



5G 毫米波终端测试方法及分析

宫剑¹, 张宇²

(1. 国家无线电监测中心检测中心, 北京 100041;
2. 中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘要: 在 5G 毫米波终端空口 (over the air, OTA) 射频一致性测试中, 等效全向辐射功率 (effective isotropic radiated power, EIRP) 和总辐射功率 (total radiated power, TRP) 类测试是重要的 OTA 测试项。目前依靠 3GPP 定义的随机扫描锁定最大波束的方式决定最大 EIRP 和 TRP, 但该方法既耗时又缺乏准确性。提出一种非信令的测试方法, 相比于目前的 EIRP、TRP 测试方法, 不仅提高了准确性, 而且使得非方向性 OTA 场地作为测量环境成为可能, 进一步降低了测试成本和时间成本, 并增加了测试环境选择的灵活度。

关键词: 等效全向辐射功率; 总辐射功率; 最大波束方向搜索; 波束编号; 混响室

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023025

5G millimeter wave UE test method and analysis

GONG Jian¹, ZHANG Yu²

1. The State Radio Monitoring Center Testing Center, Beijing 100041, China
2. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

Abstract: In the 5G millimeter wave UE OTA RF conformance test, EIRP and TRP type of tests are important OTA items. Currently, this method relying on 3GPP-defined random scan to lock the beam to determine the maximum EIRP and TRP, but this method is time-consuming and lacks accuracy. A non-signaling test method was proposed, which could not only achieve more accurate measurements compared with the current EIRP and TRP test methods but also make it possible to use the non-directional OTA site as the measurement environment, further reducing the test cost and time cost, and increasing the flexibility of the test environment selection.

Key words: EIRP, TRP, beam peak search, Beam ID, reverberation chamber

0 引言

随着国际电信联盟 2019 年世界无线电通信大会 (WRC-19) 确定 5G 毫米波标识的频段 24.25~27.5 GHz (26 GHz)、37~43.5 GHz (40 GHz)、

66~71 GHz 用于 5G 及国际移动通信系统 (IMT) 未来发展^[1], 各国加快 5G 毫米波的频率特性研究^[2]和频段规划部署及研发试验。我国工业和信息化部无线电管理局起草了《中华人民共和国无线电频率划分规定》修订征求意见



见稿,并于2022年7月31日前向社会公开征求了意见。其中也包含若干对毫米波频段用于IMT的修订。由于我国在国际5G发展中的持续引领地位,毫米波作为5G向6G的过渡,以及其在5G组网和应用上的重要体现,各设备厂商、测试机构、标准组织也在积极地推进与5G毫米波相关的研究和实验。

由于5G毫米波设备已经不存在传导测量的天线连接口,所有的测试项均需要在空口(over the air, OTA)的环境下进行,基于OTA的射频测试将迎来更大的挑战,在原理、方法、效率等方面都需要进行新的探索^[3-4]。近年来,学术界和产业界已对5G毫米波OTA射频测试和性能测试的若干关键问题开展积极的探索研究,探索精确、高效、实用的测试方法和测试系统^[5-6]。

3GPP中对5G OTA测试系统进行了定义,目前真正可用于OTA测试的场地主要有:远场、紧缩场、平面波合成器(PWS)、混响室和近场等。对于不同的被测设备以及测试项,选择上会有些不同。对于5G毫米波终端的测试环境,3GPP目前规定了远场、紧缩场、近场等,但仍然不成熟,还在不断地研究和改进。由于没有一种场地可以兼容所有的测试例,因此测试成本提高,测试方法复杂化。

EIRP和TRP类测试是重要的OTA测试项,在3GPP TS38.521-2 5G毫米波终端OTA射频一致性总辐射功率(total radiated power, TRP)类测试项的测量步骤中^[7],规定了在波束锁定模式(beam lock mode)下进行测试,测试指标为TRP。具体操作为,在方向性暗室中,扫描整个球面上各角度点并锁定当前波束,得到各点锁定波束下的EIRP的搜索值,将最大搜索值作为等效全向辐射功率(effective isotropic radiated power, EIRP)最大值结果;在测量TRP时,将最大EIRP所对应的波束锁定,重新扫描球面各点再积分得到TRP。因此,无论是最大EIRP还是TRP的测量都是非常耗

