

文章编号: 2095-4980(2021)06-1053-04

5G 基站电磁辐射评估

付松

(中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 随着 5G 基站密度不断增加, 5G 基站电磁辐射水平的影响已成为限制 5G 通信技术发展的重要因素。为解决 5G 基站周围电磁辐射限值问题, 提出评估方法对 5G 基站电磁辐射水平进行预测。假设基站覆盖小区用户容量已知, 利用统计模型对基站周围功率密度的最大值进行计算。在 ANSYS Savant 上, 通过对 5G 基站周围最大功率密度进行仿真, 验证了预测方法的准确性和可行性, 对今后基站选址具有一定的指导意义。

关键词: 5G 基站; 电磁辐射水平; 统计模型; ANSYS Savant 平台

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020198

Electromagnetic radiation assessment of 5G base station

FU Song

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: With the increasing density of 5G base station in recent years, the influence of the electromagnetic radiation level of 5G base station has become one of the most important factors restricting the development of 5G communication technology. In order to solve the problem of electromagnetic radiation limits around 5G base station, an evaluation method is proposed to predict the electromagnetic radiation level of 5G base station. Assuming that the user capacity of the cell covered by the base station is known, a statistical model is adopted to calculate the maximum power density around the base station. On ANSYS Savant, the accuracy and feasibility of the predictive method are verified by simulating the maximum power density around the 5G base station. This method has certain guiding significance for future location of base station.

Keywords: 5G base station; electromagnetic radiation level; statistical model; ANSYS Savant

基站电磁辐射水平的评估可以通过理论分析与计算来进行预测。理论分析与计算方法, 主要目的在于求不同的强电磁场源附近的场分布。目前, 许多关于基站电磁辐射的研究分析都是基于基站最大发射功率进行保守的预测与估计。2010年, W Joseph^[1]等研究话务量对基站电磁辐射公众暴露的影响, 通过测量过程的时态变化确定最小测量周期, 再对居民区、农村地区、办公环境、城市环境和工业环境 5 种场景下的最大暴露值和平均值进行估计。2011年, Z Mahfouz^[2]等针对 GSM 900、GSM 1800、通用移动通信系统(Universal Mobile Telecommunications System, UMTS)以及高速下行链路分组接入(High Speed Downlink Packet Access, HSDPA)基站, 在考虑话务量的前提下, 对一天中基站电磁暴露的最大电场强度进行研究, 并对各种类型基站产生的最大电场强度和最大电场强度变化率进行对比。2013年~2015年, A Linhares^[3-6]等通过考虑基站最大发射功率、路径损耗以及天线相关参数等, 分别对基站远场、近场以及基站旁瓣进行电磁辐射相关研究, 并给出估计基站电磁辐射最大暴露位置的理论计算模型。

近几年, 对 5G 基站电磁辐射水平进行了不少研究。R Pawlak 于 2019 年指出, 现有的用于 2G、3G 和 4G 网络中测量基站电磁辐射水平的方法不适用于 5G^[7], 主要原因是 5G 基站使用了大规模多入多出(Multiple-Input Multiple Output, MIMO)和精确波束赋形等新技术, 现有测量方法用于 5G 网络可能会导致高估的结果。基于子阵思想, E Degirmenci 提出用中心元素法和多元素法评估大规模 MIMO 天线的电磁辐射限值, 但该方法利用了数值仿真模拟计算, 计算复杂度高, 不适用于实际大规模场景^[8]。为研究 5G 基站电磁辐射水平, Thors 提出了一

种统计方法，对 5G 基站电磁辐射水平做近似计算^[9]，将基站利用率、大规模 MIMO、时分双工(Time Division Duplexing, TDD)和用户空间分布等因素进行综合分析。Baracca 利用 3GPP 提供的标准化三维空间信道模型，结合数值方法对 5G 基站周围的电磁辐射水平进行预测，由于计算复杂度高，不适用于实际大规模场景 5G 基站电磁辐射水平的评估^[10]。本文基于外推方法^[11-12]，利用选频测试仪测量 5G 同步信号或物理广播控制信道的电平，通过外推因子来评估 5G 基站电磁辐射水平的最大值。

