

陕西天气雷达覆盖率评估与分析*

白水成 高山 刘畅 任丹阳 李军 曹梅 张颖梅 樊婷丽

(西安市大气探测中心, 西安 710014)

提 要: 本文提出了计算地表任意一点上空对应的特定高度的雷达探测覆盖率的方法, 并利用地形高程数据, 研究了陕西及周边省份 23 部新一代天气雷达的探测能力。此外, 对三部高山雷达站负仰角观测模式进行了数值模拟, 给出了最优最低观测仰角。结果表明, 新一代天气雷达对陕西上空不同高度的一重覆盖率和二重覆盖率分别为: 0.5km 高度为 48.6%、2.3%, 1km 高度为 80.0%、18.9%, 2km 高度为 98.7%、74.5%, 3km 高度为 99.9%、97.1%, 4km 高度均为 100%。将陕西三部 X 波段天气雷达考虑在内的话, 1km 高度的一重覆盖率和二重覆盖率分别提升至 82.7%、32.1%。在此基础上, 依据年平均降雨量、GDP 和人口数量, 提出了计算陕西境内雷达覆盖盲区建设雷达优先级的方法。本研究对未来在雷达覆盖盲区建设天气雷达工作提供了理论和技术支撑。

关键词: 天气雷达, 地形高程数据, 覆盖率, 仰角, 优先级

Evaluation and Analysis of the Coverage Rate of Shaanxi Weather Radar

BAI Shuicheng¹ GAO Shan¹ LIU Chang¹ REN Danyang¹ LI Jun¹ CAO Mei¹
ZHANG Yingmei¹ FAN Tingli¹

¹ Xi'an Meteorological Observation Center, Xi'an 710014

Abstract: The research proposed a method to calculate the radar detection coverage with a specific altitude corresponding to one point on the surface, and used the terrain elevation data to analyze the detection capabilities of 23 new-generation weather radars in Shaanxi and surrounding provinces. Additionally, executed the numerical simulation of the negative elevation angle observation mode and obtained the optimal minimum observation elevation angle of the three mountaintop radars. The results show that the primary and secondary coverage rates of the new-generation weather radar for different altitudes over Shaanxi were: 48.6% and 2.3% at 0.5km, 80.0% and 18.9% at 1km, 98.7% and 74.5% at 2km, 99.9% and 97.1% at 3km and 100% at 4km. Considered the 3 X-band weather radars of Shaanxi, the primary and secondary coverage rates were increased to 82.7% and 32.1% at 1km, respectively. On this basis, a method used the average annual rainfall, GDP and population datas were suggested to calculate the priority of radar coverage in blind areas and counties in Shaanxi province. The findings of this study provide a theoretical and technical support for the construction of weather radar in the blind area of radar coverage in the future.

Keywords: weather radar, terrain elevation data, coverage rate, elevation, priority

引 言

截止 2021 年 10 月, 陕西省共建设新一代天气雷达 7 部, X 波段双偏振天气雷达 3 部。连同周边省份(包括四川、重庆、湖北、山西、宁夏、河南、甘肃、内蒙古)临近的 16 部

*陕西省西安市科技计划项目(20SFSF0015)和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基金

(2020G-18)共同资助

第一作者: 白水成, 高工, 主要从事大气探测研究. Email: 644165877@qq.com

新一代天气雷达共同构成的陕西天气雷达监测网在灾害性天气监测和预警方面发挥了重要作用(林文等, 2020; 刁秀广等, 2020; 徐八林等, 2020; 管理等, 2020; 肖艳姣等, 2021)。陕西省地形复杂, 海拔最高点和最低点落差 3597 米。由于地形和建筑物遮挡, 造成部分地区雷达回波偏弱, 或成为雷达观测盲区, 进而导致在灾害性天气过程中依赖回波强度的天气雷达降水估算严重失真或是测漏。根据气象行业标准《新一代天气雷达选址规定》(QX/T100—2009), 利用单部雷达覆盖范围内的地理信息数据, 绘制雷达遮蔽角图和雷达上方 1km、海拔 3km、海拔 6km 等射束高度图, 可以很好地评估雷达探测能力, 利用多部雷达等射束高度拼图可以评估雷达相互间的补盲能力。邓志等(1999)和张培昌等(2001)阐述了天气雷达等射束高度图和遮蔽角图制作原理和方法, 万玉发等(2000)提出了天气雷达站址视程客观分析技术, 并开发了相应软件。赵瑞金和杨彬云(2003)利用地理信息系统(GIS)获取雷达遮挡数据与“多普勒天气雷达候选站址净空条件客观分析软件”相配合的方法快速地计算和绘制单站雷达遮蔽图、等射束高度图和多站雷达等射束高度拼图, 并对站址四周的净空条件进行客观分析。

