

文章编号: 2096-1618(2025)01-0056-08

天气雷达模拟观测系统的设计与应用

唐强强^{1,2}, 张福贵^{1,2}, 唐佳佳^{1,2}

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要:中国已建成的业务天气雷达主要采用S和C波段体制。受地球曲率和波束展宽的影响,存在低空盲区和远距离分辨率低等不足。为弥补业务天气雷达观测网的局限,中国正在试点部署一批小型化、扫描策略灵活的X波段天气雷达。基于物理模型和数字仿真技术,设计并构建了一套天气雷达模拟观测系统,用于X波段天气雷达的站网布局和扫描策略的优化与验证研究。该系统以数字高程和数值模式生成的天气过程四维数据作为输入,模拟了对天气雷达探测效果有重要影响的波束传播、地形阻挡和雷达灵敏度等因素。以杭州地区X波段雷达网作为研究对象,开展了针对定量降水估计的扫描策略优化实验。研究结果表明,利用天气雷达模拟观测系统设计的新体扫模式弥补了杭州市S波段雷达低空探测能力的不足,有效地提高杭州地区雷达网的定量降水估测能力。

关键词:定量降水估测;模拟观测;扫描策略;雷达组网;天气雷达

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcui.2025.01.009

0 引言

中国幅员辽阔、地形复杂,受气象灾害的影响十分严重^[1]。每年暴雨、雷暴大风、龙卷、冰雹、台风等突发性灾害天气对国民经济造成极大的损害,直接经济损失高达数千亿元^[2]。多普勒天气雷达可以对致灾风暴的三维结构进行高时空分辨率的观测,是监测、预警突发性灾害天气的重要手段之一。中国已建业务天气雷达均采用S和C波段体制,在实际观测过程中暴露出低空探测盲区多、中高层垂直分辨率低等问题^[3]。为克服S和C波段天气雷达的局限,美国大气协同自适应遥感中心率先提出利用多部X波段天气雷达进行组网协同观测的技术^[4]。目前中国正在通过“补短板”工程^[5]部署一批低成本、低功耗的X波段雷达,以增强现有业务天气雷达观测网对灾害性天气过程的监测和预警能力。

由于X波段天气雷达部署位置和扫描策略的灵活性,如何根据特定区域的灾害天气统计特征优化站址布局和扫描策略成为重要的研究问题。站址布局与天气雷达硬件参数和地形特征密切相关,而扫描策略的制定更与灾害性天气的三维结构密切相关^[6-7]。扫描策略的缺陷会影响天气雷达对天气系统微物理、动力学和对流结构关键属性的探测^[8-10],降低对中小尺度天气系统的监测和预警能力。扫描策略包括扫描时间、空间分辨率、体积扫描的仰角等。为直观、定量地

揭示不同扫描策略对天气雷达观测的影响,Oue等^[6]基于云分辨模式开发了一套天气雷达模拟器(CR-SIM)。通过调整扫描仰角、周期和雷达位置,分析不同扫描策略对单体识别跟踪、微物理和动力反演的影响。

为充分发挥X波段雷达网的价值,进一步提升组网观测资料的应用水平,本文利用数字高程和高分辨率数值模式设计并实现了一套天气雷达模拟观测系统。系统基于物理模型,模拟再现地球曲率、地形阻挡和雷达观测仰角等因素对观测结果的影响。并以杭州地区的X波段雷达作为研究区域,针对雷达定量降水估测应用开展扫描策略的优化实验。基于WRF模拟的一次短时强降水天气过程,对比分析常规扫描模式(VCP21)和优化后的组网雷达混合仰角扫描模式(MIX-VCP21)下定量降水估测结果的差异。通过定量分析地形、扫描策略对结果的影响表明,基于天气雷达模拟观测系统设计的混合仰角扫描模式可以有效地提高杭州地区的地面降水估测能力,加强对短时暴雨的监测和预警能力。

1 模拟观测系统的设计与实现

1.1 系统总体框架

模拟观测系统由观测场景和模拟雷达组成,其中观测场景包含天气过程和地形两个部分,见图1。天气过程使用高分辨率数值模式(如WRF)生成,包含特定天气过程的四维温、压、风、湿和水凝物等信息。地

形数据选用高精度数字高程数据作为系统输入。模拟雷达用于在虚拟天气过程中计算得到特定观测体积内的反射率和径向速度。模拟雷达在计算雷达参量时,考虑天气雷达的如下主要观测特征:不同地球模型和大气折射率下的波束传播路径;雷达波束在传播过程中出现的地形阻挡现象;不同波段雷达的探测灵敏度差异性对弱回波观测的影响。

