

朱丹,谷军霞,师春香,等,2018.新一代天气雷达布网设计的有效覆盖和地形遮挡分析[J].气象,44(11):1434-1444.

新一代天气雷达布网设计的有效覆盖和地形遮挡分析^{*}

朱 丹¹ 谷军霞² 师春香² 周自江²

¹ 江西省宜春市气象局,宜春 336000

² 国家气象信息中心,北京 100081

提 要: 一般情况下,地形影响造成的雷达波束遮挡是长期保持不变的。研究雷达地形遮挡情况有助于提升雷达探测资料的有效性和可靠性。利用先进星载热发射和反射辐射计全球数字高程模型地形数据,对我国已建成的208个新一代天气雷达站点进行地形遮挡分析,计算业务体扫模式(Volume Coverage Pattern modes, VCP)21的九个仰角下200 km范围内雷达反射率的波束阻挡系数,绘制观测仰角分别为0.5°、1.45°、2.4°和3.35°时雷达有效观测区域的覆盖图,计算相应的有效覆盖面积。结果表明全国新一代天气雷达站200 km范围内0.5°、1.45°、2.4°和3.35°仰角平均遮挡比例分别为30.7%、8.5%、2.5%和1.0%,平均有效覆盖面积分别为83210.5、109354.2、118170.9、121631.5 km²,只有少数几个雷达站受邻近山脉地形遮挡影响严重,雷达站总体有效覆盖情况较好。

关键词: 新一代天气雷达,数字高程模型,波束遮挡,有效覆盖面积

中图分类号: P412, P414

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.11.006

Analysis of Effective Coverage and Terrain Blockage for Next Generation Radar Network Design

ZHU Dan¹ GU Junxia² SHI Chunxiang² ZHOU Zijiang²

¹ Yichun Meteorological Office of Jiangxi, Yichun 336000

² National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

Abstract: Generally, radar beam blockage caused by terrain remains unchanged for long. Research on the situation of radar terrain blockage is helpful for improving effectiveness and reliability of radar data. By using Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) terrain data, the terrain blockage of 208 existing Chinese next generation radar sites is computed. Beam blockage coefficient in a 200 km radius around radar sites is calculated at 9 observation elevation angles of Volume Coverage Pattern (VCP) modes 21. Maps of effective observation region where radar beam is not blocked are drawn while the elevation angle of radar remains at 0.5°, 1.45°, 2.4° and 3.35° respectively. The effectively covered area of radar sites is obtained according to these maps. Calculation result shows that the average blockage ratios of Chinese next generation radars within 200 km at 4 different elevation angles (0.5°, 1.45°, 2.4° and 3.35°) are 30.7%, 8.5%, 2.5% and 1.0% respectively, and the average effectively covered areas are 83210.5, 109354.2, 118170.9 and 121631.5 km² accordingly. Most of Chinese next generation radar sites can cover the surrounding area effectively as the influence of

^{*} 国家气象科技创新工程“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”攻关任务资助

2017年4月26日收稿; 2018年3月18日收修定稿

第一作者:朱丹,主要从事气象装备保障与雷达资料应用研究. Email:1796697681@qq.com

通信作者:谷军霞,主要从事多源数据融合及雷达资料应用研究. Email:gujx@ema.gov.cn

terrain blockage remains very low except a few sites near mountains.

Key words: new generation radar, digital elevation model (DEM), beam blockage, effectively covered area

引 言

新一代天气雷达利用直线传播、折射反射、多普勒效应等电磁波特性,从电磁波遇到目标后向散射的回波中提取强度、速度、谱宽等信息,反演出探测范围内目标物的空间位置、强弱分布、垂直结构等物理量场,实现对中尺度强对流天气现象的实时监测,有效提升气象灾害预警和区域降水估测能力,可为高分辨率数值预报模式提供完整的初始场资料(李柏等,2013)。经过 20 多年的建设,中国已建成的 208 个新一代天气雷达站点组成了规模庞大的监测网络,探测范围覆盖了 70% 以上的国土面积,为气象防灾减灾工作提供了强有力的支撑(许小峰,2003)。

雷达探测能力不仅受到雷达自身性能参数、电磁波传输过程中的衰减与折射等因素的影响,也受到雷达站周围高大建筑物和地形地貌的影响。庄荫模和程箴荣(1989)针对上一代的天气雷达讨论了雷达探测降水的有效范围。Westrick et al(1999)研究发现,使用下一代天气雷达探测资料定量估测降水时,由于波束遮挡产生的雷达回波强度偏弱,是降水估测结果失真的主要原因之一。万玉发等(2000)设计开发了利用地形高程数据绘制雷达单站遮挡角图、等射束高度图的软件,为分析地形对雷达波束的影响提供了便利的工具。张亚萍等(2002)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。赵瑞金和杨彬云(2003)比较了人工读取和地理信息数据读取数据模拟地物遮挡的方法,证实后者时效性明显优于前者。Kucera et al(2004)对比分析了采用 10、30、90 m 分辨率的地形数据对关岛雷达波束遮挡模拟结果的影响,发现地形数据分辨率对波束遮挡模拟结果的影响比较大。王翔等(2012)探讨了雷达波束传播路径的精确定位方法,从数学上推导出地形对雷达波束阻挡率的计算公式。王琳等(2016)利用雷达回波概率特征方法,统计了北京雷达不同仰角层雷达探测资料的概率空间分布,并

与背景场特征资料进行了对比分析检验。

随着新一代天气雷达监测网络的不断建设,如何利用多部雷达探测资料组网拼图成为亟待解决的关键问题。只要雷达站点密度足够高,组网拼图可以有效解决由波束阻挡、波束高度、波束展宽、静锥区等原因引起的各种问题。与此同时,多部雷达重复取样获得的天气信息要比只由单部雷达取样获得的更加精确。肖艳姣和刘黎平(2006)研究了把球坐标系下的雷达体扫资料插值到经纬度网格上以及用多部雷达的反射率网格资料进行三维拼图的方法,发现径向和方位上的最近邻居法结合垂直方向上的线性内插法能够较好地保留雷达体扫资料的结构特征和空间连续性,距离指数权重平均法则能够较好地保证反射率拼图的空间连续性和一致性。王建国等(2006)实现了山东及邻近省份雷达产品的远程调用,每 6 min 实时生成可局部放大、中心重定的拼图产品。杨洪平等(2009)利用高分辨率地形高程数据计算波束阻挡率,确定组网拼图的有效数据区域,研究了波束部分阻挡时回波强度订正的方法,指出不同观测模式对雷达实际探测范围有一定的影响。王红艳等(2009)研制了新一代天气雷达三维数字组网软件系统,实时生成高时空分辨率的区域雷达三维数字组网产品,实现了科研成果的业务化。王曙东等(2011)利用航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)获取的数据分析了全国 158 个雷达站点的地形遮挡情况,综合评估了新一代天气雷达网的覆盖能力,结果表明青藏高原地区和西北地区雷达覆盖较少,东部地区除部分山区雷达遮挡严重外,大部分覆盖较好。韩成鸣等(2016)采用最大值和距离指数权重拼图方法来改进 Local Analysis and Prediction System(LAPS)原有的最近邻居法,并且尝试通过最小二乘法来模拟静锥区的反射率值,结果表明最大值法和距离指数权重法能够充分发挥多部雷达观测反射率的效能,有效地改善高仰角之间的资料空白现象,对静锥区也有一些填补,特别是在对流层中层。

