

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. Wang Shudong, Pei Chong, Guo Zhimei, et al. 2011. Evaluations on Chinese next generation radars coverage and terrain blockage based on SRTM data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 459 - 468.

基于 SRTM 数据的中国新一代天气雷达覆盖 和地形遮挡评估

王曙东^{1,2,3} 裴翀³ 郭志梅³ 邵楠³

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

摘 要 利用航天飞机雷达地形测绘数据 (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 3 s 高分辨率地形数据对全国已建成的 158 部新一代天气雷达分别进行了地形遮挡和覆盖能力计算, 并提出了 3 个定量指标: 覆盖比、高度-面积指数和等效覆盖半径。按照这些指标, 对各雷达进行了计算和统计, 并分析典型雷达站点的覆盖和遮挡情况。同时综合评估了全国雷达网的覆盖能力, 结果表明青藏高原地区和西北地区覆盖较少, 东部地区除部分山区雷达遮挡严重, 大部分覆盖较好, 全国 1、2、3 km 高度的覆盖率分别为 16.9%、38.8%、52.8%, 东部地区相应覆盖率达 27.1%、59.8%、76.8%。0~3 km 高度范围内, 东南到华南沿海地区普遍有 2 个雷达重叠, 华东到华北平均有 2~4 个雷达重叠, 内蒙古中部和东北地区平均有 1~2 个覆盖重叠。可以认为我国雷达总体布局较好。

关键词 新一代天气雷达 航天飞机雷达地形测绘数据 地形遮挡 覆盖比 高度-面积指数 等效覆盖半径

文章编号 1006-9585 (2011) 04-0459-10 **中图分类号** P411 **文献标识码** A

Evaluations on Chinese Next Generation Radars Coverage and Terrain Blockage Based on SRTM Data

WANG Shudong^{1,2,3}, PEI Chong³, GUO Zhimei³, and SHAO Nan³

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract With Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 3-second high resolution terrain data, the terrain blockage and coverage of Chinese Next generation RADars (CINRADs) are computed, and the theoretical results correspond with real radar echoes fairly well. In order to quantitatively assess the detecting ability of CINRADs, the authors proposed and illustrated three factors, that is coverage ratio, height-area index, and its equivalent radius. Finally, an overall assessment was given on the 158 CINRADs coverage over China, that is the coverage ratios of three height levels (1 km, 2 km, and 3 km above ground level) are 16.9%, 38.8%, and 52.8%, respectively. The

收稿日期 2009-05-30 收到, 2011-05-11 收到修定稿

资助项目 中国气象局气象灾害监测预警与应急工程“综合气象观测系统运行监控平台 (ASOM) 建设”

作者简介 王曙东, 男, 1970 年出生, 博士研究生, 从事资料同化和数据分析。E-mail: wsu@mail.iap.ac.cn

Tibetan Plateau and the northwestern part of China are relatively less covered, while the eastern part ($22^{\circ}\text{N} - 42^{\circ}\text{N}$, $102^{\circ}\text{E} - 120^{\circ}\text{E}$) are well covered with ratios of 27.1%, 59.8%, and 76.8%, respectively. As to 3-km above ground level, the coastal areas have 2-radar coverage overlapping and the eastern and northern parts of China have 2-4-radar coverage overlapping; the center part of the Inner Mongolia and the north eastern part of China have 1-2-radar coverage overlapping.

Key words Chinese next generation radar, shuttle radar topography mission, terrain blockage, coverage ratio, height-area index, coverage equivalent radius

1 引言

经过 10 多年的努力,我国已经建成“中国气象灾害预警工程”所规划的第一期共 158 部新一代天气雷达 (ChInese Next generation RADar, CINRAD, 后文简称为雷达),形成了相当规模的天气雷达监测网。同时,基于新一代天气雷达的探测原理教学(张培昌等, 2001; 俞小鼎等, 2006)、业务应用和科研探索也蓬勃开展:李柏等(2001)通过新一代天气雷达反射率分析了江淮流域梅雨锋暴雨过程的中尺度特征;李柏等(2007)同化雷达风廓线资料改进了 2003 年淮河流域暴雨和风场的模拟;俞小鼎等(2008)利用雷达资料详细分析了安徽北部一次伴随强烈龙卷和暴雨的强降水超级单体风暴;徐亚钦等(2011)利用雷达和自动站资料综合分析风暴移动和发展规律,发现地面中尺度辐合线有利于对流单体的新生和发展,同时对主回波未来的走向和形状也有较大影响;在多普勒雷达同化研究方面,盛春岩等(2006)利用 ARPS 模式同化雷达反射率及径向风资料,改进了各层风场和水汽特性的模拟;祝婷和钟青(2008)利用 ARPS 模式同化雷达基数据,改善了短时降水范围、强度和降水中心的预报;兰伟仁等(2010a, 2010b)在区分有模式偏差和无模式偏差的情况下,利用模拟多普勒雷达资料进行一系列风暴天气尺度的资料同化试验,检验集合卡尔曼滤波在风暴天气尺度资料同化方面的效果,并验证各集合卡尔曼滤波参数对同化效果的影响。在雷达资料联网分析和应用方面,刘黎平等(2004)利用宜昌和荆州雷达资料分析了暴雨回波和风场的中尺度结构及演变过程;许小永等(2006)利用集合卡尔曼滤波同化这批资料,也得到满意结果,但指出雷达资料的缺值降低了

