

5G 无线基站射频电磁场辐射安全评估探讨

谈儒猛¹,熊尚坤¹,武彤²

(1. 中国电信股份有限公司研究院 移动通信研究所, 广东 广州 510630;

2. 中国计量科学研究院 先进测量工程中心, 北京 100029)

摘要: 针对 5G 基站辐射安全问题, 给出了人体暴露于 5G 射频电磁场的理论评估方法和安全边界计算示例。探讨了 5G 频段相关的射频电磁场人体暴露的安全标准、5G 基站实际最大 EIRP(时间平均)的确定方法、理论评估计算公式和评估程序等技术问题, 并结合实际给出一个典型 5G 基站的安全边界计算案例。

关键词: 5G; 电磁场; 人体暴露; 符合性评估

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200478

中文引用格式: 谈儒猛,熊尚坤,武彤. 5G 无线基站射频电磁场辐射安全评估探讨[J]. 电子技术应用, 2020, 46(8): 42-45, 53.

英文引用格式: Tan Rumeng, Xiong Shangkun, Wu Tong. Discussion on electromagnetic field safety compliance assessments for 5G radio base station[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(8): 42-45, 53.

Discussion on electromagnetic field safety compliance assessments for 5G radio base station

Tan Rumeng¹, Xiong Shangkun¹, Wu Tong²

(1. Mobile Communication Institute, China Telecom Research Institute, Guangzhou 510630, China;

2. Center for Advanced Metering Infrastructure, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper presents the theoretical assessment method and a case study of compliance boundary of human exposure to 5G radio base station. The technical issues related to human exposure to radio frequency electromagnetic fields at 5G frequency band, the determination method of the actual maximum EIRP(time domain average) of 5G base stations, theoretical evaluation calculation formulas and evaluation procedures, etc., are discussed for the assessment of the electromagnetic environment in real scenarios.

Key words: 5G; electromagnetic fields(EMF); human exposure; compliance assessment

0 引言

5G 是 LTE 网络的一次重大演进。5G 旨在满足当今现代社会在数据和连接方面的巨量增长, 包括数十亿级海量联接的物联网以及未来各种创新需求。

5G 的部署见证了现有 4G 网络的演进和扩展, 它在毫米波频段引入新的无线接入网络。由于使用了更高的频率范围, 基站的数量将大幅增加。这意味着 5G 网络将采用较小的小区部署和先进的天线技术(如大规模多输入多输出(mMIMO))。mMIMO 天线可使用非常窄的波束跟随用户, 对周围环境电磁场的影响完全不同于前几代移动通信系统。

本文针对 5G 基站辐射问题, 分析讨论了 5G 对周围环境射频电磁场(RF-EMF)水平影响的几点因素, 提出一种理论评估方法, 并给出一个 5G 基站评估案例。

1 5G 与 EMF 暴露限值

1.1 5G 射频电磁场和健康

分配给 5G 使用的射频频段(包括未来使用的毫米波

频率)几十年来一直被微波通信、卫星和雷达等射频应用所使用。5G 无线网络的设计非常高效, 这意味着网络和设备传输功率都将很低, 也即 5G 环境中的射频电磁场水平可控制在暴露限值以内。

世界卫生组织(WHO)和国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)的结论是, 与无线网络及其应用相关的暴露如果低于 ICNIRP 建议的限值^[1], 则不会对公共健康造成不利影响。暴露于毫米波频率下的射频电磁场对人体健康产生可能影响的研究可追溯到几十年前, 目前仍在继续研究。在 5G 频率范围的具体研究方面, 国际上也开展了大量毫米波射频电磁场健康相关的研究。在雷达、微波和军事应用方面, 人们对毫米波和健康进行了广泛的研究。

迄今为止, 科学研究表明, 组织受热仍然是暴露于毫米波频段的公认和证实的主要危害。然而, 尽管为解决这一问题进行了大量研究和沟通工作, 但人们仍然对移动通信设备中射频电磁波的可能危害性感到担忧。此

5G 网络规划技术 5G Network Planning Technology

外,在人们居住和工作区域,将新建许多 5G 基站,这可能会加剧引发更多公众关注,正确对待和处理好这些问题对确保 5G 新基建顺利推进非常重要。5G 无线网络是进入智能信息社会的关键基础设施,通过对当前网络的演进和 5G 无线网络的扩展,确保无线网络的高效率并保持低辐射水平对解决这类问题显得尤为重要。