到目前为止,对雷达受地形遮挡的研究大都针对单部或小范围内几部雷达进行,没有针对全国范

围内雷达布网设计的评估分析,所采用的地形资料分辨率也稍有欠缺,无法完整地反映起伏较大的山区对雷达探测的影响。本文以 30 m 高分辨率地形资料为基础,分析 208 个中国新一代天气雷达站点布网设计的地形遮挡情况,利用地形对雷达波束阻挡率的计算公式,分别计算业务观测模式(Volume Coverage Pattern modes, VCP) 21 的九个仰角下 200 km 范围内雷达反射率的波束阻挡比例,绘制观测仰角分别为 0.5° 、 1.45° 、 2.4° 和 3.35° 时雷达有效观测区域的覆盖图,总结出反映单部雷达地形遮挡情况的两个指标:平均遮挡比例和有效覆盖面积,对比分析了几部典型雷达的覆盖情况,最后给出了全国雷达站布网设计地形遮挡情况的总体统计结果。

1 资料与研究方法

1.1 资料来源

雷达站周边上百千米或更大范围的地形资料,对评估雷达的探测能力十分重要。阻碍雷达波束传播的地形距离天线馈源越近,造成的影响就越大。由此可知,针对雷达地形遮挡的研究需要高分辨率的地形资料,尤其是雷达站附近的精细地形资料。本研究采用的地形高度资料是 ASTER GDEM V2 (www.gscloud.cn, 可公开下载),在第一版的基础上做了较大改进。它是利用美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)新一代对地观测卫星 Terra 获得的详尽观测结果制作完成的,是迄今为止覆盖范围最大的地形数据资料。Terra 搭载的先进星载热发射和反射辐射仪探测范围覆盖了 $83^\circ\text{S}\sim 83^\circ\text{N}$ 的所有陆地区域,它采集到的约 130 万个高分辨率立体像对经过校准和处理之后生成数字高程模型(Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer Global Digital Elevation Model, ASTER GDEM),其垂直精度为 20 m,空间分辨率达到 1 弧度秒(约 30 m)。由于云的影响和边界堆叠等原因,ASTER GDEM 数据中也包含一些异常。这可能在局部区域引起较大的高程误差,并在一定程度上影响数据的可用性。根据 NASA 和日本经济产业省(Ministry of Economy, Trade and Industry)合作对

ASTER GDEM 进行的初步验证和鉴定研究,ASTER GDEM 在全球范围内满足垂直精度为 20 m 的置信度为 95%。由于数据水平分辨率较高,ASTER GDEM 可以很好地反映局地复杂地形的地表起伏情况。

从等经纬度网格存储的 ASTER GDEM 数据块中读取雷达站四周地形的海拔高度,经过投影变换后形成以雷达天线馈源位置坐标为中心的极坐标地形分布图。考虑到极坐标图中距离雷达站越远的距离库范围越大,落在其中的高程值也会逐渐增多,本文采用了平均值距离库填充法,即对距离库内部的多个 ASTER GDEM 数据取平均值,把求得的平均高程当成该距离库的高程值。

计算地形遮挡对数据精度的要求很高,尤其是雷达站的位置信息。如果雷达站附近有严重影响雷达波束传播的地形,雷达站位置的误差将导致地形遮挡计算结果的严重偏差。由于站点搬迁、测量精度、信息传递等多种原因,从不同部门获取的雷达位置信息仍有可能存在误差。为了核查从不同部门获取到的雷达站点位置信息的准确性,本文主要参考了高分辨率卫星地图,对卫星地图上找不到雷达圆顶的位置逐一进行订正,确保雷达站经纬度位置偏差不超过 30 m。

1.2 雷达波束传播路径

理想状态下,雷达天线发射的无线电波应该是直线传播的,但是由于地球表面的大气分布不均匀,实际波束传播路径会发生明显的折射。对探空资料的分析表明,大气折射率在距离地面高度较低时可视为随高度线性变化,较高时可视为随高度指数变化。王红艳等(2014)对比分析了分层大气折射模式与标准大气假设下的雷达波束传播路径,发现两条路径非常接近,波束高度差值在 200 km 范围内基本不超过 250 m。为了简化计算,本文采用等效地球半径把雷达波束简化为按直线传播处理(图 1)。等效地球半径 R' 与大气折射指数 n 随高度 h 变化的关系为:

$$R' = \frac{R}{1 + R \frac{dn}{dh}}$$

式中, R 为地球半径, h 为雷达波束距离地面的高度。由上式可知:等效地球半径 $R' = kR$, 等效地心角

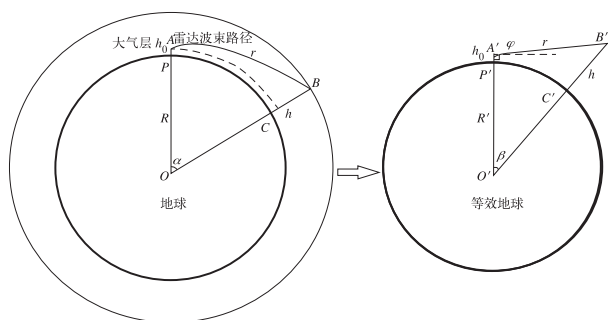


图 1 基于等效地球半径的雷达波束路径示意图

Fig. 1 Radar beam path based on effective radius of the Earth

$\beta = \alpha/k$, 其中 k 为等效地球半径系数, 采用标准大气假设时 $k=4/3$ 。

$$\begin{cases} h = \sqrt{(R' + h_0)^2 + r_0^2 + 2r_0(R' + h_0)\sin\varphi} - R' \\ \beta = \arccos \frac{(R' + h_0)^2 + (R' + h)^2 - r_0^2}{2(R' + h_0)(R' + h)} \end{cases}$$