同化效果。这些应用和研究均证明了新一代天气雷达在监测、预警灾害性天气方面具有广阔的应用前景,但对雷达覆盖范围和探测能力研究也提出了要求。

由于我国幅员辽阔,地形复杂且起伏较大,因地形对雷达造成的遮挡,进而影响雷达探测能力发挥是一个值得长期关注和研究的问题。万玉发等(2000)研究了雷达站址视程的客观分析技术,并开发推广了业务软件,其步骤为:确定雷达站位置(即经度、纬度和拔海高度);人工读取高分辨率地图上四周地形的经度、纬度和海拔高度;辅以经纬仪从不同高度和不同方位测量四周新建高大建筑物相对于雷达站的方位和遮挡仰角,并转换回经纬度和海拔高度;通过余弦定理计算雷达单站的遮蔽角图、系列等射束高度图,进而制作多个雷达站的等射束高度拼图。该方法原理正确可靠,但实际效果有赖于资料的分辨率和精度。由于当时条件所限,基础数据主要来源于人工读取地图和实地测量,任务极为繁重,且分辨率和精度也很低。赵瑞金和杨彬云(2003)在研究石家庄雷达选址时,比较了人工读取方法(仅获取 875 个数据,但花费了 4 人近 1 个月时间)和从地理信息系统(Geographical Information System, GIS)中获得基础数据的模拟效果,证实后者更加快捷,且效果优于前者。但为了确保该软件的正常运行,他们对 GIS 数据进行了采样、拼接、过滤、分段等一系列处理,同时也指出,若想全面真实地体现地物遮挡情况,需提高数据分辨率和精度、扩大数据范围、增加方位角采样密度。

精确的雷达位置和准确的地形高度资料是实现雷达地形遮挡和覆盖研究的关键。Kucera et al. (2004)分别采用 10、30、100 m 分辨率的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),研究

关岛地区的 WSR-88D 雷达(与 CINRAD 属于同一类型)的地形遮挡,发现地形资料分辨率越高,地形遮挡模拟效果越好。到目前为止,尚未见到应用全国范围 3 s(相当于 90 m)高分辨率地形资料进行新一代天气雷达的站网覆盖普查、统计和比较;对于雷达建设前的站址选取标准,或已运行的各雷达的地形遮挡和覆盖范围、探测能力的评测,也未见有定量比较。本研究以 3 s 高分辨率地形资料为基础,进行地形遮挡和雷达覆盖计算,并总结出反映单个雷达的地形遮挡、覆盖程度的 3 个量化指标:覆盖比 C_r 、高度—面积指数 S_h 与等效覆盖半径 R_h ,以此对全国已建成的 158 部新一代天气雷达进行统计和评价,并对其中典型雷达站进行了详细分析,最后给出全国雷达网覆盖的总体统计结果。希望这些结论对雷达资料应用、站网管理和后续布网建设提供参考。

2 资料和计算策略

雷达站周边若干千米范围的地形对于遮挡计算至关重要。而且,离雷达较远的上百千米或更大范围的地形资料,对评估雷达的探测能力也十分重要。本研究采用的地形高度资料是航天飞机雷达地形测绘数据(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 3 s 数据,简称 SRTM3,这是目前公开发布包含我国范围的完整高分辨率的数字地形数据(陈俊勇, 2005),它是以航天飞机为平台对全球进行同轨干涉雷达立体测绘获得,水平分辨率相当于 90 m,标称绝对高程精度 16 m。陈俊勇(2005)还对 SRTM3 和全球数字高程模型 30 s(Global TOPOgraphic 30 seconds, GTOPO30, 水平分辨率相当于 900 m)地形数据质量进行了对比、评估,指出 SRTM3 数据是通过机载雷达扫描获得,属于数字地表高程模型(Digital Surface Model, DSM),体现了如树顶、房顶等地表特征,而 GTOPO30 为数字地面高程模型(Digital Terrain Model, DTM),因此前者在密集森林植被区或居民集结区,比后者高度略高;但由于航天飞机机载雷达信号可能受到干扰、发生镜面反射、雷达阴影、回波滞后等情况,导致 SRTM 高程数据在水域、高山和峡谷地区存在有小块的数据空缺点、空白区,约占 0.23%。Reu-

ter et al. (2007) 研究、评估了 SRTM 个别资料空白区的填充插值方法,基于此,Jarvis et al. (2008) 整理并提供了更完整的 SRTM 数据,我们采用的正是这一版本资料。由于本研究着眼于地形对天气雷达的遮挡,因而包含了植被、树顶和房顶等信息的 SRTM3,与其说是缺点,不如说是优点;另外由于雷达一般布设在城郊或山顶,即使在水域和起伏很大的高山区和峡谷地区 SRTM3 误差变大,但对本研究并没有太大的影响。

