

文章编号: 2095-4980(2023)06-0826-04

## 5G 基站电磁辐射

罗勇<sup>1,2,3</sup>, 石丹<sup>1,2,3</sup>, 王冠<sup>1,2,3</sup>, 刘晓勇<sup>1,2,3</sup>

(1.北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2.生态环境部核与辐射安全中心, 北京 102488;  
3.国家无线电监测中心检测中心, 北京 100041)

**摘要:** 基于 5G 基站前向功率控制和波束赋形等关键技术, 设计单用户情况下 5G 基站电磁辐射测试方案。该方案根据电磁辐射功率密度随着距离平方减小的规律布点, 可以在一定程度上提高宏基站测试效率。对本文所提监测方案进行现场实测, 监测结果远小于国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)标准限值, 表明 5G 基站电磁辐射水平总体可控。利用高频结构仿真器(HFSS)设计 5G 基站天线模型获取大规模多输入多输出(MIMO)天线阵方向图, 基于实际场景电磁参数分析搭建场景, 通过射线追踪算法对 5G 基站的电磁辐射进行预测。预测与监测结果相比误差不大, 证明预测方法可靠。

**关键词:** 5G 基站; 电磁辐射; 测试方案; 射线追踪

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020700

## Electromagnetic radiation of 5G base station

LUO Yong<sup>1,2,3</sup>, SHI Dan<sup>1,2,3</sup>, WANG Guan<sup>1,2,3</sup>, LIU Xiaoyong<sup>1,2,3</sup>

(1.School of Electronic and Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China;  
2.Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 102488, China;  
3.The State Radio\_Monitoring\_Center Testing Center, Beijing 100041, China)

**Abstract:** Based on key technologies such as 5G base station forward power control and beam forming, the electromagnetic radiation test scheme for 5G base station under the condition of single user is designed. According to the regular layout of electromagnetic radiation power density decreasing with the square of distance, the test efficiency of macro base station can be improved to some extent. In addition, field measurement of the proposed monitoring scheme shows that the monitoring results are far less than the limit value of International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection(ICNIRP) standard, indicating that the electromagnetic radiation level of 5G base station is generally controllable. Finally, High Frequency Structure Simulator(HFSS) is adopted to design the 5G base station antenna model to obtain the large-scale Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) antenna array direction map, and the scene is built based on the electromagnetic parameter analysis of the actual scene. The electromagnetic radiation of 5G base station is predicted by ray tracing algorithm. The prediction results show little error compared with the monitoring results, which proves the reliability of the prediction method.

**Keywords:** 5G base station; electromagnetic radiation; test scheme; ray tracing

5G 无线电接入技术将成为物联网发展的关键推动力, 并在流量大幅增长和高宽带连接等场景中得到广泛应用。5G 移动通信系统具有以电磁波作为载体和终端可移动等特点。5G 基站中大规模 MIMO 和相控阵天线波束成形等关键技术的应用, 使得波束主瓣方向随着用户移动时刻发生变化, 这个特点决定了 5G 基站电磁辐射的研究与传统的基站有本质区别。

移动通信基站电磁辐射传统的测量方法主要有 2 大类: 菲涅尔区测量法和外推法。菲涅尔区测量基站天线的方法主要有 3 种; 一是将菲涅尔区近场抽样近似为远场, 利用计算电磁学数值计算方法重构基站天线辐射图<sup>[1]</sup>;

收稿日期: 2020-12-26; 修回日期: 2021-02-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771069)

二是通过角度变量扫描法获取瑞利远场的方向图和增益<sup>[2]</sup>，其中基站天线与测试点需满足瑞利远场准则；三是利用相位检索技术测量基站天线菲涅尔区域的有效全向辐射功率<sup>[3]</sup>。使用外推法来评估基站的电磁辐射水平主要有3类；评估全球移动通信系统(Global System for Mobile Communications, GSM)基站时将频率选择性测量设备调至适当的GSM载波频率后，确定GSM基站广播控制信道的电平，再通过外推因子评估GSM基站最大电磁辐射水平<sup>[4]</sup>。分析通用移动通信系统(Universal Mobile Telecommunications System, UMTS)基站电磁辐射水平时，确定UMTS基站的公共导频信道的电平来外推UMTS基站的电磁辐射水平<sup>[5]</sup>。研究长期演进(Long Term Evolution, LTE)基站则通过确定LTE基站同步信号的辐射场强来外推LTE基站电磁辐射水平的最大值<sup>[6]</sup>。

