

王辉,李林,郑国锋,等,2019. X 波段天气雷达电磁辐射对环境影响的评估[J]. 气象,45(5):723-729. Wang H, Li L, Zheng G F, et al, 2019. Assessment of impacts of X-band weather radar electromagnetic radiation on environment[J]. Meteor Mon, 45(5):723-729(in Chinese).

## X 波段天气雷达电磁辐射对环境影响的评估<sup>\*</sup>

王 辉<sup>1,2</sup> 李 林<sup>1,2</sup> 郑国锋<sup>3</sup> 仰美霖<sup>2</sup>  
李思腾<sup>2</sup> 孟庆春<sup>1</sup> 韦 涛<sup>1</sup> 田 野<sup>1</sup>

1 北京市气象探测中心,北京 100089

2 北京城市气象研究院,北京 100089

3 中国电子工程设计院,北京 100142

**提 要:** 为了定量分析 X 波段天气雷达电磁辐射对环境的影响,依据 X 波段天气雷达的主要性能参数,理论推导 X 波段天气雷达的电磁辐射特性,分析 X 波段雷达站点周边环境,对电磁辐射进行水平和垂直立体监测,理论计算和实际监测结果均表明 X 波段雷达电磁辐射大小满足《电磁环境控制限值》(GB8702—2014)和《辐射环境保护管理导则 电磁辐射监测仪器和方法》(HJ/T10.2—1996)的要求,电磁辐射水平低于公众曝露的控制限值。

**关键词:** X 波段天气雷达,电磁辐射,立体监测,环境影响评价

**中图分类号:** P414

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.014

## Assessment of Impacts of X-Band Weather Radar Electromagnetic Radiation on Environment

WANG Hui<sup>1,2</sup> LI Lin<sup>1,2</sup> ZHENG Guofeng<sup>3</sup> YANG Meilin<sup>2</sup> LI Siteng<sup>2</sup>  
MENG Qingchun<sup>1</sup> WEI Tao<sup>1</sup> TIAN Ye<sup>1</sup>

1 Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100089

2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

3 China Electronics Engineering Design Institute, Beijing 100142

**Abstract:** In order to quantitatively analyze the effect of the electromagnetic radiation of X-band dual-polarization radar on the environment, on the basis of the main performance parameters of X-band weather radar, we derive electromagnetic radiation characteristics of X-band weather radar, and analyze the surrounding environment of X-band radar station. The electromagnetic radiation is monitored horizontally and vertically. The theoretical calculation and actual measurement results show that X-band radar electromagnetic radiation meets the requirements of the “Controlling Limits for Electromagnetic Environment” (GB8702—2014) and the “Guideline on Management of Radioactive Environmental Protection Electromagnetic Radiation Monitoring Instruments and Methods” (HJ/T10.2—1996). The electromagnetic radiation level is lower than the public exposure control limit value.

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2018YFC1506801)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB441401)、中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室基金(2016LASW-B19)和北京市科技计划项目(Z161100004516018)共同资助

2018 年 3 月 23 日收稿; 2018 年 12 月 21 日收修定稿

第一作者:王辉,主要从事天气雷达设备技术保障. Email:wanghai0225@163.com

通信作者:李林,主要从事综合气象观测系统建设和观测数据质量控制. Email:lilin@bjmb.gov.cn

**Key words:** X-band weather radar, electromagnetic radiation, 3-dimensional monitoring, environmental impact assessment

## 引言

目前全国业务布网雷达均为固定式 S 波段或 C 波段天气雷达,雷达工作时向外持续发射电磁波,可能会产生电磁辐射污染,雷达建设布网前都按照要求对环境电磁辐射和周边建筑限高进行了控制,部分学者主要集中研究 S 波段雷达的电磁辐射特性(王峰等,2007;葛润生和朱小燕,2002;赵志勇等,2009),也有学者对雷达操作间的电磁辐射值进行检测和对天气雷达电磁辐射环境影响做出分析并提出一些防护措施(毕存德等,2004)。X 波段偏振雷达相对 S 波段雷达更注重近地面资料的探测,与人们的生活息息相关,而对 X 波段偏振雷达电磁辐射特性分析和实际监测分析得很少。随着人们环境保护意识的提高以及项目建设规范化要求,加强 X 波段天气雷达电磁辐射对周边环境影响评估是非常必要的。