近年来, 随着新一代天气雷达数据应用研究的深入展开, 高分辨率地形高程数据(以下简称高程数据)在雷达遮挡分析中得到了很好的应用。杨洪平等(2009)通过高程数据计算波束阻挡率, 确定了雷达组网拼图的有效区域及波束部分阻挡时回波强度订正方法。王曙东等(2011)计算了全国 158 部天气雷达地形遮挡和覆盖能力, 并提出了覆盖比、高度-面积指数和等效覆盖半径等 3 个定量指标。王红艳等(2014)利用两种分辨率高程数据模拟了浙江山区雷达的波束遮挡并检验了结果的可靠性, 王红艳和刘黎平(2015)提出了依据 0℃层高度和雷达波束阻挡分析雷达降水估算有效覆盖范围的方法。石宝灵等(2018)基于 0℃、-20℃层高度和回波强中心高度等三个重要参数, 利用高程数据评估了云南山地雷达网探测冰雹的区域覆盖能力。朱丹等(2018)和柳云雷等(2020)先后利用高程数据对全国天气雷达单站有效覆盖和组网遮挡情况进行了分析。景号然等(2019)利用 SRTM 高程数据, 根据雷达最大遮蔽角、固定仰角遮挡和多站等射束拼图分析方法, 评估了四川省新一代天气雷达组网观测能力。国内学者对雷达净空环境算法误差也进行了研究, 景号然等(2020)采用方位和距离矫正算法后, 使基于 SRTM 高程数据的天气雷达净空环境评估算法精度明显提高, 白水成等(2021)对传统天气雷达遮蔽角图和等射束高度图制作算法进行了优化。李巧等(2021)利用陕西省 7 部 C 波段天气雷达观测数据, 结合雷达探测资料质量控制、降水类型分类、地形遮挡和雷达拼图等提出了复杂地形下天气雷达定量降水估测算法。张哲等(2021)利用深圳市 S 波段和 X 波段双偏振多普勒雷达探测资料, 结合高精度地形数据分析了雷达的遮挡状况, 设计了基于双偏振量的定量降水估计方法。国外对 NEXRAD 的覆盖能力、探测性能开展了充分的分析与评估(Klazura and Imy, 1993; National Research Council, 1995; Maddox et al., 2002; Hardegree et al., 2003)。

本文设计了计算雷达探测半径范围内地表任意一点上空某一特定高度雷达覆盖情况的算法。这一高度不同于等海拔高度或雷达站上空任意高度, 是指在地表每一点海拔高度的基础上增加一特定高度后, 与下垫面近乎平行的曲面上每一点相对地面的高度, 是天气系统实际发生的空间位置。基于该算法, 利用高程数据, 评估了陕西和周边省份 23 部新一代天气雷达、3 部 X 波段双偏振雷达的覆盖能力和高山站雷达低仰角探测能力, 计算了陕西上空特定高度雷达覆盖范围, 结合陕西各县(区)近 30 年(1991-2020 年)年平均降雨量、2018 年 GDP 值及人口数量, 给出了雷达补盲建议。

1 算法设计

本文利用新一代天气雷达常用的降水观测模式 VCP21 进行计算。VCP21 模式有 9 个观测仰角(0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、19.5°), 雷达波束宽度约为 1.0°。

