

5G OTA 测试标准研究进展

Research Progress of 5G OTA Testing Standards

朱 颖¹,李 勇²,杨晓航¹,赵珍玉¹,马宇辰¹(1. 中国信息通信研究院,北京 100191; 2. 中国星网网络系统研究院有限公司,北京 100000)

Zhu Ying¹,Li Yong²,Yang Xiaohang¹,Zhao Zhenyu¹,Ma Yuchen¹(1. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China; 2. China Satellite Network System Co., Ltd., Beijing 100000, China)

摘 要:

随着 5G 技术的不断发展,尤其是大规模 MIMO 和高频毫米波技术的引入,OTA 测试成为验证 5G 设备性能的关键方法。回顾了 5G 标准化进程,并介绍了射频 OTA 和 MIMO OTA 测试方法及标准动态。探讨了 MIMO OTA 的多天线接收性能评价指标及测试方法。最后指出为适应 5G 技术演进,需优化升级现有测试方法,并构建新的测试环境。

关键词:

5G; OTA 测试; TRP; TRS; MIMO OTA

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.02.004

文章编号:1007-3043(2025)02-0019-06

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Due to the continuous advancement of 5G technology, particularly the emergence of large-scale MIMO and high-frequency millimeter wave technology, OTA testing has been deemed essential for validating the performance of 5G devices. The progress of 5G standardization is reviewed, and RF OTA and MIMO OTA testing methods, along with updates on standards, are introduced. Furthermore, evaluation metrics and testing methods for multi-antenna reception performance in MIMO OTA are explored. Finally, it is pointed out that in order to adapt to the evolution of 5G technology, it is necessary to optimize and upgrade existing testing methods, and build a new testing environment.

Keywords:

5G; OTA testing; TRP; TRS; MIMO OTA

引用格式:朱颖,李勇,杨晓航,等. 5G OTA 测试标准研究进展[J]. 邮电设计技术, 2025(2): 19-24.

1 概述

5G 技术的国际化进程是一个不断演进且充满挑战的过程,其中,3GPP 发挥了举足轻重的作用,有力推动了全球 5G 技术的统一与进步。2018 年 6 月,3GPP 成功发布了 5G 的首个版本 Release-15,标志着 5G 技术标准体系的初步构建完成。该版本主要聚焦于增强型移动宽带(Enhance Mobile Broadband, eMBB)

领域,并引入了超低时延这一核心特性。2020 年 7 月,3GPP 又完成了 Release-16 版本的制定工作,进一步提升了 5G 的综合能力,特别是在垂直行业应用方面,如工业物联网、专用网络及 5G 车联网等,同时特别强调了对超高可靠低时延通信(Ultra-reliable & Low-latency Communication, uRLLC)业务需求的满足。2022 年 3 月,3GPP 完成了 Release-17 标准的制定工作。该版本在进一步增强 5G 新空口及广域网(WAN)技术能力的同时,引入了诸如新通话等关键服务和功能,为 5G 技术的广泛应用注入了新的活力。从 Release-18 版本开始,3GPP 正式启动 5G 演进标准的制定工作,并将其正式命名为 5G-Advanced(5G-A)。

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0706604)

通讯作者:杨晓航, yangxiaohang@caict.ac.cn

收稿日期:2025-01-05

Release-18版本明确了5G技术未来发展的方向,对5G技术进行了进一步的增强。2024年6月,Release-18版本标准被正式冻结,它是5G-A的第1代技术标准,其将为5G-A产业的成熟与部署应用提供有力支撑。在此阶段,通信感知融合、通信与人工智能融合的部分功能将被逐步实现,同时也为后续6G标准的制定工作奠定了坚实的基础。

如图1所示,根据3GPP公布的标准制定计划,Release-19版本^[1]的5G-A标准预计将在2025年第3季度被冻结,3GPP持续推动移动通信技术的创新发展。

从3G时代开始,中国在全球移动通信领域的地位与影响力持续攀升,展现出强劲的增长态势。中国的通信设备制造商及电信运营商的标准代表频繁活跃于国际会议的舞台,并针对5G行业内的一系列核心议题展开讨论,推动中国的前沿技术跻身国际行业标准的行列。特别是5G测试方法与测试标准已成为3GPP讨论的热点课题,这也是国内外厂商密切关注的关键议题。在3GPP的各个研究周期内,这些议题得到了全面而深入的探讨,并经历了不断的优化与完善。本文旨在详尽阐述分析从Release-17至当前Release-19周期内,5G无线空口(Over-The-Air, OTA)测试方法领域的最新讨论成果与进展。通过对这些成果的梳理与分析,使读者能够全面了解5G OTA测试方法的最新动态与发展趋势,并进一步理解测试技术对推动移动通信技术进步发挥的作用。