本研究根据北京 X 波段天气雷达的主要性能参数,按照 GB8702—2014(国家质量监督检验检疫总局和环境保护部,2015)的要求,理论计算雷达工作时的电场特性(郑启康等,2016;王心鹏等,2016),分析周边环境,确定环境敏感目标,按照国家环境保护局(1996a)有关国家标准(HJ/T10.2—1996)的要求,对周边环境电磁辐射进行水平和垂直方向上电场强度的立体监测,分析 X 波段雷达电磁辐射对环境的影响。

## 1 雷达参数及电磁辐射评价标准

### 1.1 X 波段雷达性能参数

天气雷达电磁辐射对环境的影响,主要与雷达发射参数、天线参数和雷达天线扫描模式有关,同时还与周边环境、测点到雷达站点之间的位置有关。本文以北京 X 波段雷达为例,其发射机技术指标如表 1 所示。

雷达不同扫描模式产生的电磁辐射对环境的影响也不同,其运行方式有 PPI 扫描、RHI 扫描、VOL 扫描、扇形扫描等方式(张培昌等,2000;俞小鼎等,

2006;李柏等,2013)。PPI 扫描是雷达天线在定仰角模式下水平方向的锥形平扫;RHI 扫描是在雷达定向进行垂直方向的扫描,可以获取粒子垂直结构分布信息(陈大任等,2010;武静雅等,2016;孙康远等,2017);VOL 扫描是不同仰角进行平扫的组合扫描方式,业务中常采用的 VCP21 模式是 9 个仰角进行扫描组合;扇形扫描是指雷达在指定方位角度内进行水平往返扫描。

目前气象雷达一般都采用高增益天线,将狭窄强电磁波定向辐射出去,在天线方向图上主要辐射能流密度集中两个半功率点方向的夹角内称主瓣,侧面称为旁瓣(廖玉芳等,2008;汪舵等,2017)。雷达天线性能既是雷达探测能力的重要指标,也影响着电磁辐射特性,增加电磁辐射的方向性,能减弱雷达旁瓣电磁辐射给周围环境带来的影响。北京 X 波段雷达天线主要技术指标如表 2 所示。

表 1 X 波段雷达发射机参数

Table 1 X-band radar transmitter parameters

参数名称	技术指标
工作频率	9455 MHz
脉冲宽度	0.5/1.0 $\mu$ s
发射机峰值功率	$\geq 65$ kW
脉冲重复频率	300~2000 Hz
参差重复频率比	3/2, 4/3, 5/4

表 2 X 波段雷达天线技术指标

Table 2 X-band radar antenna technical parameter

参数名称	技术指标
天线直径	2400 $\pm$ 10 mm
天线增益	$\geq 44.1$ dB
波束宽度	$\leq 0.99^\circ$
第一副瓣电平	$\leq -29.0$ dB
天线方向性	水平垂直波束主轴差 $<0.1^\circ$

### 1.2 电磁辐射评价标准

本次评价依据国家质量监督检验检疫总局和环境保护部(2015)相关标准,标准规定为控制电场、磁场、电磁场所致公众曝露(即公众所受的全部电场、磁场、电磁场照射,不包括职业照射和医疗照射),环境中电场、磁场、电磁场场量参数的均方根值应满足表 3 的要求。标准中还指出,对于脉冲电磁波,除满足上述要求外,其功率密度的瞬时峰值不得超过表

中所列限值的 1000 倍,或场强的瞬时峰值不得超过上表中所列限值的 32 倍。本次监测北京 X 波段雷达运行的频率为 9455 MHz,频率对应表 3(仅列出与本文相关数值)中 3000~15000 MHz 频率范围,