1.2 RF-EMF 暴露限值

5G 频率下无线电波的暴露限值应由国际准则来管理。这些限值由独立科学组织制定,如 ICNIRP 和 IEEE,它包括了保护所有人群的大量安全边际。

这些准则已在世界各地的标准和法规中被广泛采用,并得到了 WHO 的认可。如果不存在国家限值,或者国家限值不涵盖所关注的频率,则应使用 ICNIRP 限值。

我国的公众暴露限值由 GB 8702-2014 规定,但 GB 8702 取消了职业暴露限值,因此推荐使用 ICNIRP 职业暴露限值。在 3.5 GHz 频段,我国公众暴露限值水平是 $46 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,是 ICNIRP 和 IEEE 限值($1\ 000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)的 1/21。可见我国限值标准采用了更高的安全等级,对公众辐射安全更有保障,但它也同时带来不利影响,如更高的网络部署成本,不利于 5G 新基建的快速低成本建设等。

2 人体暴露符合性评估

国际电工委员会(IEC)/TC106 负责制定有关测量和计算方法的国际标准,以评估人体暴露在电磁场中符合性情况。IEC 和 ICNIRP 已就 EMF 标准的责任分担达成一致。电磁场暴露限值指南由 ICNIRP 制定,电磁场暴露评估标准由 IEC 和 ITU 制定。

2.1 5G 射频电磁场评估标准

IEC 62232 规定了基站和无线网络的评估方法。它涵盖了 100 GHz 以下的频率范围,包括适用于 5G 的方法。

IEC TR 62669^[2]为 IEC 62232 的制定提供了案例研究,并给出了 mMIMO 基站的符合性评估指南。TR 62669 还提供了独立和共享 3G/4G/5G 基站以及小蜂窝基站的评估案例。

2.2 5G 网络符合性评估方法

针对 5G 网络的 RF-EMF 符合性评估,需根据站点设计和设备配置,以及是否部署 mMIMO 或小蜂窝配置等情况来进行分析评估。评估目的是为公众和天线周围的工作人员确定 RF-EMF 符合性边界(即禁区)的大小,并验证该区域是否不可进入。一种替代性方法是在公众可接近区域中靠近基站站点的位置进行计算或测量,以验证 RF-EMF 暴露水平低于限值。

2.3 5G 符合性评估的不确定度评定

在确定是否符合暴露限值时,提供不确定度评估尤为重要。与 5G 符合性评估有关的不确定度评定可参见 IEC 62232。

3 确定 5G 基站的实际最大 EIRP

由于 5G 采用新技术使无线网络变得更加高效,并

只需更少的发射功率来传递相同的数据速率。与前几代移动通信技术相比,5G 网络将传输相似功率水平,即:与 2G、3G 和 4G 网络一样,5G 基站设计不会以最大功率运行,除非在为了处理流量变化的极短时间^[2]。这意味着,在与 RF-EMF 暴露评估相关的时间段(例如 6 min,或新版 ICNIRP 推荐的 30 min)内的平均发射功率显著低于设备的额定最大发射功率^[3]。

因此,使用额定最大功率来评估将导致过度保守的 RF-EMF 暴露评估和符合性边界,特别是同一站址使用多种不同无线技术和天线的情况下。为了解决这个问题,ITU-T K.100 和 IEC 62232 都提出了使用“实际最大功率”的概念,它可根据基站实际输出功率(时间平均)的长期统计数据导出,也可以通过大量典型测量得出。

IEC TR 62669 提供的测量和模拟结果表明,运营期间的基站实时平均发射功率(又称为实际发射功率)通常远低于额定最大发射功率。使用 mMIMO 的基站通常向连接的终端设备发送多个瞬时波束。这些波束在时间和空间上都快速变化,因此在某个特定方向上不会长期发射额定最大功率。

4 EIRP 和发射功率

使用 mMIMO 的 5G 基站的配置根据运营商网络设计和 3GPP 标准的实施而有所不同。来自 mMIMO 天线阵列的实际最大发射 EIRP 和相关电磁场人体暴露的计算评估需要考虑许多因素,主要包括:

- (1)总最大发射功率;
- (2)用于业务波束和广播/同步波束的功率分量;
- (3)波束控制范围和半功率波束宽度;
- (4)天线辐射方向图(所有业务波束的包络);
- (5)业务波束和广播/同步波束的最大增益;
- (6)可能同时出现的业务波束数量;
- (7)安装环境;
- (8)用户设备的分布;
- (9)时分双工(TDD)或频分双工(FDD)。

