



专栏：5G 技术与组网应用

5G 基站辐射安全与网络规划研究

许浩, 曹弘毅

(中国电信股份有限公司上海分公司, 上海 200120)

摘要: 随着 5G 的快速发展, 基站的辐射安全成为公众关注的热点问题。由于 5G 高频段和大带宽的特性, 超密集异构网络应用日趋普遍。通过分析典型 5G 基站电磁辐射对人体的影响, 详细计算了不同功率基站的安全距离。基于室外宏基站、室外杆站、电话亭基站和室内微基站等各种常见的 5G 无线网络设备形态, 进行了不同场景的安全区分析和理论计算, 并根据实地测试结果进行验证, 给出了具体的组网建议。

关键词: 5G; 电磁辐射; 基站; 网络规划

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021196

Research on 5G base station radiation safety and corresponding network planning

XU Hao, CAO Hongyi

Shanghai Branch of China Telecom Co., Ltd., Shanghai 200120, China

Abstract: With the rapid development of 5G network, the radiation safety of base stations is a hot issue of public concern. As 5G has the characteristics of high frequency band and large bandwidth, ultra-dense heterogeneous network applications are becoming more common. The impact of electromagnetic radiation from typical 5G base stations on the human body was analyzed, and the safety distances of base stations with different powers were calculated in detail. Based on various common 5G base station equipment forms such as outdoor macro stations, outdoor pole stations, telephone booth base stations, and indoor micro stations, the safe area of different scenarios was analyzed and theoretically calculated. The results were verified based on field test and specific networking planning recommendations were proposed.

Key words: 5G, electromagnetic radiation, base station, network planning

1 引言

目前 5G 网络相比于 4G, 使用更大的带宽、更高的频谱。为了保证覆盖效果, 一方面 5G 100 MHz 的带宽相比于 4G 20 MHz 的带宽需要 5 倍左右的

功率; 另一方面, 5G 主流使用的 3.5 GHz 频段相比于 4G 常用的 1.8 GHz 频段, 传播距离更短、穿透能力更弱, 需要部署更多的基站。因此, 需要引入超密集组网增强覆盖能力, 这也导致基站与公众活动区域间的距离更近。生活中随处可见的



5G 基站设备也使得公众开始关注 5G 辐射安全问题。

基于此，为了在满足辐射安全规范的情况下开展组网，需要从 5G 异构组网基站设备性能、电磁辐射原理、安全规范要求、典型室内外覆盖场景等方面开展相关研究分析，为在实际组网中避免辐射危害提供依据，指导 5G 规模建设过程中既能保证网络质量和用户感知，又能兼顾确保网络设备对公众电磁辐射安全。

2 超密集异构网络组网

超密集无线异构网络能够大幅提升无线网络容量与流量密度，被认为是 5G 网络的重要组网技术之一。5G 来临后，移动通信将会大量使用 3 GHz 以上频段，甚至是毫米波频段。基于宏基站蜂窝的传统组网方式已经无法满足高频段的需求，如图 1 所示，除宏基站以外，将引入电线杆（高杆）、路灯杆（低矮杆）、电话亭等异构站址，基站密度大幅增加。

5G 网络架构包括无线接入网和核心网。用户设备（user equipment, UE）发起业务，经过新空口（new radio, NR）到达无线接入设备，可以是有源天线处理单元（active antenna unit, AAU）、微型远端射频单元（pico remote radio unit, pRRU）、远端射频单元（remote radio unit, RRU），进入集中式单元/分布式单元（centralized unit/distributed unit, CU/DU）进行基带处理，经过 5G 核心网（5G core network, 5GC）转发至外部数据网络（data network, DN）。