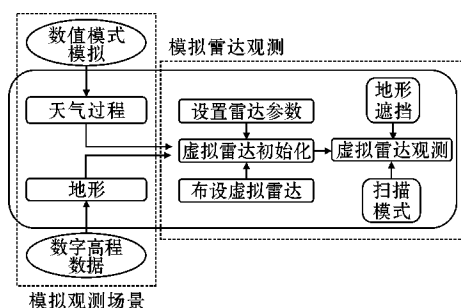


图1 天气雷达模拟观测系统总体设计框架示意图

1.2 系统实现

1.2.1 观测场景

模拟观测系统的观测场景地形部分采用数字高程数据作为输入,虚拟天气过程采用高分辨率数值模式模拟生成的四维格点数据作为输入。目前基本覆盖全球可以免费获取的数字高程(digital elevation model, DEM)数据主要包括3种:ASTERGDEM(advanced space borne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model)、SRTM(shuttle radar topography mission)和GTOPO30(global 30 arc-second elevation)^[11]。其中ASTERGDEM数据的空间分辨率达到了1弧秒×1弧秒(约30 m×30 m),较SRTMDEM数据等有较大提高,同时其地面覆盖范围也得到很大扩展。因此本研究选用ASTERGDEM数据作为模拟观测系统的地形输入。

模拟观测系统使用的虚拟天气过程由WRF模式^[12]模拟得到。WRF模式是一种完全可压非静力模式,采用Arakawa C网格,集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体的模式系统,能更好地改善对中尺度天气的模拟和预报,被广泛地应用于有限区域的天气研究和业务预报^[13]。本文利用WRF模式模拟的一次短时暴雨天气过程作为虚拟天气过程,输出为一个包含反射率因子、三维风矢量等变量的四维格点数据,水平分辨率为1 km,垂直分辨率为0.5 km,时间分辨率为6 min。

1.2.2 波束传播路径

天气雷达波束路径的准确性对回波高度定位、降水估计等定量应用有直接的影响^[14]。波束传播路径

主要与大气折射指数的垂直梯度有关,雷达气象学中包括两种常用的近似计算方法:等效地球半径模式和分层大气模式。其中等效地球半径模式假定标准大气下对测高公式进行简化;分层大气模式是根据实际大气条件推导给定条件下的电磁射线高度与地表距离函数的微分方程,采用基于离散变量的Snell定律积分计算波束传播路径^[15]。等效地球半径模式和分层大气模式在200 km内,波束高度差值基本不超过250 m^[16]。因此为简化计算,研究选用等效地球半径模型来计算波束传播路径,见图2。

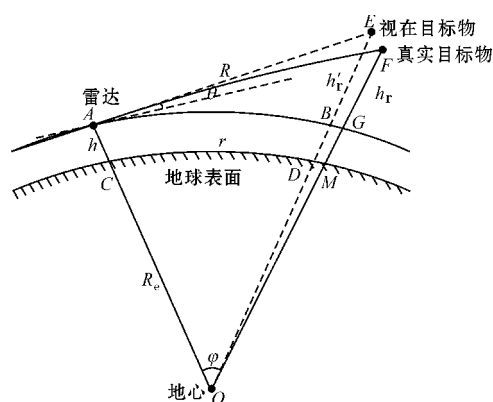


图2 考虑大气折射下的球面地球波束传播示意图

假定大气折射指数随高度呈线性变化,因为雷达观测仰角一般很小,且近地面大气折射指数 n 的平均近似值为1。对于采用标准大气状况的假定,则有:

$R' = \frac{4}{3}R_e$ 。雷达波束高度为距离和等效地球半径的函数,具体表示如下:

$$h_r = [r^2 + (R')^2 + 2rR'\sin\theta]^{1/2} - R' + h$$

式中: h_r 为雷达波束高度, R' 为等效地球半径, R_e 为地球半径, r 为雷达波束斜距, θ 为雷达波束发射仰角, h 为雷达天线海拔高度。

1.2.3 地形阻挡

天气雷达低仰角观测时雷达波束受到地形阻挡的现象很常见,出现地形阻挡现象时往往无法探测到天气系统的准确信息。当雷达波束受到部分阻挡时,雷达接收到的电磁功率出现损失,导致回波偏弱。当雷达波束被完全阻挡时,将会出现阻挡盲区,见图3。

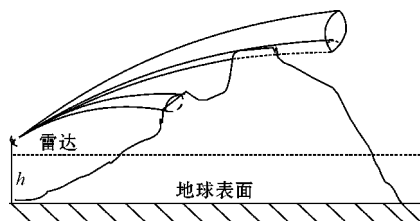


图3 雷达波束地形阻挡示意图

为更好地模拟地形阻挡对模拟观测的影响,需要对雷达波束进行扩展。在获取雷达中心波束传播路径之后,进行方位扩展和仰角扩展。具体的扩展办法是:以雷达波束轴为中心,在方位角上每隔 0.1° 向左向右扩展 n 条;在仰角上每隔 0.1° 向上向下扩展 m 条,即将雷达波束细分为 $(2n+1)\times(2m+1)$ 个单元,得到所有射线小单元组成的波束区域,见图4。

