

通信基站电磁辐射安全防护距离的理论计算及应用^{*}

李 刚¹ 李盛富^{1#} 王 磊² 李鹏飞¹ 乔 浩¹

(1.核工业二一六大队,新疆 乌鲁木齐 830011;

2.中国移动新疆有限公司乌鲁木齐市分公司,新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要 为明确第五代通信(5G)基站在运营期产生的电磁辐射水平,依据《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)计算 5G 基站电磁辐射的安全防护距离,并与实际监测数据进行对比。根据理论计算,5G 基站安全防护直线距离约 41.1 m,垂直防护距离约 6.5 m。实际监测结果显示,在垂直距离不变的条件下,5G 基站电磁辐射强度随水平距离的增加呈现先增大至峰值后不断减小的趋势,水平距离约 40.0 m 处达最大值;水平距离相同的情况下,电磁辐射强度随垂直距离的增加而逐渐衰减,且电磁辐射强度高值区附近衰减幅度更大。5G 基站电磁辐射强度实测值低于理论计算值,其运行时的电磁辐射强度超标范围小于理论计算结果,造成的电磁辐射对环境影响较小。

关键词 5G 基站 安全防护距离 电磁辐射 环境影响 辐射防护

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.04.019

Theoretical calculation and application on electromagnetic radiation safety protection distance of communication base station LI Gang¹, LI Shengfu^{1#}, WANG Lei², LI Pengfei¹, QIAO Hao¹. (1. No. 216 Geological Party of China National Nuclear Corporation, Urumqi Xinjiang 830011; 2. Urumqi Branch of China Mobile Communications Group Xinjiang Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 830063)

Abstract: In order to determine the electromagnetic radiation level generated by fifth generation mobile networks (5G) base station during the operation period, the safety protection distance of 5G base station electromagnetic radiation was calculated according to the methods of "Guideline on management of radioactive environmental protection electromagnetic radiation monitoring instruments and methods" (HJ/T 10.2-1996), and the calculating data was compared with actual monitoring data. According to theoretical calculations, the protection distance of the 5G base station was about 41.1 m, and the vertical protection distance was about 6.5 m. The actual monitoring results showed that under the condition of constant vertical distance, the electromagnetic radiation intensity of the 5G base station increased to a peak value at first then decreases with the increase of horizontal distance, reaching a maximum value at horizontal distance of about 40.0 m. When the horizontal distance was fixed, the electromagnetic radiation intensity was gradually attenuates with the increase of vertical distance, and the attenuation amplitude was greater near the high value area of electromagnetic radiation intensity. The measured value of electromagnetic radiation intensity of the 5G base station was lower than theoretical calculation value, and the exceeding range of the electromagnetic radiation intensity was smaller than the theoretical calculation result, resulting in a small impact of electromagnetic radiation on the environment.

Keywords: 5G base station; safety protection distance; electromagnetic radiation; environmental impact; radiation protection

随着现代社会移动互联的飞速发展,人们对数据流量的需求已从简单的语音文字转变为视频社交,第五代通信(5G)技术俨然成为经济社会发展的立足点与制高点。与第四代通信(4G)技术相比,5G 基站无论在设备功耗、发射功率和铺设密度等方面都有一定程度的提高^[1-2]。据《数字中国发展报告

(2021)年》^[3]显示,截至 2021 年底,我国已建成的 5G 基站为 142.5 万座,超过全球总量的 60%。5G 基站铺设的高速增长也带来了能源与环境问题,结合近年来公众对基站谈“辐”色变,使得通信基站电磁辐射问题逐渐成为了社会热点话题。为更好地平衡通信基站电磁辐射与公众对 5G 网络需求间的矛