在 5G 组网方案中，主要使用的无线接入设备类型、典型射频性能指标及典型应用场景见表 1。

由表 1 可见，各种组网设备发射功率、天线增益、设备与公众距离有较大差别，导致辐射强度也有较大差别。

3 电磁辐射影响与理论模拟计算

3.1 电磁辐射对人体影响与国家标准要求

移动网络通过无线电波通信，使用户可以随

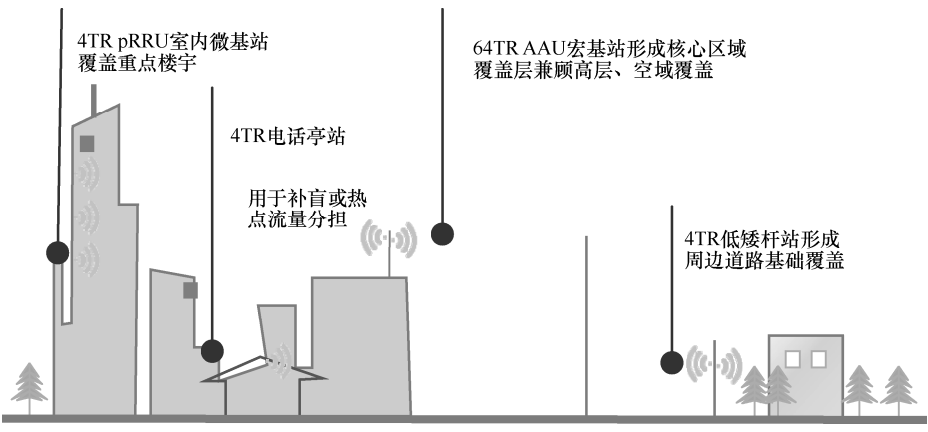


图 1 异构网络覆盖场景示意图

表 1 5G 网络无线覆盖设备类型典型射频性能指标及典型应用场景

设备类型	典型发射功率	典型天线增益	典型部署场景	设备与公众距离
AAU	100~200 W	22~25 dBi	室外宏基站	一般 100~500 m
RRU	80~200 W	15~17 dBi	室外高杆站（电线杆）	一般 20~200 m
小型 RRU	20~80 W	约 11 dBi	低矮杆站（路灯杆）、路边站（电话亭等）	一般 5~100 m
pRRU	0.5~2 W	约 5 dBi	室内分布	一般 2~20 m

时随地连接网络、沟通世界,已成为公众生活中一个重要的组成部分。包括 5G 在内的移动通信基站所发射的无线电波是电磁波的一种,但与 X 射线或 γ 射线辐射等电离辐射不同的是,无线电波不会打破化学键,也不会给人体造成电离辐射伤害。但鉴于移动电话用户普及率极高,公众对基站电磁辐射的关注度越来越高。

世界卫生组织过去 20 年来进行了大量研究,以评估移动电话是否具有潜在的健康风险。迄今为止,尚未证实移动电话的使用对健康造成任何不良后果,但认为各国相关部门应采取保护措施保护其公民避免有害强度的射频场对健康造成影响。

国家标准《GB 8702-2014 电磁环境控制限值》,规范了包括 5G 网络在内的电磁辐射环境影响的最高限值,详见表 2。

电场强度在数值上等于电场中某一点的单位电荷在那一点所受的电场力,理想电荷的电量、体积均充分小,可忽略它对电场分布的影响并精确描述各点的电场。功率密度指一个从放射源向

平面状物体照射时,每单位面积所得到的放射束数量的物理量。

电场强度 E 与功率密度 S_{eq} 以式 (1) 进行换算。

$$S_{eq} = \frac{E^2}{Z_0} \quad (1)$$

其中, Z_0 为自由空间的波阻抗,为 377Ω 。

后文将以应用较为普遍的功率密度为单位计算。

根据具体所用频段不同,不同运营商的频段辐射限值有些许的区别。根据安全原则,选取频段中能够得出最小功率密度限值的频率下沿进行计算,详见表 3。

3.2 模拟计算理论基础

根据目前国际上 5G 主要使用的 3.5 GHz 频段计算,以 $f=3\ 500\text{ MHz}$ 为例(对应的安全功率密度为 0.467 W/m^2),分析研究各种覆盖场景下辐射强度水平情况。

天线的辐射场分为 3 个区域,分别是电抗性近场、辐射近场(菲涅耳区)以及辐射远场(弗琅和费区)。其中电抗性近场为天线口径面至 $\lambda/2\pi$ (约 1.4 cm) 之间。辐射近场和远场边界如式 (2) 所示。

表 2 电磁环境控制限值

频率范围	电场强度 $E/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$	等效平面波功率密度 $S_{eq}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
30~3 000 MHz	12	0.4
3 000~15 000 MHz	$0.22f^{1/2}$	$f/7\ 500$