本研究和万玉发等(2000)使用相同的原理和公式,雷达以某一仰角向各方位角发射电磁波射线,计算从近到远各抽样点处的海拔高度,与对应点的地形高度进行对比,当发现射线高度低于地形高度时,即认为射线受到地形遮挡,不再向远方延伸。另外,基于完备的高分辨率地形资料,更进一步统计了雷达射线的离地高度和水平覆盖范围,并进行后续的深入分析和统计。为了有效地使用 SRTM3 高度资料,我们开发软件进行了针对性处理,因此省去前期复杂的资料读取、转换。但使用高分辨率资料带来的唯一问题是数据量和计算量庞大。以计算全国覆盖范围为例,选取的地理范围是(10°N~55°N, 70°E~135°E),每度见方包含 1200×1200 个数据,读入数据达 8.4 GB,运算结果也超过 8 GB,因此选择在 16 GB 内存的 Linux 并行环境下进行运算。为提高模拟精度,我们也试验和验证不同采样密度的影响,最终确定了与 3 s 分辨率地形资料相称的方位角采样步长为 0.01 s、径向步长 40 m。

3 雷达覆盖和探测能力指标研究

首先对 158 部雷达反复确认经纬度和高度资料,然后计算各站在最低 3 个仰角(0.5°、1.5°、2.4°)下的遮挡和覆盖情况,最后进行全国范围内不同高度覆盖统计。图 1a 显示了深圳雷达的遮挡计算效果,与雷达实际反射率产品(图 1b)相比非常符合。普查、对比其他更多雷达站的遮挡图,理论计算均能逼真地再现地形对雷达射线各个方向不同程度的遮挡,效果令人满意,如 0.5°仰角下,合肥雷达西南方 7 km 处大蜀山造成的 3.3°遮挡,青岛雷达偏南方 27 km 处灵山岛的

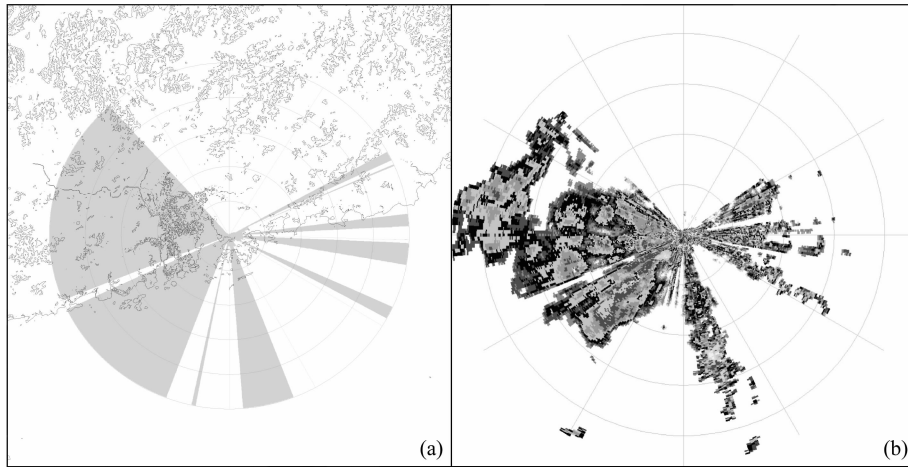


图1 深圳雷达 0.5°仰角的覆盖效果: (a) 利用 SRTM3 地形资料计算; (b) 实际回波 (2009 年 7 月 4 日 17 时 30 分, 协调世界时)
Fig. 1 The coverage of Chinese Next generation RADar (CINRAD) in Shenzhen at 0.5° level: (a) Calculation based on Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 3; (b) real echo (1730 UTC on 4 Jul 2009)

0.4°遮挡。我们认为 SRTM3 地形数据基本上满足本研究需求, 可以作为后续工作的基础。

目前我国新一代天气雷达的工作模式是体扫描, 即以规定的仰角 (0.5°、1.5°、2.4°等) 进行 360°方位扫描, 其中仰角越小, 水平扫描范围越大, 因此以较低仰角下的扫描面积来衡量单部雷达的地形遮挡是合理的; 在相同仰角下, 射线离雷达越远, 则离地高度越高, 而实际业务中往往关心对流层中下部到行星边界层范围内的天气系统, 因此可以选择某一离地高度 (如 1、2、3 km) 来衡量单部雷达和整个雷达网的覆盖和探测能力。利用全国范围的 SRTM3 高分辨率地形资料, 对雷达进行上述定量评价成为可能。

3.1 覆盖比

根据对雷达不同功能需求, 以若干千米的半径 r 为标准 (如 75、150、230 km), 雷达以某一仰角扫描 360°后射线所能覆盖的面积, 与无地形遮挡时的完全覆盖面积之比定义为覆盖比 (C_r),

显然 C_r 为无量纲数, $C_r=1.0$ 为完全覆盖, $C_r=0$ 为完全遮挡。

以扫描半径 $r=75$ km 为例, 0.5°仰角的完全覆盖面积约为 $1.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。我国目前正式投入业务运行和测试运行的 158 部雷达中, 完全覆盖的有 46 部, 覆盖评价为良的有 38 部, 覆盖程度为中等的有 46 部, 覆盖评价为差的有 18 部 (见表 1)。随着仰角的抬高, 地形遮挡逐渐减少, 覆盖面积加大, 覆盖比增大, 仰角为 2.4°时完全覆盖的达 113 部, 覆盖极差的雷达仅有 2 部, 是位于青藏高原的林芝和拉萨。取更大扫描半径计算, 如 150 km 或 230 km, C_r 在数值上略有细微差别, 但各站的覆盖比排名基本上没有太大的变化。以宜昌雷达为例, 图 2a 为周围地形对雷达形成的最大地形高度角 (即各个方向的不同距离地形相对雷达的高度角的最大值), 可见雷达的东方视野开阔, 方位角在 $60^\circ \sim 157.6^\circ$ 和 $158.6^\circ \sim 162.5^\circ$ 处最大地形高度角小于 0.5°, 因此以 0.5°仰角进行 360°