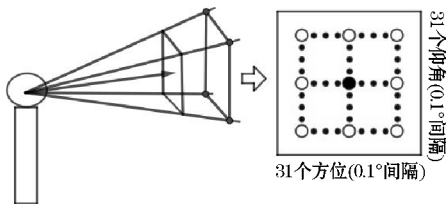


图4 雷达波束扩展示意图

由于雷达波束区域中的这些射线分别被阻挡在距离雷达不同的位置上或没有被阻挡,波束则可能部分或全部被阻挡,通过确定雷达波束每个小单元的阻塞距离,将雷达波束的实际距离与相应波束区域内所有小单元的阻塞距离相比较,就可以求出该雷达波束在此距离上的阻挡百分比率。方位角为 T ,仰角为 W ,距离为 R 处的波束阻挡系数 O 的计算公式如下:

$$O=\sum_{n=-15}^{15}B(n)W(|n|)$$

式中, $B(n)$ 描述波束区域扩展图上第 n 个方位上的阻挡程度, $n=0$ 表示波束轴。 $B(n)$ 的取值与 m 有关, m 反映第 n 个方位上波束被阻挡的程度,其与该处高程有关并等于阻挡物高度能达到的标号值。权重 $W(|n|)$ 反映

$B(n)$ 对整个波束阻挡率大小的贡献, $W(|n|)$ 的取值与 n 有关。 $B(n)$ 和 $W(|n|)$ 的表达式如下:

$$B(n)=\frac{\int_{-1.55}^{0.1(m+0.5)}\exp\left[-8\ln2\left(\frac{h}{s}\right)^2\right]dh}{\int_{-1.55}^{1.55}\exp\left[-8\ln2\left(\frac{h}{s}\right)^2\right]dh}$$
$$W(|n|)=\frac{\int_{0.1(|n|-0.5)}^{0.1(|n|+0.5)}\exp\left[-4\ln2\left(\frac{\theta}{s}\right)^2\right]d\theta}{\int_{-1.55}^{1.55}\exp\left[-4\ln2\left(\frac{\theta}{s}\right)^2\right]d\theta}$$

式中 s 表示波束分辨率,取值 1° 。 θ 表示扩展波束与波束轴线的水平夹角, h 表示扩展波束与波束轴线的垂直夹角。 m 的取值 $-15\leq m\leq 15$, n 的取值 $-15\leq n\leq 15$ 。

1.2.4 雷达灵敏度

天气雷达灵敏度是衡量雷达质量的最重要指标之一,雷达在不同径向距离处能探测到的最小回波强度与雷达的发射功率、最小可探测功率、波束宽度、大气损耗、接收发射链路损耗等因素有关,具体表示如下:

$$dBZ_{min}=P_{min}+10\lg\left(\frac{2.69\lambda^2}{P_t\tau\theta\varphi}\right)-2G_A+160+L_{\Sigma}+20\lg(R)+RL_{at}+2\int_0^RA(R)dr$$

式中: dBZ_{min} 为最小可探测回波强度; P_{min} 是雷达最小可接收功率; λ 为雷达波波长; P_t 是雷达发射功率; τ 是脉冲宽度; θ 是水平波束宽度; φ 是垂直波束宽度; G_A 是天线增益; L_{Σ} 是接收发射链路损耗; R 是径向距离; L_{at} 是大气损耗; $A(R)$ 是衰减系数。具体参数见表1。

表1 X波段多普勒天气雷达的参数^[17]

band	λ/cm	P_{min}/dBm	P_t/kW	$\tau/\mu\text{s}$	$\theta/^{\circ}$	$\varphi/^{\circ}$	G_A/dB	L_{Σ}/dB	L_{at}/dB
X	3.2	-110	50	0.5	1	1	40	4	0.016

1.3 模拟观测实验

选择淳安燕尖山(29.659°N , 119.112°E)X波段雷达开展模拟观测实验,采用等效地球半径模型计算波束传播路径,模拟地形阻挡和雷达灵敏度对观测结果的影响。淳安燕尖山雷达站点位置如图5所示,探测半径为60 km,雷达西北、西南方向上地势较高,存在地形阻挡现象。

采用等效地球半径模型,扫描模式为VCP21模式,开展模拟观测实验,模拟观测结果如图6所示。对比图6(a)和图6(b)可以看到,由于雷达西南方向地势较高,存在地形阻挡,导致黑色椭圆标记区域的雷达回波减弱;对比图6(a)和图6(c)可以看到,考虑雷达灵敏度得到的观测结果丢失了部分弱回波信息,如红

色椭圆标记区域所示,与预期结果一致,说明本文设计的模拟观测系统能够很好的模拟地形和雷达灵敏度对雷达观测结果的影响。

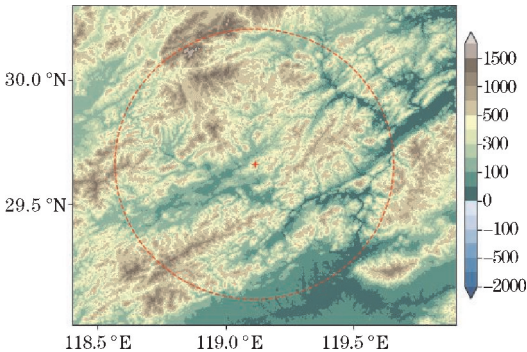


图5 淳安燕尖山雷达站点位置(“+”为淳安燕尖山雷达地理位置,红色虚线圆形表示探测半径为60 km)