选用电场强度进行控制,因此对应的均方根值的标准限值为  $21.4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ,瞬时峰值的标准限值为  $684.8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

表 3 公众曝露控制限值

Table 3 Controlling limits for public exposure

频率范围	电场强度/ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	磁场强度/ $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	磁感应强度/ $\mu\text{T}$	等效平面波功率密度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
3000~15000 MHz	$0.22f^{1/2}$	$0.00059f^{1/2}$	$0.00074f^{1/2}$	$f/7500$

为确保环境中总的电磁辐射强度不超标,国家环境保护局(1996b)对单个项目的辐射贡献量做了如下规定:为使公众受到总照射剂量小于 GB8702—2014 的规定值,对单个项目的辐射必须限制在 GB8702—2014 限值的若干分之一。对于由国家环境保护局负责审批的大型项目可取 GB8702—2014 中场强限值的  $1/\sqrt{2}$ ,或功率密度限值的  $1/2$ ,其他项目则取场强限值的  $1/\sqrt{5}$ ,或功率密度限值的  $1/5$  作为评价标准。

北京市 X 波段雷达项目是由北京市环境保护局审批,故本次评价的环境管理目标值依据国家质量监督检验检疫总局和环境保护部(2015)中规定的电场强度的  $1/\sqrt{5}$  作为评价标准,即以  $9.57 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  作为电场强度均方根值的控制限值,以  $306.24 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  作为电场强度瞬时峰值的控制限值。

## 2 电磁环境影响理论计算分析

北京 X 波段雷达技术指标要求发射功率  $\geq 65 \text{ kW}$ ,根据国家环境保护局(1996b)相关标准,结合周边环境确定本次评价范围为以雷达发射天线为中心、半径为 500 m 的区域。依据国家环境保护局(1996a)相关标准,本次雷达站电磁影响采用模式计算和现场实际测量相结合的方法进行,来评估 X 波段雷达电磁辐射对周边环境的影响。

### 2.1 电磁场的近场和远场模式计算

电磁辐射源产生的交变电磁场可分为性质不同的两个部分,其中一部分电磁场能量在辐射源周围空间及辐射源之间周期性地来回流动,不向外发射,称为感应场;另一部分电磁场能量脱离辐射体,以电磁波的形式向外发射,称为辐射场。一般情况下,电

磁辐射场根据感应场和辐射场的不同而区分为近场(感应场)和远场(辐射场)。

近场内电场强度与磁场强度的大小没有确定的比例关系,在远场中所有的电磁能量基本上均以电磁波形式辐射传播。近场的电磁场强度比远区场大得多且随距离的变化比较快,在此空间内的不均匀度较大;远场为弱场电场强度均较小,其辐射强度的衰减要比近场慢得多。

一般来说,近场和远场的分界以离发射体  $2D^2/\lambda$  的距离作为参照,即:

$$L = 2D^2/\lambda \quad (1)$$

式中, $L$  为近场和远场的分界距离(单位:m), $D$  为雷达天线的直径(单位:m), $\lambda$  为雷达工作波长(单位:m)。通过式(1)计算 X 波段雷达对应的近场和远场分界距离为 363 m。

#### 2.1.1 近场区计算公式及参数的选取

本文实际监测选取 X 波段雷达工作频率为 9455MHz,属于微波波段。采用国家环境保护局(1996a)提供的近场区最大功率密度计算公式:

$$P_{d\max} = \frac{4P_T}{S} \quad (2)$$

式中, $P_{d\max}$  为功率密度(单位: $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), $P_T$  为送入天线净功率(单位:mW), $S$  为天线实际几何面积(单位: $\text{cm}^2$ ),天线半径为 120 cm。

#### 2.1.2 远场区计算公式及参数的选取

远场区轴向功率密度计算公式:

$$P_d = \frac{PG}{4\pi r^2} \quad (3)$$

式中, $P$  为雷达发射机平均功率(单位:mW), $G$  为天线增益(倍数)除去系统发射支路引起的射频损耗, $r$  为测量位置与天线轴向距离(单位:cm)。