注: 1. 频率 f 的单位为所在行中第一栏的单位。

2. 0.1 MHz~300 GHz 频率,场量参数是任意连续 6 min 内的方均根值。

表 3 5G 移动通信各频段的电磁环境控制限值

运营商	频段/MHz	带宽/MHz	功率密度限值/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	电场强度限值/ $(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$
中国移动	2 515~2 675	160	0.4	12
	4 800~4 900	100	0.64	15.242
中国电信	3 400~3 500	100	0.453	12.82
中国联通	3 500~3 600	100	0.467	13.015
中国广电	703~743/758~798	40×2	0.4	12
中国电信、中国联通共建共享	3 300~3 400	100	0.44	12.638



$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2)$$

其中, D 为天线口径 (cm), λ 为波长 (cm)。

以 3.5 GHz 频段 AAU 为例, 天线口径为 9 cm, 近远场边界约为 19 cm。在实际案例中, 基本没有公众可到达设备天线附近 19 cm 范围内的场景, 因此本文仅讨论远场环境。

根据行业标准《HJ/T 10.2-1996 电磁辐射监测仪器和方法》, 微波频段远场轴向功率密度 (mW/cm^2) 计算式如式 (3) 所示。

$$P_d = \frac{PG}{4\pi r^2} \quad (3)$$

其中, P 为发射机平均功率 (mW), G 为天线增益 (倍数), r 为测量位置与天线轴向距离 (cm)。

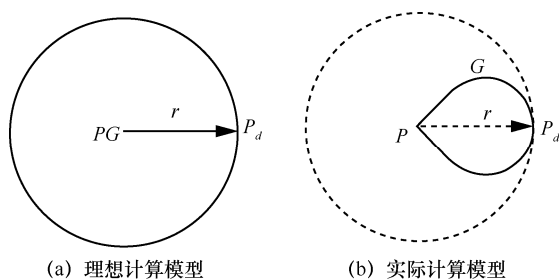


图2 远场轴向功率密度理想、实际计算模型

由图 2 可见, 根据球面波理想模型计算辐射强度值时, 设想在无限均匀介质中心存在一个全向发射天线, 向球面任意一点增益相同, 球面等距离各点距离发射机越远, 功率密度随球面面积增大而衰减越大。

在实际网络中, 多采用指向性较好的天线增强覆盖效果, 以减小与周边使用相同频率基站的干扰。因此, 主瓣正对方向, 不同距离、不同角度的功率密度可根据式 (3), 考虑天线增益后计

算得出, 可形成如图 2(b) 的模型。由于在现实环境中, 大气中的粉尘、水汽、人体、树木和建筑物等阻挡物均会对辐射强度造成不同程度的衰减, 所以, 实测值会明显低于理论值。

以中国电信、中国联通使用的 3.5 GHz 频段为例, 上下行采取 TDD 时分复用的工作方式, 采用 5 ms 双周期帧结构, 上下行时隙配比为 3:7, 基站只在下行时发射功率, 如图 3 所示。

由于上下行时隙转换周期 5 ms 远小于国家标准规定的辐射测量周期 6 min (见表 2 注 2), 所以基站发射功率长期平均值 $\approx$ 额定功率 $\times 70\%$ 。如果基站额定功率为 200 W, 计算时可将实际平均发射功率认为 140 W。

3.3 主瓣方向安全距离

根据 5G 覆盖典型设备的主要参数, 以 $0.467 \text{ W}/\text{m}^2$ 为限值标准, 基站上下行时隙配比 3:7, 按照表 1 所给定的天线增益计算, 主瓣方位安全距离及距离与功率密度关系如图 4 所示。