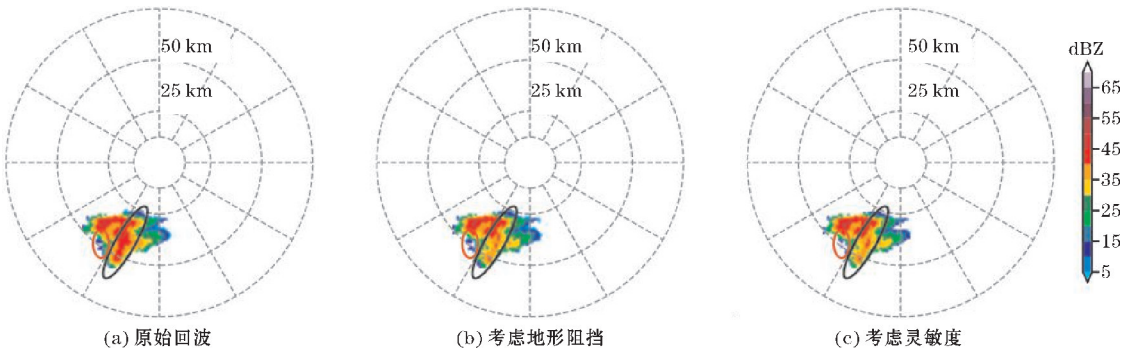


图 6 0.5°仰角模拟观测结果对比图

2 降水估测模拟观测实验

2.1 研究区域

近年来,杭州市布设了多部 X 波段雷达用于获取近地层的气象观测数据。由于地形和扫描策略的原因,X 波段雷达组网在实际应用中存在一定的局限性。一是业务天气雷达扫描模式相对固定,无法针对具体

的天气过程进行优化扫描。二是受地形影响较大,存在大量的探测盲区。本研究选取杭州及周边地区(28°N~33°N,117°E~123°E)作为研究区域,具体地形分布如图 7(a)所示。模拟天气过程位于杭州 S 波段雷达(30.274°N,120.338°E)和建德乌龙山(29.575°N,119.525°E)、淳安燕尖山(29.659°N,119.112°E)两部 X 波段雷达组成的雷达组网的覆盖范围内,雷达回波位置如图 7(b)所示。

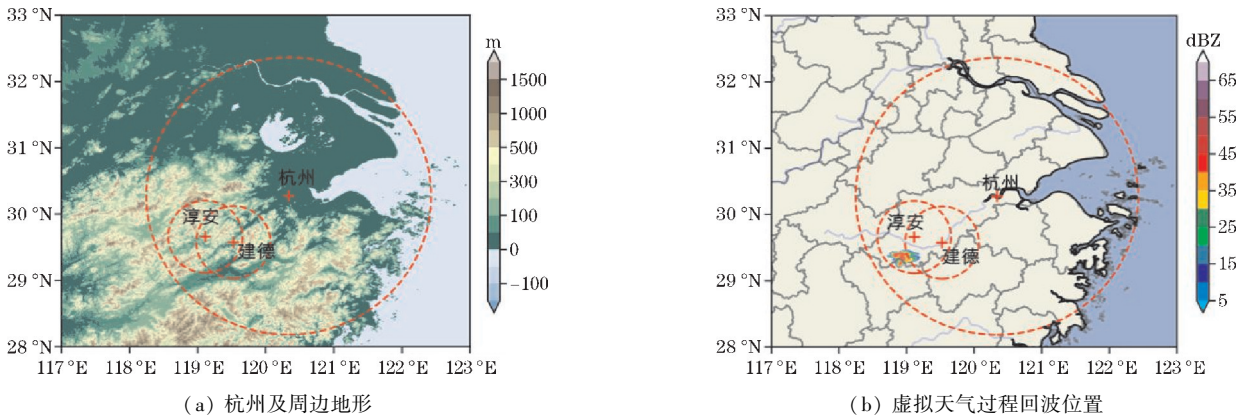


图 7 杭州及周边地区地形图及虚拟天气过程雷达回波位置分布示意图(“+”为杭州 S-Band 雷达和淳安燕尖山、建德乌龙山两部 X-Band 雷达地理位置,红色虚线圆形分别表示杭州雷达探测半径230 km和淳安、建德探测半径为60 km)