第一作者:李 刚,男,1993 年生,硕士,工程师,主要从事环境监测与评价工作。[#] 通讯作者。

^{*} 新疆移动网络部应用研究项目(No.20181511)。

盾,营运商在架设新的通信基站时应妥善考虑基站电磁辐射安全防护距离设置的问题。

现阶段,5G 基站安全防护距离的确定主要集中在仿真建模和理论计算方面。解维果等^[4]通过“无人机+接收机”的形式搭建虚拟基站平台,在验证其有效性的前提下,进行数据采集和计算。李云等^[5]采用泊松分布建立基站分布模型,优化站点密度,通过仿真手段在不同网络需求下,分析站点密度对周边网络能效和环境辐射水平的影响。沈瑶^[6]基于时空分析下基站人流量预测模型,从空间和时间的角度,利用回归树建立预测模型,从而得到最优的基站部署方案,尽量避免了基站电磁辐射对公众的危害。陈永梅等^[7]的研究则认为 5G 基站的建设和运营受物理属性的限制,站间距、波束赋形和上下行配置等均会影响基站的电磁辐射水平,实际情况中,应充分考虑影响因子对辐射的贡献。仿真建模的方法在安全防护距离方面虽具有较强的直观性,但建模的工作量大,过程复杂,对精度有具体要求,且对单站而言,每个基站的实际情况都有所差异(架设高度、建筑物情况等),导致建模在二次适用性上较为薄弱。

综上所述,为了估算 5G 基站运营期对周围电磁环境的影响,本研究依据《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)^[8]中电磁环境电场强度预测方法,结合基站电磁辐射实测结果,综合分析 5G 基站运营期对周围电磁环境的影响,结果有助于 5G 基站的进一步规划和建设,并为运营商和铁塔等单位合理设置安全防护距离提供基础数据。

1 仪器设备与执行标准

1.1 监测仪器

电磁辐射监测过程中选取电场强度和功率密度作为基站辐射水平的衡量因子。所用仪器设备为 OS-4P 型电磁辐射监测仪配 SRF-06 型天线,经第三方检定合格,且在校准有效期内。

1.2 执行标准

本研究中基站电磁辐射环境监测方法参照《5G 移动通信基站电磁辐射环境监测方法(试行)》(HJ 1151—2020)^[9];公众电磁环境暴露控制限值选取参考《电磁环境控制限值》(GB 8702—2014)^[10];5G 基站电磁辐射环境影响评价方法参照《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)^[11]。

1.3 5G 基站电磁辐射的电场强度计算模型

基站天线在提供网络信号时,向辐射空间发射电磁辐射,根据其辐射的方向特性,可将天线的波瓣分为主瓣和副瓣。天线主瓣方向是基站天线辐射强度最大的方向,一般情况下,主瓣宽度越窄,辐射越集中,信号强度越好,天线主瓣方向以外为副瓣方向(见图 1)。天线的主瓣方向是电磁辐射污染的主要区域,天线的安全防护距离是基于主瓣方向上无高大建筑物或树木等遮挡、基站正常负荷下保守估算的防护距离。当基站周围所有敏感点距天线的直线距离均大于主瓣的安全防护距离时,该基站不会对周围的人群产生电磁辐射危害。若安全防护距离内有敏感点,则其电场强度需根据敏感点与大线的空间位置关系进一步判断。虽然安全防护距离的计算存在不确定性,但该方法仍是一种保守安全的计算方法,在目前没有较好预测模型的情况下,该方法将最大程度保护基站周围公众的健康,避免人群因过量的电磁辐射导致身体损伤。

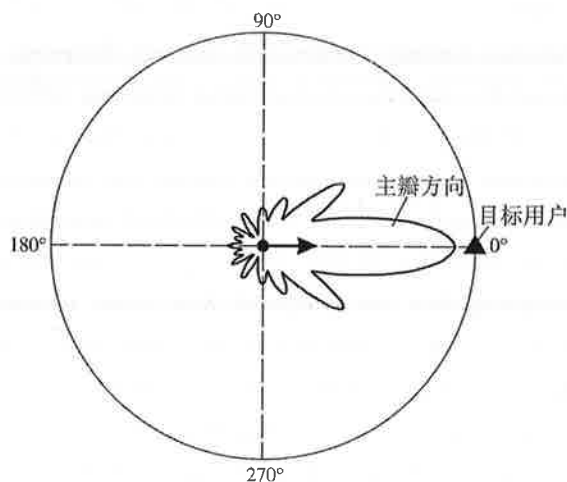


图 1 通信基站辐射模型

Fig.1 Communication base station radiation model

由于 5G 基站多配置方形口面的定向天线,因此基站产生的电磁辐射在水平和垂直两个方向上存在不同特性^[12-14]。依照 HJ/T 10.2—1996,天线轴向的功率密度计算见式(1):

