

景号然,谢晓琳,郑伟,等,2019. 基于 SRTM 数据的天气雷达探测环境分析研究[J]. 气象,45(6):871-876. Jing H R, Xie X L, Zheng W, et al, 2019. Research on weather radar environment detection based on SRTM elevation data[J]. Meteor Mon, 45(6): 871-876(in Chinese).

## 基于 SRTM 数据的天气雷达探测环境分析研究\*

景号然<sup>1,2,3</sup> 谢晓琳<sup>1,2,3</sup> 郑伟<sup>1</sup> 彭涛<sup>1</sup> 刘娟<sup>1,3</sup> 刘宗庆<sup>1</sup>

1 四川省气象探测数据中心,成都 610072

2 中国气象局大气探测重点开放实验室,成都 610225

3 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072

**提 要:** 利用 SRTM 高程数据作为选址基础数据,结合天气雷达工作方式和探测方法,计算得到天气雷达在 0.5°、1.0°、2.4° 仰角上地物遮挡情况;利用高程格点数据获得 3 个仰角的地物剖面数据,提高了 SRTM 数据利用精度和运算速度;分析中结合地球曲率和电磁波折射影响,改进算法获得站点遮蔽角图,站点上空 1 km、海拔 3 和 6 km 等射束高度图及数据,该分析结果充分体现了 SRTM 数据的高分辨率特点。最后将结果数据与 GIS 地图结合,完成了四川省天气雷达网探测环境分析,并给出了各个台站评估结果。

**关键词:** 天气雷达,覆盖评估,选址方法,遮蔽角,等射束

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.013

### Research on Weather Radar Environment Detection Based on SRTM Elevation Data

JING Haoran<sup>1,2,3</sup> XIE Xiaolin<sup>1,2,3</sup> ZHENG Wei<sup>1</sup> PENG Tao<sup>1</sup> LIU Juan<sup>1,3</sup> LIU Zongqing<sup>1</sup>

1 Sichuan Meteorological Observation and Data Center, Chengdu 610072

2 CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225

3 Sichuan Provincial Key Laboratory for Rainstorm, Drought and Flood Disasters in Plateau and Basin, Chengdu 610072

**Abstract:** The sites were selected based on SRTM elevation data to effectively extract the locations where the electromagnetic wave was obstructed by surface features when the weather radar was placed at 0.5°, 1.0° and 2.4° in line with the working mode and detection principle of the weather radar. The obstructing conditions of surface features under the 3 elevations were obtained by means of elevation lattice data, so as to make SRTM data more precision and increase its arithmetic speed. The blind angle diagram of the sites, diagram of iso-beam heights and data at the elevations of 1 km, 3 km and 6 km at the site were finally obtained. This method fully reflects the high resolution characteristics of SRTM data. Finally, by combining with GIS map, the analysis on environment detection by using weather radar network in Sichuan which was taken as an example was finished. The analysis results at each site were provided.

**Key words:** weather radar, coverage evaluation, method for site selection, blind angle, iso-beam

\* 中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(KLAS2017010)和四川省气象局课题(川气课题 2017-青年-13)共同资助