2.2 VCP21 模式模拟观测

虚拟天气过程所处位置地形较复杂,对杭州 S 波段雷达进行地形阻挡分析结果如图 8 所示。杭州雷达采用的是 VCP21 体积扫描模式,雷达在0.5°仰角层不同方位上存在不同程度的地形阻挡,方位角为 209°~221°波束阻挡率达 55% 以上。地形遮挡会导致雷达回波出现严重失真,进而导致定量降水估计结果误差较大,不利于短时暴雨的临近预报和预警。杭州雷达在 1.5°仰角层上的地形阻挡现象得到极大改善,但在距离雷达相同位置处,1.5°仰角下雷达的探测高度比 0.5°仰角下雷达的探测高度更高,同样对定量估测降水造成一定的影响。

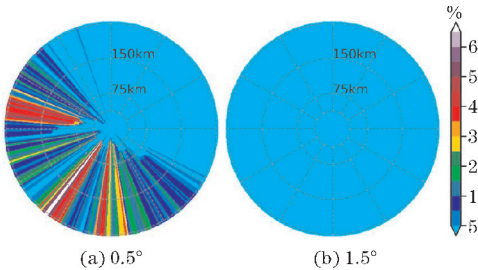


图 8 杭州雷达地形阻挡百分率示意图

在标准大气条件下,根据杭州 S 波段雷达的地理位置和 VCP21 扫描模式,对虚拟天气过程进行模拟观测。利用杭州雷达0.5°和1.5°两层仰角观测的反射率因子得到的单部雷达混合反射率因子,再根据反射率因子和降水强度之间存在的指数型关系 $Z = aR^b$ ($a = 300, b = 1.4$)来估计雷达覆盖范围内的降水强度。以

虚拟天气过程1 km高度逐六分钟的反射率因子反演得到的1 h降水量作为参考值,与杭州雷达混合反射率因子反演得到的定量降水结果对比发现,模拟雷达观测结果中的强回波区域(图9b)明显大于参考场(图9a),并且模拟观测得到的雷达回波范围比参考场的回波范围大。因此,利用Z-R关系得到的降水强度(图9d)比真实降水强度大(图9c)。出现这一现象的

主要原因是雷达波束在一定仰角下发射,随着探测距离的增大,探测高度也随之增大。当雷达波束探测距离为200 km时,0.5°仰角下的雷达波束探测高度可达4 km,本研究将受地形影响的部分区域采用1.5°仰角下的反射率形成最终的混合反射率因子,导致探测到的强回波区域和回波范围均大于近地层的强回波区域和回波范围。