时的测试。

本文首先对3GPP标准定义的测试方法进行研究,分析了这种方法的局限性。后提出了一种新的测试方法并与3GPP方法进行了对比分析。

1 3GPP标准中规定的EIRP/TRP测试方法及问题

3GPP TS38.521-2是对5G毫米波终端的OTA射频一致性的测试要求和测试方法的标准规定。其中,最大带内TRP输出功率、带外辐射(out of band emission)(包括频谱发射模板(SEM)和邻道泄漏比(ACLR)),以及杂散发射等都需要测量TRP作为衡量指标,它们被统称为TRP类测试项。对于TRP类测试项,在方向性暗室紧缩场或远场^[8]中需要扫描整个球面的若干点的EIRP,再根据式(1)计算出TRP的最终结果:

$$\text{TRP}_{\text{Estimate}} = \frac{\pi}{2NM} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} (\text{EIRP}_{p1}(\theta_n, \phi_m) + \text{EIRP}_{p2}(\theta_n, \phi_m)) \sin \theta_n \quad (1)$$

其中, $\text{EIRP}_{p1}(\theta_n, \phi_m)$ 和 $\text{EIRP}_{p2}(\theta_n, \phi_m)$ 分别表示两个极化在相应角度点的EIRP测量结果。 (θ_n, ϕ_m) 为球坐标系中不同点的方位和极化角度。角度的步进间隔取决于波长 λ 和被测终端尺寸 D ,如式(2)所示。

$$\Delta\phi_{\text{ref}} = \min\left(\frac{180^\circ}{\pi} \frac{\lambda}{D_{\text{cyl}}}, 15^\circ\right) \quad (2)$$

$$\Delta\theta_{\text{ref}} = \min\left(\frac{180^\circ}{\pi} \frac{\lambda}{D}, 15^\circ\right) \quad (3)$$

其中, D 为包围所有被测天线辐射单元的最小球体的直径, D_{cyl} 为包围所有被测天线辐射单元的最小Z向圆柱的直径。

EIRP在三维球面的采样点网格示意图和二维平面采样点网格示意图如图1所示。

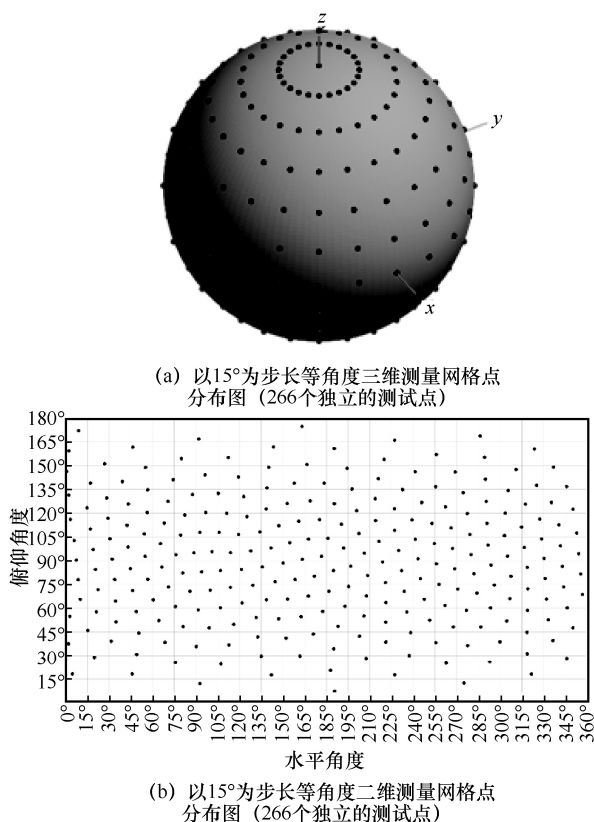


图1 EIRP在三维球面的采样点网格示意图和二维平面采样点网格示意图

然而, 应该选取哪一种波束方向图进行这一扫描呢? 在3GPP TS38.521-2的附录K1.1中定义了发射波束峰值方向的搜索过程, 在扫描带内TRP之前, 需要先进行最大波束方向的搜