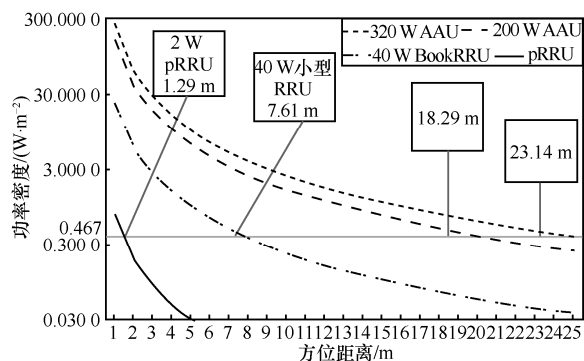


图4 典型覆盖设备主瓣方位距离 (m) 与功率密度 (W/m^2) 关系

4 典型场景安全区分析与理论计算

根据以上计算结果, 继续以 3 500 MHz 频点,

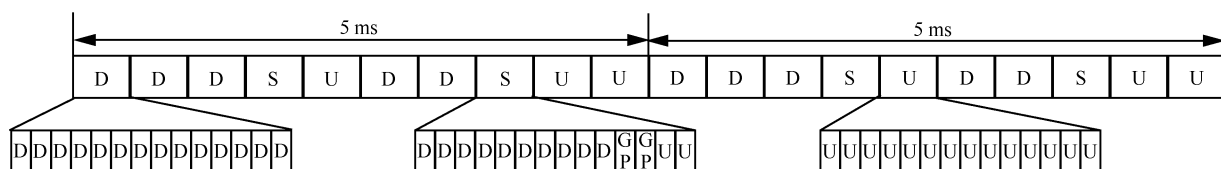


图3 3:7 双周期帧结构示意图

时隙配比为 3:7 的基站, 分析在高杆站、低矮杆站、电话亭基站、室内微基站等各场景的安全距离。

4.1 高杆站场景

典型高杆站天线增益示意图如图 5 所示。由图 5 可见垂直增益主波瓣位于垂直面约 95°方位, 增益 15 dBi, 第一下旁瓣位于垂直面约 120°方位, 增益约-3 dBi, 与主瓣差 18 dB (63 倍); 第二下旁瓣位于垂直面约 125°方位, 增益约-2 dBi, 与主瓣差 17 dB (50 倍)。由于距离基站较近的位置往往方位角大于 125°, 增益比主瓣低 17 dB 以上, 可忽略不计, 仅需根据主瓣计算安全距离。

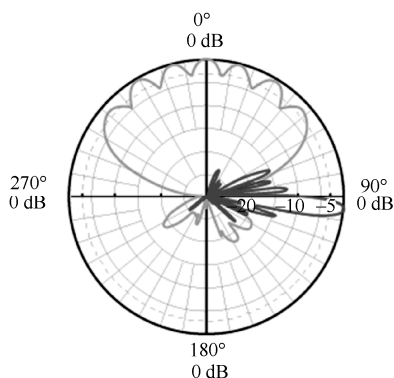


图 5 典型高杆站天线增益

如图 6 所示, 典型高杆站场景主要考虑水平安全距离, 主要保护天线正对方向建筑等可能在主瓣正对方向公众活动区域的安全。主瓣方向角及主瓣安全距离共同影响水平安全距离。

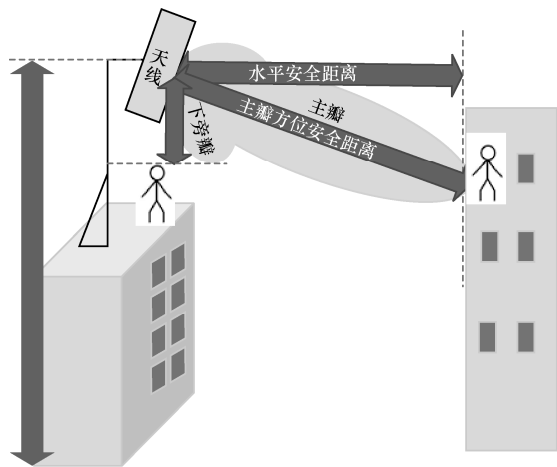


图 6 典型室外宏基站场景

根据图 4 可得天线的主瓣方向安全距离, 高杆站天线主瓣安全距离为 27.49 m。以综合下倾角 15°计算, 水平安全距离为 26.55 m。据此, 在天线正对方向, 与基站距离 26.55 m 范围内不应存在相同高度或略低于基站的有人建筑物。