IEC TR 62669 和 ITU-T K.100 给出了确定 mMIMO 基站天线的实际最大 EIRP(直接或间接从实际最大发射功率导出)的方法。以下结合现网实际,给出一个典型 5G 宏站的案例评估研究,详细说明如何执行 5G 基站的 RF-EMF 符合性评估。

5 5G 基站评估案例^[4]

本案例研究例举了一个典型 5G NR 宏基站,该基站工作在 3.5 GHz 频段,其 mMIMO 阵列天线带有 64 个天线单元子阵列,并且发射器和接收器的数量相同。该天线在水平方向上的业务波束覆盖范围为 $\pm 60^\circ$,在垂直方向上覆盖范围为 $\pm 20^\circ$ 。该基站设备的制造商通常提供天线辐射方向图数据文件,该文件是通过组合所有可能的业务波束的方向图而构建的。因此,这些天线文件对应

5G 网络规划技术 5G Network Planning Technology

业务波束的包络,给出了所有可能方向上的最大增益。

在此案例研究中,对架设在某楼顶的 5G mMIMO 宏基站进行计算机建模。基站的额定最大发射功率为 200 W,并且使用 TDD 的最大下行链路占空比为 0.75(即基站仅发射 75%的时间)。基于 5G NR 的保守评估,假定所有功率都用于业务波束,即没有功率用于控制信道传输。图 1 显示了该站点的安装示意图,表 1 提供了该基站的基本参数。

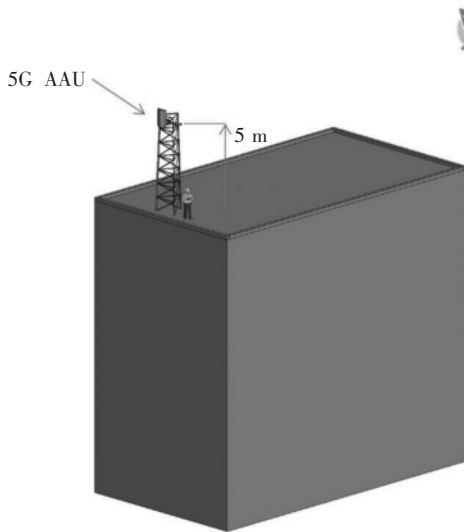


图 1 带有 3.5 GHz mMIMO 基站的宏基站址评估示意图
(天线的下部位于屋顶上方 5 m 的高度)

表 1 典型 5G 基站的基本参数

参数	值
工作频段	3 400 MHz~3 600 MHz
天线阵列设置	8×8 交叉极化天线阵列(128 个天线单元);64 (2×1)子阵列(每种极化 32)
Tx/Rx 设置	64T/64R
最大增益/ dBi	24
水平面最大扫描范围/(°)	±60
垂直面最大扫描范围/(°)	±20
下倾角/(°)	3
TDD 占空比/%	75
额定最大输出功率/W	200
最大 EIRP/dBm	77

本次案例评估采用 ICNIRP 推荐的全身平均导出限值,即公众照射(10 W/m²)和职业照射(50 W/m²)限值,平均时间按 6 min 来确定三维符合性边界,用于验证可进入区域的 RF-EMF 暴露量低于限值。

5.1 暴露评估算法

本次评估使用 IEC 62232 中定义的“合成模型和射线追踪算法”进行计算。

射线追踪算法采用一种简便算法,该方法使用天线方向图合成和球形自由空间传播模型来计算天线的辐射近场和远场的场强值。

远场球面公式可用于计算空间峰值和空间平均的

射频频场强。空间平均和空间峰值等效功率密度可按以下公式进行评估:

$$S = \frac{\overline{P}_{\text{avg}} \cdot G_{\theta, \phi}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (1)$$

其中, $\overline{P}_{\text{avg}}$ 为某个时间段天线端口的平均输出功率, $G_{\theta, \phi}$ 为给定球坐标方位的天线增益; r 为评估点距天线的距离。

如果需考虑反射地平面的影响,则使用下式:

$$S = (1 + |\Gamma|)^2 \cdot \frac{\overline{P}_{\text{avg}} \cdot G_{\theta, \phi}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (2)$$