2018 年 7 月 27 日收稿; 2019 年 4 月 23 日收修定稿

第一作者:景号然,从事天气雷达技术保障工作. Email:jinghaoran\_sc@foxmail.com

## 引言

中国现已完成 208 部新一代天气雷达站建设和组网运行,随着天气雷达在监测和预报灾害性天气过程的作用越加重要,对雷达网建设和完善提出了更高要求。如今我国天气雷达组网探测精度有待提高,组网探测盲区依然存在,双极化天气雷达建设还未完成(李柏等,2013),对雷达组网探测能力评估还需要继续深入研究。对于单站雷达可以通过分析地物遮挡情况得到各个方位上的最大遮蔽角数据,也可固定雷达仰角分析得到受遮挡的方位角度,针对组网雷达需要运用到多站等射束拼图,这样才能找到多站雷达盲区共同区域(邓志等,1999;万玉发等,2000;梁成根和黄云仙,2008;杨洪平等,2009);最大遮蔽角和等射束是两种较为常见的探测环境的分析方法,由于最大遮蔽角可以由经纬仪测量和高程数据演算两种方式获取,不同数据来源造成部分方法受限于雷达选址应用(赵瑞金和杨彬云,2003;吴焕萍,2010;韦清媛和王龙波,2012;高飞,2013;黄太山,2014;郭方,2017);王曙东等(2011)运用 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数据较好完成了全国雷达固定仰角的组网净空环境分析。现阶段组网探测环境情况已经影响到了雷达观测数据质量(徐鸣一等,2017),这是因为地物遮挡造成回波强度失真,从而造成降水低估,但如果预先将地物遮挡情况纳入计算可以在一定程度实现降水估计订正。获取探测环境遮挡数据包括三种方式:累积大面积降水分析、高程数据演算波束阻塞和经纬仪人工测量方法;同样对于雷达实时探测中预先设置探测环境信息,可以利用地物回波强度对气象回波强度进行实时订正,以提高雷达数据质量(徐八林等,2006;王红艳和刘黎平,2015;刘娟,2015;勾亚彬等,2017),不仅如此,雷达探测环境在满足某些条件下,天气雷达还可以开启负角度探测模式,从而扩展雷达探测覆盖范围,提高雷达低空探测能力以消除近地面探测盲区(孙伟,2011;张杨成等,2013;杨金红等,2013)。

综合上述研究天气雷达探测环境的分析方法,它们不仅对雷达站址选择和组网评估具有重要的意义,同样也对雷达探测能力扩展和数据资料质量控

制发挥了作用。在选择高程数据时应选择标准统一、误差可控和精度较高的数据。鉴于此,本文选择采用经纬度格点化的 SRTM 高程数据作为分析数据集,改进了最大遮蔽角和等射束分析方法,引入等效地球半径法以减小雷达电磁波折射和地球曲率造成的分析误差,最终得到基于 SRTM 高程数据的雷达最大遮蔽角、固定仰角遮挡和多站等射束拼图的分析方法;并且将该方法用于四川省新一代天气雷达组网观测能力评估,结合 GIS 区划数据,得到单站分析和多站分析结果,可直观反映四川省天气雷达探测覆盖能力。

## 1 数据提取与应用

SRTM 数据选自美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA),发布时间为 2003 年,其水平分辨率为  $90\text{ m}\times 90\text{ m}$ ,其标称高程精度在  $16\text{ m}$ ,SRTM 数据每个点由 3 个 SRTM1 原数据点平均得到。数据通过航天飞机利用机载雷达测量而得,反映了地球表面海拔情况,处理过程中选择四川省为分析对象,截取了  $20^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $95^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$  SRTM 数据,得到  $90\text{ m}\times 90\text{ m}$  分辨率的数据集。四川地形以成都为中心,西面为山地高原,东面为成都平原盆地,东西高差巨大,图 1 中为高程数据与区划数据叠加,采用的数据范围为  $20^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $95^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 。在  $250\text{ km}$  范围内所有站点的高程数据是完整的。

## 2 计算过程设计

为了提高计算速度和精度,首先去除一些低仰角位置的数据,以减少参与运算的数据量,将中心半径为  $250\text{ km}$  的区域选取为运算单元,并对数据切片选取。

图 2 以雷达 PPI 模式下仰角  $0.5^{\circ}$ 、 $1.0^{\circ}$  和  $2.4^{\circ}$  为例,去除计算范围外的 SRTM 数据,以格点数据的形式将切片区域绘制,图中距离圆为  $50\text{ km}$  等间距。在切片结果中, $0.5^{\circ}$  仰角的地物遮挡了站点的西北边大部分地区, $1.0^{\circ}$  仰角下西北地区遮挡较小,在  $2.4^{\circ}$  仰角下几乎没有遮挡。在数据处理中利用格点化数据方式,不必再进行极坐标转换,提高了数据运算速度。