理论上, 雷达探测半径内, 在没有遮挡的情况下, 处于雷达观测仰角 $0^{\circ} \sim 4.8^{\circ}$ 、 $5.5^{\circ} \sim 6.5^{\circ}$ 、 $9.4^{\circ} \sim 10.4^{\circ}$ 、 $14.1^{\circ} \sim 15.1^{\circ}$ 、 $19.0^{\circ} \sim 20.0^{\circ}$ 之间的空间内的所有点均能被探测到。如图 1 所示, O 为等效地球球心, R 为雷达馈源位置, A、B、C、D、E 为雷达探测半径覆盖范围内的五个点, 其上的线段长度代表需要计算的地表上空雷达覆盖高度, 为了便于讨论, 假设为 1km。RL 为 0.5° 仰角波束下沿, $\angle LRM$ 为雷达最低探测仰角 0.5° , RN 为 19.5° 仰角波束的上沿, $\angle LRN$ 为 20.0° 。从方位角 0.0° 雷达 0.5° 仰角波束的下沿 0.0° 算起, 对 0.0° 雷达射线来说, 受距离雷达最近的遮挡物 A 点影响, A 点之外的点无法被 0.0° 雷达射线探测到, A 点之内的各点, 海拔高度加上 1km, 如果处于 0.0° 雷达射线和前述雷达最大观测仰角之间, 可以被探测到, 否则无法被探测到。例如 A 点, 其海拔高度加上 1km, 超过雷达最大仰角波束上沿 20.0° 射线, 因此无法被探测到。距离雷达较近的点, 因为 20.0° 射线高度较低, 很多点之上 1km 无法被探测到, 形成了雷达顶部盲区。增加雷达射线仰角, 当超过 A 点相对于雷达馈源的仰角时 (假设此时的仰角为 α), A 点和下一个距离雷达最近的遮挡物 Q 之间的所有点, 海拔高度加上 1km, 如果处于仰角为 α 的雷达射线和前述最大仰角雷达射线之间时, 可以被探测到, 否则不能被探测到。照此方法, 逐步增加仰角, 直至接近 20.0° 。在此期间, B 点和 D 点可以被探测到, C 点和 E 点受前面遮挡物的影响, 无法被探测到。然后计算下一方位角, 直至将雷达探测半径范围内能够被覆盖的地表上空 1km 的点全部找到。具体算法如式 (1)、(2)、(3) 所示。

$$\mu = \frac{S_1}{S} \quad (1)$$

$$S_1 = \frac{S}{N} \times N_1 \quad (2)$$

$$N_1 = \text{COUNTIF}(N, h_1 < H + h < h_2) \quad (3)$$

μ 为雷达覆盖率, S 为待评估区域总面积, S_1 为待评估区域特定高度被雷达覆盖的面积, N 为待评估区域在所用高程数据中的总点数, N_1 为被雷达覆盖的特定高度的点数, H 为某个点所在位置的海拔高度, h 为待评估高度, h_1 、 h_2 为某个点所在位置上空雷达波束的下、上沿高度。本文所用高程数据经向、纬向分辨率均为 0.01° ; 方位角计算分辨率为 0.5° ; 仰角计算分辨率为 0.1° 。遮挡点相对于雷达馈源的方位角、仰角、斜距等参数的计算方法见白水成等 (2021)。

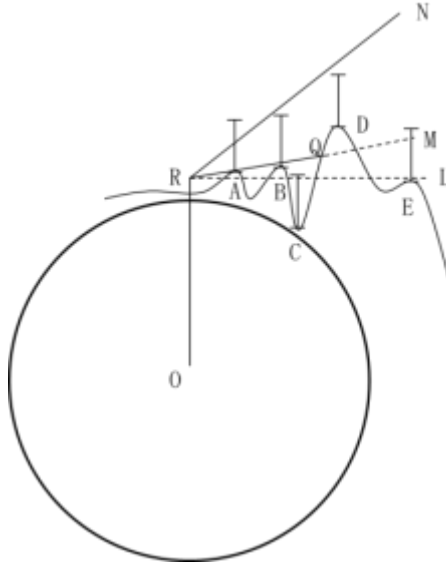


图 1 地物遮挡模拟图

Fig.1 Ground object occlusion simulation

2 单部雷达覆盖能力评估

2.1 理想条件下天气雷达覆盖能力

不同天气现象发生的空间高度不同，中气旋、龙卷涡旋、雷暴大风等主要发生在 2km 及以下，中层径向辐合主要发生在 3~7km，如果要计算定量估测降水(QPE)，需要用到 0.5km 高度的雷达回波。如图 2 所示，在不考虑负仰角的理想情况下，PE 是雷达最低观测仰角波束下沿，角度为 0.0°，PA 为最高观测仰角波束上沿，∠EPA 为 20°，弧 PC 为所求高度雷达顶部盲区，D 是所求高度雷达能够探测的最远点，AC 和 ED 相等，R 是等效地球半径。利用三角函数，可以得到：

$$\widehat{PC} = R \times \left(\frac{180 - 110 - \sin^{-1} \left(\frac{R}{R+H} \times \sin(110) \right)}{180} \right) \quad (4)$$

$$\widehat{PD} = R \times \frac{\cos^{-1} \left(\frac{R}{R+H} \right)}{180} \quad (5)$$

根据公式 (4)、(5)，计算地表上空 0.5km、1km、2km、3km 高度雷达顶部盲区半径、覆盖区域半径、覆盖面积如表 1 所示，为了便于计算，将地表弧长等效为半径。表 1 中的覆盖面积是环形面积。