对于理想导电地面(如:平坦金属屋顶)场景,取反射系数 $|\Gamma|=1$;对于典型的地面反射条件,取反射系数 $|\Gamma|=0.6$ 。

采用计算机软件 IXUS 进行仿真计算,天线模型基于业务波束包络数据文件创建,忽略其他环境源的辐射贡献。

5.2 暴露评估取值

5G 阵列天线的实际最大发射功率按 IEC TR62669 中描述的方法确定,采用统计模型结果。影响 mMIMO 天线实际最大发射功率的 3 个主要因素为:(1)时分双工(占空比);(2)服务用户的调度时间和空间分布;(3)基站 PRB 利用率(业务负载)。第 2 个因素可表示为“功率衰减因子”,主要是考虑到在 6 min 平均时间内功率(或 EIRP)在不同方向上扩散。图 2 给出了使用统计方法确定的分别用于农村和城市安装场景的 8×8 mMIMO 天线阵列的功率衰减因子的累积分布函数(CDF)^[2]。本案例研究选取农村场景 95%置信区间下的值,即 0.32。

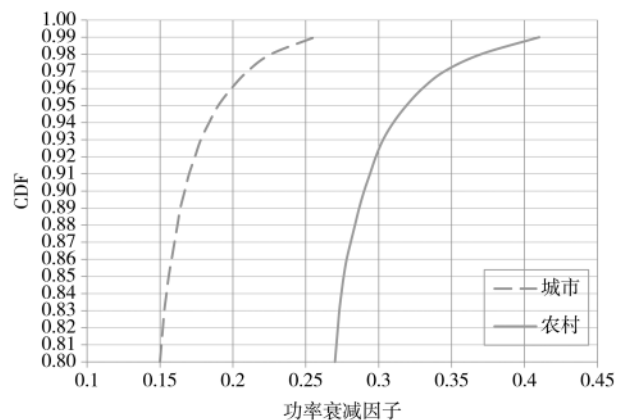


图 2 8×8 mMIMO 天线阵列在农村和城市安装场景中的功率衰减因子的累积分布函数(CDF)

对 TDD 占空比为 0.75、功率衰减因子为 0.32 时,实际最大发射功率(6 min 平均时间)为额定最大功率的 25%(=0.75×0.32)。因此,取实际最大功率为 50 W(即 200 W 的 25%)用于本次案例评估。采用的功率衰减因子 0.32 适用于 8×8 天线阵列以及农村环境中的实际用户分布。对于城市场景,可预期评估结果是偏保守的,因为城市

场景下用户设备的分布导致更小的功率衰减因子(图2左边曲线显示95%置信区间的值小于0.2)。另外,假如按基站PRB利用率(业务负载)接近100%来评估,这只会增加计算的保守性,因为典型的流量负载约为50%或更小。

5.3 暴露评估结果

图3和图4给出了评估后的5G NR mMIMO站点楼顶上普通公众和工作人员的实际符合性边界(即禁区)。从屋顶到符合性边界下边缘的最小垂直距离对于普通公众是2.8 m,对于职业工人是4.2 m。因此,如果这两组人群都可以进入该楼顶天窗,其EMF暴露是低于ICNIRP

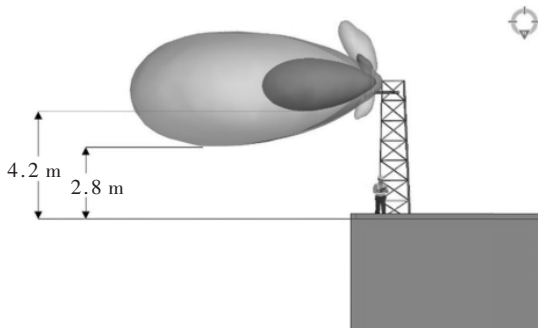


图3 计算出的安装在建筑物屋顶上5G基站的公众(浅色)和职业(深色)符合性边界的垂直视图(图示数值为屋顶天窗到符合性边界最低点的垂直距离)