式中, h_0 为雷达馈源离地面的高度, r_0 是点 B 到雷达馈源的距离, φ_0 是经过点 B 的雷达波束与水平面

雷达的数据点采用的是以雷达天线馈源为原点、馈源与地心的连线为 Z 轴的球坐标系, 点 B 在球坐标系中位置用 $(\theta_0, \varphi_0, r_0)$ 表示, 其中角 θ 为雷达波束传播路径与馈源所在轴截面的夹角, 角 φ 为雷达波束传播路径与馈源所在水平面的夹角, 距离 r 为雷达波束传播路径长度。地形数据结点采用的是以地心为原点、地轴为 Z 轴的球坐标系, 点 B 在球坐标系中用 (X, Y, Z) 表示, 其中角 X 为点 C 的经度, 角 Y 为点 C 的纬度, 距离 Z 为点 B 到地心的距离。假设雷达馈源点 A 的球坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) , $Z_0 = R + h_0$, 利用等效地球把雷达波束传播路径转换成直线, 雷达数据点 B 的对应点 B' 与等效地球地心 O' 、雷达馈源对应点 A' 构成一个三角形, 利用余弦定理求解可得:

的夹角。对应的地心角 $\alpha = k\beta$, 利用余弦定理求解三角形 OAB 可得:

$$\begin{cases} AB = \sqrt{(R + h_0)^2 + (R + h)^2 - 2(R + h_0)(R + h)\cos k\beta} \\ \angle OAB = \arccos \frac{R + h_0 - (R + h)\cos k\beta}{AB} \end{cases}$$

式中, h 为点 B 离地面的高度。相应的坐标转换公式如下:

$$\begin{cases} X = X_0 + \arctan \frac{AB \sin \angle OAB \sin \theta_0}{Z_0 \cos Y_0 - AB \sin \angle OAB \cos \theta_0 \sin Y_0} \\ Y = \arcsin \frac{(Z_0 - AB \cos \angle OAB)(Z_0 \sin Y_0 + AB \sin \angle OAB \cos \theta_0 \cos Y_0)}{Z_0 \sqrt{Z_0^2 + AB^2 - 2Z_0 AB \cos \angle OAB}} \\ Z = R + h \end{cases}$$

式中 X_0, Y_0, Z_0 分别为雷达馈源的经度、纬度和到地心的距离, θ_0 是经过点 B 的雷达波束按顺时针旋转时与正北方向的夹角。

1.3 雷达波束阻挡率计算

新一代天气雷达的工作原理是发射和接收电磁波, 利用多普勒效应分析发射与接收的电磁波之间频率变化大小, 探测气象目标相对雷达波束的速度, 反演出中小尺度天气系统的位置、强度、结构、特征、趋势等物理量场。电磁波在传播路径中碰到地形就会发生反射、散射、折射、绕射、吸收等多种效应, 能量相应减少。波束阻挡率就是由于地形影响造成的雷达功率损失与雷达天线馈源发射的电磁波总功率的比值, 它体现了地形对雷达探测的影响大小。当地形影响造成的能量损失超过一定的百分比时, 雷

达波束传播路径上更远处的回波强度将相应变弱, 有时甚至无法测量。

张培昌等(2000)指出, 根据雷达气象方程, 天线辐射强度不均匀分布时单个目标的雷达回波功率为

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L^4} |f(\theta, \varphi)|^4$$

式中, P_t 为雷达发射功率, G 为雷达天线增益, λ 为天线波长, L 为目标与雷达天线的距离, σ 为目标的后向散射截面面积, $f(\theta, \varphi)$ 为雷达天线方向图函数, θ 为与波束中心轴线的水平夹角, φ 为与波束中心轴线的垂直仰角。

天线波束传播路径上与波束轴线成 θ, φ 夹角方向上的能流密度为

$$S(\theta, \varphi) = S_{\max} |f(\theta, \varphi)|^2$$

式中 S_{\max} 为最大辐射方向上的能流密度。张亚萍等

(2002)指出,当天线波束内能流密度分布不均匀,且半功率点以外还有能量时,雷达天线方向图函数

$$|f(\theta, \varphi)|^2 = e^{-4\ln 2(\frac{\theta^2}{s^2} + \frac{\varphi^2}{s^2})}$$

式中 s 为雷达波束宽度。

波束遮挡率是遮挡造成的功率损失与总功率的比值。假设在雷达数据点 $B(\theta_0, \varphi_0, r_0)$ 处地形对雷达波束的阻挡角度为 $g(\theta_0, \varphi_0, r_0)$, 波束阻挡率 $\rho(\theta_0, \varphi_0, r_0)$ 等于方位阻挡系数 $T(\theta, \varphi_0, r_0)$ 与方位影响因子 $W(\theta)$ 乘积的积分, 即

$$\rho(\theta_0, \varphi_0, r_0) = \int_{-\pi}^{\pi} T(\theta, \varphi_0, r_0) W(\theta) d\theta \times 100\%$$

式中方位阻挡系数 $T(\theta, \varphi_0, r_0)$ 为

$$T(\theta, \varphi_0, r_0) = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{\frac{-8\ln 2\varphi^2}{s^2}} d\varphi}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{\frac{-8\ln 2\varphi^2}{s^2}} d\varphi}$$

方位影响因子 $W(\theta)$ 为

$$W(\theta) = \frac{\int_{\theta-\theta_0-\frac{s}{2}}^{\theta-\theta_0+\frac{s}{2}} e^{\frac{-4\ln 2\theta^2}{s^2}} d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} e^{\frac{-4\ln 2\theta^2}{s^2}} d\theta}$$

由于雷达发射的电磁波在到达数据点 $B(\theta_0, \varphi_0, r_0)$ 之前可能已经受到地形的阻挡, 实际计算时应当使用点 B 到雷达天线馈源的波束路径上取值最大的波束阻挡率 $\rho'(\theta_0, \varphi_0, r_0)$, 即

$$\rho'(\theta_0, \varphi_0, r_0) = \max_{0 < r < r_0} \rho(\theta_0, \varphi_0, r)$$

