

新一代天气雷达电磁辐射防护

葛润生 朱小燕

(中国气象科学研究院灾害性天气研究中心, 北京 100081)

摘要 根据新一代天气雷达(CINRAD)的技术参数和运行模式,分析了其电磁辐射特征,按照标准 GB 8702-88“电磁辐射防护规定”的要求,估算了新一代天气雷达电磁辐射对环境的影响和防护要求的范围。

关键词 新一代天气雷达 电磁辐射防护 环境保护

引言

新一代天气雷达是大功率的电磁辐射源,其辐射功率已超过可豁免的电磁辐射体等效辐射功率的范围,必须向所在地区的环境保护部门申报、登记,并接收监督。新建雷达站需事先向环境保护部门提交“环境影响报告书(表)”,并在建成后进行实地电磁辐射场空间分布的测试,必要时以实测为基础划出防护区,设立警戒标志。

本文根据新一代天气雷达的主要性能参数,推导了其电磁辐射场量参数的分布,按照国家标准 GB 8702-88“电磁辐射防护规定”^[1],环境保护行业标准 HJ/T 10.3-1996“辐射环境保护管理导则:电磁辐射环境影响评价方法和标准”的要求,估算了新一代天

气雷达电磁辐射对环境的影响和防护要求的范围。

1 电磁辐射防护的限值

“电磁辐射防护规定”对其防护限值分为两种:职业照射和公众照射。职业照射的限值为每天 8 小时工作期间内,任意连续 6 分钟按全身平均的比吸收率(SAR)应小于 $0.1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$;公众照射的限值为每天 24 小时内,任意连续 6 分钟按全身平均的比吸收率(SAR)应小于 $0.02 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由上述的限值可以导出电磁辐射场的场量参数(电场强度、磁场强度、功率密度),电磁辐射场量参数的限值仍用任意连续 6 分钟内的平均值来界定。表 1 给出 S 波段和 C 波段电磁辐射场量参数的限值。对于脉冲电磁波,则要求其瞬间值不应超过限值的 1000 倍。

表 1 S 波段和 C 波段电磁辐射场量的防护限值

	S 波段(2800 ~ 3000 MHz)			C 波段(5300 ~ 5500 MHz)		
	电场强度 ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)	磁场强度 ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	功率强度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	电场强度 ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)	磁场强度 ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	功率强度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
职业照射量	28	0.075	2.0	37	0.11	3.6
公众照射量	12	0.032	0.4	16	0.072	0.72

2 新一代天气雷达的电磁辐射参数

雷达的电磁辐射场参数主要与雷达的发射参数和天线参数等有关,符合电磁辐射防护限量要求还与雷达天线扫描方式有关。

2.1 新一代天气雷达的有关参数

目前正在布站建设的新一代天气雷达有

CINRAD/SA、CINRAD/SC、CINRAD/CC 等几种型号,其中 SA、SC 均为 S 波段,性能参数基本相同,CC 为 C 波段,表 2 给出其发射参数,表 3 给出天线参数。

新一代天气雷达天线扫描的运行方式有三种:平面位置扫描(PPI)、距离高度扫描(RHI)、体积扫描(VOL)。PPI 扫描时天线仰角固定,方位角作 $0 \sim 360$ 度的环扫,扫描速度通常设定在 12 度/秒左

右,即每分钟两周。RHI 扫描时,方位角设定在某一位置上,天线的仰角自下而上扫描,扫描的范围为 0~30 度,扫描速度约为 2 度/秒,即每分钟两次俯仰来回。体积扫描由一组不同仰角的 PPI 扫描组成,仰角数可选为 9~14 个甚至可以选为 20 个,雷达运行一次体积扫描的时间约为 6 分钟左右,或更长一些,主要由选定的仰角数来确定。由于电磁辐射防护限值的要求,按测点连续 6 分钟的场参数平均值来确定,可以看出当雷达在某一方位上进行 RHI 扫描时测点的电磁辐射场参数值最大,而作体积扫描时最小。