$$P_d = \frac{P \cdot G'}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \times 100 \quad (1)$$

$$H = r \times \sin\left(\theta + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

$$L = r \times \cos\theta \quad (3)$$

式中: P_d 为天线轴向的功率密度, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$; P 为发射功率,W; G' 为天线增益倍数; r 为测量位置与天线的直线距离,m; H 为监测点的理论垂直防护距离,m; θ 为天线下倾角,°; φ 为天线垂直半功率角,°; L 为测量位置与天线的理论水平防护距离,m。

表 1 乌鲁木齐市内典型 5G 基站基本参数
Table 1 Basic parameters of typical 5G base stations in Urumqi

名称	参数/型号	名称	参数/型号
网络类型	5G	发射频率/MHz	2 515~2 675
机柜型号	DBS3910	水平半功率角	65°
标称功率/W	320	垂直半功率角	6°
基站站型	S111	天线增益倍数	10
极化方式	双极化	天线下倾角	6°
频段/GHz	2.6	功率负载/%	50

1.4 5G 基站电磁辐射的理论计算

以乌鲁木齐市内典型 5G 基站作为研究对象, 站具体参数汇总见表 1。

为确保 5G 基站产生的电磁辐射在任何情况下对公众都是安全的, 以基站的标称功率为基础, 计算电磁辐射的安全防护距离。依据 GB 8702—2014, 30~3 000 MHz 频段下公众暴露功率密度控制限值为 $40 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 结合 HJ/T 10.3—1996 中对单个项目的影响规定, 取功率密度控制限值的 1/5 作为评价依据, 因此 5G 基站营运期电磁环境管理阈值为 $8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。由天线下倾角为 6° , 垂直半功率角为 6° , 根据式(1)可得在电磁环境管理阈值下, 监测点与天线的理论防护直线距离约为 56.4 m, 根据式(2)计算得到监测点的垂直防护距离约为 8.8 m。

进一步确定 5G 基站在监测时的实际防护距离, 根据 5G 基站的标称功率为 320 W, 监测时通信基站的功率负载约为 50%, 按照资源块(RB)总数为 273, 同步广播块占据 20 个 RB, 参考文献[15]、文献[16]给出的方法, 计算得到基站监测时的实际发射功率约为 172 W。同理, 由式(1)、式(2)可得 5G 基站监测时的理论防护直线距离约为 41.1 m, 垂直防护距离约为 6.5 m。

2 结果与分析

2.1 电磁辐射电场强度准确度测试

为确保监测所用电磁辐射仪监测数据的稳定可靠, 对设备进行电场强度准确度测试。结合前文中运营商通信基站的发射频率, 选择 2 450 MHz 作为电场强度准确度测试的频点, 在微波暗室中设定电场强度标准值分别为 5.0、10.0、15.0、30.0、50.0 V/m, 电场强度测试值误差均在 0.9 V/m 内, 电场强度的标准值与测试值间的线性回归方程为 $y = 1.094 2x + 0.112$, 决定系数 $R^2 = 0.999$, 表明电场强度测试值的 99.9% 可由标准值来解释, 说明本研究使用的电磁辐射监测仪的电场强度测试准确, 能够反映其真值。

2.2 5G 基站电磁辐射强度在水平方向上的变化

为了探究 5G 基站电磁辐射在水平方向上的变化情况, 选取乌鲁木齐沙依巴克区某 5G 基站(记为基站 A)作为监测对象开展电磁辐射监测。该基站为移动运营商单 5G 基站, 设备正常运行, 定向天线 3 副, 方位角分别为 55° 、 180° 、 310° 。基站 A 架设于沿街某 3 层商铺楼顶, 架设方式为楼顶抱杆, 天线对地高度约为 15.0 m, 不与其他运营商共站或共址, 且周边 50.0 m 内无其他电磁辐射体(输电线路、变电站等)。