1 模型和方法

5G 通信基站未来要实现的三大应用场景，分别为：增强型移动带宽、大规模机器通信和超高可靠低时延通信。针对不同的应用场景，通信过程使用的帧结构存在巨大差异。从下行链路电磁辐射评估角度看，实际最大电磁辐射应与帧结构下行时隙传输时间所占比例成正比。5G 帧结构中，下行时隙与上行时隙的传输配置比与长期演进(Long Term Evolution, LTE)类似，常规有 6 种可能的配置比，范围从 2:3~9:1。

在 TDD 中，下行链路和上行链路分别占有不同的时隙，基站只有在下行时隙中才会发射功率。从平均功率的角度分析，下行时隙占比为：

$$F_{TDD} = \frac{\eta}{\eta + 1} \quad (1)$$

式中 η 为下行时隙与上行时隙传输配置比，由基站特性决定。

在极端情况下，理论上可以利用所有波束都集中于一点的保守方法预测 5G 基站电磁辐射的最大值。但研究表明，这种场景出现的概率非常小。为对 5G 基站电磁辐射的最大值进行合理预测，可采用统计模型进行计算，如图 1 所示。其中 φ_{ep} 为评估点方位角； NB_{3dB} 为半功率波束水平宽度； $MIMO_{3dB}$ 为 5G 基站扇形水平覆盖宽度。

该方法遵循以下步骤：

1) 该统计模型在水平方向上将智能波束分为 3 类：宽带波束、邻边波束和其他。将每类波束水平角度之和与扇区水平覆盖角度之比定义为该波束出现的概率，然后根据该概率确定每类波束所对应的用户数量上限。

2) $P_{\text{宽带}} = \text{宽带水平角度之和} / \text{扇区水平覆盖角度}$ ，则二项累积概率 $F = \sum_{i=0}^N C_n^i P_{\text{宽带}}^i (1 - P_{\text{宽带}})^{N-i}$ ，其中， C_n^i 为组合计算公式，当二项累积概率接近 97% 时，认为该累积概率已达到收敛条件。此时 $N_1=i$ ，可认为是宽带波束所对应的用户数量上限。当用户数量再多时，出现的概率认为非常小，可忽略不计。

3) $P_{\text{邻边}} = \text{邻边水平角度之和} / (\text{扇区水平覆盖角度} - \text{宽带水平角度之和})$ ，与步骤 2) 类似，则二项累积概率 $F = \sum_{i=0}^{N-N_1} C_i^{N-N_1} P_{\text{邻边}}^i (1 - P_{\text{邻边}})^{N-N_1-i}$ ，当二项累积概率接近 97% 时，认为该累积概率已达到收敛条件。此时 $N_2=i$ ，可认为是邻边波束所对应的用户数量上限。当用户数量再多时，出现的概率认为非常小，可忽略不计。

4) $N_3=N-N_1-N_2$ 为其他波束所对应的用户数量上限，其中 N 是小区用户数量。

5) 以宽带波束为参考方向(即评估点在宽带波束方向上)，对邻边波束和其他波束的增益进行修正，结合式(2)~(3)，便可以对 5G 基站电磁辐射功率的最大值进行计算。