雷达平均功率可以按式(4)进行计算:

$$P = kP_M(\tau/T) \quad (4)$$

式中,  $P_M$  为发射功率(峰值功率), 本处采用雷达运行时的实测值(70 kW);  $\tau$  为脉冲宽度, 分别为 0.5、1.0  $\mu\text{s}$ ;  $T$  为脉冲周期( $T=1/f$ ,  $f$  为脉冲重复频率 Hz); 由于脉冲宽度与重复频率存在对应关系, 重复频率取最大值分别为 2000、1000 Hz;  $k$  为波形修正系数, 本处取 1, 由式(4)推算雷达平均功率为 70 W。

该 X 波段雷达天线增益换算为增益倍数公式:

$$G = 10^{[G(\text{dB})-L/10]} \quad (5)$$

式中,  $G(\text{dB})$  为天线最大增益。本项目雷达站天线最大增益为 45 dB,  $L$  为天线系统损耗。发射机功率向天线的传递过程中, 由于发射机输出端到环形器、波导、天线等设备的影响会出现一定的损耗, 在确定源强时这部分损耗也要考虑在内, 本站采用实际测量值(2.83 dB), 由式(5)得出天线增益为 16482 倍。

### 2.1.3 均方根值计算

通过以上计算得到近场和远场区瞬时功率密度值, 由于天线实际工作中采用多个不同仰角进行 360° 旋转的圆锥扫描, 天线的水平波束宽度  $\leq 1^\circ$ , 对于某一固定位置大部分时间是没有受到主波束的辐射。对于任意 6 min 内均方根值可以通过下式计算:

$$\bar{P} = P_d \times \eta \quad (6)$$

式中,  $\bar{P}$  为功率密度均方根值(单位:  $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),  $P_d$  为功率密度瞬时峰值(单位:  $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),  $\eta$  为主波束扫过固定目标的时空比, 本处简化处理  $\eta = 1/360 = 0.00278$ 。

## 2.2 理论计算结果与分析

电场强度与功率密度的计算公式如下:

$$E = \sqrt{P \times 3763.6} \quad (7)$$

式中  $E$  为电场强度(单位:  $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ), 通过理论预测计算近场区电场强度最大值见表 4。

当预测点位于远场区时, 通过国家环境保护局(1996a)推荐的计算公式推算远场区电场强度值。但当预测点位于近场区时, 由于近场区内场强无法进行简单计算, 为了描述近场区轴向场强值, 本次参照式(3)、式(4)推导出计算值作为参考, 具体推算结果绘制天线轴向电场强度值随距离的变化趋势见图 1。

通过理论计算, X 波段雷达站发射天线近场区

表 4 天线近场区电场强度最大值

Table 4 Maximum electric field intensity near the field area of antenna

预测因子	电场强度/ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	
	瞬时峰值	均方根值
近场区最大值	152.62	8.04
环境管理目标值	306.24	9.57

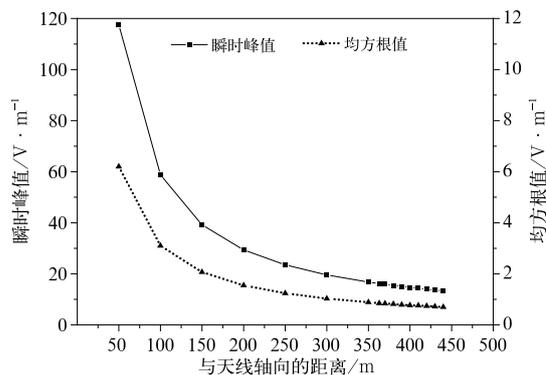


图 1 天线轴向电场强度变化趋势

Fig. 1 Variation trend of axial electric field intensity of antenna

的最大电场强度均方根值为  $8.04 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , 最大瞬时峰值为  $152.62 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , 在雷达天线 50~500 m 范围内轴向的电场强度均方根值为  $0.62 \sim 6.20 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , 瞬时峰值为  $11.76 \sim 117.56 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , 且电场强度随天线距离的增加呈减弱趋势。