5G基站电磁辐射水平的研究目前尚处于初步发展阶段。由于5G基站使用大规模MIMO和精确波束赋形等新技术，PAWLAK R指出传统网络中测量基站电磁辐射水平的方法不适用于5G<sup>[7]</sup>，亟需提出新的测试理论。结合空间复用技术理论及实地测试结果，ADDA S证明外推方法也适用于小规模MIMO信号，但测试的参考信号电平与传统网络制式有所区别<sup>[8]</sup>。基于归一化平均功率模式，PINCHERA D计算了某些场景下5G基站电磁辐射的安全防护距离<sup>[9]</sup>，但该方法只适用于特定的场景，扩展性不高。此外，BARACCA和THORS等通过对用户空间分布、大规模MIMO、时分双工、信道模型和基站利用率等因素进行研究，利用数值运算方法对5G基站电磁辐射水平进行评估<sup>[10-11]</sup>。

基于以上研究成果，本文对单用户情况下5G基站电磁辐射水平的评估提出了测试和预测方法，并按照测试方案进行了实地监测。监测结果表明5G基站电磁辐射水平与传统移动通信基站电磁辐射水平相比有所上升，但基本上可控。通过预测结果与仿真结果的对比，误差较小，表明预测方法具有准确性。

## 1 5G 基站电磁辐射测试

### 1.1 5G 基站电磁辐射测试方法

对于单个移动用户台，假定基站以相同的前向功率进行通信，离基站越远，移动台接收到的信号越弱。为使小区边缘的移动台用户接收到信号，此时基站前向功率应该调至最大。由式(1)可知，电磁辐射平均功率与基站的发射功率成正比，当基站前向功率调至最大时，从基站到小区边缘单个用户的下行链路上电磁辐射功率达到最大值，使得电磁辐射水平达到最高。此外，5G基站3D波束成形可使波束主瓣在水平和垂直方向上转换，即波束主瓣方向是随着用户位置在时刻变化。在本测试方案中拟采用5G移动终端将波束“引到”基站边缘。将5G移动终端放置在基站边缘后，在5G基站大规模MIMO天线阵主射方向上基站和移动终端之间布点，便可以进行单用户情况下5G基站电磁辐射的测量。

扇形布点和网格布点是环境监测的主要布点方式。基站电磁辐射测试一般都采用扇形布点。由于5G波束赋形的特点，本文的测试方法主要在基站天线主射方向和边缘用户之间的直线上进行布点。对于5G微基站而言，基站覆盖范围较小，可在距离天线5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m, 40 m...等处布点。对于5G宏基站，基站覆盖范围相对较大，若还是以上述间距布点，将导致测试方法点位多、代表性差和监测数值变化小。由式(1)可以看出，电磁辐射功率密度与距离平方的倒数成正比。采用优化布点原则使轴线上的点位都具有代表性，宏基站应按照5 m, 10 m, 20 m, 40 m, 80 m, 160 m, 320 m, 640 m...的规律在基站和5G终端之间进行布点较合适。这样既可以大量减少监测点位，同时也使电磁辐射功率密度测试值随着距离的平方呈指数减小。本次测试方法采用后者进行布点。

$$P_d = PG/4\pi r^2 \quad (1)$$

式中： $P_d$ 为基站平均辐射功率密度； $P$ 为基站发射机功率； $G$ 为天线增益； $r$ 为测量位置与基站天线距离。

基于以上研究，单用户情况下5G基站电磁辐射测试方案布点如图1所示。

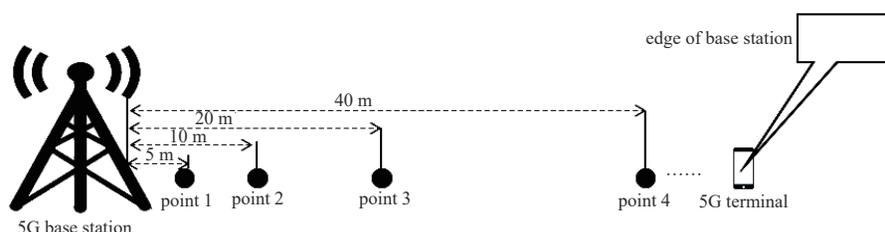


Fig.1 Electromagnetic radiation test of 5G base station under single user condition