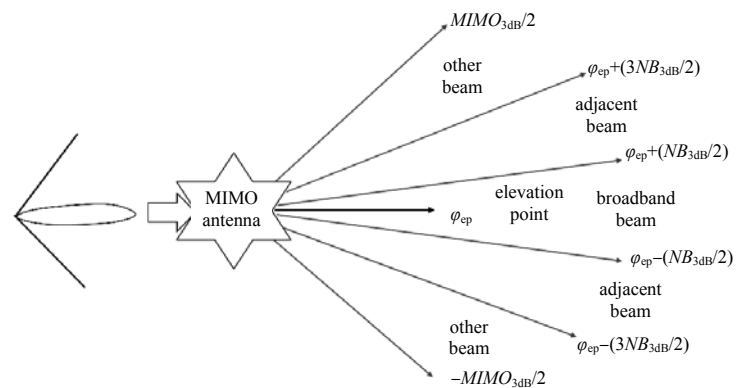


Fig.1 Coverage of beamforming azimuth
图 1 波束赋形方位角覆盖图

$$S_u = \frac{(PF_{TDD} / N) \times G}{4\pi r^2} \quad (2)$$

$$S_{sta} = S_u (\delta_{\max} N_1 + \delta_{\text{adj}} N_2 + \delta_{\text{oth}} N_3) \quad (3)$$

式中： S_u 为评估点功率密度； S_{sta} 为评估点平均功率密度； P 为基站发射功率； N 为基站用户容量； G 为天线增益； r 为用户到基站的距离； N_1, N_2, N_3 分别对应图 1 三个波束区域的用户数量； δ_{\max} 为宽带波束方向的增益修正系数，假设评估点在宽带波束方向上，则 $\delta_{\max} = 1$ ； δ_{adj} 表征邻边波束的功率对评估点电磁辐射的贡献，为邻边波束增益修正系数，邻边波束的水平宽度刚好为宽带波束宽度，可近似认为邻边波束对评估点电磁辐射的贡献为半

功率强度(-3 dB), 即 $\delta_{adj}=0.5$; δ_{oth} 表征其他波束对评估点电磁辐射的贡献, 为其他波束增益修正系数, 其他波束对评估点的电磁辐射贡献可近似认为旁瓣功率的贡献(-12 dB), 即 $\delta_{oth}=0.063$ 。

以具体基站参数为例, 对上述 5G 基站电磁辐射最大值的公式进行计算验证。为便于计算, 假设二项式累积和达到 97% 时, 认为其达到收敛; 扇区宽度为 120° , 波束宽度为 15° , 评估点距基站的距离为 20 m, 天线增益为 15 dBi, F_{TDD} 取典型值 0.725, 基站发射功率为 200 W, 小区容量为 24。

$$P_{\text{宽带}} = \frac{N_{3\text{dB}}}{MIMO_{3\text{dB}}} = \frac{15^\circ}{120^\circ} = 0.125, N=24, \text{ 则二项式累积概率密度函数如图 2 所示。当 } F=0.97 \text{ 时, } N_1=6 \text{ 为该波束}$$

范围内的用户容量上限, 用户再多时发生的概率极小, 可忽略不计。

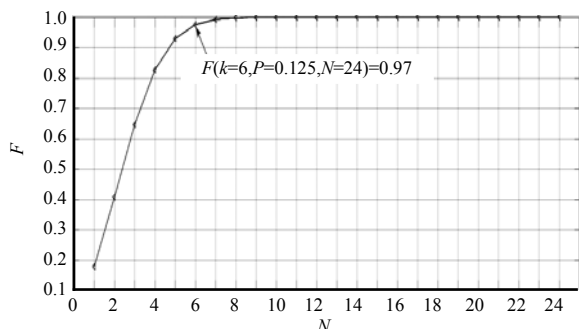


Fig.2 Binomial cumulative function($P=0.125, N=24$)
图 2 二项累积函数($P=0.125, N=24$)

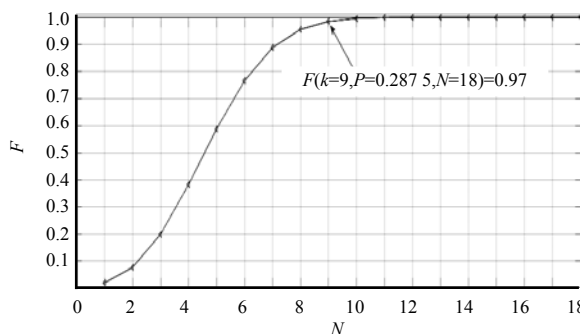


Fig.3 Binomial cumulative function($P=0.2875, N=18$)
图 3 二项累积函数($P=0.2875, N=18$)

$$P_{\text{邻边}} = \frac{2N_{3\text{dB}}}{MIMO_{3\text{dB}} - N_{3\text{dB}}} = \frac{30^\circ}{105^\circ} = 0.2875, N=24-6=18,$$