索。然后根据一次性扫描的结果, 选中测得的最大EIRP功率的波束所对准的方向进行波束锁定, 同时将此EIRP作为最大EIRP的结果, 并基于此波束锁定的方向图进行带内TRP及带外辐射、杂散等射频项的测量。K1.1的最大EIRP波束搜索的测量结果部分见表1, 是一个实测扫描的记录表格, 由于总共需要进行266个点(实际还要考虑下行和上行天线极化, 实为 $266 \times 2 \times 2 = 1\,064$ 个测量值)的波束锁定扫描, 所以表格过长, 这里仅截取部分结果进行说明。

表1是在以15°为间隔下进行扫描的, 在不同的 (θ_n, ϕ_m) 角度下, 分别进行下行和上行两个天线极化的扫描和测量, 将图1中的所有266个点扫描完毕后, 找到最大的扫描点, 即表1中方框所框出的数值, 当 $(\theta_n, \phi_m) = (60^\circ, 120^\circ)$ 时, 在下行天线的H极化上取得EIRP最大值29.052 dBm, 那么在此角度和极化下进行波束锁定, 并将其对应的波束方向图作为测量带内TRP及其带外指标的波束方向图。上述3GPP规定的测试方法存在以下问题: 传统意义上的最大发射功率及带外辐射或杂散测试, 都应基于带内最大发射功率的前提。由于5G毫米波终端可能会存在多于一个的天线模组和阵列, 5G毫米波终端天线模组示例如图2所示。

表1 K1.1的最大EIRP波束搜索的测量结果部分

俯仰角度 θ	水平角度 ϕ	测量的俯仰角度 EIRP/(dBm·IBW ⁻¹)	测量的水平角度 EIRP/(dBm·IBW ⁻¹)	测量的总 EIRP/(dBm·IBW ⁻¹)
15°	180°	20.643 783 57	19.265 953 06	23.019 581 47
15°	180°	20.637 414 93	19.237 966 54	23.004 117 38
15°	195°	19.488 574 98	17.191 644 67	21.500 524 54
15°	195°	14.953 868 87	8.7930 822 37	15.895 291 33
...	...	...	...	...
60°	135°	27.348 026 28	21.880 941 39	28.433 617 18
60°	135°	27.26 658 63	21.870 090 48	28.367 888 72
60°	120°	27.007 026 67	24.798 971 18	29.052 141 44
60°	120°	26.368 812 56	25.11 602 02	28.797 734 09
...	...	...	...	...

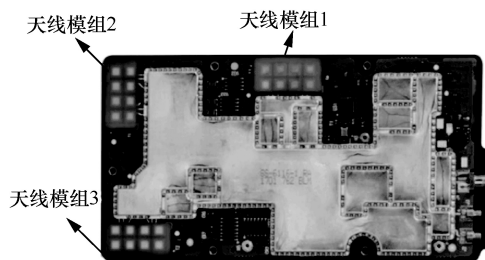


图2 5G毫米波终端天线模组示例

仅通过一次 K1.1 扫描确定峰值 (peak) EIRP 的波束方向图, 无法保证当前测量的峰值 EIRP 一定是毫米波终端的最大 EIRP, 其所对应的方向图扫描计算出来的 TRP 也同样无法保证是最大的。因为每一次扫描所确定的所谓的最大 EIRP, 可能只是在不同的天线模组中随机选取的某个 Beam ID 所对应的值。某终端在同一频段带宽下, 不同天线 ID 在不同 Beam ID 情况下的最大 EIRP 测量值举例见表 2。对于天线 ID1、ID2、ID3, 所测量出来的最大 EIRP 值分别为: 29.29 dBm、28.21 dBm 和 33.50 dBm。所以 3GPP 中 K1.1 的搜索方法, 只是在某一个角度位置上, 触发了码本 (codebook) 中的某一个 Beam ID, 然后进行锁定并测量, 无法保证所触发并测量的 EIRP 就是所有波束中最大的 EIRP, 也无法保证锁定的波束方向图经过扫描后, 对应了最大的 TRP。