表 1 理想条件下单部雷达顶部盲区半径和覆盖范围半径

Table 1 Blind spot radius at the top and coverage radius of a single radar in the ideal conditions

覆盖高度 (km)	顶部盲区半径 (km)	覆盖区域半径 (km)	覆盖面积 (km ²)
0.5	1.4	92.2	26700.0
1	2.7	130.3	53315.3
2	5.5	184.4	106729.7
3	8.2	225.8	159964.9

固原	1.6%	11.7	9.3%	39.8	41.1%	118.3	62.5%	178.4
陇南	22.6%	43.9	35.4%	77.6	52.6%	133.7	63.2%	179.4
东胜	49.0%	64.6	76.7%	114.2	97.5%	182.0	99.9%	225.6
神农架	2.0%	13.1	4.7%	28.3	18.6%	79.4	36.2%	135.8
万州	42.6%	60.2	57.9%	99.2	66.2%	150.0	69.1%	187.6
五寨	0.6%	7.0	3.3%	23.8	24.9%	92.0	48.7%	157.6
临汾	49.2%	64.7	42.7%	85.2	43.2%	121.1	46.6%	154.1
吕梁	32.9%	52.9	34.4%	76.5	38.1%	113.8	42.7%	147.5
三门峡	38.8%	57.5	43.8%	86.2	53.1%	134.4	59.3%	173.8
十堰	40.8%	58.9	66.8%	106.5	76.7%	161.5	74.6%	194.9
达州	55.1%	68.4	73.2%	111.5	84.9%	169.8	82.8%	205.4
广元	40.6%	58.8	50.0%	92.1	62.9%	146.2	68.7%	187.1
西峰	88.5%	86.7	97.6%	128.8	92.7%	177.5	93.6%	218.4
天水	73.4%	79.0	70.4%	109.3	70.0%	154.2	73.1%	192.9
平均	48.2%	59.7	52.6%	90.0	59.4%	138.9	63.9%	178.1

景号然等（2019）也计算了四川各天气雷达对雷达站上空 1km 高度平面的覆盖率，其中达州雷达覆盖率为 70.38%，广元雷达覆盖率为 49.90%，与表 2 达州(73.2%)、广元(50.0%)覆盖率相比，前者略低。主要原因有两方面，一是与本文算法相比，前者只考虑了固定仰角，未考虑雷达波束展宽；二是本文计算的是雷达对与地表近乎平行的曲面的覆盖率，前者计算的是雷达站上空 1km 平面的覆盖率，不包括 1km 之上突兀地表的面积，以上两方面均能造成计算结果偏小，前述比对结果符合理论预期。

3 高山雷达负仰角探测能力评估

由表 2 可知，宁夏固原、山西五寨、湖北神农架三个雷达站 0.5km 和 1km 高度覆盖比较低。图 3 是三站的遮蔽角图，由图 3 可知，除了神农架站个别方位外，三站的净空环境均较好。通过查看地形图可知这三部雷达均建设在孤立的山顶，周边地形下降坡度较大，按照雷达现有最低 0.5° 仰角探测，雷达探测半径内近地面空间覆盖率不高。