此外, 高杆站天线挂高一般在 20 m 以上, 下倾角一般不大于 15°。天线旁瓣的增益显著低于主瓣 15 dB 以上, 无须考虑对于近点地面的辐射。

4.2 低矮杆站场景

如图 7 所示, 低矮杆站场景主要有最低安全挂高和水平安全距离两项。最低安全挂高, 主要保护在低矮杆场景中, 在地面近点活动公众的安全; 水平安全距离, 主要保护天线正对方向建筑内活动公众的安全, 可以通过主瓣安全距离计算水平安全距离及天线最低挂高。

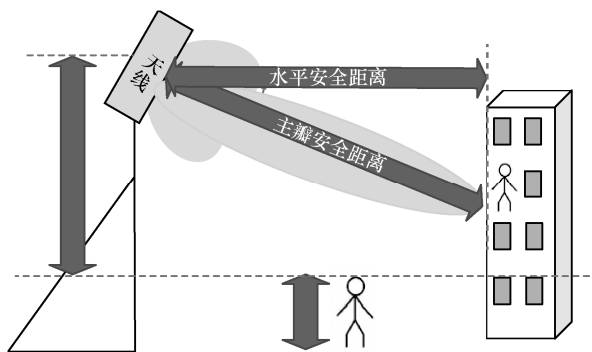


图 7 典型低矮杆站场景示意图

根据图 7 可得, 40 W 小型 RRU 的主瓣方向安全距离为 7.75 m, 以天线挂高 15 m、综合下倾角 15°计算, 水平安全距离为 7.48 m。据此, 在天线正对方向, 与基站距离 7.48 m 范围内不应存在相同高度或略低于基站的有人建筑物。

如果由于客观因素受限, 天线挂高低于 15 m, 可计算最小安全挂高:

$$\begin{aligned} \text{最小安全挂高} = & \\ & \text{主瓣安全距离} \times \sin\theta + \text{人体高度} \end{aligned} \quad (4)$$

根据国家规范, 人体高度考虑为 1.7 m, 下倾角为 15°的情况下, 最小安全挂高为 3.7 m。由图 8 可



见塔下近点天线增益约为 -5 dBi 以下，计算可得该位置功率密度小于 0.10 W/m^2 ，符合安全要求。

4.3 电话亭基站

由于 5G 电话亭基站天线挂高无法调整，仅为 2.2 m ，距离公众更近，此类基站的辐射问题，得到了社会的广泛关注。

由图 8 可见垂直增益主波瓣位于垂直面约 7° 方位，增益 12 dBi ，第一下旁瓣位于垂直面约 15° 方位，增益约 0 dBi ，与主瓣差 12 dB （16 倍）；由于电话亭的限制，主要通过使用优化发射功率的方法控制辐射强度。

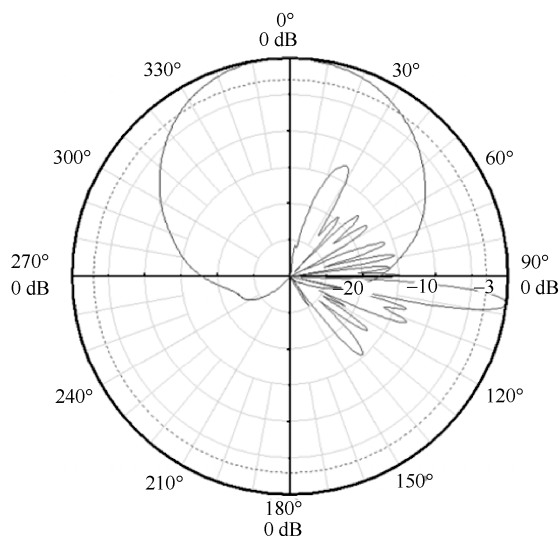


图 8 典型小型 RRU 天线垂直增益

根据图 9，在公众位于电话亭门口时，约在第一下旁瓣方位，天线距人体约为 0.7 m （水平距离约为 0.5 m ），天线增益约为 0 dBi ，同时考虑电话亭玻璃钢美化罩造成约 5 dB 的衰减，根据前文功率密度计算式，需优化发射功率至 8 W 以内，就能控制辐射强度至 0.45 W/m^2 以内。