2 雷达地形遮挡分析

2.1 地形遮挡仰角

要计算雷达数据点 $B(\theta_0, \varphi_0, r_0)$ 处的波束遮挡率, 首先要知道雷达发射的波束被四周地物遮挡的角度 $g(\theta, \varphi_0, r_0)$ 。假设 Q 点为方位角为 θ 时地物对雷达波束遮挡的最高点, Q 点对雷达波束的遮挡仰角 $g(\theta, \varphi_0, r_0) = \angle QA'O' - \pi/2$, 通过坐标转换可求出 Q 点的经纬度坐标和地心角 β , 利用高分辨率地形数据 ASTER GDEM 双线性插值得出 Q 点的海拔高度 H , 利用余弦定理求解三角形 $QA'O'$ 可得:

$$g(\theta, \varphi_0, r_0) = \arctan \frac{(R' + H)\cos\beta - R' - h_0}{(R' + H)\sin\beta}$$

由上式可知, Q 点的地物遮挡角度主要取决于 Q 点的位置坐标, 计算时需要考虑雷达的探测范围。

目前中国新一代天气雷达主要有两种波段(S波段和C波段)八个型号, 探测范围大小不一, 实际业务运行探测降水时主要采用 VCP21 体积扫描模式, 即6分钟内扫描 0.5° 、 1.45° 、 2.4° 、 3.35° 、 4.3° 、 6.0° 、 9.9° 、 14.6° 、 19.5° 等九个仰角, 最低的两个仰角采用分离取样方式, 中间的四个仰角采用交替取样方式, 上面的三个仰角采用连续多普勒方式。由于新一代C波段雷达探测范围已达到 200 km, 未来有可能通过硬件改造提升老旧雷达的探测范围, 同时考虑到雷达波束路径上距离天线馈源 200 km 以上的点受到地物遮挡的仰角非常低 ($< 0.5^\circ$), 影响非常小, 所以本文统一给出 200 km 的极坐标地形图和遮挡仰角图, 只计算 200 km 内地物对雷达波束的遮挡仰角。

雷达极坐标地形和遮挡仰角数据均以雷达站位置为中心, 从正北方向顺时针排列, 方位间隔, 径向分辨率 500 m, 最大距离 200 km, 总共有 3600×400 个数据。选取不同型号的雷达站点(南昌 CINRAD/SA 雷达站, 成都 CINRAD/SC 雷达站, 西安 CINRAD/CB 雷达站, 昆明 CINRAD/CC 雷达站, 拉萨 CINRAD/CD 雷达站), 分别绘制极坐标地形图和遮挡仰角图(图2)。

通过雷达站点附近地形图与遮挡仰角图的对比, 可以发现近距离地形造成的遮挡明显大于远距离的地形, 距离越近相应的遮挡仰角越大。全国 208 个雷达站点附近地形对雷达波束的最大遮挡角为 14.54° , 位于西藏林芝雷达站东北方向 6 km 处。

2.2 波束阻挡比例

地形对雷达波造成的遮挡可分为部分遮挡和完全遮挡两种情况。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。而部分遮挡时, 雷达探测到的回波强度值偏低, 需要加以订正。根据雷达气象方程可知, 由于地物遮挡造成的回波强度订正值取决于雷达在该点的波束阻挡率, 即

$$dBz - dBz' = 10 \lg \frac{1}{1 - \rho'(\theta_0, \varphi_0, r_0)}$$

波束阻挡率取值为 10.9%、29.2%、43.8% 和 55.3% 时, 回波强度订正值约为 0.5、1.5、2.5、3.5 dB。在实际探测当中, 波束阻挡率大于 55% 时回波强度探测值与实际值明显相关系数非常低, 可以近似认为波束被地形完全遮挡。按照回波强度订正值的大小, 本文把波束阻挡率分为 10.9% 以下、