表 1 全国 158 部雷达不同仰角下的覆盖比 (C_{75}) 统计

Table 1 Statistics of coverage ratio (C_{75}) under three levels of 158 CINRADs

覆盖比 (C_{75})	评价	仰角为 0.5°		仰角为 1.5°		仰角为 2.4°	
		站点数	百分比	站点数	百分比	站点数	百分比
$0 \leq C_{75} < 0.1$	极差	10	6.3%	3	1.9%	2	1.3%
$0.1 \leq C_{75} < 0.4$	差	18	11.4%	2	1.3%	1	0.6%
$0.4 \leq C_{75} < 0.8$	中等	46	29.1%	24	15.2%	8	5.1%
$0.8 \leq C_{75} < 1.0$	良	38	24.9%	43	27.2%	34	21.5%
$1.0 \leq C_{75}$	完全覆盖	46	29.1%	86	54.4%	113	71.5%

扫描, 共有 101.5° (占 28.2%) 是无遮挡的, 模拟结果 (见图 2b) 和实际回波 (见图 2c) 在整体和细节上都非常吻合, 而计算的 C_{230} 为 0.287 , 可理解为 360° 视野范围中的 28.7% 可用, 两个数值非

常接近, C_{230} 稍大一点是由于它把雷达四周尚未遮挡的几千米范围内的扫描面积也统计在内; 当雷达以 1.5° 仰角扫描时的模拟结果和实际回波见图 2d 和 2e, 东半部除了东北方向 ($34.7^\circ \sim 39.5^\circ$) 有一