为了获得高精度的雷达遮蔽角情况,只利用单层切片是不够完善的。还需要对每个径向上的最大

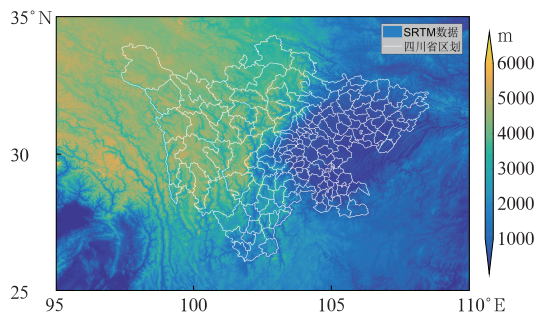


图 1 四川 SRTM 数据地形图  
Fig. 1 Topographic map of SRTM data in Sichuan Province

遮蔽角进行运算,经纬度格点化后的 SRTM 数据需要根据站点纬度数据进行校正,由站点高纬度造成的误差不仅存在两点相对方位,也存在于经纬度测算两点相对距离,因此在算法中需要引入校正算法,国家地震局地球物理研究所(1978)给出了较为有效的测算方法,对地球曲率,雷达探测尺度范围已经无法忽略地球曲率带来的影响,需要引入地球曲率和大气折射因素。基于雷达波束传播等效方法已经有许多研究成果,其中以等效地球半径方法使用最为普遍,这种方法能够有效弥补雷达波在大气中传播受到的折射影响。

已知两点的经纬度计算两点的距离公式:  
近似公式:

$$\Delta = 111.199 \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\lambda_1 - \lambda_2)^2 \cos^2 \left( \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right)}$$

精确公式:

$$\begin{aligned} \cos \Delta &= A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2 \\ A_1 &= \cos \varphi_1 \sin \lambda_1 \\ A_2 &= \cos \varphi_2 \sin \lambda_2 \\ B_1 &= \cos \varphi_1 \cos \lambda_1 \\ B_2 &= \cos \varphi_2 \cos \lambda_2 \\ C_1 &= \sin \varphi_1 \\ C_2 &= \sin \varphi_2 \end{aligned}$$

式中,  $(\varphi_1, \lambda_1), (\varphi_2, \lambda_2)$  是两点的经纬度,  $\Delta$  单位为  $^\circ$ 。

以上给出了计算中较为重要的公式,在应用中采用了近似公式,从而得到较为精准的站点和山体方位距离。有研究表明,地球曲率和大气折射可以增加单站探测范围 10% 以上,吕智(2012)较为详细地总结了地球球面和大气折射对气象雷达目标探测的影响;在这种影响下,并且给出了天气雷达考虑地球球面及大气折射情况下的地球等效半径为 8500 km。在张培昌等(2001)以及 Doviak and Zrnić (1993) 研究中,也给出了详实的考虑因素和条件。