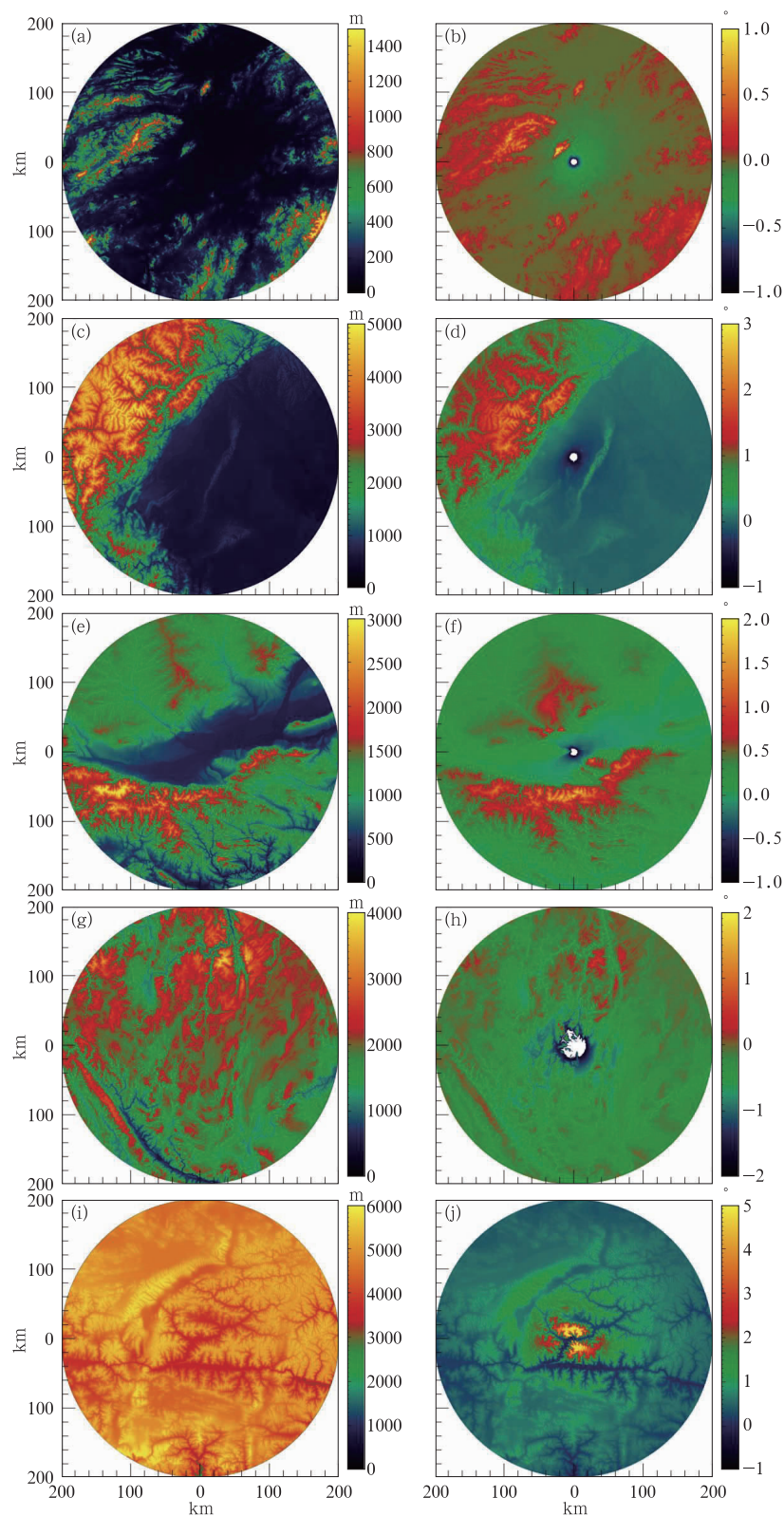


图 2 不同型号雷达站 200 km 范围内的地形图(a,c,e,g,i)和遮挡仰角图(b,d,f,h,j)

(a,b)南昌,(c,d)成都,(e,f)西安,(g,h)昆明,(i,j)拉萨

Fig. 2 Topographic map (a, c, e, g, i) and blocking angle map (b, d, f, h, j) around different types of radars within 200 km

(a, b) Nanchang, (c, d) Chengdu, (e, f) Xi'an, (g, h) Kunming, (i, j) Lhasa

10.9%~29.2%、29.2%~43.8%、43.8%~55.3%、55.3%以上五类。

取雷达波束宽度 $s=0.95^\circ$ ，以拉萨雷达为例分别计算 VCP21 模式下 200 km 范围内各个仰角的波束阻挡比例，绘制波束阻挡图(图 3)。

以雷达站为中心，某个半径 d (d 分别取值 50、75、100、150、200 km) 范围内仰角为 φ 时方位间隔 0.1° ，径向分辨率 500 m 的所有波束阻挡率数据取平均值 ρ_d ，称为雷达站在仰角 φ 下的平均遮挡比例。平均遮挡比例反映了雷达站周边地形对波束遮挡的平均效应。地形对雷达波束遮挡越严重，平均遮挡比例就越大。由于实际观测中混合扫描反射率只使用了 0.5° 、 1.45° 、 2.4° 和 3.35° 四个仰角的反射率数据，而且其他仰角的反射率数据受到地物遮挡的影

响一般都非常小 ($<10.9\%$)，本文统计了全国 208 个新一代天气雷达站点(包括部分尚未正式运行的站点)在上述五种距离范围内，上述四个仰角时的平均遮挡比例，按照以上五类波束阻挡率 ρ 分别绘制柱状图(图 4)。

统计结果表明，全国新一代天气雷达站 50、75、100、150、200 km 范围内 0.5° 、 1.45° 、 2.4° 和 3.35° 仰角平均遮挡比例分别为 16.0%、4.4%、1.2% 和 0.3%，20.8%、5.8%、1.6% 和 0.4%，24.0%、6.7%、1.9% 和 0.5%，28.1%、7.7%、2.2% 和 0.6%，30.7%、8.5%、2.5% 和 1.0%，平均遮挡比例随距离的增加而增大，地形遮挡最严重的三部雷达均位于西藏自治区，分别是拉萨、日喀则和林芝。

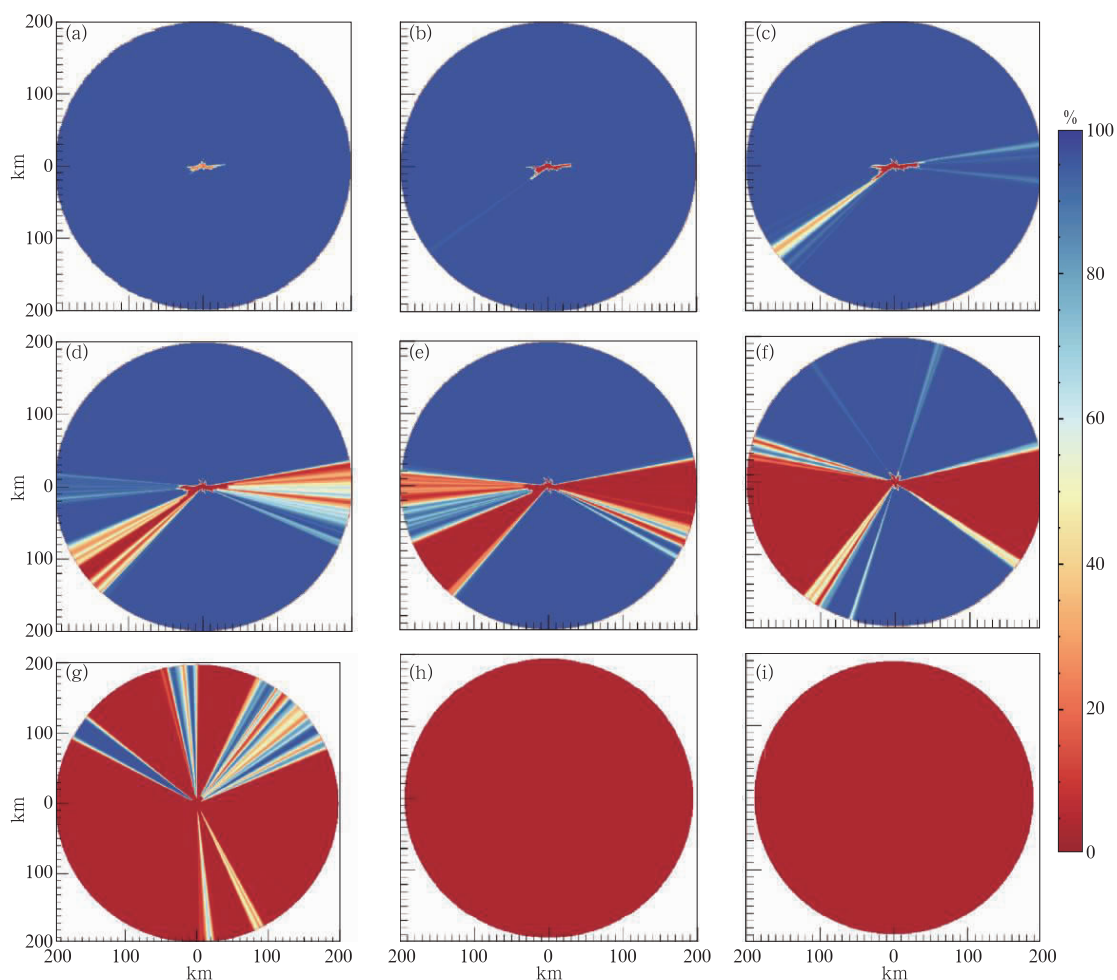


图3 拉萨 CINRAD/CD 雷达站 200 km 范围内不同仰角的波束遮挡图

(a) 0.5° , (b) 1.45° , (c) 2.4° , (d) 3.35° , (e) 4.3° , (f) 6.0° , (g) 9.9° , (h) 14.6° , (i) 19.5°