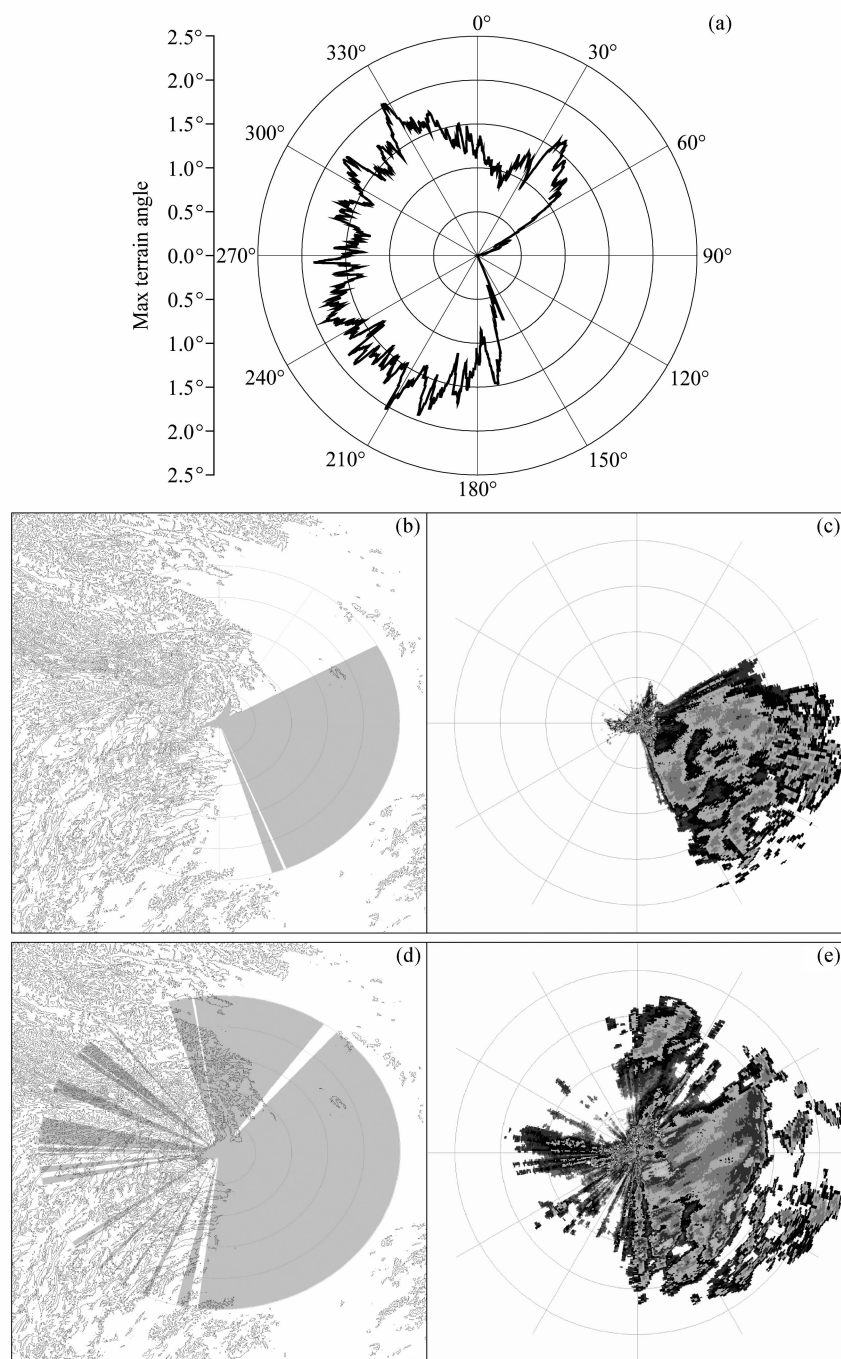


图 2 宜昌雷达站 (a) 周围最大地形高度角; 0.5° 仰角时的 (b) 遮挡模拟和 (c) 实际扫描效果; 1.5° 仰角时的 (d) 遮挡模拟和 (e) 实际扫描效果

Fig. 2 (a) The maximum terrain angle, (b) calculated coverage pattern and (c) real echo at 0.5° level, and (d) calculated coverage pattern and (e) real echo at 1.5° level of Yichang CINRAD

小范围遮挡外, 总体视野开阔, 而西半部仍有间断性遮挡, C_{230} 为 0.669, 即大约 66.9% 视野范围可用; 当雷达的仰角抬高到 2.4° 时, 已超过各方向最大地形高度角 (2.03°), 因此没有任何遮挡 (图略), C_{230} 为 1.0, 即全部视野范围可用。

覆盖比 C_r 直观地反映近距离 (几十千米内) 高大地形的遮挡程度, 作为衡量地形对雷达的遮挡定量指标, 已为广东连州雷达选址提供了参考。

3.2 高度-面积指数和等效覆盖半径

覆盖比 C_r 为雷达射线的实际覆盖面积与无地形影响时覆盖的面积之比, 体现了近距离高大地形对雷达射线的遮挡程度, 而对于雷达实际探测能力的全面评价, 则需进一步具体考察该雷达周围方圆数百千米的地形与雷达射线之间的空间高度和覆盖面积。基于这个思路, 我们定义了高度-面积指数 S_h 。当雷达以某一扫描半径 (如 230 km)、某一仰角扫描一周后, 按照射线离地表高

度 (射线的海拔高度减去地表海拔高度) 范围, 如 0~1 km、0~2 km、0~3 km 等, 分别统计覆盖面积, 即为相应高度的面积指数 (单位: 10^4 km^2)。这里强调的是地表高度, 即扣除了地形高度, 为天气系统发生、发展的真实空间, 是雷达探测的主要目标区域。为了对覆盖面积有更直观的印象, 可将其转化为等效覆盖半径 (单位: km)

$$R_h = (S_h/\pi)^{0.5}.$$

即不考虑具体遮挡方位和覆盖区域的形状, 直接以相同面积的圆形半径来衡量, 可见 R_h 越大, 表明雷达的探测范围越大, 效益发挥越好。

以地形影响很小、覆盖效果接近理想状态的上海青浦雷达为例 (见图 3), 以雷达为圆心, 射线的不同离地高度形成一组同心圆环, 从里到外分别为 0~1 km、1~2 km、2~3 km 等, 分别统计离地高度为 1 km、2 km 和 3 km 的覆盖面积, 并转化为等效覆盖半径, 对比结果见表 2。

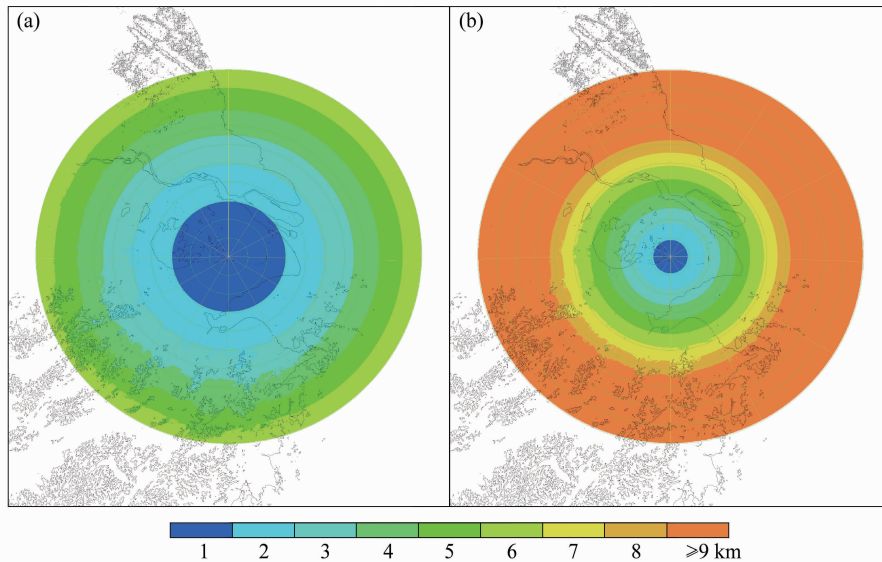


图 3 青浦雷达 (a) 0.5° 、(b) 2.4° 不同仰角射线离地高度和分布模拟

Fig. 3 The calculated beam height and coverage of Qingpu CINRAD at (a) 0.5° level and (b) 2.4° level