同时由于电话亭基站一般位于密集城区，天线主瓣方向辐射可能影响附近略高于地面位置的安全，例如附近存在台阶或自动扶梯等情况。需要额外考虑主瓣方向安全距离，在 8 W 功率下主瓣安全距离为 3.46 m 。据此，在天线正对方向，与基站距离 3.46 m 范围内应保持地面相对平整，

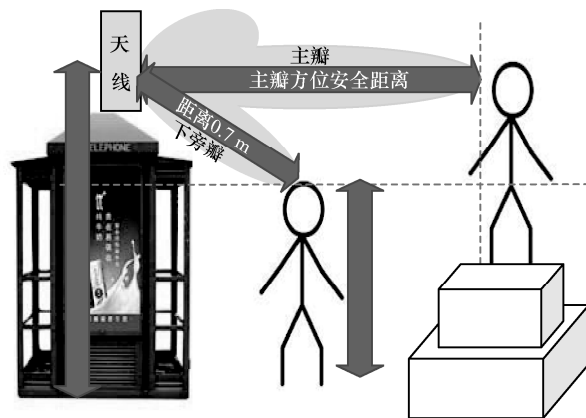


图 9 典型电话亭站点场景

或电话亭高于附近地面，避免主瓣照射高台、扶梯等公众可能到达的高处位置。

在电话亭内，由于人体与天线间存在不锈钢顶板阻挡，衰减在 30 dB （1000 倍）以上，且该处天线增益低于 0 dBi ，故无须考虑该处辐射问题。

4.4 室内微基站理论计算

室内微基站多采用 pRRU 覆盖，设备大多为吸顶安装，主瓣垂直向下方辐射，如图 10 所示。

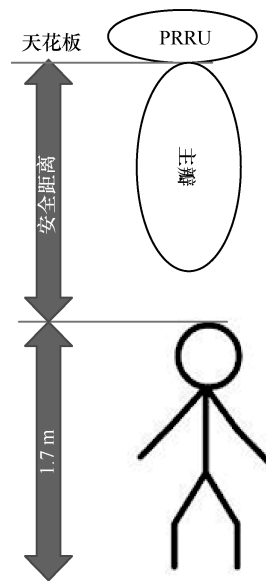


图 10 室内微基站天线示意图

由于室内场景公众可达的最短距离在设备正下方，垂直安全距离和主瓣安全距离一致。pRRU 安装高度应大于辐射安全距离+人体高度（ 1.7 m ），

常见 pRRU 射频指标与安全距离见表 4。

以额定发射功率 2 W、天线增益 5 dBi 的典型 pRRU 计算,安全距离为 0.869 m。工程实践中 pRRU 天线安装的高度应大于 2.569 m。若层高较低,可通过相应地降低 pRRU 功率控制辐射强度低于安全限制,如降低到 0.5 W,那么辐射值与有吊顶阻挡时高度相当。

考虑到大部分场景室内天线安装位置与公众可达位置间存在有石膏板、细木工板等装饰吊顶材料阻挡,一般衰减为 5~13 dB,为充分考虑安全防护,以理想的 3 dB 衰减来计算,最低安装高度为 2.134 m,明显低于大多数商业建筑层高。

5 实地测试验证

根据以上理论分析结果,针对室外宏基站场景、室外杆站场景、电话亭场景和室内微基站分别进行现场测试验证。根据国家标准,测试中国电信 3 400~3 500 MHz 基站,单次测试时间为 1 min,取 6 次测试平均值得到最终结果。

从结果来看,由于理论计算基于理想环境,而现场环境中影响因素较多,实测值相比理论值略小。

5.1 典型高杆站场景测试情况

选取典型自立杆塔站型场景,使用 RRU+外置天线,发射功率 200 W,天线增益 15 dBi,天线挂高约 25 m,下倾角 15°。由于现场无法找到高空位置测试,主要测试地面辐射情况。测试设备放置在距地面 1.7 m 进行测试(考虑人体高度 1.7 m)。测试结果见表 5,均符合安全规范。

5.2 低矮杆站场景测试情况

选取典型低矮杆站场景,使用小型 RRU,发射功率 40 W,天线增益 11 dBi,下倾角 15°,天线挂高 15 m。由于杆站无法找到高空位置测试,主要测试地面辐射情况。测试设备放置在距地面 1.7 m 进行测试(考虑人体高度 1.7 m)。测试结果见表 6,均符合安全规范。