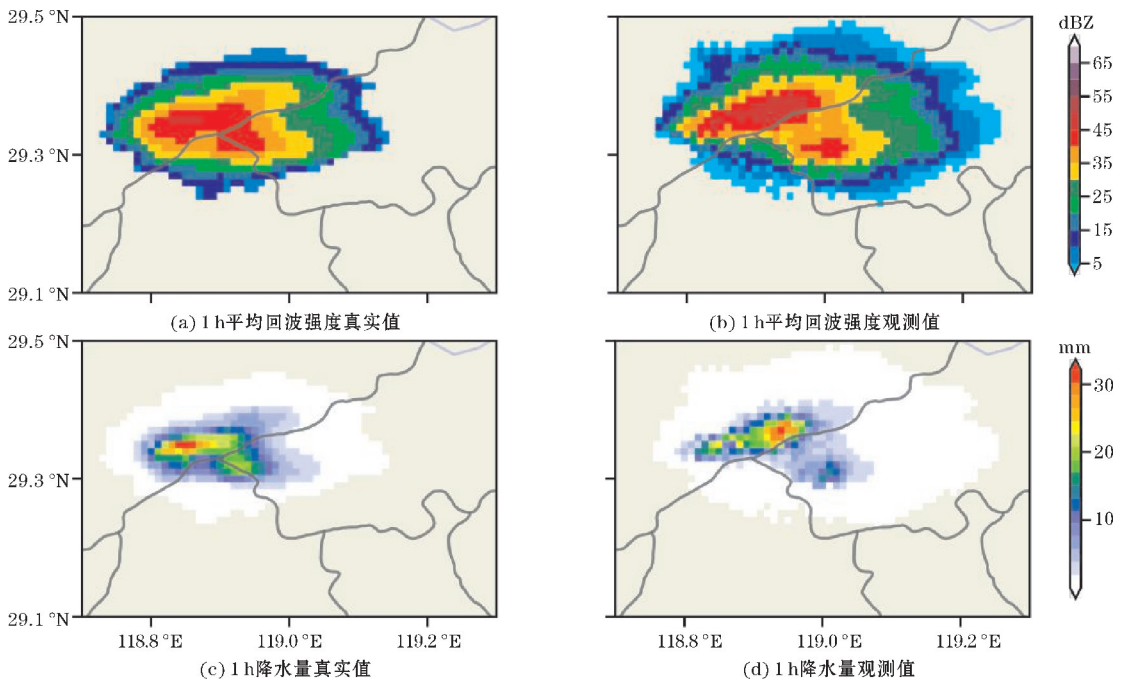


图9 杭州雷达在VCP21扫描模式观测得到的降水回波反射率因子以及降水反演对比示意图

2.3 MIX-VCP21 混合仰角扫描模式设计

为减少地形阻挡的影响,提高定量降水估计的精度,本文利用模拟观测系统对X波段雷达的扫描策略进行优化,以改善对地形复杂区域的低层探测能力。将杭州及周边地区(28°N~33°N,117°E~123°E)以0.01°分辨率构建分析网格,对比分析网格内每个格点对应的地形高度与杭州、建德乌龙山、淳安燕尖山3部雷达的实际探测高度,综合考虑地形阻挡和探测高度后取探测高度最接近地面且大于地形高度的雷达探测结果作为该网格的探测结果。改变建德乌龙山、淳安燕尖山2部X波段雷达的最低探测仰角,根据雷达站点信息和周围地形数据,计算2部雷达0.5°~1.5°(按0.1°的步长进行递增)各仰角组合下对分析网格替换的网格总数,具体计算流程如图10所示。从图11可以看到随着仰角的增大,距离雷达同一位置处的探测高度逐渐增大,导致被替换网格总数减少。当淳安燕尖山最低仰角为0.7°,建德乌龙山最低仰角为0.5°时,在分析网格覆盖范围内被替换的网格总数所占百分比最大。本研究将这种混合仰角扫描模式称为MIX_VCP21模式。

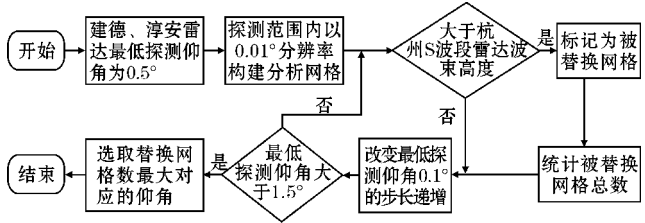


图10 最低探测仰角计算流程图

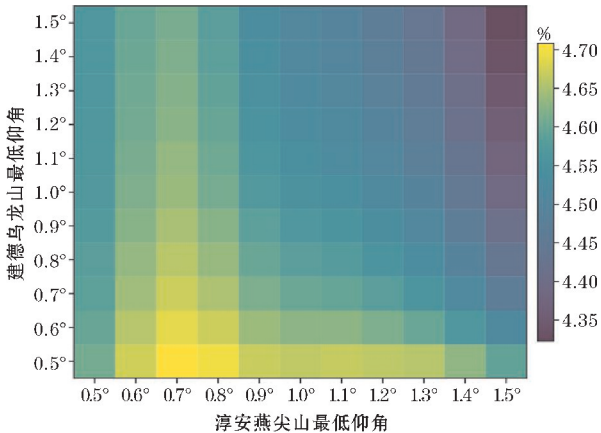


图11 淳安燕尖山和建德乌龙山两部X波段雷达不同仰角组合下分析网格替换的网格点数与总网格数的百分比示意图

图 12 显示了建德乌龙山和淳安燕尖山在 MIX-VCP21 和 VCP21 扫描模式下,雷达回波观测结果和定量降水估计的差异。对比分析降水反演结果可以看到,采用混合扫描模式得到的降水强度与参考场更为接近。