表 2 青浦雷达不同仰角情形下高度-面积指数 S_h 及其等效覆盖半径 R_h

Table 2 The height - area index S_h and its equivalent radius R_h under three levels of Qingpu CINRAD

离地高度/km	仰角为 0.5°		仰角为 1.5°		仰角为 2.4°	
	$S_h/10^4 \text{ km}^2$	R_h/km	$S_h/10^4 \text{ km}^2$	R_h/km	$S_h/10^4 \text{ km}^2$	R_h/km
1	1.76	74.8	0.38	34.7	0.16	22.6
2	5.05	126.7	1.38	66.3	0.63	44.8
3	8.78	167.2	2.83	94.9	1.36	65.8

在地形影响很小的情况下，以 0.5° 仰角扫描，雷达射线离地高度 1 km 的覆盖面积约为 $1.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，等效半径为 74.8 km；离地高度 2 km 的覆盖面积增大到 $5.05 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，等效半径达 126.7 km；同样取离地高度 2 km，但抬高仰角到 2.4° 后，等效半径缩减至 44.8 km，覆盖面积缩小到 $0.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，仅为 0.5° 仰角时的 12.5%。因此，在无地形遮挡和铺垫情况下，应尽可能选择低仰角扫描，以获得最大监测范围。

对于处在实际地形中的全国 158 部天气雷达，对 0.5° 仰角的射线离地高度分别取 2 km、3 km 进行统计（见表 3），可见 3 km 覆盖范围或等效覆盖半径达到“优”的站数超总数的 2/3，因此，我国新一代天气雷达总体探测能力令人满意。

注意到一个有趣的现象：在 0.5° 仰角下，几乎无地形影响的青浦雷达 2 km 离地高度时的 R_h 为 126.7 km，排序中并不是最大值（详细数据略），另外还有 13 个雷达站超过青浦，最大者为荆州，其 R_h 达 140.2 km，原因是这些雷达站位于相对较低地势，周围有稍高地形抬高了下垫面，这样因地形的铺垫作用，使得射线离地高度在 0~2 km 之间的范围得到扩大，而这片区域正是天气现象发生、发展的实际空间。从这个指标来看，有效探测范围内的地形并非全是不利因素：远距离处适当的地形抬升有利于抵消地球曲率的影响，扩大了雷达的有效监测范围。

3.3 全国雷达覆盖状况

综合统计 158 部雷达覆盖数据，得到全国范围 1、2、3 km 高度的雷达覆盖面积（其中包含了边境地区和沿海海区面积）分别为 $162.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $372.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $507.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，为国土面积的 16.9%、38.8%、52.8%。图 4 为各雷达在 0.5° 仰角下离地 3 km 覆盖范围和叠加个数。整

体说来， 100°E 以东地区除了云贵高原至湘西、南岭山脉至武夷山，雷达覆盖很好。以（ $22^\circ\text{N} \sim 42^\circ\text{N}$ ， $102^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ ）范围为例，总面积为 $375.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，雷达射线离地 1、2、3 km 高时覆盖率分别是 27.1%、59.8%、76.8%。我国西部地区雷达覆盖较少，只有天山南侧和北疆有所覆盖，青藏高原几乎没有明显覆盖。从 3 km 高度雷达叠加个数看，东南到华南沿海地区普遍有 2 个雷达重叠，华东到华北均有 2~4 个雷达重叠，特别是长江三角洲一带已出现 5~6 部雷达重叠。内蒙中部和东北地区平均有 1~2 个覆盖重叠，且分布均匀，总体较好。

另外，我国台港澳地区气象部门共有 7 部同类型雷达，其中台湾省有 4 部（花莲、垦丁、七股、五分山），分别位于台湾岛的东、南、西、北端，由于中央山脉的遮挡，它们的 0.5° 仰角覆盖比 C_{230} 分别为 0.48、0.77、0.75、0.85，对岛内覆盖并不全面，但对周围海区覆盖很好。香港 2 部雷达分别位于大帽山、大老山的山顶， C_{230} 分别为 1.00 和 0.95，澳门大泽山上雷达 C_{230} 为 0.90，三者对南海北部形成很好覆盖。

4 结论与讨论

本文以 SRTM 3 s 高分辨率地形资料为基础，对雷达进行地形遮挡和覆盖能力研究，提出定量评价雷达探测能力的指标：覆盖比、高度一面积指数及等效覆盖半径。前者为实际覆盖面积与无地形遮挡时覆盖面积之比，反映了周围高大地形的遮挡程度；后者为雷达探测指定高度范围的覆盖面积，及与该面积等效的圆形区域的半径，反映了雷达的实际探测能力。应用这些指标，分析了典型遮挡个例，并对我国已建成的 158 部新一

表 3 全国新一代天气雷达 0.5° 仰角下、不同离地高度时的高度一面积指数 S_h 和等效覆盖半径 R_h 统计
Table 3 Statistics of CINRADs' height - area index S_h and equivalent radius R_h at 0.5° level