表 2 新一代天气雷达发射参数

	S 波段	C 波段
频率	2800 ~ 3000 MHz	5300 ~ 5500 MHz
脉冲宽度	1.5 μs 4.5 μs	1 μs 2 μs
脉冲重复频率	300 ~ 1300 Hz(1.5 μs)	300 ~ 1000 Hz
峰值功率	300 ~ 450 Hz(4.5 μs) 750 k W	250 k W
平均功率	1125 W(1000 Hz,1.5 μs) 1120 W(332 Hz,4.5 μs)	250 W(1000 Hz,1 μs) 150 W(300 Hz,2 μs)

表 3 新一代天气雷达天线参数

	S 波段	C 波段
天线直径	<8.54 m	4.30 m
天线增益	>44 dB	45 dB
波束宽度	<1°	<1°
旁瓣电平	<-29 dB	<-29 dB
远瓣电平	<-40 dB	<-40 dB
馈线损耗	<2 dB	<1.5 dB

2.2 天气雷达射线方向功率密度的估算

对于微波波段,电磁辐射场参数常用功率密度来描述^[2],可以由雷达的发射参数,天线参数来估算雷达射线方向功率密度随距离的分布。

新一代天气雷达天线采用圆抛物面型,用雷达反射面辐射出的电磁波初为平行波束,传播一段距离后经相干涉逐渐形成锥形波束。根据天线波束

形成理论,天线波束形成的距离可用 $\frac{D^2}{\lambda} \sim \frac{2D^2}{\lambda}$ 来估算, D 为天线的直径, λ 为电磁波的波长。射线方向的功率密度随距离分布可由三个距离区间来描述:平面波束、波束形成后锥形波束、平面波束转换为锥形波束区间。平行波束和锥形波束形成后,可以理论上进行估算功率密度,平面波束转换为锥形波束区间内的辐射功率密度难于估算,但可认为其功率密度约大于按锥形波束估算的功率密度值,而不会大于平行波束状况时估算的功率密度。

平面波束状况时,辐射的功率密度(ρ)可简单的用平行波束的横截面积(相当于天线反射面的截面积)除以雷达的平均发射功率来计算:

$$\rho = 4\overline{P}/\pi D^2 \tag{1}$$

功率密度 ρ 不随测点距雷达距离的变化而改变。按新一代天线的参数来估算, S 波段的辐射功率密度 ρ 为 $19.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, C 波段的 ρ 为 $17.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

在锥形波束形成后,其射线方向最大的辐射功率密度 ρ 可按下式计算:

$$\rho = 4\overline{P}G/4\pi r^2 \tag{2}$$

式中 r 为测点距雷达的距离, ρ 随距离的增大而迅速的减小。新一代天气雷达 S 波段和 C 波段的 ρ 分别为 $1.42 \times 10^6/r^{-2} (\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ 、 $4.45 \times 10^5/r^{-2} (\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ 。

设平行波束估算的 ρ 与锥形波束估算 ρ 相等的距离 r_0 ,当天线辐射的波束作为平行波考虑时的最大距离,即距雷达天线的距离 $r < r_0$ 时,辐射波束的功率密度可视为固定值 ρ_0 , S 波段和 C 波段新一代天气雷达的 r_0 分别为 268 m、161 m。按 D^2/λ 来计算锥形波束的形成距离,可计算出 S 波段新一代天气雷达的 r_1 分别为 681 m、324 m。当测点的距离大于 r_1 时,其辐射功率密度按锥形波束来估算。 r 处于 r_0 和 r_1 之间时,则认为功率密度值在两种估算值之间。

综合上面的估算和分析,可得出新一代天气雷达在射线方向上辐射功率密度随天线距离的分布(表 4)。

表 4 新一代天气雷达射线方向辐射功率密度分布

S 波段		C 波段	
距离/ m	$\rho/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	距离/ m	$\rho/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
≤ 268	19.8	≤ 161	17.2
$268 < r < 681$	$\frac{1.4 \times 10^6}{r^2} < \rho < 19.8$	$161 < r < 324$	$\frac{4.45 \times 10^5}{r^2} < \rho < 17.2$
≥ 681	$1.4 \times 10^6/r^2$	≥ 324	$4.45 \times 10^5/r^2$

