雷达电磁波非常规遮挡回波补偿技术, 结合长时段雷达估测降水累积分布和地面实况雨量分布制定了各雷达遮挡修订方案, 并利用降水典型个例和汛期所有降水过程检验评估了遮挡修订方案对于雷达定量降水估测的提升效果, 最终得到以下结论:

1) 陕西复杂地形环境导致雷达观测资料需要进行最优无缝混合仰角处理遮挡现象后才能正确计算用于降水估测的降水回波。首先利用SRTM地形数据和雷达体扫信息计算得出各雷达最低有效混合仰角参数信息; 其次利用长时间段雷达QPE累积分布识别非地形遮挡(NSB)导致的降水空间不连续区域, 经过交叉方位角插值、更上一层仰角数据填补和线性加权滑动平均等方法, 最终形成最优无缝非常规电磁波遮挡补偿技术。

2) 修订前、后的雷达混合仰角反射率及QPE分布对比结果表明, 经过雷达电磁波非常规遮挡补偿技术修订后可以有效填补反射率分布和QPE分布中大范围或局地楔形的遮挡不连续区域, 较为准确地还原雷

达实际降水回波分布。经过最优无缝混合扫描仰角处理后的降水回波覆盖面和平滑程度较改进前有明显提高,采用的遮挡不连续修订参考方案可直接应用到业务观测中,实时自动修订得出混合仰角反射率产品。

3) 典型个例和汛期降水过程检验评估显示在固定Z-R关系下,经过遮挡不连续修订后的雷达估测降水量与地面降水量之间均方根误差、平均绝对误差明显减小,两者具有更好的线性相关性,QPE分布比修订前更接近于地面降水分布,并且在强对流降水过程中能有效改善由于遮挡导致强降水回波缺失现象。

由于部分降水过程中存在低层仰角电磁波束部分被遮挡现象,造成低层仰角反射率强度偏小但不能忽视,或者存在降水系统相对浅薄、云顶高度较低导致抬高仰角后电磁波束超过云顶等情况,并且NSB修订参考表格随城市发展需要及时更新,因此后续仍需继续开展更多研究以便进一步提高改进陕西雷达遮挡修订工作及QPE精度。

#### 参考文献:

- [1] Germann U, Joss J. Operational measurement of precipitation in mountainous terrain. *Weather Radar*, 2004: 52-77.
- [2] Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*, 1997, 13(2): 377-395.
- [3] Bech J, Codina B, Lorente J, et al. The sensitivity of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20: 845-855.
- [4] Kucera P A, Krajewski W F, Young C B. Radar beam occultation studies using GIS and DEM technology: an example study of Guam. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 21(7): 995-1006.
- [5] Langston C, Zhang J. An automated algorithm for radar beam occultation. *Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, 2004: 917-920.
- [6] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(4): 621-638.
- [7] Tang L, Zhang J, Qi Y, et al. Non-Standard Blockage Mitigation For national Radar QPE Products. *Conference on Radar Meteorology American Meteorological Society*, 2013.
- [8] 肖艳姣,刘黎平,杨洪平.基于天气雷达网三维拼图的混合反射率因子生成技术. *气象学报*, 2008, (3): 180-183.
- [9] 戚友存.通过VPR订正技术提高雷达定量降水估计能力.南京:南京信息工程大学, 2012.
- [10] 杨沈,刘黎平,王红艳.利用反射率因子垂直廓线填补雷达波束遮挡区的方法研究. *气象科技*, 2015, 43(5): 788-793.
- [11] 勾亚彬,刘黎平,李瑞义,等.基于雷达回波概率特征的雷达部分遮挡区域识别算法. *高原气象*, 2015, 34(2): 556-567.
- [12] 谷军霞,师春香,潘旸.天气雷达定量估测降水研究进展. *气象科技进展*, 2018, 8(1): 71-78.
- [13] Zhang J, Howard K, Langston C, et al. National Mosaic and Multi-Sensor QPE (NMQ) System: Description, Results, and Future Plans. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(10): 1321-1338.
- [14] 王红艳,刘黎平.新一代天气雷达降水估算的区域覆盖能力评估. *高原气象*, 2015, 34(06): 1772-1784.
- [15] Feng Y. Introduction to SWAN system and its application. 26th Conference on Interactive Information and Processing Systems(IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, 2010.