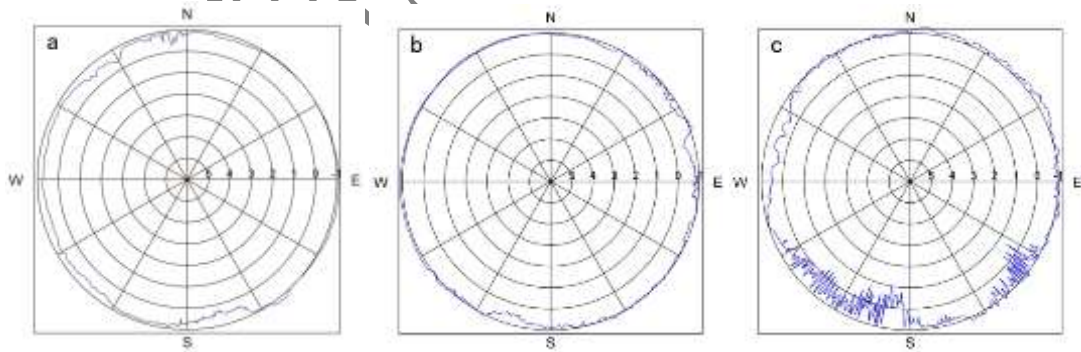


图 3 雷达遮蔽角 (a) 固原, (b) 五寨, (c) 神农架

Fig 3 The Radar masking angle of (a) Guyuan, (b) Wuzhai, (c) Shennongjia

张扬成等（2013）指出了高山雷达站负仰角观测的局限性及使用俯仰角观测的建议。影响雷达最低探测仰角的因素包括体扫时间、遮挡、地球曲率等。理论上雷达最低探测仰角越低，覆盖的面积越大。但最低仰角越低，可能造成体扫时间过长，因此需要选择合适的最低探测仰角。如图 4，本研究利用高程数据计算了五寨雷达不同负仰角情况下，最低仰角波束下沿 1km 高度覆盖面积。图 5 为五寨雷达仰角下沿为 -0.1°、-0.9°、-1.3° 时，波束下沿 1km

高度覆盖的范围。通过计算可知，当雷达波束下沿为 -0.1° 时，波束下沿 1km 高度覆盖面积为 1785.0m^2 ，等效半径为 23.8km。随着仰角降低，覆盖面积逐渐增大，雷达近距离盲区逐渐减小。当雷达波束下沿降为 -0.9° 时，波束下沿 1km 高度覆盖面积达到最大值 116629.9m^2 ，等效半径为 192.7km，但距离雷达较近的五寨县、神池县、宁武县仍有部分盲区。当仰角继续降低，最低仰角波束下沿覆盖面积逐渐减小，当雷达波束下沿降为 -1.3° 时，雷达附近地区 1km 高度盲区基本消失。仅考虑覆盖面积，五寨雷达最低仰角波束下沿设为 -0.9° 最为合适，此时波束中心仰角为 -0.4° 。考虑到雷达附近近地面盲区其它雷达也很难覆盖，也可将最低波束下沿设为 -1.3° ，此时波束中心仰角为 -0.8° 。按照同样的分析方法，固原和神农架雷达近距离盲区最小时的波束中心仰角宜设为 -0.4° 、 -0.8° 。通过以上分析可知，如果天气雷达建在孤立山顶，可能造成近地面高度覆盖率不高，宜考虑负仰角观测，不同雷达最低观测仰角应根据周边地形进行单独分析。

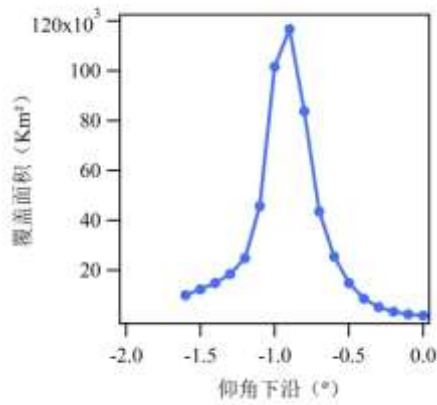


图 4 五寨雷达不同仰角下沿 1km 高度覆盖面积

Fig 4 Coverage area of Wuzhai radar at 1km height under different lower edge of elevation



图 5 五寨雷达仰角下沿为 (a) -0.1° ; (b) -0.9° ; (c) -1.3° 时 1km 高度覆盖范围

Fig 5 1km altitude coverage of Wuzhai radar elevation angle bottom edge at (a) -0.1° , (b) -0.9° , (c) -1.3°

4 陕西省特定高度雷达覆盖范围计算

本节计算了陕西及周边省份 23 部新一代天气雷达对陕西省不同高度的覆盖率。算法为：在单部雷达覆盖范围的基础上，统计陕西境内每一点被周边雷达覆盖情况，同一点被多于 1 部雷达覆盖时，均按二重覆盖计。二重覆盖范围能够为备份雷达建设提供依据。由表 3 可以看出，陕西境内 0.5km 高度新一代天气雷达一重覆盖率为 48.6%，二重覆盖率为 2.3%。随着高度增加，一重覆盖率和二重覆盖率均增加，4km 高度，两者均达到 100%。