2.3 雷达扫描时功率密度 6 分钟平均值的估算

电磁环境保护限值以 6 分钟平均的功率密度值计算,测点 6 分钟平均的辐射功率密度 ρ 与雷达天线扫描运行方式有很大的关系。为方便计算辐射功率密度的 6 分钟平均值,在测点距离大于锥形波束形成距离时,引进类似于计算脉冲功率和平均功率之间转换关系中的占空比概念。锥形波束时,雷达在某一仰角进行连续 PPI 扫描,扫描周期小于 6 分钟时,扫描面中任一点接收到辐射功率密度的占空比可近似的用天线波束宽度与天线扫描方位角范围的比值 δ 来表示,辐射功率密度的 6 分钟平均值 ρ 等于雷达射线方向上功率密度乘以占空比。

$$\rho = \rho \times \delta \tag{3}$$

雷达在某一方位角上进行连续的 RHI 扫描时,RHI 扫描面中任一点的 6 分钟平均辐射功率密度值可参照 PPI 扫描时的计算方法来计算,但占空比与 PPI 扫描时占空比不相同,要大得多。雷达运行体积扫描(VOL)模式,仍可引用占空比的概念,但计算方法可略作修改,用天线扫过一个波束宽度的时间与运行 VOL 扫描的周期时间的比值来表示占空比,若扫描周期超过 6 分钟,计算中仍用 6 分钟来计算。根据新一代天气雷达运行时的扫描参数可以计算出各种方式下的占空比(表 5),进一步用来估算其 ρ 。

表 5 锥形波束区 PPI、RHI、VOL 三种扫描方式时 ρ 计算中的占空比 δ

	PPI	RHI	VOL*
占空比	1/360	1/30	$\frac{1}{12} \times 360$

注: * 扫描周期按 6 分钟估算

平行波束时,估算 6 分钟平均的辐射功率密度仍可用占空比的概念,但计算占空比的方法需修改,用平行波束在测点的驻留时间与扫描周期的比值为占空比,波束驻留时间是与测点距天线的距离 r/m 有关的,与波束的宽度(近似等于天线的直径)有关。对新一代天气雷达来讲,平行波束区的占空比可参见表 6

表 6 平行波束区 PPI、RHI、VOL 三种扫描方式时 ρ 计算中的占空比 δ

	PPI	RHI	VOL*
占空比(S 波段)	$1.36/r$	$16.3/r$	$0.113/r$
占空比(C 波段)	$0.68/r$	$8.21/r$	$0.057/r$

注: * 扫描周期按 6 分钟估算

综合上述分析和估算,对表 4 所列的射线方向辐射功率密度 ρ 进行修正后,可以得出新一代天气雷达在三种运行方式下,辐射功率密度 6 分钟平均值 ρ 随距离分布(表 7)。

表 7 新一代天气雷达辐射功率密度 6 分钟平均值 ρ 分布 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

	r/m	PPI	RHI	VOL
S 波段	≤ 268	$27.0/r$	$322/r$	$2.24/r$
	$268 < r < 681$	$3.9 \times 10^3/r^2 < \rho < 2.70/r$	$4.7 \times 10^4/r^2 < \rho < 322/r$	$3.3 \times 10^2/r^2 < \rho < 2.24/r$
	≥ 681	$3.9 \times 10^3/r^2$	$4.7 \times 10^4/r^2$	$3.3 \times 10^3/r^2$
C 波段	≤ 161	$11.8/r$	$141/r$	$0.98/r$
	$161 < r < 324$	$1.24 \times 10^3/r < \rho < 11.8/r$	$1.48 \times 10^4/r^2 < \rho < 141/r$	$1.03 \times 10^2/r^2 < \rho < 0.98/r$
	≥ 324	$1.24 \times 10^3/r$	$1.48 \times 10^4/r^2$	$1.03 \times 10^2/r^2$