Fig. 3 Radar beam blocking rate map for Lhasa CINRAD/CD Radar Site within 200 km at different elevation angles

(a) 0.5° , (b) 1.45° , (c) 2.4° , (d) 3.35° , (e) 4.3° , (f) 6.0° , (g) 9.9° , (h) 14.6° , (i) 19.5°

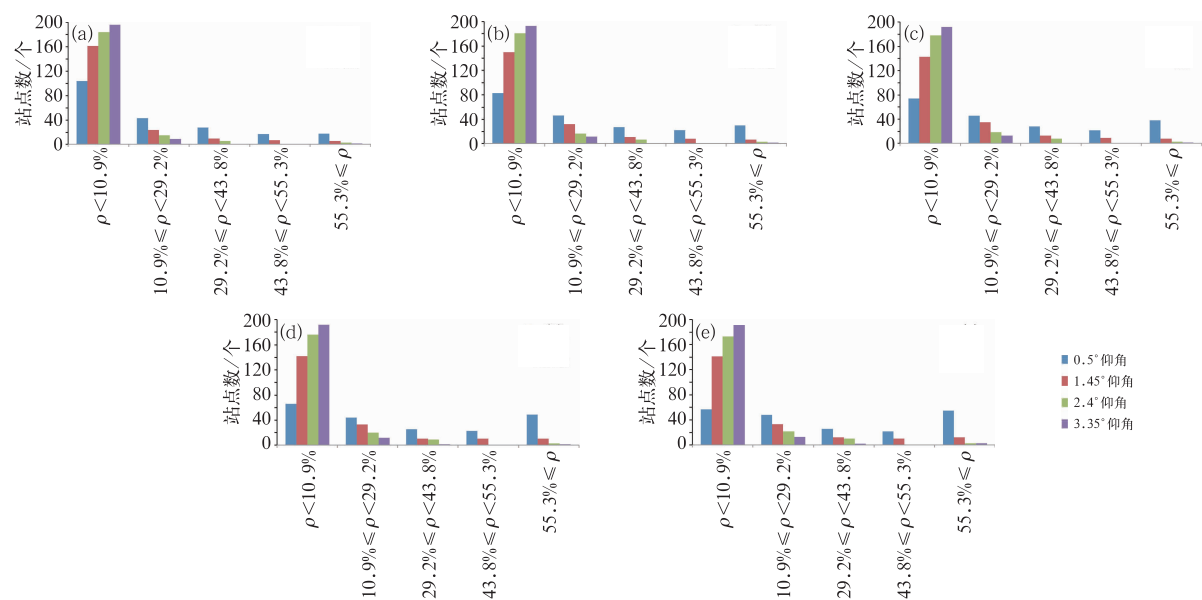


图 4 208 个中国新一代天气雷达站点不同距离内平均遮挡比例
(a)50 km, (b)75 km, (c)100 km, (d)150 km, (e)200 km
(图中 ρ 为波束阻挡率)

Fig. 4 Average blocking rates for 208 Chinese new generation radar sites within different distances
(a)50 km, (b)75 km, (c)100 km, (d)150 km, (e)200 km
(ρ for radar beam blocking rate)

3 雷达覆盖能力分析

3.1 有效数据区域

雷达体扫区域是一个锥形的扇面,各径向数据点并不在同一水平面上。为了实现多部雷达探测资

料组网拼图,需把不同仰角的体扫数据插值到同一等高面上。这就意味着离雷达距离近时需要选取仰角较大的体扫数据,距离远时选取仰角较小的体扫数据。本文采用基于距离的混合扫描反射率,按照体扫数据的组合方式,组成混合扫描波束阻挡图,即 20 km 以内使用 3.35°仰角的阻挡率,20~35 km 使用 2.4°仰角的阻挡率,35~50 km 使用 1.45°仰角的阻挡率,50 km 以上使用 0.5°仰角的阻挡率。以宜春 CINRAD/SA 雷达为例,对比实际观测的混合扫描基本反射率图(图5)和组合波束遮挡图(图6)。可

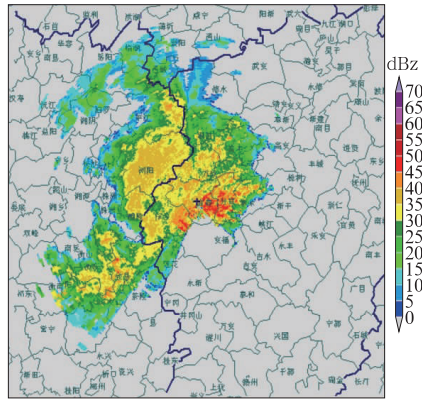


图 5 2016 年 4 月 26 日 08 时宜春雷达站
混合扫描基本反射率图
Fig. 5 The base reflectivity map of
Yichun Radar by mixed sweep using
combined detecting angle at
08:00 BT 26 April 2016

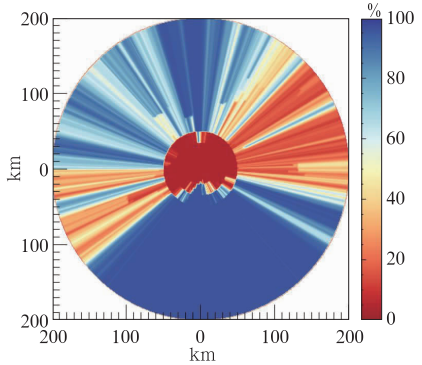


图 6 宜春雷达站混合扫描波束遮挡图
Fig. 6 Mixed sweep blocking rate map
for Yichun Radar Site

以直观地发现,雷达波束阻挡率较高的地方回波强度明显偏低,当阻挡率超过 60% 时雷达波束被完全遮挡。

刘晓阳等(2010)研发了基于新一代天气雷达的估测降水软件,评估了雷达雨量估测的精度。王红艳等(2015)采用两步校准法改善了雷达估测降水的系统性偏差,然后对雷达—雨量计对之间的差异进行统计学的分析。王丽荣和王立荣(2017)分析了海拔高度和与雷达站水平距离对定量估测降水的影响,