5.3 典型电话亭基站场景测试情况

选取典型电话亭基站场景,覆盖设备为小型 RRU,天线挂高 2.2 m,增益 11 dBi,功率计算结果设为 8 W,有一层玻璃钢美化罩阻挡(衰减值 5 dB 以上)。测试设备天线高度 2.2 m,位于主瓣正对方位。由于美化罩导致实测值低于理论值,理论值-5 dB(3 倍)衰减后,与实测值基本契合。测试结果见表 7。

表 4 常见 pRRU 射频指标与安全距离(天线增益: 5 dBi)

发射功率/W		0.5	1	1.5	2
无吊顶阻挡	安全距离/m	0.434	0.614	0.753	0.869
	最低安装高度/m	2.134	2.314	2.453	2.569
有吊顶阻挡	安全距离/m	0.217	0.307	0.376	0.434
	最低安装高度/m	1.917	2.007	2.076	2.134

表 5 室外场景地面实测值

地面与天线水平距离(天线正对方向)		约 5 m	约 10 m	约 15 m
功率密度/(W·m ⁻²)	实测值	0.085	0.061	0.007

表 6 杆站场景地面实测值

与天线水平距离(天线正对方向)		约 4 m	约 6 m	约 8 m	约 10 m	约 12 m
功率密度/(W·m ⁻²)	实测值	0.123	0.078	0.033	0.011	0.008



表 7 电话亭场景主瓣方向实测值

与天线水平距离（天线正对方向）		电话亭内	距电话亭约 1 m	距电话亭约 2 m	距电话亭约 4 m
功率密度/(W·m ⁻²)	理论值	/	5.61	1.4	0.35
	-5 dB 理论值	/	1.86	0.46	0.20
	实测值	0.067 4	1.486	0.25	0.10

表 8 电话亭场景优化功率后公众可达位置辐射强度实测值

与天线水平距离（天线正对方向）		电话亭内	距电话亭 0.5 m	距电话亭 1 m	距电话亭约 2 m	距电话亭约 4 m
功率密度/(W·m ⁻²)	发射功率 4 W	0.028	0.020	0.255	0.073	0.016
	发射功率 8 W	0.067	0.088	0.386	0.116	0.032
	发射功率 40 W	0.166	0.174	2.549	0.753	0.203

表 9 室内场景功率密度实测值

		2 W		1 W	
		设备正下方约 0.4 m	设备正下方约 0.7 m	设备正下方约 0.4 m	设备正下方约 0.7 m
功率密度/(W·m ⁻²)	无吊顶	0.702	0.406	0.351	0.224
	有吊顶	0.244	0.150	0.146	0.089

然后进行公众可达位置、配置不同的发射功率测试，测试设备天线高度 1.7 m。测试结果见表 8，在功率低于 8 W 的情况下，测试结果均符合安全规范。

最后，在 8 W 功率下，进行覆盖效果测试。测试结果如图 11 所示。线条为 RSRP，色块表示 SINR，可见在功率降低至 8 W 的情况下，仍能保证 100 m 内的覆盖效果，可以发挥对电话亭站的设计要求，有效起到补盲疏忙的作用。

5.4 典型室内覆盖场景测试情况

选取典型室内覆盖场景，覆盖设备为 pRRU，天线挂高 2.6 m，增益 5 dBi。首先使用升降测试设备天线高度的方法测试各高度的功率密度。测试结果见表 9。在 2.5 m 净高（考虑人体高度 1.7 m）时辐射安全；在 1 W 发射功率下，辐射也安全。