高度一面积指数 $S_h/10^4 \text{ km}^2$	等效覆盖半径 R_h/km	评价	离地高度 2 km		离地高度 3 km	
			站点数	百分比	站点数	百分比
$0 \leq S_h < 0.12$	$0 \leq R_h < 20$	极差	5	3.20%	4	2.50%
$0.12 \leq S_h < 0.64$	$20 \leq R_h < 45$	差	8	5.10%	5	3.20%
$0.64 \leq S_h < 3.14$	$45 \leq R_h < 100$	中等	53	33.50%	23	14.60%
$3.14 \leq S_h < 4.50$	$100 \leq R_h < 120$	良	49	31.00%	17	10.80%
$4.50 \leq S_h$	$120 \leq R_h$	优	43	27.20%	107	67.70%

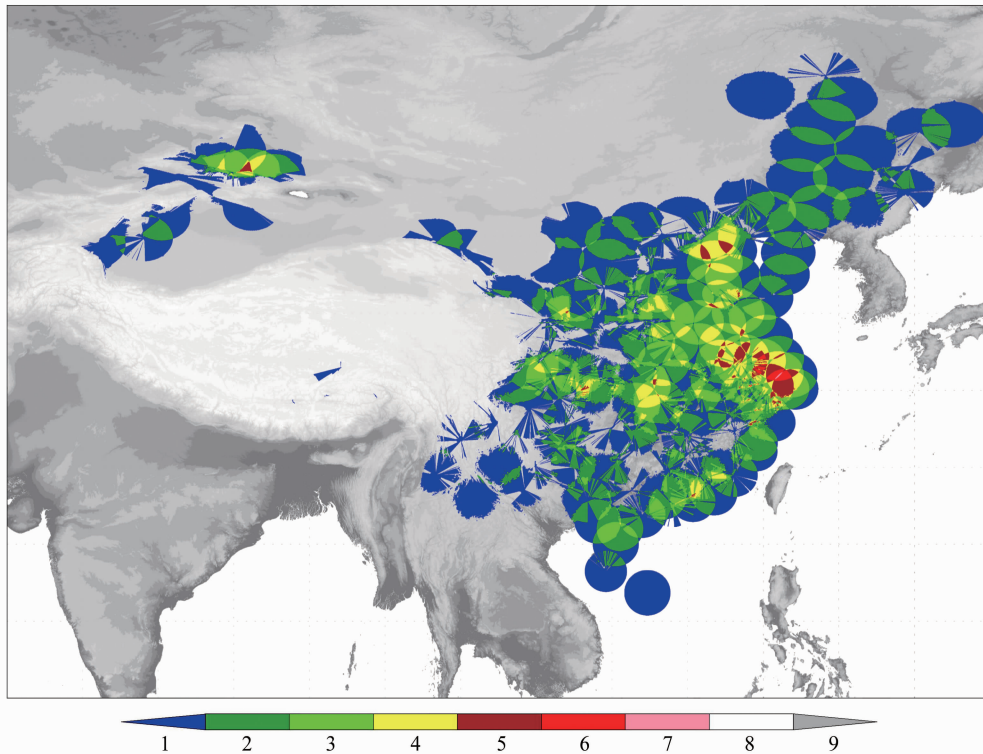


图4 全国158部雷达覆盖范围和叠加个数(0.5°仰角,离地高度3 km)

Fig. 4 The coverage and overlapping of 158 CINRADs over China (0.5° level, 3 km above ground level)

代天气雷达进行综合评估,结果表明青藏高原和西北地区覆盖较少,东部地区除部分山区雷达遮挡严重,大部分覆盖较好。全国范围1、2、3 km高度的雷达覆盖面积为国土面积的16.9%、38.8%、52.8%,东部地区相应的覆盖率为27.1%、59.8%、76.8%。另外从3 km高度雷达叠加个数看,东南到华南沿海地区普遍有2个雷达重叠,华东到华北平均有2~4个雷达重叠,长江三角洲一带出现5~6部雷达重叠,内蒙古中部和东北地区平均有1~2个覆盖重叠。可以认为我国雷达总体布局较好。

在本研究中,还有几点需指出:

(1) 准确的数据是计算地形遮挡的基础。首先是雷达站的位置需达到秒级或10 m级精度,特别是当附近有较大地形影响时,位置的误差很可能造成遮挡方位的较大偏差。以南宁雷达为例,当雷达位置不够精准时,计算出近处地形造成的遮挡位于正南,而实际回波的遮挡方位是西南方(图略),方位偏差达40°。另外,从模拟效果和实际回波对比,可以认为SRTM 3 s地形数据基本

上满足了大部分雷达的地形遮挡模拟,但该资料采集于2000年,自此以后十多年来的地形的改变,主要是城市高大建筑物的出现,使得理论计算无法再现一些位于城区的雷达(如北京市气象局位于海淀区的雷达)的最新遮挡状况,因此,据此计算的覆盖和遮挡是乐观的估计,实际遮挡情况可能要严重一些。

(2) 本研究把雷达波束理想化为射线,并没有考虑它的波瓣宽度的影响。另外,大气的物理性质在时间和空间上都存在明显变化和差异,因此实际雷达波束的传播路径非常复杂,本文根据射线与地形高度计算的覆盖和遮挡只是理论数据,或者说是一种平均状况,但据此从宏观、总体角度来评估雷达的覆盖和遮挡,仍然具有指导意义和参考价值。