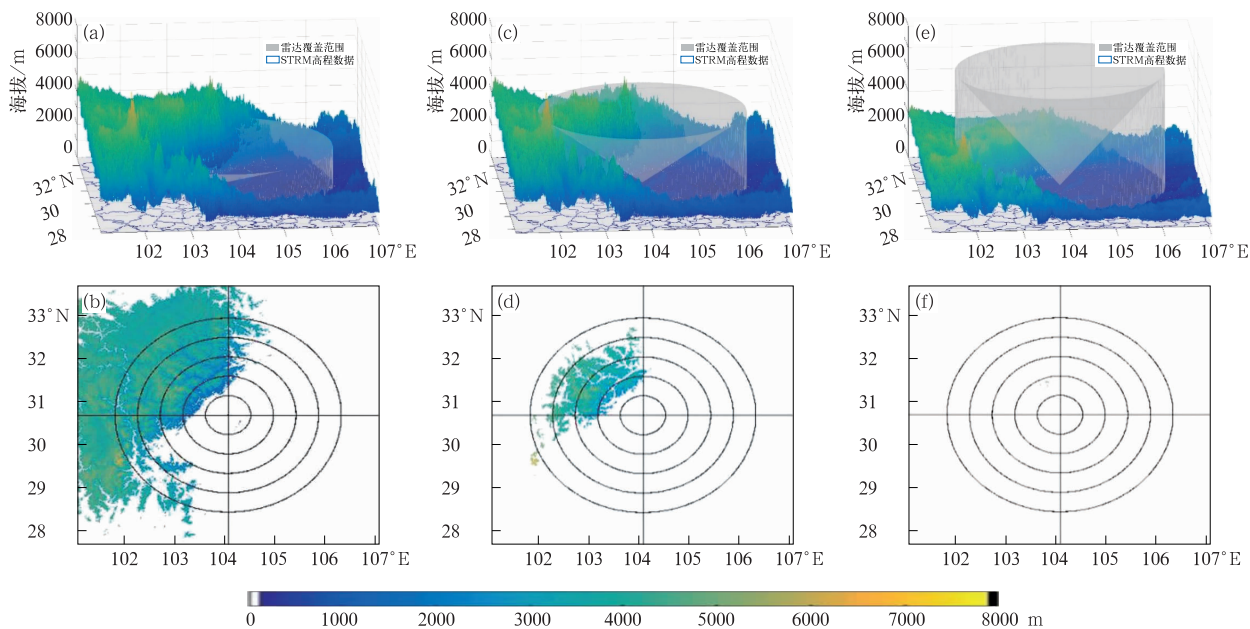


图 2 成都雷达站点 0.5°(a,b),1.0°(c,d),2.4°(e,f)仰角地物切片三维图(a,c,e)和切片结果(b,d,f)  
Fig. 2 Schematic diagram for range of terrain section at elevations 0.5° (a, b), 1.0° (c, d) and 2.4° (e, f) and 3D surface sections (a, c, e) and section results (b, d, f) at Chengdu Radar Site

### 3 结果分析

成都站作为单站分析例子,先按照切片方式获取在以站点为中心半径 166 km 范围为  $90\text{ m} \times 90\text{ m}$  分辨率的 SRTM 高程数据,再代入等效地球半径进行计算,获得单站  $360^\circ$  范围内的所有地物遮蔽角,并且保存遮蔽地物的距离数据。为了提高算法效率需要减少循环计算次数和计算数据带入量,在运算中利用矩阵运算减少计算循环次数,剔除海拔高度小于雷达馈源高度的地物数据,减少无用数据的带入计算。在考虑地球半径和折射的情况下剔除遮蔽角  $< 0^\circ$  数据,以提高计算效率;最后将结果中的负角度数据都去除,获得单站的遮蔽角与地物位置数据。

遮蔽角反映站点周围高大山体的最大遮挡仰角,但遮蔽角数据不能说明遮挡位置处于哪里,故选用包含地物位置信息的等射束高度。结合等射束高度图进行探测环境分析,不仅可以反映遮挡情况,还可以反映地物所处位置。从图 3b 中可以发现台站 1 km 与海拔 3 km 位于西北面的遮挡的等射束非常接近,台站上空 1 km 等射率图(蓝线)站点高度上增加 1 km 处高度上的等射束图。图 3b 中橙色为海拔 3 km 高度上的等射束。由于川西地区山脉高度平均高度普遍高于 3 km,所以 3 km 等射束无法迈过高山,站点 1 km 与海拔 3 km 等射束图较为接近。由于 6 km 等射束高度可以迈过部分山峰,探测范围较大,所以与图 1 高程地形图一致。

据此将四川天气雷达的实际探测距离考虑进算法中,得到实际 SC 型号以及 CD 雷达的雷达探测距离为 166 km,根据调整后的参数对全省雷达作了等射束拼图。

从图 4a 中可以看到,SRTM 高程数据地形图与等射束一致,在西昌站点,其馈源海拔为 2656 m,在台站以上 1 km 和海拔 3 km 时,台站以上 1 km 实际计算海拔为 3656 m,因此在制图中存在站点 1 km 覆盖范围优于海拔 3 km 的情况存在,甘孜雷达站海拔为 4241 m,故甘孜雷达站不存在海拔 3 km 等射束图。

从结果可知对于研究发展高度达到 3~6 km 的天气过程,四川成都平原地带具备较好的天气雷达覆盖率。在主要大城市成都、绵阳、南充和乐山区域具备较好的重叠覆盖,并且覆盖重庆西面部分区域;然而在四川西部高海拔地区因缺乏天气雷达覆