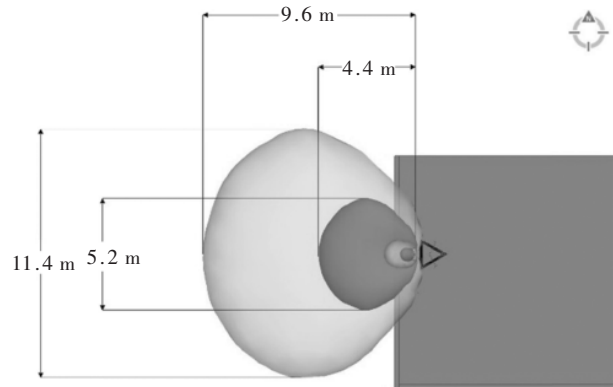


图4 计算出的安装在建筑物屋顶上5G基站周围的公众(浅色)和职业(深色)符合性边界的水平视图(图中数值为符合性边界的长度和宽度)

相关限值的。在基站天线正前方,普通公众的EMF安全距离为9.6 m(按我国标准限值应为45 m)。假设距公众可到达的邻近建筑物或区域的距离大于此距离,则表明5G站点符合相关限值。

6 结论

本文探讨了5G mMIMO基站的RF-EMF限值符合性评估方法和执行评估时需要考量的几点因素(如MIMO

(下转第53页)

(上接第41页)

能缩短送风距离,并确保回风直通顺畅,减少热风滞留。

3.2.2 各类机房典型场景空调布局及气流组织设计

(1)基站机房一般采用柜机,空间狭窄的可采用壁挂式空调作为补充。对于设备数量较多、负荷较大的应采用2台空调(无备用)。空调设备出风口应朝向设备正面或进风通道,并能保证设备背面热风能够顺畅回流,不造成气流短路。

(2)小C-RAN机房一般采用柜机或小型精密空调,至少应采用2台空调,有条件的或保障级别较高的应增加1台备机。空调设备出风口应朝向设备正面或进风通道,并能保证设备背面热风能够顺畅回流,不造成气流短路。

(3)中C-RAN机房一般采用机房专用空调, $N+1$ 冗余备份。机房应采用严格的“面对面、背对背”的冷热通道隔离形式。条件具备的应尽可能采用架空地板送风。空间有限的也可以采用微冷池等柜内风道形式结合小型列间空调(或柜内空调)。

(4)大C-RAN机房一般采用机房专用空调, $N+1$ 冗余备份。也可结合微模块、封闭冷通道(冷池)等采用列间空调形式,工艺要求与DC机房相当^[4]。

4 结论

本文分别从业务和成本两个层面入手,提出5G边

缘计算机房规划部署方法,同时对机房电源、空调等基础设施配置提出要求。机房节点规划是5G边缘节点部署的关键问题,应根据机房类型和所处位置,分别采取对应方案即可优化资源利用方式,妥善平衡业务需求与成本之间的关系。

参考文献

- [1] 杨鑫,段惠斌,沈云,等.从移动边缘连接到大规模边缘计算论MEC的应用部署及演进[J].通信世界,2019,797(5):38-41.
- [2] 王海军,庞冉,刘琦.面向5G回传的IPRAN网络演进[J].通信世界,2019,804(12):26-28.
- [3] NGMN.NGMN 5G whitepaper V1.0[EB/OL].(2017-08-14)[2020-06-29].https://www.ngmn.org/5g-white-paper/5g-white-paper.html.
- [4] 中国电信.5G BBU机房基础设施建设指导意见(暂行)[Z].2019.

(收稿日期:2020-06-29)

作者简介:

金超(1978-),男,本科,高级工程师,主要研究方向:移动通信网络规划设计。

徐羲晟(1991-),男,硕士,工程师,主要研究方向:5G通信工程建设。

综述与评论 Review and Comment

[19] CESELLI A, PREMOLI M, SECCI S. Cloudlet network design optimization[C]. Proceedings of the IFIP Networking, Toulouse, France, 2015: 1-9.

[20] DEAN J, GHEMAWAT S. Map Reduce: simplified data processing on large clusters[C]. Proceedings of the 6th Conference on Symposium on Operating Systems Design & Implementation, 2004.

[21] 夏靖波, 韦泽鲲, 付凯, 等. 云计算中 Hadoop 技术研究与综述[J]. 计算机科学, 2016, 43(11): 6-11.

[22] ABADI M, AGARWAL A, BARHAM P, et al. TensorFlow: large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems[J]. arXiv: 1603.04467, 2016.

[23] ZAHARIA M. An architecture for fast and general data processing on large clusters[M]. Morgan & Claypool, 2016.

[24] CARBONE P, KATSIFODIMOS A, EWEN S, et al. Apache flink: stream and batch processing in a single engine[J]. Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering, 2015, 36(4).