## 3 电磁辐射实际监测方法及结果

有学者研究表明功率集中在雷达主瓣方向, 旁瓣泄漏较小, 第一旁瓣电磁辐射污染影响区间按公众防护要求最远为 148 m, 远端副瓣电磁辐射污染影响区域按公众防护要求最远为 42 m(王峰等, 2007), 第 2 节对电场强度变化趋势进行理论计算, 本节结合 X 波段雷达站周边环境, 制定监测方案并对实际监测结果进行分析。

### 3.1 电磁辐射监测方案

雷达周边植被、建筑和山脉等对于雷达探测回波影响较大, 近距离障碍物可能改变天线辐射方向图, 其产生的电磁辐射对当地环境产生影响。本文选取监测的北京 X 波段雷达站, 范围内无近距离障碍物、自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、饮用水水源保护区、居民区、学校、医院等, 雷

达站位于试验基地院内东侧, 周边 500 m 范围内的设施主要为果蔬大棚及周边散落的临时出租用房等, 建筑物最高为 1 层。

### 3.1.1 监测环境及仪器

监测时间段为 2016 年 11 月 23 日 10:30—17:30, 该时段监测区域为晴天, 室外温度 3℃, 相对湿度 38%, 风速 3.4 m·s<sup>-1</sup>。

由于近区场强很大, 较远处的其他电磁辐射源的贡献可忽略不计, 因此采用综合场强仪测量近区场强。本次监测采用意大利 PMM 公司的 8053B 型仪器和 EP183 探头, 该仪器具有较好的测量精度和强大的数据处理功能, 测量时不必调整探头方向, 具有更宽的测量频率范围。电磁辐射分析仪和探头参数如表 5 所示。

表 5 电磁辐射仪和探头参数  
Table 5 Parameters of electromagnetic radiation and detector

仪器名称	频率范围	动态/量程
8053B	5 Hz~40 GHz	≥120 dB
EP183 探头	1 MHz~18 GHz	0.8~800 V·m <sup>-1</sup>

### 3.1.2 监测方法

北京 X 波段雷达采用 VCP21 模式运行, 考虑到雷达波束中心随距离的增加而抬高, 波束宽度也随距离增加而展宽的局限性, 通过分析雷达站周边环境及建筑调查, 分别在水平距离和垂直方向上测量雷达站距地 1.7 m 高度处的电场强度。

水平距离监测布点是以雷达天线为起点, 垂直于天线方向距离地面 1.7 m 高度, 各监测点间距为 50 m, 顺序测至距离天线 500 m 处为止。结合周边环境, 选取适宜布点的东侧和南侧作为监测路径。垂直高度上, 以天线为起点, 选取南侧 50 和 100 m 处垂直方向上进行监测布点, 布点高度分别距地面 2、5、8、11、14、17、20 m 高度。监测方案布点示意图 2。

## 3.2 监测结果

依据国家环境保护局(1996a)相关标准要求, 在雷达正常工作时间内进行实时测量。

### 3.2.1 地面水平方向电场强度监测结果

通过监测雷达站东侧地面处的电场强度, 均方根值在 0.10~0.23 V·m<sup>-1</sup>, 瞬时峰值在 3.22~

6.64 V·m<sup>-1</sup>, 雷达站南侧地面处的电场强度均方根值在 0.12~0.25 V·m<sup>-1</sup>, 瞬时峰值在 3.79~7.08 V·m<sup>-1</sup>。雷达站东侧和南侧地面布点处的电场强度监测结果变化趋势见图 3。

由图 3 可见, 电场强度监测值随距离增大呈现不规则变化, 雷达站东侧电场强度监测值在距离 200 m 处随距离增加呈减弱趋势, 雷达站南侧距离 400 m 处出现数值增大可能是因周边高铁运行、信号塔等外部因素所致。由于监测采样点有限, 实际电场强度变化趋势比监测值更复杂, 但相比理论计算规律性的趋势, 监测值能更好地描述近场区电场强度的实际特征。