盖,所以利用天气雷达难以发现从西部高原发展而来的天气的发生发展过程。

四川省站点以上 1 km 等射束覆盖率(计算方法:单站覆盖面积除以单站无遮挡覆盖面积)为 59.70%,海拔 3 km 等射束覆盖率为 69.50%,海拔 6 km 等射束覆盖率为 88.66%。3~6 km 是我们比较关心的强对流天气发生发展区域,1 km 为边界层区域。其中:西昌雷达站海拔为 2.65 km,站点上空 1 km 覆盖率为 17.35%,海拔 3 km 覆盖率为 7.06%,而仅仅在 6 km 具备 58.08% 的探测覆盖率,雷达覆盖率偏低;甘孜雷达站同样具有这样的情况,在站点 1 km 和海拔 6 km 覆盖率分别为 36.07% 和 44.83%(表 1)。分析结果表明四川省天气雷达平原地区具备较好的覆盖能力,而高原山地地区由于受到地形影响,整体近地面探测能力偏

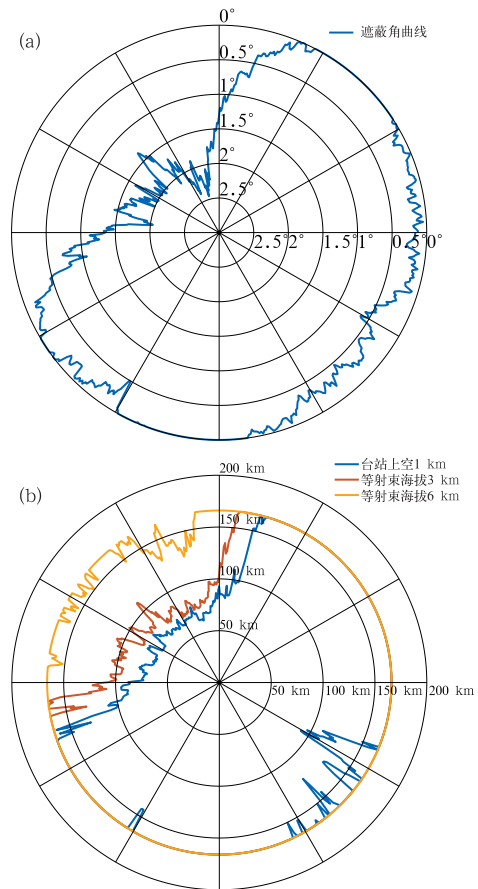


图 3 成都站遮蔽角图(a)和  
站点 1 km、海拔 3 km、海拔 6 km  
等射束高度图(b)

Fig. 3 Blind angle (a) and diagram of  
iso-beam heights at 1 km above ground,  
3 km and 6 km altitudes (b) at Chengdu Site



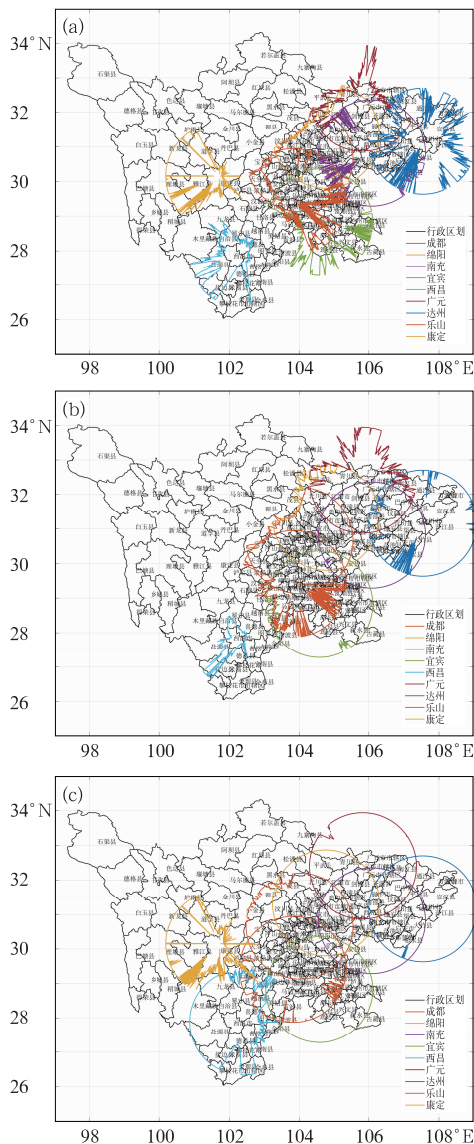


图 4 四川天气雷达站点  
上空 1 km(a),海拔 3 km(b)和  
6 km(c)等射束拼图

Fig.4 Mosaic diagrams of iso-beam of  
Sichuan Weather Radar at 1 km above  
ground (a), 3 km altitude (b) and  
6 km altitude (c)