表2 不同天线 ID 在不同 Beam ID 情况下的最大 EIRP 测量值举例

频段/带宽	天线 ID	Beam ID	测量的最大 EIRP/dBm
n258/100 MHz	1	1	24.98
n258/100 MHz	1	2	29.29
n258/100 MHz	1	13	25.32
n258/100 MHz	2	3	25.35
n258/100 MHz	2	9	23.93
n258/100 MHz	2	14	28.21
n258/100 MHz	3	5	26.46
n258/100 MHz	3	8	33.50
n258/100 MHz	3	16	27.24

2 非信令的 EIRP/TRP 测量方法

根据上述分析, 本文提出使用非信令的方法

通过厂商声明的方式进行 EIRP 和 TRP 类的测试, 更加准确。即毫米波终端厂商对自己的天线模组进行声明, 通过芯片控制软件, 选取其中较大的 EIRP 对应的 Beam ID 进行非信令的控制发射, 得到若干组 EIRP, 从中选取最大的 EIRP 对应的 Beam ID 进行相应的带内 TRP, 以及带外 TRP 类项目的测量。某厂商的 5G 毫米波芯片控制软件发送 Beam ID 等配置测量功率的示例如图 3 所示, 其中 Beam ID 和相关参数都可以进行软件设置。

载波	Carrier 0
射频模块	Tx on MIMO Chain 0(44)
Beam ID	10
动作	Start Waveform(1)
波形	PUSCH DFT-S(11)
调制	QPSK(0)
功率/mW	250
起始RB	22
RB数量	20

图3 5G毫米波芯片控制软件发送 Beam ID 等配置测量功率的示例

5G 毫米波终端 EIRP 及占用带宽的测试示例 (100 MHz-1CC-QPSK) 如图 4 所示, 是在图 3 的某种设置下, 使用频谱分析仪测得的带内功率和占用带宽的截图。可以通过这种方法寻找到最大的带内 EIRP。

3 两种方法的对比分析

两种方法的对比分析主要包括以下几个方面。

第一, 测试的准确性。正如前面所述, 3GPP 所述方法在确定最大 EIRP 的波束方向上存在不确定性。而采用软件控制 Beam ID 发送波束的方式, 可以遍历所有波束场景, 确定找到真正最大的 EIRP。

第二, 测试场地的选择。3GPP 所提供的测试方法使得测试场地的选择受限。由于必须要精确地测量 EIRP, 只能选择方向性的 OTA 暗室, 如紧缩场、远场等进行测量。这导致系统造价提高, 测试的灵活性受限。如果选用非信令的测试方法, 则可以选择非方