图1 单用户情况下5G基站电磁辐射测试

## 1.2 测试结果分析

现场实地监测基站为宏基站，最大发射功率为 200 W，增益为 24.5 dBi，5G 天线架高为 23 m，5G 宏基站的覆盖距离为 500 m。测试时终端设置为数据传输模式，下载速率稳定在 30 MB/s 左右。测试仪器选用 Narda SRM-3006 选频测试仪，检波方式为方均根，结果类型为平均值，测试频段为 3 400~3 500 MHz，5G 终端使用电信 5G 手机。现场实测如图 2 所示，测试结果如图 3 所示。注：工况 1 为 5G 终端放在基站边缘，工况 2 为 5G 终端放在距离基站天线 60 m 处。

图 3 的测试结果表明，在近场区，5G 基站电磁辐射较小，主要是受到天线副瓣的影响。在远场区，电磁辐射水平随着距离的增加呈指数衰减趋势，证明了布点方案的合理性。此外，工况 2 的测试结果比工况 1 的测试结果小，表明 5G 终端放在基站边缘时基站电磁辐射水平较高，这是基站前向功率控制的体现，实际测试时应尽量让终端放在基站覆盖边缘处。数据传输场景下，5G 宏基站电磁辐射总体上比 4G 基站电磁辐射有所上升，但所有测试值都远小于 ICNIRP 标准限值，表明 5G 基站电磁辐射水平总体可控。

由于使用 5G 手机作为 5G 终端，测试过程中数据传输速度极不稳定，应进行多次测试，取传输速度稳定的一组数据作为参考。此外，背景噪声也可能对测试结果产生一定的影响。

## 2 5G 基站电磁辐射预测

### 2.1 射线追踪算法模型

对基站电磁辐射的计算普遍使用弗林斯公式(即式 1)，该计算公式未考虑实际复杂电磁场景和近场与远场的计算差别，往往导致预测结果与实际测试结果偏差较大。射线追踪算法弥补了弗林斯公式的不足，综合分析实际电磁场景的结构特征与分布规律，找到基站天线与观察点之间的有效传播路径，利用电磁散射理论计算观察点的场强或功率密度。该计算模型与 5G 基站天线大规模 MIMO 技术具有类似的原理。此外，预测过程中使用 HFSS 设计天线阵模型，利用静态波束来模拟 5G 基站波束赋形的效果。基于以上研究，可以使预测仿真结果与实际监测结果较为吻合。

射线追踪算法主要是基于 Optix 框架通过编程来实现，并利用中央处理器(Central Processing Unit, CPU)与图形处理器(Graphic Processing Unit, GPU)并行加速技术来减少仿真时间。其中 GPU 型号为 GEFORCE GTX 1080Ti，主要性能参数为：统一计算架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)核心 3 584 个，升压时钟 1 582 MHz，内存速度 11 Gbps，标准内存配置 11 GB，内存带宽 484 GB/s。

### 2.2 5G 基站场景搭建

预测场景的模块主要有地面、建筑物和基站辐射源。其中设置地面相对电导率为 0.02，相对介电常数为 25，形状是 1 km×1 km 的矩形。设置建筑物相对电导率为 0.015，相对介电常数为 15，通过卫星图与实景图获取建筑物的位置与大小。基站辐射源的建立是通过导入 HFSS 天线模型仿真得到天线各立体角增益文件，并设置辐射源的发射功率和发射频率。预测场景如图 4 所示，仿真一次总耗时 0.2 s 左右。

5G 基站天线阵模型及其 3D 增益图分别如图 5 和图 6 所示，其中中心频率为 3 450 GHz，最大增益为 23.6 dBi。

### 2.3 预测结果分析

预测场景按照实测场景进行搭建，预测与实测结果对比分析如图 7 所示。

预测结果与监测结果相比总体的变化趋势一致，且两者相比误差较小，表明了预测模型的准确性。其中导致误差的主要原因是天线模型和电磁参数等与实际测试场景相比仍有较大的差异，使得预测数据与实测数据之间存在一定的波动。



Fig.2 Measurement map  
图 2 现场实测图

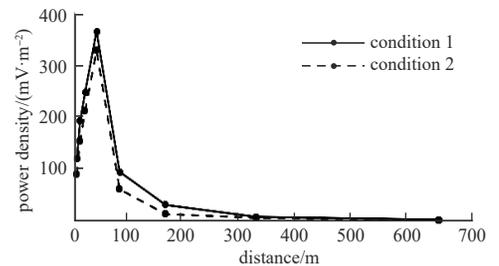


Fig.3 Test results of electromagnetic radiation in 5G base station under single user condition  
图 3 单用户情况下 5G 基站电磁辐射测试结果