表 3 陕西境内新一代天气雷达覆盖率

191

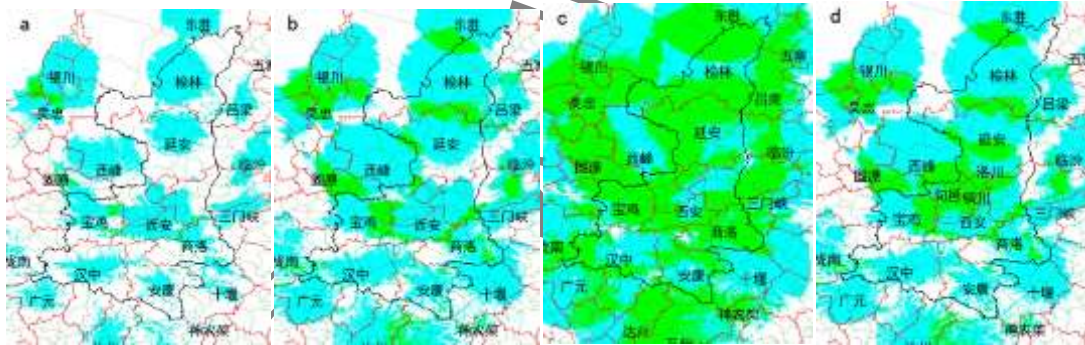
Table 3 Coverage rate of new-generation weather radar of Shaanxi province

高度 (km)	一重覆盖 (%)	二重覆盖 (%)
0.5	48.6	2.3
1	80.0	18.9
2	98.7	74.5
3	99.9	97.1
4	100	100

192

图 6 (a-d) 依次为陕西新一代天气雷达 0.5km、1km、2km 高度覆盖范围和增加了 3 部 X 波段雷达后 1km 高度覆盖范围。由图 6a 可知，在 0.5km 高度，陕西中部一重覆盖率较高，北部榆林和延安雷达覆盖范围虽然较大，但因为雷达少，地域大，覆盖率不高，南部虽然雷达相对较多，但因处于秦巴山区，遮挡严重，覆盖率也不高。由图 6b 可知，1km 高度一重覆盖率大幅度提高，未覆盖地区主要位于两部雷达探测的交界地区，1km 高度二重覆盖的地区包括榆林和延安交界地区，宝鸡东部。由图 6c 可知，2km 高度一重未覆盖的地区较少，主要位于汉中、安康、商洛的个别地区，以及榆林、汉中、安康等雷达的顶部盲区，2km 高度二重覆盖的地区明显扩大，主要位于北部和中部雷达探测的交界地区，南部二重覆盖率仍然较低。另外，根据计算结果，3km 高度除了汉中和安康雷达的顶部盲区外，其余地区一重全覆盖，二重覆盖率也较高，除了汉中、安康、渭南、延安的个别地区外，其余全覆盖，4km 高度，一重和二重已实现全覆盖。图 6d 是增加旬邑、铜川、洛川三部 X 波段天气雷达后，1km 高度的覆盖情况。比较图 6b 和 d 可以看到，三部 X 波段雷达很好的弥补了咸阳北部和延安南部的盲区。经过计算，增加 3 部 X 波段雷达后，1km 高度一重覆盖率由 80.0% 提高到 82.7%，二重覆盖率由 18.9% 提高到 32.1%，X 波段雷达作为补盲和备份雷达的效果明显。

205



206

图 6 陕西新一代天气雷达在 (a) 0.5km, (b) 1km, (c) 2km, (d) 增加 3 部 X 波段雷达后 1km 覆盖范围 (蓝色为一重覆盖, 绿色为二重覆盖)

208

Fig 6 The coverage of new generation weather radar of Shaanxi at (a) 0.5km, (b) 1km, (c) 2km, (d) adding 3 X-band radars at 1km altitude (Light green is single coverage, dark green is double coverage)

210

5 陕西境内雷达补盲建议

211

与新一代天气雷达相比，X 波段天气雷达波长短、衰减大，探测距离近。但 X 波段天气雷达具有较高的空间分辨率，地杂波的影响相对较小，能够有效提升局地小尺度灾害天气的监测能力。对于新一代天气雷达的探测盲区，适宜以县为单位建设 X 波段天气雷达进行补盲。当盲区较多时，如何确定补盲雷达建设的优先级，需要相关理论来支持。

215

天气雷达主要用来观测降水类天气系统。一般来说，强降水天气过程发生在人口密度大、经济要素密集的地区，比发生在人口密度小、经济欠发达地区的影响严重。所以本文提出以县为单位，以县年平均降雨量、GDP、人口数量为依据来确定建设 X 波段雷达的优先级。具体做法为：分别对 1km 高度雷达探测盲区县的年平均降雨量、GDP、人口数量进行降序

219

排名，将每个县三项排名的序号相加，数值越小者，优先级越高。表 4 是根据陕西省 GDP 和人口数量（2018）及 1991-2020 年平均降雨量排名，计算出的 1km 高度盲区县 X 波段雷达建设优先级，洛南、紫阳、韩城、神木、镇安位列优先级前 5 位。