二项累积概率函数如图 3 所示, 当 $F=0.97$ 时, $N_2=9$ 为邻边波束范围内的用户容量上限, 用户再多时发生的概率极小, 可忽略不计。

$N_{\text{其他}} = N - N_1 - N_2 = 9$ 。单个用户平均电磁辐射功率为:

$$S_u = \frac{(200 \times 0.725 / 24) \times 31.62}{4\pi \times 20^2} = 0.038 \text{ W/m}^2, \text{ 基站统计平均电磁辐射功率为: } S_{\text{sta}} = 0.038 \times (1 \times 6 + 0.5 \times 9 + 0.063 \times 9) = 0.42 \text{ W/m}^2.$$

2 结果和讨论

利用以上理论分析, 在 ANSYS Savant 平台上搭建基于用户分布的 5G 基站电磁辐射最大值测量方法场景。为方便搭建场景, 利用波束赋形算法, 按 $N_1:N_2:N_3$ (依次从右往左) 的比例将基站发射功率作用于 3 个波束, 如图 4 所示。

仿真结果如图 5 所示。设 5G 基站的工作频段为 3.4~3.6 GHz (中心工作频率为 3.5 GHz), 接收天线距离基站 20 m 时, 接收信号归一化功率密度约为 0.0001 W/m^2 。ANSYS Savant 平台上默认的发射功率为 1 W, 因此将仿真场景 5G 基站的发射功率与上文设置的 5G 基站发射功率进行统一, 仿真场景 5G 基站的发射功率也为 200 W, 且设置的用户容量为 24。则接收信号实际功率密度为: $S=0.0001 \times 200 \times 24=0.48 \text{ W/m}^2$ 。从计算结果可知, 仿真结果与实际预测的接收信号功率密度基本相当, 证明了预测结果的准确性。

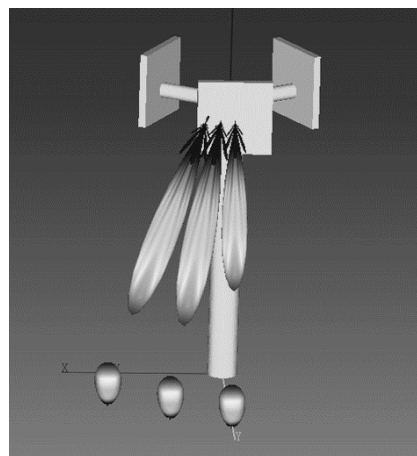


Fig.4 Prediction scenario of maximum electromagnetic radiation of 5G base station based on user distribution
图 4 基于用户分布的 5G 基站电磁辐射最大值预测场景

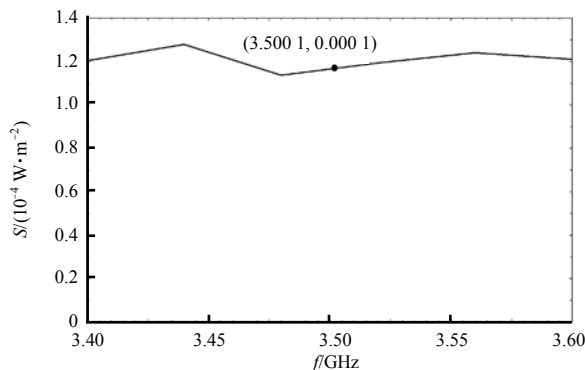


Fig.5 Simulation results of maximum electromagnetic radiation of 5G base stations based on user distribution
图 5 基于用户分布的 5G 基站电磁辐射最大值仿真结果