设计了雷达定量估测降水最佳方案。本文收集了 2016 年 7 月部分雷达站的基数据文件,利用中国气象局探测中心的单部雷达降水估测产品(OHP),计算雷达站单月累积降水量。以建阳 CINRAD/SA 雷达站、大理 CINRAD/CC 雷达站、宝鸡 CINRAD/CB 雷达站为例,对比雷达定量估测降水累积量图与混合扫描波束遮挡图(图 7)。可以看出,用 DEM 数据模拟的混合扫描波束遮挡图与实际雷达探测时波束受到的地形遮挡具有高度一致性。

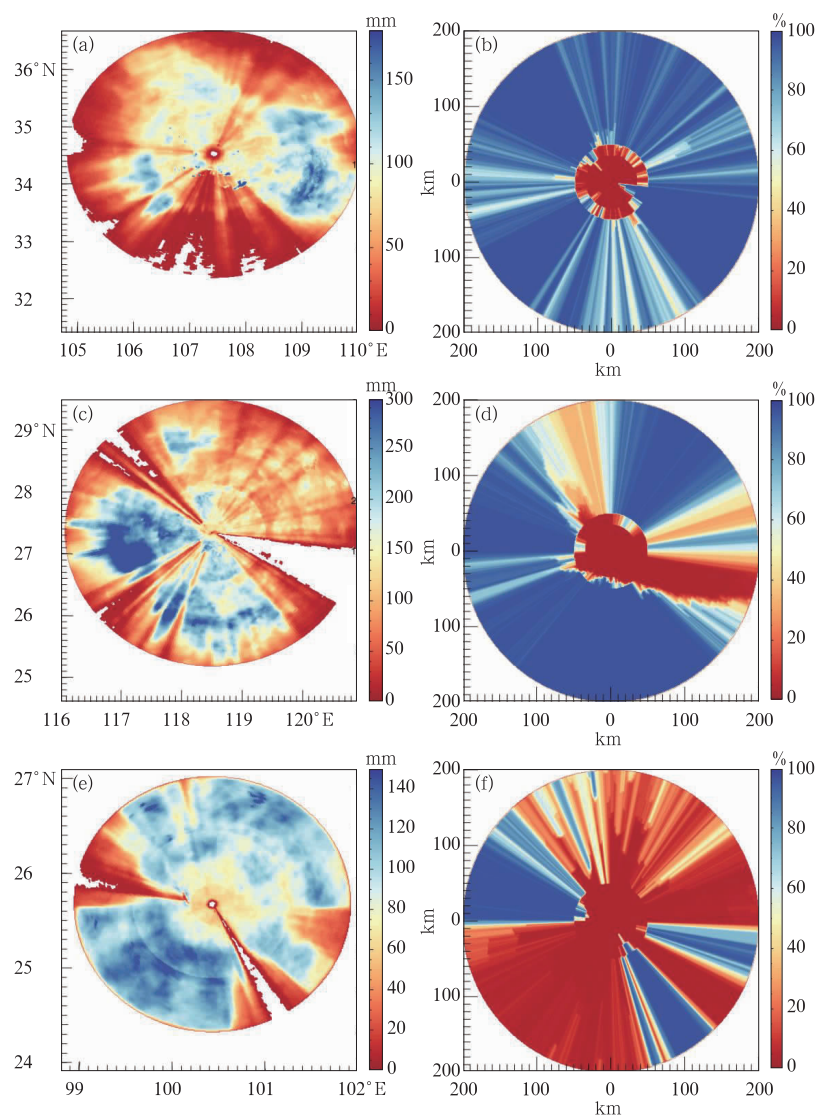


图 7 2016 年 7 月不同型号雷达站的雷达定量估测降水累积量图(a,c,e)
和混合扫描波束遮挡图(b,d,f)
(a,b)建阳,(c,d)宝鸡,(e,f)大理

Fig. 7 Accumulation map using radar QPE product (a, c, e) and mixed sweep blocking rate map (b, d, f) for different types of radar sites in July 2016
(a, b) Jianyang, (c, d) Baoji, (e, f) Dali

3.2 有效覆盖面积

当波束阻挡率超过 60% 时,可以认为雷达波束被完全遮挡,形成了探测盲区。以雷达站为中心,某个半径 d (d 分别取值 50、75、100、150、200 km) 范围内雷达以仰角为 φ 扫描 360° 能够覆盖到的面积称为有效覆盖面积 C_d 。 C_d 反映了地形遮挡对雷达探测能力影响的大小。地形对探测能力影响越小, C_d 就越大。为适应不同型号雷达的功能需求,本文计算了全国 208 个雷达站点(包括部分尚未正式运行的站点)200 km 范围内仰角分别为 0.5°、1.45°、2.4° 和 3.35° 时的 C_d ,按省级行政区分别平均后绘制柱状图(图 8)。

计算结果表明,全国 208 个雷达站点(包括部分尚未正式运行的站点)200 km 范围内仰角分别为 0.5°、1.45°、2.4° 和 3.35° 时平均有效覆盖面积分别为 83210.5、109354.2、118170.9、121631.5 km²。总体而言,中部和东部各省的雷达覆盖情况都比较好,西部各省相对稍差,西藏、青海、陕西、山西、贵州、新疆等省(区)的雷达受到地形遮挡的影响比较大。

4 结论与讨论

本文以 ASTER GDEM 30 m 高分辨率地形资

料为基础,对中国新一代天气雷达布网设计进行地形遮挡和覆盖能力的分析研究,分别模拟计算了 208 个雷达站点 200 km 范围内不同仰角的平均遮挡比例和有效覆盖面积。前者为 360° 方位上所有地形影响造成的遮挡比例的平均值,反映了雷达站周围地形的遮挡程度,后者为雷达以指定仰角探测时能够覆盖到的全部面积,反映了雷达的实际探测能力。对比分析发现,利用 DEM 数据模拟的地形遮挡与雷达实际探测受到的地形遮挡有很好的相关性。计算结果表明,地形对雷达 0.5° 仰角探测的遮挡比例较高,有四分之一的雷达站平均遮挡比例超过了 55%,全国雷达探测能够覆盖到的平均有效面积只有最大面积的三分之二,雷达以其他仰角探测时地形遮挡的影响相对较小,绝大多数的雷达站覆盖到的面积都超过了最大扫描面积的 80% (青藏高原上的 6 部雷达除外)。总体而言,地形遮挡对雷达探测的影响相对可控,全国雷达站整体覆盖情况较好。