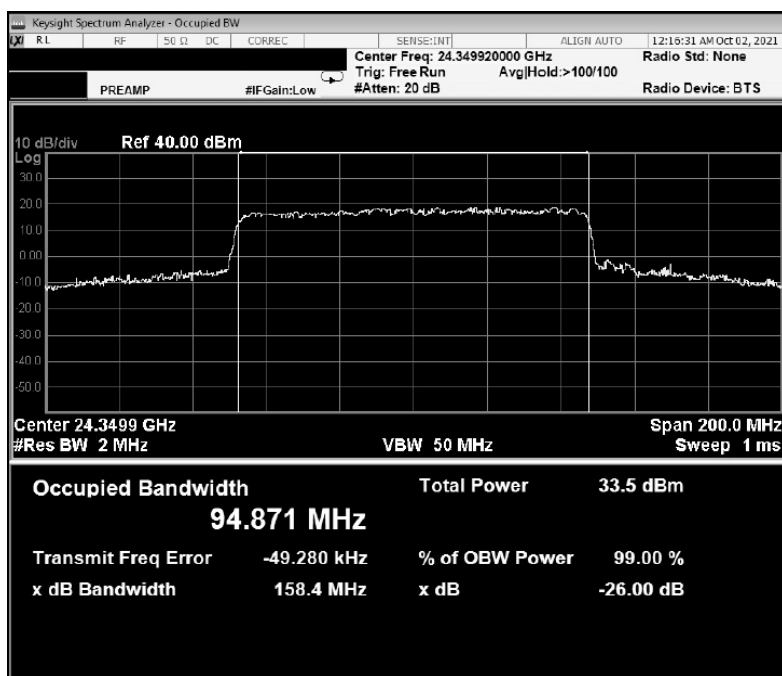


图4 5G 毫米波终端 EIRP 及占用带宽的测试示例 (100 MHz-1CC-QPSK)

向性 OTA 测试场地, 如混响室进行 TRP 类测试。混响室不光测试时间短, 效率非常高, 而且在建设成本上相比于紧缩场和远场也有很大的优势。

紧缩场测试系统示意图如图 5 所示, 混响室测试系统示意图如图 6 所示。与紧缩场不同, 混响室是通过搅拌器的搅拌, 在高品质因数的屏蔽壳体内, 不断改变内部电磁场结构, 使其内部任意位置的电磁场能量密度、相位、极化和来波方向均按照某一统计分布规律随机变化。被测设备的测试过程是搅拌器变化周期内的时间积分平均值响应, 即足够多模式被搅拌后在测试区域能实现统计上的均匀场。因此在混响室内可以进行 TRP 类的测量, 但无法进行准确的方向性 EIRP 类测试^[9]。

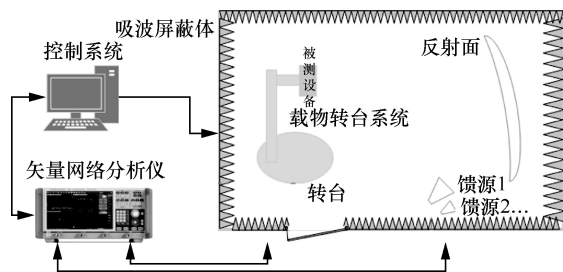


图5 紧缩场测试系统示意图

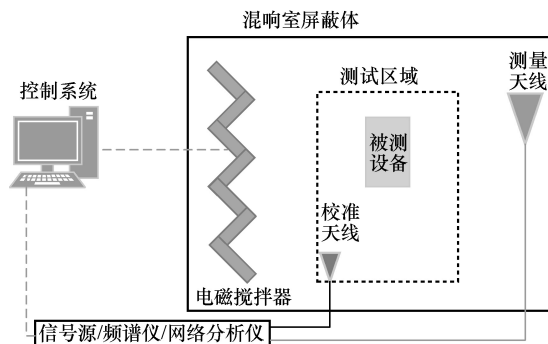


图6 混响室测试系统示意图

第三, 测试仪表的选择。使用 3GPP 所提供的测试方法, 只能使用基站模拟器, 即综合测试仪与 5G 毫米波终端进行信令连接并进行扫描测试, 每次更换一个角度, 都需要有一次释放以及重新锁定波束的过程。目前的综合测试仪无法得知具体锁定了哪一个 Beam ID, 并且 5G 毫米波综合测试仪的造价昂贵, 连接复杂。最重要的是, 5G 毫米波信令连接的过程中, 建链失败率较高, 非常耗时, 导致测试的稳定性变差, 进一步增加了测试的不确定性。而非信令的测试方式, 可以选择频谱仪等测量仪表, 连接方便简单, 提高了稳定性同时降低了测试难度。



第四,测试时间。3GPP 中的测试方法,进行 K1.1 的波束扫描,带来了额外的测试时间,目前业界大概能做到的是 1 h 左右。并且在方向性暗室进行 TRP 类测试项的扫描时间也会变得更长。如果知道确切最大 EIRP 所对应的 Beam ID,并采用混响室进行 TRP 测量,则可以大大节省 TRP 类测量项的测试时间。