考虑到监测点布设便利性的原因, 选择方位角 180° 方向的地面依次布设 5 个监测点(分别记为 A1~A5), 监测仪器探头对地高度为 1.7 m, 监测点间距均为 10.0 m(见图 2), 各监测点的电磁辐射测定结果见图 3。5 个监测点中, A4 功率密度为 $1.123 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。可见, 监测点的电磁辐射强度与其距天线的水平距离直接相关, 在水平距离为 10.0~40.0 m 时, 5G 基站运行产生的电磁辐射强度随距离的增加而增大, 在水平距离 40.0 m 处出现拐点, 随后电磁辐射强度随水平距离的增加而逐渐衰减。因此, 在垂直距离不变的条件下, 5G 基站电磁辐射强度随水平距离的增加呈现先增大至峰值, 然后不断减小的趋势。

2.3 5G 基站电磁辐射强度在垂直方向上的变化

为考察 5G 基站电磁辐射在垂直方向上的变化情况, 选取乌鲁木齐市新市区某基站(记为基站 B)为监测对象开展电磁辐射监测。基站 B 为移动 5G 基站, 设备正常运行, 定向天线 3 副, 方位角分别为 30° 、 175° 、 260° 。基站 B 架设于 11 层住宅楼顶, 架设方式为楼顶抱杆(抱杆高度 3.0 m), 天线对地高度约 39.0 m, 不与其他运营商共站或共址, 且周边 50.0 m 内无其他电磁辐射体。

基站 B 周边电磁环境监测点布设见图 4。于基站 B 北向 6 层住宅楼南侧窗口自上而下布设监测点 B1、B2、B3, B1~B3 与基站 B 水平距离均约 50.0 m; 于基站 B 南向 11 层住宅楼北侧窗口自上而下布