本文采用的 ASTER GDEM 数据是 1999 年发射的卫星 Terra 采集到的,不能真实反映雷达站周边新建建筑物的影响,因此会造成模拟地形遮挡效果在某些方位的缺失。比如北京大兴 SA 雷达东南方向、山东临沂 SC 雷达西南方向都有高大的新建建筑物,对实际雷达探测造成了极大的遮挡,但是在模拟地形遮挡图中都没有体现。未来应当考虑将雷

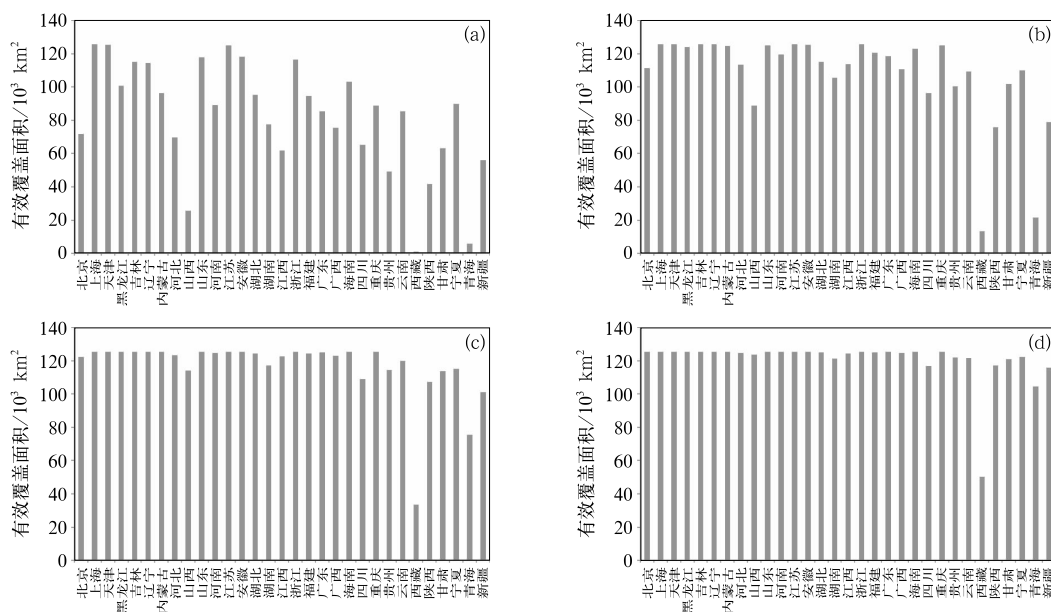


图 8 中国新一代天气雷达站不同仰角 200 km 范围内有效覆盖面积

(a)0.5°, (b)1.45°, (c)2.4°, (d)3.35°

Fig. 8 Effectively covered area for Chinese new generation radar sites within 200 km at different elevation angles

(a)0.5°, (b)1.45°, (c)2.4° and (d)3.35°

达站附近新建建筑物数据叠加到地形数据上,真实反映雷达探测受到的实际遮挡情况。

雷达波束实际路径是非常复杂的曲线,不同地点、不同时刻由于大气物理性质的变化会受到不同的影响。本文把雷达波束路径理想化为标准大气状况下的射线,只能代表多年平均情况下的波束路径,不能反映某个具体时刻的实际传播路径。一般情况下,气温较高时实际路径与理想路径的偏差会增大,但是这种偏差对近距离地物遮挡的影响较小,模拟地物遮挡能够满足实际计算时的精度要求。

地形数据的分辨率对于近距离波束遮挡模拟结果的影响很明显,但是高分辨率数据对存储和计算的要求都很高,而远距离波束遮挡模拟结果受地形数据分辨率的影响较小,可以考虑近距离采用高分辨率的地形数据,远距离采用低分辨率的地形数据,既保证精度又节省不必要的计算和数据量。

参考文献

- 韩成鸣,李耀东,史小康,2016. LAPS 雷达反射率拼图方法改进及静锥区填充方法研究[J]. 气象,42(3):322-329.
- 李柏,古庆同,李瑞义,等,2013. 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,39(3):265-280.
- 刘晓阳,杨洪平,李建通,等,2010. 新一代天气雷达定量降水估测集成系统[J]. 气象,36(4):90-95.
- 万玉发,杨洪平,肖艳姣,等,2000. 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,11(4):440-447.
- 王红艳,刘黎平,何丽萍,2014. 浙江山区新一代天气雷达波束遮挡分析[J]. 高原气象,33(6):1737-1747.
- 王红艳,刘黎平,肖艳娇,等,2009. 新一代天气雷达三维数字组网软件系统设计与实现[J]. 气象,35(6):13-18.
- 王红艳,王改利,刘黎平,等,2015. 利用雷达资料对自动雨量计实时质量控制的方法研究[J]. 大气科学,39(1):59-67.
- 王建国,高玉春,朱君鉴,等,2006. 山东省新一代天气雷达组网业务应用[J]. 气象,32(10):102-106.
- 王丽荣,王立荣,2017. 水平距离和海拔高度对雷达估测降水影响及订正[J]. 气象,43(9):1152-1159.
- 王琳,谭学,郑文,等,2016. 新一代天气雷达背景场特征资料生成方法及检验[J]. 水文,36(1):27-31.
- 王曙东,裴翀,郭志梅,等,2011. 基于 SRTM 数据的中国新一代天气雷达覆盖和地形遮挡评估[J]. 气候与环境研究,16(4):459-468.
- 王翔,沈铁元,杨洪平,等,2012. 雷达波束传播路径精确定位与地形对波束的阻挡计算[J]. 沙漠与绿洲气象,6(3):8-13.
- 肖艳姣,刘黎平,2006. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报,64(5):647-657.
- 许小峰,2003. 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,5(6):7-14.
- 杨洪平,张沛源,程明虎,等,2009. 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,20(1):47-55.
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2000. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社:70-93.
- 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[J]. 南京气象学院学报,25(5):640-647.
- 赵瑞金,杨彬云,2003. 地理信息系统(GIS)在新一代天气雷达选址中的应用[J]. 气象,29(6):30-32.
- 庄荫模,程箴荣,1989. 可用于雨区边界的雷达方程和有意义的波束范围[J]. 高原气象,8(3):261-272.
- 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]. J Atmos Ocean Technol, 21(7):995-1006.
- 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[J]. Bull Amer Meteor Soc, 80(11):2289-2298.