表 4 陕西境内 1 公里高度覆盖盲区县雷达补盲优先级

Table 4 Radar blind compensation priority of blind areas and counties covered at 1 km of Shaanxi

优先级	县名	GDP 排名	人口排名	年均降雨量排名	综合排名
1	洛南	45	26	30	101
2	紫阳	57	50	2	109
3	韩城	11	33	67	111
4	神木	1	20	95	116
5	镇安	52	51	20	123
6	镇巴	73	59	1	133
7	府谷	6	53	93	152
8	定边	15	41	99	155
9	略阳	80	65	23	168
10	岚皋	85	78	5	168
11	柞水	79	77	18	174
12	凤县	48	89	37	174
13	宁陕	91	93	7	191
14	镇坪	96	96	3	195
15	吴起	37	81	90	208
16	留坝	98	98	16	212
17	太白	93	95	25	213
18	宜川	90	88	75	253

6 结论

本文提出了地表上空特定高度雷达覆盖范围计算方法，并以经向、纬向分辨率均为 0.01° 的高程数据，计算了陕西及周边省份 23 部新一代天气雷达的覆盖比和等效半径，得到主要结论如下：

（1）陕西及周边省份 23 部天气雷达的平均覆盖率和等效半径在 0.5km 高度分别为 48.2%、59.7km，1km 高度分别为 52.6%、90.0km，2km 高度分别为 59.4%、138.9km，3km 高度分别为 63.9%、178.1km。

（2）分析了高山雷达负仰角探测能力，如果天气雷达建在孤立山顶，宜考虑负仰角观测，不同高山雷达最低观测仰角应根据周边地形进行单独分析。

（3）计算了陕西境内不同高度天气雷达探测一重覆盖率和二重覆盖率：0.5km 高度分别为 48.6%、2.3%，1km 高度分别为 80.0%、18.9%，2km 高度分别为 98.7%、74.5%，3km 高度分别为 99.9%、97.1%，4km 高度均为 100%。将陕西三部 X 波段天气雷达计算在的话，1km 高度一重覆盖率和二重覆盖率分别提升至 82.7%、32.1%；

（4）提出了以县为单位，依据年平均降雨量、GDP 和人口数量，计算雷达覆盖盲区县建设 X 波段天气雷达优先级的方法，并确定了陕西境内 1 公里高度雷达覆盖盲区县建设雷达的优先级。

参考文献

- 白水成, 高山, 樊婷丽, 等, 2021. 天气雷达等射术高度图制作算法优化[J]. 气象科学, (已录用, 待见刊). Bai S C, Gao S, Fan T L, et al, 2021. Algorithm optimization for weather radar range chart[J]. J Meteor Sci, (Accepted, to be published) (in Chinese). [\[查阅所有网上资料, 未正式出版, 请确认\]](#)
- 邓志, 刘明文, 黄美金, 1999. 雷达等射术高度图制作方法[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).
- 刁秀广, 刘畅, 万明波, 等, 2020. 山东 3 次大暴雨过程云街雷达回波特征及其作用分析[J]. 气象, 46(2): 179-188. Diao X G, Liu C, Wan M B, et al, 2020. Analysis on cloudstreet echo characteristics and effects during three severe rainfall events in Shandong province[J]. Meteor Mon, 46(2): 179-188 (in Chinese).
- 管理, 戴建华, 赵渊明, 等, 2020. 上海地区暖季午后对流的雷达气候学特征分析[J]. 气象, 46(12): 1543-1554. Guan L, Dai J H, Zhao Y M, et al, 2020. Radar climatology analysis of warm season afternoon convective storm over Shanghai[J]. Meteor Mon, 46(12): 1543-1554 (in Chinese).
- 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).
- 景号然, 郑伟, 刘宗庆, 等, 2020. 基于 SRTM 天气雷达净空环境评估算法误差分析[J]. 气象, 46(2): 278-282. Jing H R, Zheng W, Liu Z Q, et al, 2020. Error analysis on the assessment algorithm of clearance environment of weather radar based on SRTM[J]. Meteor Mon, 46(2): 278-282 (in Chinese).
- 李巧, 戚友存, 朱自伟, 等, 2021. 复杂地形下 C 波段雷达定量降水估计算法[J]. 气象学报, 79(4): 689-702. Li Q, Qi Y C, Zhu Z W, et al, 2021. Quantitative precipitation estimation algorithm for C-band radar situated in complex topographical regions[J]. Acta Meteor Sin, 79(4): 689-702 (in Chinese).
- 林文, 张深寿, 罗昌荣, 等, 2020. 不同强度强对流云系 S 波段双偏振雷达观测分析[J]. 气象, 46(1): 63-72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al, 2020. Observational analysis of different intensity severe convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 46(1): 63-72 (in Chinese).
- 柳云雷, 李昌兴, 张乐坚, 等, 2020. 基于高分辨率高程数据统计分析新一代天气雷达组网的地形遮挡影响[J]. 气象学报, 78(4): 705-720. Liu Y L, Li C X, Zhang L J, et al, 2020. Statistical analysis of terrain blockage impacts on the CINRAD network based on DEM data[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 705-720 (in Chinese).
- 陕西省统计局, (2019-08-05)[2021-10-01]. 陕西统计年鉴-2019[EB/OL]. <http://tjj.shaanxi.gov.cn/upload/2020/pro/3sxtjnj/zk/indexce.htm>, 2019-08-05/2021-10-01. Bureau of Statistics of Shaanxi Province, (2019-08-05)[2021-10-01]. Shaanxi Statistical Yearbook-2019[EB/OL]. <http://tjj.shaanxi.gov.cn/upload/2020/pro/3sxtjnj/zk/indexce.htm> (in Chinese).
- 石宝灵, 王红艳, 刘黎平, 2018. 云南多普勒天气雷达网探测冰雹的覆盖能力[J]. 应用气象学报, 29(3): 270-281. Shi B L, Wang H Y, Liu L P, 2018. Coverage capacity of hail detection for Yunnan Doppler Weather Radar Network[J]. J Appl Meteor Sci, 29(3): 270-281 (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, 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. Wang H Y, Liu L P, He L P, 2014. Beam blockage studies of doppler weather radar in mountainous region of Zhejiang[J]. Plateau Meteor, 33(6): 1737-1747 (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]. *Clim Environ Res*, 16(4): 459-468 (in Chinese).