3 新一代天气雷达辐射防护要求的距离范围

根据对新一代天气雷达辐射的功率密度分布和功率密度 6 分钟平均值分布的估算,按照 GB 8702 - 88“电磁辐射防护规定”导出的电磁辐射防护限值的要求,计算出要求防护的范围。

雷达作 PPI 扫描方式运行时,S 波段电磁辐射

需进行防护的距离为:13.5 m(职业照射)、67.5 m(公众照射);C 波段电磁辐射需进行防护的距离:3.72 m(职业照射)、16.4 m(公众照射)。雷达作 RHI 扫描式运行时,S 波段电磁辐射需进行防护的距离为:161 m(职业照射)、490 m(公众照射);C 波段电磁辐射需进行防护的距离 39.2 m(职业照射)、196 m(公众照射)。雷达作 VOL 扫描方式运行时其

ρ 比运行 PPI、RHI 要小得多,要防护的距离比运行 PPI、RHI 时所要求防护距离小得多。

按上面估算,可以得出新一代天气雷达处于运行状态时,对于职业照射需保护的最大距离:S 波段为 161 m,C 波段为 39.2 m。对于公众照射需保护的最大距离:S 波段为 490 m,C 波段为 196 m。当雷达天线波束指向固定在一个方向时,在射线方向会造成较强的辐射功率密度 6 分钟平均值,需要防护的距离则要大得多,S 波段新一代天气雷达的防护距离达 842 m(职业照射)、1880 m(公众照射),C 波段新一代天气雷达的防护距离达 351 m(职业照射)、786 m(公众照射)(表 8)。

表 8 新一代天气雷达电磁辐射需防护的最大距离

	S 波段	C 波段
运行 PPI、RHI、VOL	161 m(职业照射)	39.2 m(职业照射)
时	490 m(公众照射)	196 m(公众照射)
天线波束固定指向	842 m(职业照射)	351 m(职业照射)
时	1880 m(公众照射)	786 m(公众照射)

4 雷达电磁辐射的防护措施

新一代天气雷达是较大功率的电磁辐射源,在距雷达天线较近范围内产生的电磁辐射功率密度超过电磁辐射防护限值,需进行防护。从前面的估算可看出需进行防护的距离范围大致可以划分成三个区域,职业照射防护区、公众照射防护区、避免直接照射区。新一代天气雷达天线的架设高度应尽量避

免波束直接照射被防护对象,同时加强对雷达系统运行操作的管理,杜绝由于工作处置不当而造成电磁辐射对环境的影响。

新一代天气雷达天线的架设高度应超过职业照射防护区(S 波段为 160 m,C 波段为 39.2 m)内所有建筑物的高度,考虑到雷达天线仰角最低可达 - 2°,天线的高度最好超过范围内最高建筑物 5 m 以上。雷达天线的架设高度也应超过职业照射防护区外公众照射防护区(S 波段为 490 m、C 波段为 196 m)内所有居民住宅楼的高度,可以有少量办公用房超过雷达天线高度。对公众照射防护区以远的高层建筑可不作特别的防护要求,但雷达在调试、试验中需固定天线指向时,应注意天线波束不应指向高层目标。

5 结束语

电磁辐射的防护是环境保护中的一项工作,新一代天气雷达的建站过程必须充分注意到雷达的电磁辐射对环境的影响。本文根据新一代天气雷达的参数和环境电磁辐射防护要求,估算出雷达电磁辐射的防护距离,供建站时考虑。建站时需根据周围建筑物的分布,雷达天线架设的高度等,对环境电磁辐射影响作出评估。

参考文献

1 GB 8702-88. 电磁辐射防护规定. 北京:国家标准出版社,1988
2 斯特尔尼克. 雷达手册. 谢卓译. 北京:国防工业出版社,1978