### 3.2.2 雷达站电场强度垂直分布监测结果

通过仪器监测, 雷达站南侧 50 m 处在距地 2~20 m 垂直高度的电场强度均方根值在 0.21~3.09 V·m<sup>-1</sup>, 瞬时峰值在 5.91~49.48 V·m<sup>-1</sup>; 南侧 100 m 处在距地 2~20 m 垂直高度的电场强度均方根值在 0.19~2.82 V·m<sup>-1</sup>, 瞬时峰值在 5.58~46.36 V·m<sup>-1</sup>, 雷达站南侧 50 和 100 m 处垂直高度的电场强度监测结果垂直分布见图 4。

由图 4 分析得出, 电场强度均方根值和瞬时监测值在距雷达站垂直方向随高度的上升呈增大趋势, 变化趋势一致, 说明近场区距离雷达天线主波束中心越近, 电场监测值相对较大。分析监测值, 雷达站瞬时峰值和均方根值相同高度南侧水平 50 m 处均大于 100 m 处, 但在垂直方向由地面靠近雷达主波束中心的监测值变化速率不同, 验证了雷达近场区电场强度变化的复杂性和分布的不均匀性。

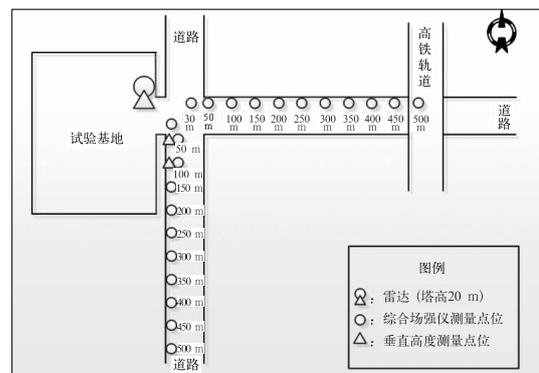


图 2 电磁辐射监测布点示意图  
Fig. 2 Sketch map of electromagnetic radiation monitoring points

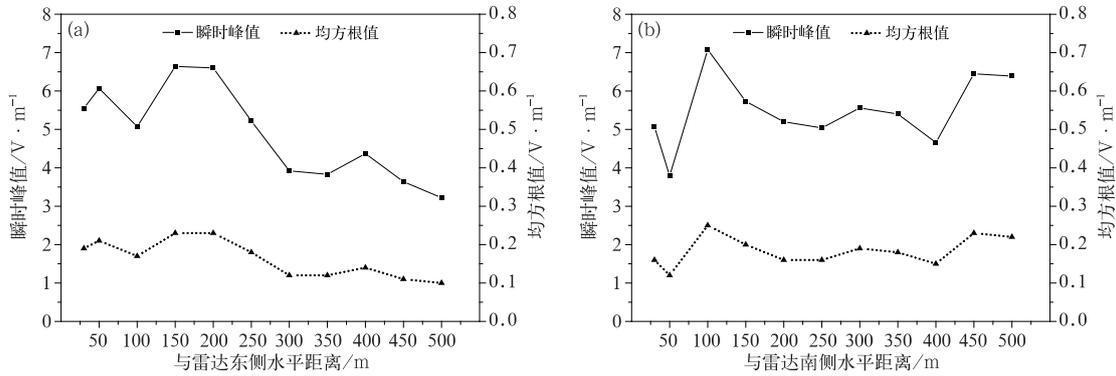


图 3 雷达站东侧(a)和南侧(b)地面处水平方向电场强度变化

Fig. 3 Trend map of horizontal electric field intensity on the ground in the east (a) and the south (b) of radar station