肖艳姣, 王珏, 王志斌, 等, 2021. 基于 S 波段新一代天气雷达观测的下击暴流临近预报方法[J]. *气象*, 47(8): 919-931. Xiao Y J, Wang J, Wang Z B, et al, 2021. A downburst nowcasting method based on observations of S-Band new generation weather radar[J]. *Meteor Mon*, 47(8): 919-931 (in Chinese).

徐八林, 杨卫洁, 徐舒扬, 等, 2020. C 波段高山天气雷达对森林火灾的探测能力初析[J]. *气象*, 46(8): 1113-1121. Xu B L, Yang W J, Xu S Y, et al, 2020. Preliminary analysis of the ability of C-Band mountaintop radars to detecting forest fires[J]. *Meteor Mon*, 46(8): 1113-1121 (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).

张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 2001. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社: 125-127. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. Radar Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press: 125-127 (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).

张哲, 戚友存, 朱自伟, 等, 2021. 深圳 S 波段与 X 波段双偏振雷达在定量降水估计中的应用[J]. *气象学报*, 79(5): 786-803. Zhang Z, Qi Y C, Zhu Z W, et al, 2021. Application of radar quantitative precipitation estimation using S-band and X-band polarimetric radars in Shenzhen[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(5): 786-803 (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).

中国气象局, 2009. QX/T 100-2009 新一代天气雷达选址规定[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2009. QX/T 100-2009 Provisions on the sites selection of China new generation weather radar[S]. Beijing: China Meteorological Press, 2009 (in Chinese).

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. Zhu D, Gu J X, Shi C X, et al, 2018. Analysis of effective coverage and terrain blockage for next generation radar network design[J]. *Meteor Mon*, 44(11): 1434-1444 (in Chinese).

Hardegree S, Van Vactor S, Healy K, et al, 2003. Multi-watershed evaluation of WSR-88D (NEXRAD) radar-precipitation products[C]//Proceedings of the 1st Interagency Conference on Research in the Watersheds. Benson: 486-491. (查阅所有网上资料, 请确认本条文献格式)

Klazura G E, Imy D A, 1993. A description of the initial set of analysis products available from the NEXRAD WSR-88D system[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 74(7): 1293-1312.

Maddox R A, Zhang J, Gourley J J, et al, 2002. Weather radar coverage over the contiguous United States[J]. *Wea Forecasting*, 17(4): 927-934.

National Research Council, 1995. Assessment of NEXRAD Coverage and Associated Weather Services[M]. Washington DC: The National Academies Press: 8-33.