混响室由于其特殊的测试原理和测试方法,可以极大地缩减 TRP 类测试项的测试时间。如式(4)、式(5)所示,混响室计算 TRP 的计算式如下^[10]:

$$\text{TRP}_{\text{UE}} = \frac{\eta M_1^{(r)}}{P^{(r)}} P_{\text{UE}} \quad (4)$$

其中,

$$P_{\text{UE}} = \frac{\langle |U_{\text{UE}}|^2 \rangle}{50} \quad (5)$$

U_{UE} 为被测终端发出功率后,接收端收到的能量,本身即可等效成 TRP。不需要像在方向性暗室中逐点进行 EIRP 扫描再进行积分计算的方法,连续采集多个功率的样本进行平均即可得到 TRP 数值。紧缩场/远场测试 5G 毫米波终端测试时长统计举例见表 3。表 3 中例举了最大输出功率、频谱辐射模板和杂散发射的 TRP 测试在所选择的测试配置下的测试时长统计,这 3 项测试总时长在紧缩场/远场中已经超过 40 h,尤其是杂散 TRP 测试,由于扫描频段较多,例如,从 6~67 GHz,需要进行多段的分段扫描,导致测试时间大大增

加。除此之外,还有初始的 K1.1 扫描以及其他定向测试项目的时间。而在混响室中 3 个项目在同样配置下,总时长不超过 3 h。

4 结束语

OTA 测试始终被认为是复杂而又成本高昂的测试,5G 毫米波终端由于无法提供射频接口导致所有测试都只能在 OTA 的环境下才能进行,而不同的 OTA 测试环境又各自有自己的优势和局限性。想只用一种场地解决所有的测试项,目前看是不现实的。所以需要研究更多有效的测试解决方案去实现低成本和时间优化的测试系统和场地的组合方案。

OTA 测量项分为方向性和非方向性。以最大 EIRP 为代表的 5G 毫米波终端测量项,包括最小发射功率、矢量误差幅度等,均是方向性 OTA 测量项;以 TRP 为代表的 5G 毫米波终端测量项,包括带内发射总功率、关功率、杂散、邻道泄漏比、频谱发射模板等,均是非方向性的 OTA 测量项。这些测试对 5G 毫米波终端的射频性能都具有重要的意义,因此它们的测试准确度和测试时间成本也非常重要。

目前,对于最大 EIRP 的测试,3GPP 规定的测试方法是通过执行一定角度间隔的全球扫描进行波束锁定下的峰值搜索,最大 TRP 测试是在此搜索的基础上锁定最大 EIRP 对应的波束,再次进行全球各点的 EIRP 扫描从而得出 TRP。以上过程均为基于信令的测试,而且只能在方向性暗室中进行测

表 3 紧缩场/远场测试 5G 毫米波终端测试时长统计举例

TRP 检测项目	测试配置	紧缩场/远场测试时长	混响室测试时长
最大输出功率	测试信道: 低、中、高 测试带宽: 最低、100MHz、最高 调制方式和 RB 配置: 1 种	25×3×3=225 单配置耗时: 25 min	3×3×3=27 单配置耗时: 3 min
频谱辐射模板	测试信道: 中 测试带宽: 最低、最高 调制方式和 RB 配置: 5 种	25×2×5=250 单配置耗时: 25 min	3×2×5=30 单配置耗时: 3 min
杂散发射	测试信道: 低、高 测试带宽: 最高 调制方式和 RB 配置: 2 种	500×2×2=2 000 单配置耗时: 500 min	10×2×5=100 单配置耗时: 10 min
时长总计	上述配置	40 h	2.5 h