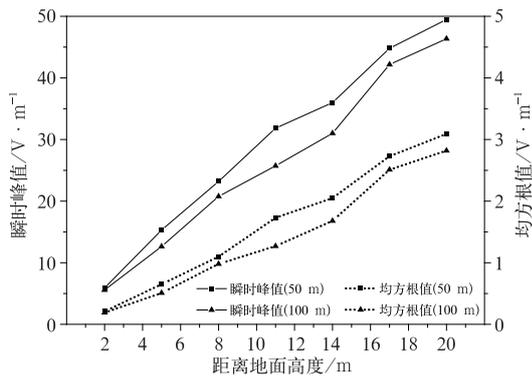


图 4 雷达站南侧 50 和 100 m 电场强度垂直方向变化

Fig. 4 Trend diagram of 50 m and 100 m vertical electric field intensity in the south of radar station

## 4 结 论

通过对北京 X 波段雷达周边电场强度进行理论计算和实际监测结果可以预测:

(1) 选取的 X 波段雷达对周边环境电磁辐射影响均满足国家质量监督检验检疫总局和环境保护部(2015)、国家环境保护局(1996b)相关标准(GB8702—2014 和 HJ/T10. 2—1996)中电场强度均方根值为  $9.57 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 、瞬时峰值为  $306.24 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  的环境管理目标限值。

(2) 选取的 X 波段雷达站东侧电场强度监测的均方根值在  $0.10 \sim 0.23 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , 南侧地面处的电场强度均方根值在  $0.12 \sim 0.25 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , 在水平方向上电磁辐射受周边建筑和环境的影响, 导致电磁

波传播过程中辐射监测值产生不同变化, 因此雷达电磁辐射对环境的影响应结合周边建筑和居民生活环境进行分析。

(3) 相比理论计算值的规律性变化, 实际监测值能更好地反映电场强度特征。目前电磁环境日益复杂, 雷达建设前后都应进行电磁辐射监测, 便于评估雷达运行过程中设备产生的电磁辐射对环境的影响。

(4) 一般来说, X 波段天气雷达选址近距离无障碍物, 周边建筑符合雷达环境的限高要求, 雷达产生的电磁辐射对环境的影响都在相关标准限值之内, 处于天线主波束下方区域(即仰角  $0.5^\circ$  以下的空间范围)的公众, 其所处环境的电磁辐射是完全可以满足相关标准限值的。伴随着经济的发展和城市的扩容, 做好雷达周边环境保护和建筑控高工作, 对雷达站附近居民展开科学宣传工作, 业务保障人员加强对雷达设备的运行监控, 防止雷达长时间向某一方向发射电磁波或者负仰角运行, 对周边居民生活环境和雷达设备造成伤害。

## 参考文献

- 毕存德, 孙治, 闫双华, 2004. 新一代天气雷达系统电磁辐射环境影响分析一例[J]. 云南环境科学, 23(S1): 189-190. Bi C D, Sun Z, Yan S H, 2004. Case study on environmental impact of electromagnetic radiation from New Weather Radar System[J]. Yunnan Environ Sci, 23(S1): 189-190(in Chinese).
- 陈大任, 陈刚, 吴峥嵘, 2010. 基于体扫模式的组合 RHI 自动实现算法[J]. 气象, 36(2): 109-112. Chen D R, Chen G, Wu Z R, 2010. Composite RHI auto-implementation algorithm based on volume scan mode[J]. Meteor Mon, 36(2): 109-112(in Chinese).
- 葛润生, 朱小燕, 2002. 新一代天气雷达电磁辐射防护[J]. 气象科技,