(3) 覆盖比侧重于考察地形的遮挡程度,特别是雷达近处高大地形的影响,可以直观地理解为某一仰角下的360°视野可用程度,体现了线性关系,但没有考虑雷达探测的空间范围,而高度一面积指数则侧重考察具体地形分布下的雷达探

测能力, 统计指定高度下的雷达射线的覆盖面积, 比前者更加全面, 将面积转换为等效覆盖半径后, 增加了直观感觉, 因此在实际应用中, 根据需要进行选择合适的指标进行评估。

致谢 感谢美国地质勘探局 (United States Geological Survey)、国际热带农业中心 (International Center for Tropical Agriculture) 提供 SRTM 高分辨率地形资料。本文得到了高玉春、孟昭林、杨洪平高级工程师的指导, 气象探测中心运行监控保障室同仁们协助进行计算效果图与雷达实际回波对比工作, 在此一并感谢。

参考文献 (References)

- 陈俊勇. 2005. 对 SRTM3 和 GTOPO30 地形数据质量的评估 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 30 (11): 941-944. Chen Junyong. 2005. Quality evaluation of topographic data from SRTM3 and GTOPO30 [J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese), 30 (11): 941-944.
- Jarvis A, Reute H I, Nelson A, et al. 2008. Hole-filled seamless SRTM data V4 [OL], <http://srtm.csi.cgiar.org>, 2008.
- 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. Oceanic Technol., 21 (7): 995-1006.
- 兰伟仁, 朱江, Xue Ming, 等. 2010a. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 I. 不考虑模式误差的情形 [J]. 大气科学, 34 (3): 640-652. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010a. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part I: Perfect model tests [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 640-652.
- 兰伟仁, 朱江, Xue Ming, 等. 2010b. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 II. 考虑模式误差的情形 [J]. 大气科学, 34 (4): 737-753. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010b. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part II: Imperfect model tests [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 737-753.
- 刘黎平, 邵爱梅, 葛润生, 等. 2004. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究 [J]. 大气科学, 28 (2): 278-284. Liu Liping, Shao Aimei, Ge Runsheng, et al. 2004. A study of mesoscale wind structures in heavy rainfall system of merging cloud with dual-Doppler radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (2): 278-284.
- 李柏, 曹性善, 周昆, 等. 2001. 江淮梅雨锋暴雨过程中尺度系统的演变及结构特征分析与研究 [J]. 气候与环境研究, 6 (2): 168-172. Li Bai, Cao Xingshan, Zhou Kun, et al. 2001. The analysis and research to the evolution and structure characters of the mesoscale systems during the Meiyu front heavy rain processes [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (2): 168-172.
- 李柏, 周玉淑, 张沛源. 2007. 新一代天气雷达资料在 2003 年江淮流域暴雨模拟中的初步应用: 模拟降水和风场的对比 [J]. 大气科学, 31 (5): 826-838. Li Bai, Zhou Yushu, Zhang Peiyuan. 2007. Application of the China new generation weather radar data to the torrential rain simulation over the Yangtze River-Huaihe River basin in 2003: Contrast of precipitation and wind [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 826-838.
- Reuter H I, Nelson A, Jarvis A. 2007. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data [J]. International Journal of Geographic Information Science, 21 (9): 983-1008.
- 盛春岩, 浦一芬, 高守亭. 2006. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响 [J]. 大气科学, 30 (1): 93-107. Sheng Chunyan, Pu Yifen, Gao Shouting. 2006. Effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting output of mesoscale model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 93-107.
- 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. Wan Yufa, Yang Hongping, Xiao Yanjiao, et al. 2000. An objective method for analyzing the horizon of Doppler weather radar stations [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 11 (4): 440-447.
- 徐亚钦, 翟国庆, 黄旋旋, 等. 2011. 利用雷达和自动站资料综合分析风暴移动和发展规律 [J]. 大气科学, 35 (1): 134-146. Xu Yaqin, Zhai Guoqing, Huang Xuanxuan, et al. 2011. A study of the evolution regularity of storm based on the data of radar and automatic station [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 134-146.
- 许小永, 刘黎平, 郑国光. 2006. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验 [J]. 大气科学, 30 (4): 712-728. Xu Xiaoyong, Liu Liping, Zheng Guoguang. 2006. Numerical experiment of assimilation of Doppler radar data with an ensemble Kalman filter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 712-728.
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社, 314pp. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan, et al. 2006. The Theory and Operational Application of Doppler Weather Radar [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 314pp.
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究 [J]. 大气科学, 32 (3): 508-522. Yu Xiaoding, Zheng Yuanyuan, Liao Yufang, et al. 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 508-522.

- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 499pp. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. 2001. Radar Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 499pp.
- 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. Zhao Ruijin, Yang Binyun. 2003. Application of geographical information system to CINRAD's siting [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (6): 30 - 32.
- 祝婷, 钟青. 2008. 多普勒雷达基数据在短时对流天气数值预报中的应用 [J]. 气候与环境研究, 13 (3): 281 - 290. Zhu Ting, Zhong Qing. 2008. Application of Doppler raw radar data on meso-scale model for convection nowcasting and short-range forecast [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (3): 281 - 290.