图 2 基站 A 电磁辐射监测点分布

Fig.2 Electromagnetic radiation monitoring points of base station A

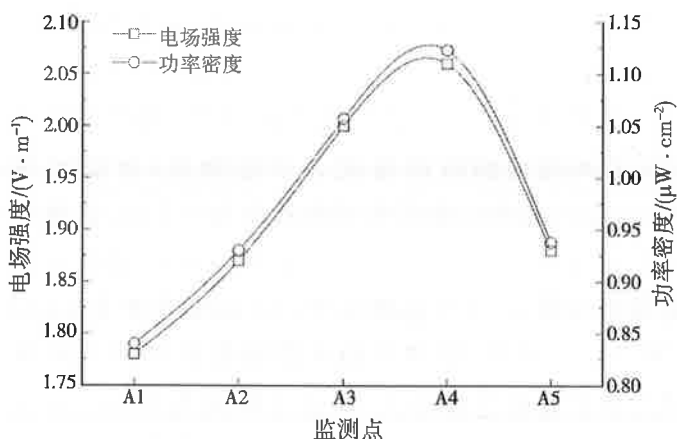


图 3 电磁辐射强度随水平距离的变化

Fig.3 Variation of electromagnetic radiation intensity with horizontal distance

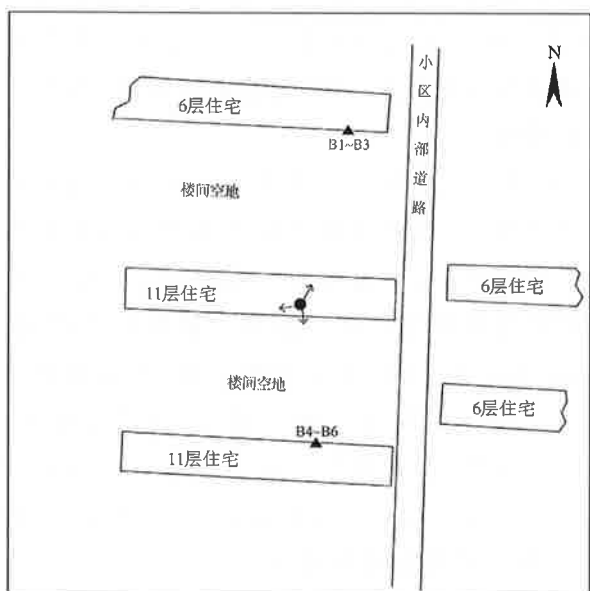


图 4 基站 B 电磁辐射监测点分布

Fig.4 Electromagnetic radiation monitoring points of base station B

均约 38.0 m。监测时,仪器探头距离足平面 1.7 m。6 个监测点电磁辐射强度监测结果见图 5。B4~B6 所在建筑物与基站 B 所在建筑物等高,B4 的垂直高度与天线高度基本一致,因此该点位电磁辐射强度最大,功率密度达到 $5.229 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。B4~B6 与基站 B 水平距离相同,垂直距离上的差异使得功率密度由 $5.229 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 降至 $2.170 \mu\text{W}/\text{cm}^2$;北向 B1~B3 与基站水平距离均为 50.0 m,直线距离大于 50.0 m,因此 B1~B3 的辐射强度整体低于 B4~B6,功率密度由 $0.978 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 降至 $0.581 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。综上可知,水平距离相同的情况下,电磁辐射强度随垂直距离的增加而逐渐衰减,且电磁辐射强度在高值区附近衰减幅度更大。

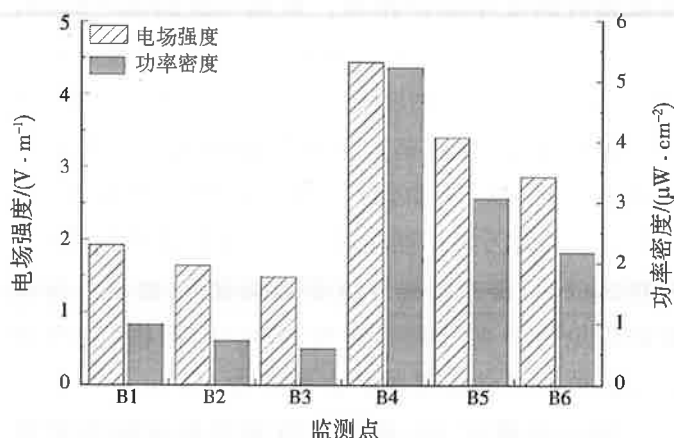


图 5 基站 B 各监测点电磁辐射强度

Fig.5 Electromagnetic radiation intensity of different monitoring points of base station B

3 讨论

理论计算和实际监测的结果表明,在 5G 基站实际发射功率下,水平方向上的安全防护直线距离为 41.1 m,垂直防护距离为 6.5 m,理论计算与电磁辐射强度的监测值存在差异,理论计算结果高于实际监测值。以基站 B 的监测点 B4 为例,其与天线的垂直高度基本一致,理论计算显示,在 41.1 m 处应测得功率密度为 $8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,而监测结果则表明,水平距离小于安全防护距离的情况下(B4 与基站 B 的水平距离约为 38.0 m,功率密度为 $5.229 \mu\text{W}/\text{cm}^2$),监测值反而低于 $8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。因此,理论计算结果是偏于保守的计算结果。

探究其原因可能由以下几个方面造成:①理论计算作为一种预测,所有的参数选择和条件控制均为理想状态,是基站所能发射出的最大电磁辐射。而实际中,基站运行功率存在损耗(馈线、接头、耦合器等),且运营商在保证公众通信服务的前提下,尽可能降低基站的实际功率,以减少电磁污染。②基

站的运行功率不是定值^[17-18]。考虑节能降耗和维护设备正常运转,当基站覆盖范围内通信数据量少时,其发射功率一般低于正常功率,当数据量多或者激增时,为了维持数据的正常需求,基站的发射功率将明显上升,这也是导致理论计算和实际监测产生偏差的原因。③电磁辐射向周围传播的过程中不可避免地因为空气吸收、建筑物反射和阻挡等因素逐渐地衰减。电磁辐射穿越建筑物时会造成电磁波衰减,穿过砖墙时的衰减量远低于穿过钢筋混凝土建筑时的衰减量^[19-20]。④监测时受环境条件的制约,点位与天线的主瓣方向存在偏差,使得点位无法正对天线的主瓣方向等,都会造成监测结果比计算值小,导致理论计算值与实际值的偏差。