3 结论

本文提出了一种统计模型, 计算 5G 基站周围功率密度的最大值。该模型将 5G 基站的覆盖扇区划分成 3 个波束覆盖区: 宽带波束区、邻边波束区和其他波束区。根据每个用户出现在每个波束覆盖区的概率, 利用二项累积函数估算每个波束覆盖区的用户数量上限; 以宽带波束覆盖区的评估点为参考, 分别对邻边波束和其他波束的增益进行修正, 计算 5G 基站电磁辐射功率密度的最大值。最后在 ANSYS Savant 上对 5G 基站电磁辐射场景进行仿真, 验证了预测模型的可靠性。该模型为 5G 基站最大电磁辐射的模拟计算提供了一种方法。

参考文献:

- [1] JOSEPH W,VERLOOCK L. Influence of mobile phone traffic on base station exposure of the general public[J]. *Health Physics*, 2010,99(5):631–638. doi:10.1097/hp.0b013e3181db264f.
- [2] MAHFOUZ Z,GATI A,LAUTRU D,et al. Assessment of the real life exposure to 2G and 3G base stations over a day from instantaneous measurement[C]// 2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul,Turkey:IEEE, 2011: 1–4. doi:10.1109/URSIGASS.2011.6051312.
- [3] LINHARES A,TERADA M A B,SOARES A J M. Estimating the location of maximum exposure to electromagnetic fields associated with a radiocommunication station[J]. *Journal of Microwaves Optoelectronics & Electromagnetic Applications*, 2013,12(1):141–157. doi:10.1590/S2179–10742013000100012.
- [4] LINHARES A,MARTINS–SOARES A J,BRASIL–TERADA M A. Side lobes from radio base station antenna in the evaluation of human exposure to EMF[C]// 2013 SBMO/IEEE MTT–S International Microwave & Optoelectronics Conference(IMOC). Rio de Janeiro,Brazil:IEEE, 2013:1–5. doi:10.1109/IMOC.2013.6646422.
- [5] LINHARES A,SOARES A,TERADA M. Determination of measurement points in urban environments for assessment of maximum exposure to EMF associated with a base station[J]. *International Journal of Antennas & Propagation*, 2014:1–7. doi:10.1155/2014/297082.
- [6] FERNANDES L C,LINHARES A,SOARES A J M. Estimation of region of maximum exposure to radiofrequency electromagnetic fields[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2015,57(6):1330–1332. doi:10.1002/mop.29084.
- [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] DEGIRMENCI E,THORS B,TÖRNEVIK C. Assessment of compliance with RF EMF exposure limits:approximate methods for radio base station products utilizing array antennas with beam-forming capabilities[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016,58(4):1110–1117. doi:10.1109/TEMC.2016.2550611.
- [9] THORS B,FURUSKÄR A,COLOMBI D,et al. Time-averaged realistic maximum power levels for the assessment of radio frequency exposure for 5G radio base stations using massive MIMO[J]. *IEEE Access*, 2017(5):19711–19719. doi:10.1109/ACCESS.2017.2753459.
- [10] BARACCA P,WEBER A,WILD T,et al. A statistical approach for RF exposure compliance boundary assessment in massive MIMO systems[C]// Proceeding of 22nd International ITG Workshop Smart Antennas(WSA). Bochum,Germany:[s.n.], 2018: 1–6.
- [11] AERTS S,VERLOOCK L,BOSSCHE M,et al. In-situ measurement methodology for the assessment of 5G NR massive MIMO base station exposure at Sub-6 GHz frequencies[J]. *IEEE Access*, 2019(7):184658–184667. doi:10.1109/ACCESS.2019.2961225.
- [12] KELLER H. On the assessment of human exposure to electromagnetic fields transmitted by 5G NR base stations[J]. *Health Physics*, 2019,117(5):541–545.

作者简介:

付松(1986–), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为目标特性研究、复杂电磁环境构建与评估等方向.email: fusong1215@163.com.