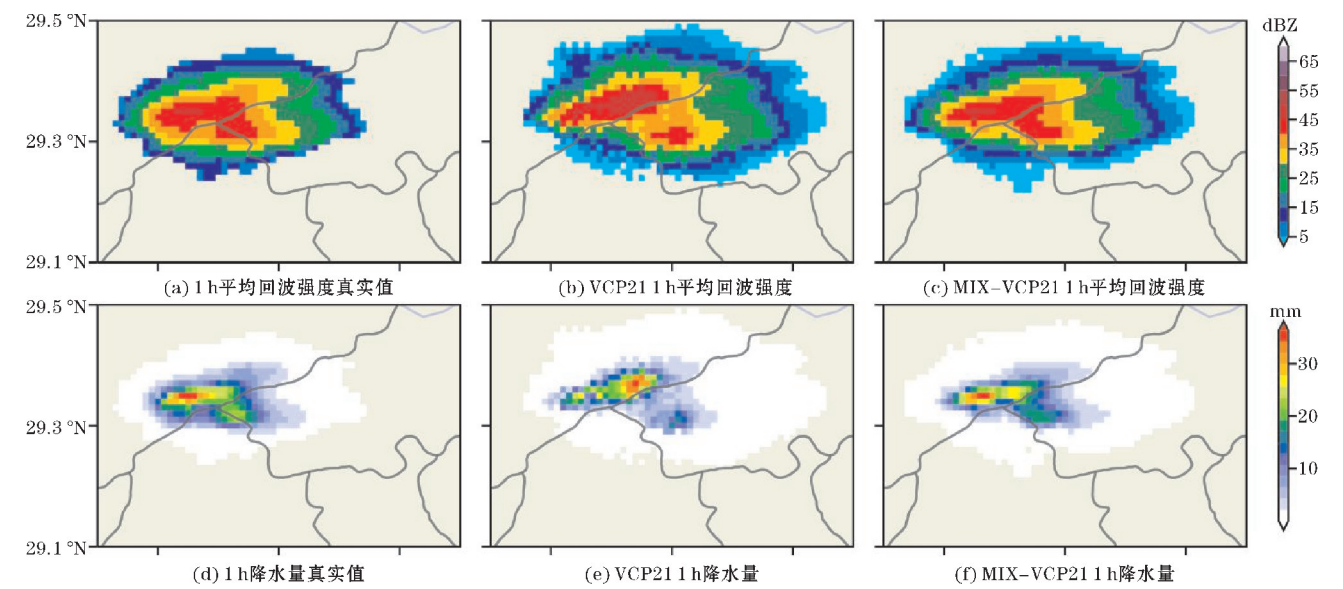


图 12 不同扫描模式降水反演对比示意图

进一步采用比率偏差(BIAS)、平均误差(ME)、绝对平均误差(MAE)、均方根误差(RMSE)来评估 VCP21 和 MIX-VCP21 两种模式定量降水估测效果。根据表 2 不同扫描模式降水强度评估结果可以看到, VCP21 模式和 MIX-VCP21 模式的 BIAS 都接近于 1, 但 MIX-VCP21 模式下的 ME 降低了 95%, MAE 降低了 53%, RMSE 降低了 59%, 整体而言, 采用 MIX-VCP21 扫描模式得到的定量降水估计值比 VCP21 模式下定量降水估计值更接近参考值。

$$\begin{aligned} \text{BIAS} &= \frac{r_{i,j}}{g_{i,j}} \\ \text{ME} &= \frac{1}{n} \sum_j^n (g_{i,j} - r_{i,j}) \\ \text{MAE} &= \frac{1}{n} \sum_j^n |g_{i,j} - r_{i,j}| \\ \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j^n |g_{i,j} - r_{i,j}|^2} \end{aligned}$$

其中, $r_{i,j}$ 为不同扫描模式下得到雷达反射率因子反演得到的降水强度, $g_{i,j}$ 为降水强度的参考值。

表 2 不同扫描模式评估结果

扫描模式	BIAS	ME	MAE	RMSE
VCP21	0.731	-1.084	2.825	6.429
MIX-VCP21	0.918	-0.064	1.319	2.664

按照短时临近气象服务降水量等级标准^[18], 计算 VCP21 模式和 MIX-VCP21 模式不同降水等级的 TS 评

分。从图 13 可以看到 MIX-VCP21 模式在不同降水等级下的 TS 评分都高于 VCP21 模式。晴天的 TS 评分提高了 12%, 短时小雨的 TS 评分提高了 15%, 短时中雨的 TS 评分提高了 31%, 短时大雨的 TS 评分提高了 27%, 短时暴雨的 TS 评分提高了 32%, MIX-VCP21 模式相比 VCP21 模式可以有效提高不同降水量级雷达定量降水估测的准确度。

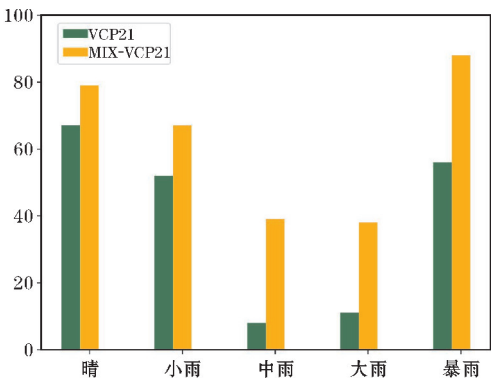


图 13 VCP21 模式和 MIX-VCP21 模式不同降水等级 TS 评分对比示意图

3 结论

本文利用物理模型和数字仿真计算, 设计并实现了一套天气雷达模拟观测系统。该系统以数字高层和数值模式模拟结果作为输入, 对影响天气雷达观测结果的主要因素进行仿真。以模拟观测系统为基础, 选择杭州及周边地区及该地区易发的灾害性天气短时暴

雨为研究对象,针对新一代天气雷达低空探测能力不足引起的降水估测误差较大的问题,以提高杭州 S 波段雷达和建德乌龙山、淳安燕尖山 2 部 X 波段雷达构成的雷达组网的降水估测能力为目的,提出适用于杭州雷达组网的混合仰角扫描模式(MIX-VCP21)。利用天气雷达模拟观测系统开展模拟观测实验,对比 VCP21 和 MIX-VCP21 两种模式下杭州雷达组网降水估测能力,结论如下:

(1)受地形影响,杭州 S 波段雷达在 0.5° 仰角不同程度的波束阻挡。杭州雷达 0.5° 和 1.5° 两层仰角观测的反射率因子得到的单部雷达混合反射率因子反演得到的 1 h 降水量与参考值相差较大。