低,站点 1 km 和海拔 3 km 覆盖范围不及四川区划总面积的一半。

#### 4 结论和讨论

利用文中方法分析了四川省天气雷达单站覆盖情况,并运用SRTM高程数据完成了对四川省天气

表 1 四川省天气雷达等射束覆盖率

Table 1 Coverage of iso-beam of  
Sichuan weather radars

站点	覆盖率/%		
	站点 1 km	海拔 3 km	海拔 6 km
成都	71.69	80.77	97.78
西昌	17.35	7.06	58.08
宜宾	65.00	95.92	99.92
达州	70.38	98.14	99.94
广元	49.90	74.52	99.07
南充	93.39	99.97	100.00
乐山	59.71	81.89	98.49
绵阳	73.84	87.21	99.84
甘孜	36.07	0.00	44.83
全省平均	59.70	69.50	88.66

雷达组网探测能力的评估;计算过程采用切片方法,提高了计算效率,利用等效地球半径法消除地球曲率和电磁波折射带来的计算误差,运用近似距离公式消除了经纬度计算相对方位出现的误差问题。总结文中分析过程,基于 SRTM 高程数据天气雷达探测环境分析方法可以有效完成对新一代天气雷达站网探测能力的评估,但有三点问题值得讨论:

(1) 该方法可以获得雷达探测范围的高程数据,延伸出雷达近地面探测盲区和得到雷达静锥区的三维探测环境分析方法,其三维结果可以更加直观地描述雷达探测环境情况。

(2) 文中并没有考虑波束宽度对评估结果的影响,径向距离的增加和波束展宽的情况应该被考虑到评估算法当中,文中的评估结果是偏于保守的。

(3) 在评估雷达探测能力时可以引入雷达体扫模式进行综合分析,有利于将评估结果用于数据质量控制研究中。

#### 参考文献

邓志,刘文文,黄美金,1999. 雷达等射束高度图制作方法[J]. 气象, 25(11):47-49. Deng Z, Liu W W, Huang M J, 1999. Drawing radar chart with ISO-beam height[J]. Meteor Mon, 25(11): 47-49 (in Chinese).

高飞,2013. 天气雷达站址选择的有效地理视距分析[J]. 测绘科学, 38(3):203-204. Gao F, 2013. Discussion on CINRAD effective geographic range analysis system[J]. Sci Surv Mapp, 38(3): 203-204(in Chinese).

勾亚彬,汪章维,刘黎平,等,2017. 雷达波束部分遮挡识别应用及效果评估[J]. 高原气象,36(1):229-240. Gou Y B, Wang Z W, Liu L P, et al, 2017. Application and evaluation of radar partial blockage identification[J]. Plateau Meteor, 36(1): 229-240 (in