4 结 论

(1) 根据乌鲁木齐市内典型 5G 基站的基本参数,计算出 5G 基站监测时功率负载为 50% 的条件下,安全防护直线距离约为 41.1 m,垂直方向上的安全防护距离为 6.5 m。

(2) 通过 5G 基站电磁辐射强度的监测,基站在水平距离约 40.0 m 处电磁辐射强度最大,垂直方向上电磁辐射强度随高度的降低逐渐衰减,且电磁辐射强度高值区附近衰减幅度更大。

(3) 5G 基站电磁辐射安全防护距离的理论计算是较为保守的理想化结果,功率损耗、建筑物遮挡等因素均会显著影响基站的电磁辐射强度。因此,5G 基站运营期产生的电磁辐射水平小于理论计算结果,基站运行时的电磁辐射强度超标范围小于理论计算结果,5G 基站产生的电磁辐射对周边环境影响较小。

(致谢:本工作的完成得到中国移动新疆公司网络部的支持与帮助,在此表示衷心感谢!)

参考文献:

[1] 赵涵,郭云峥,李奥,等.5G 基站配套节能技术研究[J].通信电

源技术,2021,38(14):84-86.

- [2] 刘宇刚.差异化备电设备和电池共用管理器在 5G 基站备电方案中的应用研究[J].通信电源技术,2021,38(12):10-13.
- [3] 国家互联网信息办公室.数字中国发展报告(2021 年)[R].北京:国家互联网信息办公室,2022.
- [4] 解维果,章汉武,吴建华.无人机航摄中虚拟基站和物理基站 PPK 精度对比分析[J].测绘标准化,2022,38(2):33-36.
- [5] 李云,王俊伟,赵为粮,等.基于基站密度和业务负载的异构蜂窝网络能效优化[J].电子与信息学报,2017,39(4):854-859.
- [6] 沈瑶.基于大数据的基站流量预测与网络规划算法研究[D].南京:南京邮电大学,2020.
- [7] 陈永梅,吴沛林,王铖.5G 基站电磁辐射预测及防护探讨[J].科学与信息化,2022(16):16-18.
- [8] HJ/T 10.2—1996,辐射环境保护管理导则 电磁辐射监测仪器和方法[S].
- [9] HJ 1151—2020,5G 移动通信基站电磁辐射环境监测方法(试行)[S].
- [10] GB 8702—2014,电磁环境控制限值[S].
- [11] 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与标准[S].
- [12] 闫斐,焦迎迎,肖菊.5G 移动通信基站对电磁辐射环境的影响研究[J].皮革制作与环保科技,2022,3(10):164-166.
- [13] 周红华,黄辰,肖伟剑,等.移动通信基站电磁辐射环境影响仿真预测与评价[J].三峡环境与生态,2020,42(3):57-62.
- [14] 龚源,迟沁,刘秋新,等.5G 应用基站电磁辐射环境影响模拟仿真[J].工业安全与环保,2022,48(7):80-83.
- [15] 张建国,徐恩,肖清华.5G NR 频率配置方法[J].移动通信,2019,43(2):33-37.
- [16] 张建国,徐恩,张艺译.5G NR 峰值速率综合分析[J].邮电设计技术,2019(7):28-32.
- [17] 郝睿,徐续,江君,等.WCDMA 网络基站安全防护距离理论计算与实测对比研究[J].安全与环境学报,2012,12(5):197-200.
- [18] 陈志芳.20W GSM 基站功率放大器的研制[D].成都:电子科技大学,2004.
- [19] 田晓迪,周雷,李亚秋,等.电磁波在传播中的大气气体吸收衰减[J].电讯工程,2021(1):12-16.
- [20] 王晓云,齐华月,陈志平.南昌市电磁辐射环境现状与评价[J].环境污染与防治,2017,39(7):802-806.

编辑:丁 怀 (收稿日期:2022-09-25)