然后进行覆盖效果测试，测试结果见表 10。

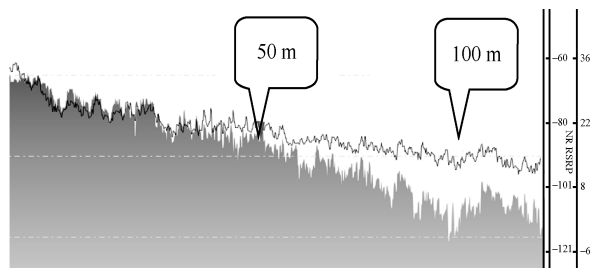


图 11 电话亭场景覆盖效果实测值

在发射功率降低至 1 W 的情况下，仍能保证 30 m 内的 RSRP 大于 -100 dBm，覆盖效果良好，足够满足 pRRU 布放间距的设计要求。

6 结束语

经过以上分析和现场测试，为了有效地兼顾公众电磁辐射安全和 5G 网络覆盖质量，对于 5G 网络规划有如下主要建议。

- 高杆站建设位置，应该距离建筑物 26.55 m 以上。
- 低矮杆站建设位置，应该距离建筑物

表 10 室内场景覆盖效果实测值

		2 W		1 W	
		距设备约 15 m	距设备约 30 m	距设备约 15 m	距设备约 30 m
无吊顶	RSRP	-75.2	-80.3	-79.7	-82.8
	SINR	15.2	12.4	18.2	12.1
有吊顶	RSRP	-80.5	-87.1	-91.2	-97.6
	SINR	13.2	11.9	17.0	11.6

7.48 m 以上, 最小挂高 3.7 m 以上。

- 电话亭基站建设位置, 应该距离周边高台(台阶、扶梯等) 3.46 m 以上; 发射功率不超 8 W; 电话亭应采用金属作为顶, 隔离基站辐射。
- 室内覆盖 pRRU 建设位置, 在无吊顶阻挡的情况下, 挂高应高于 2.5 m, 或者降低功率到 1 W 以下。

如果建筑物正对基站的墙面没有窗户、阳台等, 可以不考虑间隔距离。

随着 5G 无线网络建设快速推进, 公众对于基站辐射高度关注。合理部署基站位置, 打造高效、绿色的 5G 网络, 实现网络与环境的协调发展, 造福大众。诚然, 5G 发展刚刚起步, 新的站型会不断出现, 辐射安全问题研究也需要与时俱进, 在大规模组网中进一步对各类设备、各种场景进行科学的分析测试, 同时确保用户良好感知和公众健康安全。

参考文献:

- [1] 许浩, 李辰. 5G 室内覆盖规模部署研究与思考[J]. 电信科学, 2020, 36(S1): 38-44.
XU H, LI C. Research and consideration on 5G indoor coverage scale deployment[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(S1): 38-44.
- [2] 许浩, 张儒申. 5G 组网架构对比与演进方案[J]. 电信科学, 2020, 36(S1): 1-6.
XU H, ZHANG R S. Comparison and evolution of 5G network architecture[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(S1): 1-6.
- [3] 张卢华, 许浩, 卞轶杰. 重要城市场景 5G 组网的挑战与思考[J].

电信科学, 2020, 36(S1): 7-14.

ZHANG L H, XU H, BIAN Y J. Challenges and thoughts of 5G networking in important urban scenarios[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(S1): 7-14.

- [4] 环境保护部. 电磁环境控制限值: GB 8702-2014[S]. 2014.
Ministry of environmental protection. Electromagnetic radiation protection regulations: GB 8702-2014[S]. 2014.
- [5] 国家环境保护局. 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[S]. 1996.
State Environmental Protection Administration. Guidelines for the administration of radiation environmental protection - Methods and standards for environmental impact assessment of electromagnetic radiation: HJ/T 10.3-1996[S]. 1996.
- [6] 国家环境保护局. 辐射环境保护管理导则—电磁辐射监测仪器和方法 评价方法与标准: HJ/T 10.2-1996[S]. 1996.
State Environmental Protection Administration. Guidelines for the administration of radiation environmental protection - evaluation methods and standards for electromagnetic radiation monitoring instruments and methods: HJ/T 10.2-1996[S]. 1996.
- [7] 世界卫生组织. 基台和无线电技术[R]. 2006.
World Health Organization. Base station and radio technology[R]. 2006.

[作者简介]



许浩(1981-), 男, 中国电信股份有限公司上海分公司高级工程师, 主要从事移动网技术研究工作, 包括 4G/5G 无线网、核心网的架构、参数以及新技术应用等。

曹弘毅(1990-), 男, 中国电信股份有限公司上海分公司工程师, 主要从事移动网优化技术工作, 包括 4G/5G 无线网技术、无线网优化策略制定分析、干扰与辐射问题研究等。