- Chinese).
- 郭方, 2017. 成都天府国际机场天气雷达站选址分析[J]. 气象水文海洋仪器, 34(1): 22-24. Guo F, 2017. Analysis on site selection for weather radar station of Chengdu Tianfu International Airport [J]. Meteor Hydrol Mar Instrum, 34(1): 22-24 (in Chinese).
- 国家地震局地球物理研究所, 1978. 近震分析[M]. 北京: 地震出版社: 31-32. Institute of Geophysics, China Earthquake Adminis, 1978. Near Earthquake Analysis [M]. Beijing: Seismological Press: 31-32 (in Chinese).
- 黄太山, 2014. 巧用 GIS 空间叠置分析计算遮蔽角[J]. 北京测绘, (6): 55-57. Huang T S, 2014. Using the GIS spatial overlay analysis to calculate the defilade angle cleverly[J]. Beijing Surv Mapp, (6): 55-57 (in Chinese).
- 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其未来发展[J]. 气象, 39(3): 265-280. Li B, Gu Q T, Li R Y, et al, 2013. Analyses on disastrous weather monitoring capability of CINRAD and future development[J]. Meteor Mon, 39(3): 265-280 (in Chinese).
- 梁成根, 黄云仙, 2008. 天气雷达网资料拼图方法研究[J]. 计算机与现代化, (4): 54-57. Liang C G, Huang Y X, 2008. Study of method for weather radar network data mosaic[J]. Comput Mod, (4): 54-57 (in Chinese).
- 刘娟, 2015. CINRAD/SC 新一代天气雷达回波地物检测与校正方法探讨[J]. 气象, 41(10): 1286-1291. Liu J, 2015. Detection and correction discussion of ground echoes of CINRAD/SC new generation Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 41(10): 1286-1291 (in Chinese).
- 吕智, 2012. 地球球面和大气折射对气象雷达目标探测的影响[J]. 现代电子技术, 35(12): 119-122. Lü Z, 2012. Influence of ground spherical surface and aerosphere refraction on target detection with airborne weather radar[J]. Mod Electron Technol, 35(12): 119-122 (in Chinese).
- 孙伟, 2011. 低空大气折射率的多普勒天气雷达探测和分析[D]. 南京: 南京信息工程大学. Sun W, 2011. Measurement and analysis of near-surface atmospheric refractivity with Doppler weather radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese).
- 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 Y F, Yang H P, Xiao Y J, et al, 2000. An objective method for analyzing the horizon of Doppler weather radar stations[J]. Quart J Appl Meteor, 11(4): 440-447 (in Chinese).
- 王红艳, 刘黎平, 2015. 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, 34(6): 1772-1784. Wang H Y, Liu L P, 2015. Assessment of CINRAD regional coverage for quantitative precipitation estimation[J]. Plateau Meteor, 34(6): 1772-1784 (in Chinese).
- 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 S D, Pei C, Guo Z M, et al, 2011. Evaluations on Chinese next generation radars coverage and terrain blockage based on SRTM data[J]. Climatic Environ Res, 16(4): 459-468 (in Chinese).
- 韦清娜, 王龙波, 2012. GIS 在雷达站选址中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 35(12): 88-89, 92. Wei Q Y, Wang L B, 2012. Application of GIS in the location selection of radar station[J]. Geomat Spat Inf Technol, 35(12): 88-89, 92 (in Chinese).
- 吴焕萍, 2010. GIS 技术在气象领域中的应用[J]. 气象, 36(3): 90-100. Wu H P, 2010. Application of GIS in meteorology[J]. Meteor Mon, 36(3): 90-100 (in Chinese).
- 徐八林, 刘黎平, 杨明, 等, 2006. 高山雷达站选址对估测降水的影响分析[J]. 气象科技, 34(3): 340-343. Xu B L, Liu L P, Yang M, et al, 2006. Impact analysis of radar location on precipitation estimation over alpine areas[J]. Meteor Sci Technol, 34(3): 340-343 (in Chinese).
- 徐鸣一, 李峰, 夏元彩, 等, 2017. 新一代天气雷达 2009—2014 年运行状态分析[J]. 气象, 43(3): 365-372. Xu M Y, Li F, Xia Y C, et al, 2017. Analysis of CINRAD radar operation status during 2009—2014[J]. Meteor Mon, 43(3): 365-372 (in Chinese).
- 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. Yang H P, Zhang P Y, Cheng M H, et al, 2009. The valid mosaic data region of the CINRAD network[J]. J Appl Meteor Sci, 20(1): 47-55 (in Chinese).
- 杨金红, 陈大任, 王曙东, 2013. 改进新一代天气雷达低层探测能力研究[J]. 气象, 39(4): 494-499. Yang J H, Chen D R, Wang S D, 2013. Research on improving CINRAD detection ability in lower layers[J]. Meteor Mon, 39(4): 494-499 (in Chinese).
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 2001. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社: 94-149. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. Radar Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press: 94-149 (in Chinese).
- 张扬成, 游文华, 高翔宇, 等, 2013. 新一代天气雷达负仰角探测能力分析[J]. 气象科技, 41(1): 15-19. Zhang Y C, You W H, Gao X Y, et al, 2013. Analysis of detection capability of CINRAD/SA using negative elevation angle[J]. Meteor Sci Technol, 41(1): 15-19 (in Chinese).
- 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 R J, Yang B Y, 2003. Application of geographical information system to CINRAD's siting[J]. Meteor Mon, 29(6): 30-32 (in Chinese).
- Doviak R J, Zmric D S, 1993. Doppler Radar and Weather Observations[M]. San Diego: Academic Press: 10-29.