[25] 马黎. Spark 和 Flink 平台大数据批量处理的性能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(2): 191-195.

[26] 廖湖声, 黄珊珊, 徐俊刚, 等. Spark 性能优化技术研究综述[J]. 计算机科学, 2018, 45(7): 7-15.

[27] 舒娜, 刘波, 林伟伟, 等. 分布式机器学习平台与算法综述[J]. 计算机科学, 2019, 46(3): 9-18.

[28] 方巍, 文学志, 潘吴斌, 等. 云计算: 概念、技术及应用研究综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2012, 4(4): 351-361.

[29] 张栗粽, 崔园, 罗光春, 等. 面向大数据分布式存储的动态负载均衡算法[J]. 计算机科学, 2017, 44(5): 178-183.

[30] BYRNE J, CASARI P, EARDLEY P, et al. Reliable capacity

provisioning for distributed cloud/edge/fog computing applications[C]. Proceedings of the 26th European Conference on Networks and Communications. IEEE, 2017: 1-6.

[31] 刘正伟, 文中领, 张海涛. 云计算和云数据管理技术[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(S1): 26-31.

[32] 鲁鹏凯, 江大伟, 陈珂, 等. RStore: 基于 Big Table 的关系数据模型存储系统[J]. 计算机科学与探索, 2018, 12(10): 1547-1558.

[33] 徐泉, 王良勇, 刘长鑫. 工业云应用于技术综述[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(8): 1887-1901.

[34] 杨文广, 龙泉, 蒋东翔. 基于云平台的动力设备远程故障诊断系统研究[J]. 制造业自动化, 2017, 39(7): 6-14.

[35] 侯一鸣, 徐泉, 李亚杰, 等. 基于物联网和工业云的选矿设备状态监控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(9): 1972-1982.

[36] 陈卫, 杨长虹, 戴超凡. 云计算在军事领域的应用[J]. 国防科技, 2015, 36(4): 23-26.

[37] 程妍妍. 美军云计算安全策略发展及启示[J]. 国防科技, 2019, 40(1): 51-57.

[38] 唐素纯, 李宁, 于钺, 等. 面向海上战术云的信息资源服务架构设计[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(2): 103-109.

(收稿日期: 2020-04-15)

作者简介:

葛文双(1989-), 通信作者, 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 数据驱动的智能评估、云计算与数据分析, E-mail: wsidianqi@126.com.

郑和芳(1985-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 计算机应用技术。

刘天龙(1988-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 指挥控制系统总体技术。

(上接第 45 页)

天线波束的随机性、用户在时间和空间上的分布、实际 EIRP 的确定等)。5G 由于引入大发射功率和大规模 MIMO 天线技术, 使得理论评估变得复杂, 传统的理论评估方法将得出过于保守的安全边界。鉴于目前 5G 网络尚处于商用初期, 用户数量和用户规模亟需培育发展, 因此当前阶段难以开展真实用户场景下的现场测量评估。目前正在起草的行业标准中推荐采用模拟加载(如 Speedtest 软件或下行灌包等)方式进行现场测量, 这种人为加载方式测得的环境电磁场并不能反映 5G 网络带来的真实电磁环境分布, 仅作为评估 5G 基站在严酷场景下的电磁辐射水平情况。采用本文介绍的理论与评估方法基本可以符合未来 5G 网络实际, 文中给出的理论评估算法、实际 EIRP 确定和理论评估考量因素均应进一步验证与探索, 使理论评估更加符合实际电磁场的分布。

参考文献

[1] ICNIRP(2020). ICNIRP guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields(100 kHz to 300 GHz)[J]. Health

Physics, 2020, 118(5): 483-524.

[2] IEC TR 62669. Case studies supporting IEC 62232-determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure[S]. 2018.

[3] ITU-T Recommendation K.100. Measurement of radio frequency electromagnetic fields to determine compliance with human exposure limits when a base station is put into service[S]. 2018.

[4] ITU-T Recommendation K.Sup16. Electromagnetic field compliance assessments for 5G wireless networks[S]. 2018.

(收稿日期: 2020-06-11)

作者简介:

谈儒猛(1973-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 5G 辐射、节能、电磁兼容。

熊尚坤(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 5G 移动通信、无线网络演进。

武彤(1975-), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向: 节能计量、检测。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所