(2)通过建德乌龙山和淳安燕尖山 2 部 X 波段雷达不同最低仰角组合对杭州 S 波段雷达底层探测盲区替换网格数的统计结果可以看出,当淳安燕尖山最低仰角为 0.7° ,建德乌龙山最低仰角为 0.5° 时,在分析网格覆盖范围内被替换的网格总数所占百分比最大。杭州雷达组网采用此混合仰角扫描模式(MIX-VCP21)得到的降水估测结果最接近参考值。

(3)杭州 S 波段雷达和通过建德乌龙山、淳安燕尖山 2 部 X 波段构成的雷达组网采用 MIX-VCP21 模式比杭州 S 波段雷达采用 VCP21 模式得到的 1 h 降水量更接近参考值,且对不同降水等级的估测能力均有提高。

参考文献:

- [1] 许小峰. 中国新一代多普勒天气雷达网的建设与技术应用[J]. 中国工程科学, 2003, 5(6): 7-14.
- [2] 刘彤. 我国的主要气象灾害及其经济损失[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 90-95.
- [3] 李柏, 古庆同, 李瑞义. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J]. 气象, 2013, 39(2): 265-280.
- [4] Brotzge J, Brewster K, Johnson B, et al. CASA' S FIRST TEST BED: INTEGRATIVE PROJECT #1[R].
- [5] 王宏伟. 补好灾害预警监测短板 协同应对系统性风险[N]. 中国应急管理报, 2021-10-30(003).
- [6] Oue M, Tatarevic A, Kollias P, et al. Copernicus GmbH, 2020. The Cloud-resolving model Radar SIMulator (CR-SIM) Version 3.3: Description and applications of a virtual observatory[J]. Geoscientific Model Development, 2020, 13(4): 1975-1998.
- [7] Bousquet O, Tabary P, du Châtelet J P. American Meteorological Society, 2008. Operational multiple-doppler wind retrieval inferred from long-range radial velocity measurements[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(11): 2929-2945.
- [8] Given T, RAY S. Response of a Two-Dimensional Dual-Doppler Radar Wind Synthesis[J]. American Meteorological Society, 1994, 11: 239-255.
- [9] Collis S, Protat A, Chung K S. The effect of radial velocity gridding artifacts on variationally retrieved vertical velocities[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(7): 1239-1246.
- [10] Clark T L. Errors in Wind Fields Derived from Multiple-Doppler Radars[J]. American Meteorological Society, 1980, 19: 1273-1284.
- [11] 康晓伟. GDEM 数据介绍[J]. 遥感应用, 2011, 6(14): 69-72.
- [12] 黄菁. 中尺度大气数值模拟及其进展[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 273-283.
- [13] 王晓君. 新一代中尺度预报模式 WRF 国内应用进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1191-1199.
- [14] Alberoni P P, Levizzani V, Watson R J, et al. The 18 June 1997 companion supercells: Multiparametric Doppler radar analysis[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2000, 75(1-2): 101-120.
- [15] Caumont O, Ducrocq V, Delrieu G, et al. A Radar Simulator for High-Resolution Nonhydrostatic Models[J]. American Meteorological Society, 2006, 23: 1049-1067.
- [16] 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[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1772-1784.
- [17] QT/T 524-2019. X 波段多普勒天气雷达[S]. 中国气象局, 2019.
- [18] 王曙东, 惠建忠, 张国平, 等. 短时临近气象服务降水量等级标准研究[C]. 中国气象学会. 第 34 届中国气象学会年会 S11 创新驱动智慧气象服务——第七届气象服务发展论坛论文集, 2017: 368-369.

Design and Application of Simulated Weather Radar Observation System

TANG Qiangqiang^{1,2}, ZHANG Fugui^{1,2}, TANG Jiajia^{1,2}

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Open Laboratory of Atmospheric Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China)

Abstract: The operational weather radars built in China mainly use the S and C band systems. Affected by the curvature of the earth and beam broadening, there are deficiencies such as low-altitude blind spots and low long-distance resolution. To make up for the limitations of the operational weather radar observation network, China is piloting the deployment of a batch of X-band weather radars with miniaturization and flexible scanning strategies. Based on the physical model and digital simulation technology, this paper designs and builds a simulated weather radar observation system to optimize and verify the X-band weather radar station network layout and scanning strategy. The system takes four-dimensional data of the weather process, generated by a digital elevation model and a numerical model, and simulates factors such as beam propagation, terrain blocking and radar sensitivity, which have a major impact on the detection performance of weather radar. Taking the X-band radar network in Hangzhou as the research object, the optimization of the scanning strategy for quantitative precipitation estimation is carried out. The research results show that the new volume scan mode designed by using the simulated weather radar observation system makes up for the lack of low-altitude detection capability of S-band radar in Hangzhou, and can effectively improve the quantitative precipitation estimation ability of the radar network in Hangzhou.

Keywords: quantitative precipitation estimation; simulated observation; scanning strategy; radar network; weather radar