量,无论是从精确度还是时间成本上来说都存在缺陷。本文通过具体分析非信令的测试方法,即利用芯片的控制软件来控制发射较大 EIRP 的波束进行对比测量,不仅可以做到更加精确,而且在 OTA 场地选择上可以增加非方向性的混响室作为测量场地,使得测试成本和时间成本都进一步降低。相比于 3GPP 定义的 EIRP、TRP 测试方法,本文方法在测试的准确性、测试场地和测量仪表选择的灵活性以及测试时间上均存在一定优势。

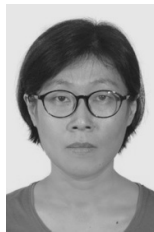
美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)实验室也同样接受非信令的测试方法作为 5G 毫米波终端验证手段。此外,3GPP 规范已将混响室作为 5G 基站 OTA 测试场地。CTIA 也已将混响室写入 5G 等终端的测试规范^[11]。选择混响室作为 5G 毫米波终端 TRP 类测试项的 OTA 测量环境,将会大大节省测试时间与测试成本。

毫米波技术除了在 5G 中得到充分利用外,在 6G 中也将发挥重要作用^[12],所以 5G 毫米波设备的测试手段也同样将影响未来 6G 设备。研究使用更加高效、低成本、低复杂度的测试系统也将对 6G 产生重要的意义。

参考文献:

- [1] 许颖,任红,王坦.美国 5G 频谱战略概述及启迪[J].电信科学,2021,37(1): 102-111.
XU Y, REN H, WANG T. Overview and inspiration of the America's 5G spectrum strategy[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(1): 102-111.
- [2] HOSSEINI N, KHATUN M, GUO C Y, et al. Attenuation of several common building materials: millimeter-wave frequency bands 28, 73, and 91 GHz[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2021, 63(6): 40-50.
- [3] 蒋政波,郭翀,洪伟.5G 毫米波测试方法研究进展[J].中国科学基金,2020,34(2): 126-132.
JIANG Z B, GUO C, HONG W. Research and progress in 5G millimeter wave testing: an overview[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(2): 126-132.
- [4] 凌云志,张煜,许虎,等.5G 毫米波 OTA 测试技术[J].电信科学.2021,37(2): 39-47.
LING Y Z, ZHANG Y, XU H, et al. 5G mmWave OTA test technologies[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(2): 39-47.
- [5] REN Y X, PAN C, YANG X H, et al. Measurement of total radiated power in reverberation chamber for 5G millimeter wave base station[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-3.
- [6] PAN C, NING Z H, WANG Z P, et al. A multi-feed compact antenna test range for 5G millimeter wave OTA test[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-3.
- [7] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project technical specification group radio access network NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 2: Range 2 standalone: TS38.521-2 V16.11.0[S]. 2022.
- [8] 宫剑,南楠.5G 基站无用发射 OTA 测试环境分析[J].电信科学,2020,36(2): 145-150.
GONG J, NAN N. Unwanted emission OTA test environment analysis of 5G basestation[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(2): 145-150.
- [9] GIFUNI A, ADIL M, GRASSINI G, et al. An effective method using reverberation chambers to measure TRP from mobile phones and power absorbed by user body[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(4): 951-962.
- [10] 3GPP. 3rdGeneration Partnership Project technical specification group radio access network; radio frequency (RF) conformance testing background for radiated Base Station (BS) requirements: TR 37.941 V16.3.0[S]. 2021.
- [11] CTIA01.73 supporting procedures test plan for wireless device over-the-air performance, version 4.0.0[Z]. 2022.
- [12] 洪伟,余超,陈继新,等.5G 及其演进中的毫米波技术[J].微波学报,2020,36(1): 12-16.
HONG W, YU C, CHEN J X, et al. Millimeter wave technology for 5G and beyond[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(1): 12-16.

[作者简介]



宫剑(1977-),女,国家无线电监测中心检测中心工程师,主要研究方向为 5G、无线接入系统及毫米波雷达等测试方法及标准。



张宇(1989-),男,中国信息通信研究院高级工程师,主要研究方向为大规模 MIMO 天线阵列技术、电磁波近远场变换技术、空口可重构多维传输技术。