- 30(4):233-236. Ge R S, Zhu X Y, 2002. Protection of electromagnetic radiation for new generation weather radar[J]. Meteor Sci Technol, 30(4):233-236(in Chinese).
- 国家环境保护局, 1996a. 辐射环境保护管理导则 电磁辐射监测仪器和方法: HJ/T 10. 2—1996[S]. 北京: 中国标准出版社: 443-448. National Environmental Protection Agency, 1996a. Guideline on Management of Radioactive Environmental Protection Electromagnetic Radiation Monitoring Instruments and Methods: HJ/T 10. 2—1996[S]. Beijing: Standards Press of China: 443-448(in Chinese).
- 国家环境保护局, 1996b. 辐射环境保护管理导则 电磁辐射环境影响评价方法与标准: HJ/T 10. 3—1996[S]. 北京: 中国标准出版社: 456-457. National Environmental Protection Agency, 1996b. Guideline on Management of Radioactive Environmental Protection Environmental Assessment Methods and Standards: HJ/T 10. 3—1996[S]. Beijing: Standards Press of China: 456-457(in Chinese).
- 国家质量监督检验检疫总局, 环境保护部, 2015. 电磁环境控制限值: GB 8702—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社: 1-4. General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Environmental Protection Department, 2015. Controlling Limits for Electromagnetic Environment: GB 8702—2014[S]. Beijing: China Environmental Science Press: 1-4(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).
- 廖玉芳, 俞小鼎, 吴林林, 等, 2008. S波段多普勒天气雷达旁瓣回波的特征分析[J]. 热带气象学报, 24(2): 183-188. Liao Y F, Yu X D, Wu L L, et al, 2008. Characteristics of the hailstorm side-lobe echo from S-band Doppler weather radar[J]. J Trop Meteor, 24(2): 183-188(in Chinese).
- 孙康远, 郑媛媛, 慕瑞琪, 等, 2017. 南京及周边地区雷达气候学分析[J]. 气象学报, 75(1): 178-192. Sun K Y, Zheng Y Y, Mu R Q, et al, 2017. An analysis of radar climatology in Nanjing and its vicinity[J]. Acta Meteor Sin, 75(1): 178-192(in Chinese).
- 汪舵, 刘黎平, 吴翀, 2017. 基于相态识别的S波段双极化雷达最优定量降水估测方法研究[J]. 气象, 43(9): 1041-1051. Wang D, Liu L P, Wu C, 2017. An optimization rainfall algorithm of S-band dual-polarization radar based on hydrometeor identification[J]. Meteor Mon, 43(9): 1041-1051(in Chinese).
- 王峰, 程小泉, 许农, 2007. 新一代多普勒天气雷达电磁辐射污染分析[J]. 气象, 33(9): 107-111. Wang F, Cheng X Q, Xu N, 2007. Analysis of electromagnetic radiation pollution of CINRAD[J]. Meteor Mon, 33(9): 107-111(in Chinese).
- 王心鹏, 吴文程, 李冀刚, 等, 2016. X波段测波雷达电磁辐射测量方法与实例分析[J]. 海洋技术学报, 35(2): 34-37. Wang X P, Wu W C, Li J G, et al, 2016. Study on the measuring method and case analysis for electromagnetic radiation of the X-band wave observation radar[J]. J Ocean Technol, 35(2): 34-37(in Chinese).
- 武静雅, 刘黎平, 郑佳锋, 2016. 固态毫米波雷达探测模式的对比评估与分析[J]. 气象, 42(7): 790-798. Wu J Y, Liu L P, Zheng J F, 2016. Contrast assessment and analysis of a solid-state millimeter wave radar modes[J]. Meteor Mon, 42(7): 790-798(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社: 19-46. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Doppler Weather Radar Principles and Applications[M]. Beijing: China Meteorological Press: 19-46(in Chinese).
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 2000. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社: 122-149. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2000. Radar Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press: 122-149(in Chinese).
- 赵志勇, 杨国栋, 刘明海, 2009. 新一代S波段多普勒天气雷达电磁辐射环境影响分析[J]. 中国辐射卫生, 18(2): 199-202. Zhao Z Y, Yang G D, Liu M H, 2009. Electromagnetic radiation environmental impact analysis of the new generation S-band Doppler weather radar[J]. Chin J Radiol Health, 18(2): 199-202(in Chinese).
- 郑启康, 何敏玲, 李与广, 2016. 佛山X波段天气雷达辐射对环境影响的定量分析[J]. 广东气象, 38(5): 64-66. Zheng Q K, He M L, Li Y G, 2016. Electromagnetic radiation environmental impact analysis of X-band weather radar in Foshan[J]. Guangdong Meteor, 38(5): 64-66(in Chinese).