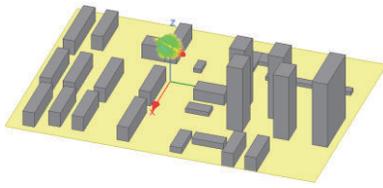


Fig.4 Forecast scenario  
图4 预测场景图

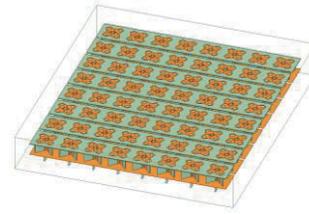


Fig.5 Model of 5G base station antenna array  
图5 5G 基站天线阵模型

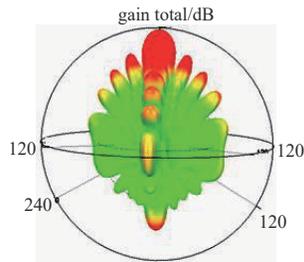


Fig.6 3D gain of antenna array model  
图6 天线阵模型3D增益图

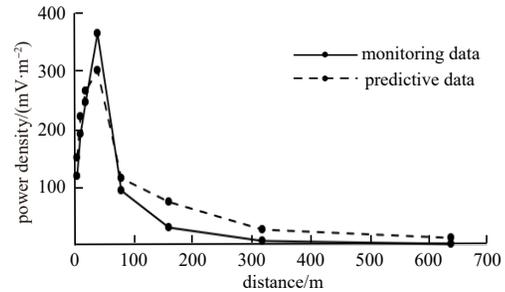


Fig.7 Comparison of electromagnetic radiation test and prediction results of 5G base station  
图7 5G 基站电磁辐射测试与预测结果对比

### 3 结论

本文利用5G基站前向功率控制、波束赋形和基站的辐射特性设计了单用户情况下5G宏基站测试方案。测试结果表明，与其他工况相比，将5G用户终端放在基站边缘时基站周围总体的电磁辐射会有所增强。按照基站辐射特性布点，远场测试结果也能呈现出随着距离的平方递减规律。除此之外，本文利用射线追踪算法来评估随着距离增加5G基站电磁辐射特性；预测结果与测试结果相比呈现较好的拟合性。在5G基站电磁辐射预测的下一步研究中，可以改善5G基站天线阵模型和实际场景电磁参数的精确度来提高预测数据的准确度。

#### 参考文献：

- [ 1 ] D'ELIA G,LEONE G,Pierri R,et al. New method of far-field reconstruction from Fresnel field[J]. Electronics Letters, 1984,20(8): 342-343. doi:10.1049/el:19840232.
- [ 2 ] OH S S,KIM J,YUN J,et al. Antenna measurement method in Fresnel region by  $\varphi$  variation scanning[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008(7):206-209. doi:10.1109/LAWP.2008.920711.
- [ 3 ] OH S S,LEE Younghwan. Simulation study for EIRP measurement of base-station antenna using simple phase retrieval technique[C]// XVIth International Seminar/workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory. Lviv,Ukraine:[s.n.], 2011:123-126.
- [ 4 ] RIEDERER M. EMF exposure due to GSM base stations: measurements and limits[J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003(1):402-405. doi:10.1109/ICSMC2.2003.1428276.
- [ 5 ] OLIVIER C,MARTENS L. Optimal settings for frequency-selective measurements used for the exposure assessment around UMTS base stations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007,56(5): 1901-1909. doi: 10.1109/TIM.2007. 903617.
- [ 6 ] LUNCA E, DAMIAN C, SALCEANU A. EMF exposure measurements on 4G/LTE mobile communication networks[C]// International (Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering(EPE). Iasi,Romania:IEEE, 2014:545-548. doi:10.1109/ICEPE. 2014.6969968.
- [ 7 ] PAWLAK R,Krawiec P,ŻUREK J. On measuring electromagnetic fields in 5G technology[J]. IEEE Access, 2019(7):29826-29835. doi:10.1109/ACCESS.2019.2902481.
- [ 8 ] ADDA S,AURELI T,D'ELIA Set al. A theoretical and experimental investigation on the measurement of the electromagnetic field level radiated by 5G base stations[J]. IEEE Access, 2020(8):101448-101463. doi:10.1109/ACCESS.2020.2998448.