2 5G OTA测试标准进展

为了优化频谱利用效率,提升峰值数据传输速率,5G系统引入了大规模MIMO技术与高频毫米波技术。尽管这些技术显著增强了5G系统的性能,但同时也使技术复杂性剧增,给测试验证工作也带来巨大挑战。具体而言,大规模MIMO技术因其涉及的大量天线端口与复杂算法,而毫米波设备难以提供测试端口,导致传统的传导测试方法不再适用于5G测试^[2-5]。鉴于此,3GPP、CTIA^[6]等国际标准组织均对OTA测试方法展开深入研究。OTA测试对辐射性能进行评估,它被视为在更接近实际用户与设备交互场景下,验证用户设备整体性能的重要手段之一^[7]。在3GPP 5G的各个研究周期内,OTA测试标准被持续讨论与优化,旨在更好地适应5G技术的快速发展,确保测试方案的有效性与前瞻性。

2.1 射频OTA测试

2.1.1 射频OTA测试方法

无线通信设备的发射特性与接收特性,作为决定其在多变网络环境中效能和表现的核心要素,其重要性不仅体现在数据传输速率、网络容量、延迟降低等关键指标上,还直接关系到用户体验和系统可靠性。在5G FR1(Sub-6 GHz频率范围)频段,用户设备(UE)对射频指标的测试继续采用传统的传导方式,仅针对总辐射功率(Total Radiated Power, TRP)、等效辐射功

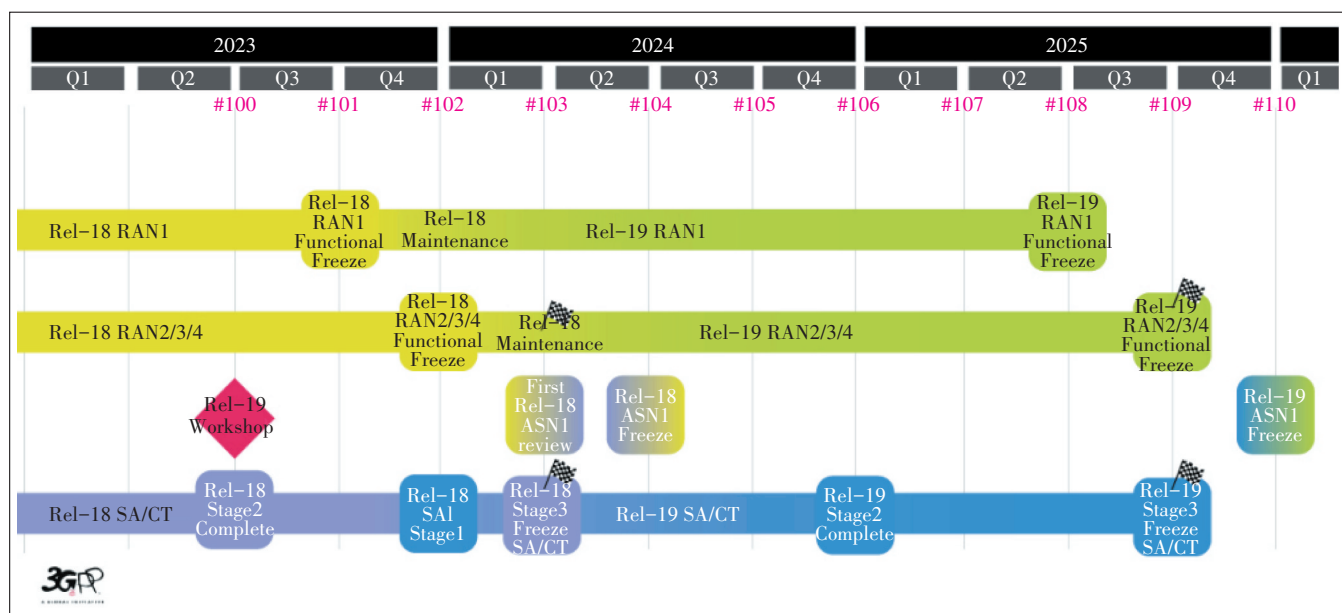


图1 3GPP Release-19研究周期时间表^[1]

率(Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP)、总接收机灵敏度(Total Radiated Sensitivity, TRS)和等效辐射灵敏度(Equivalent Isotropically Sensitive, EIS)等参数进行OTA测试,测试方法与4G相比差异并不明显,可继续采用消声暗室直接远场测试方法或混响室测试方法。而对于5G FR2(毫米波频率范围)频段的设备来说,由于采用阵列天线技术,具有天线数量庞大、严格封装和集成度高等特点,需要在保证待测设备天线阵列和硬件结构不被破坏的情况下完成测试,因此,FR2所有射频性能指标均需通过OTA测试方法来进行评估和测量,相应测试方法和测试系统也进行了改进和创新。

典型OTA测试方法包括直接远场、间接远场(紧缩场)、近场等,对于FR1频段设备,以上几种方案均有典型应用。然而对于FR2频段,以工作在26 GHz、最大尺寸为0.2 m的FR2 UE为例,根据远场范围计算公式: $2 \times (\text{天线最大尺寸 } D)^2 / \text{电磁波波长 } \lambda$,可以得出远场距离为8 m,自由空间损耗达到80 dB,给射频性能测试带来极大挑战。为应对毫米波远场距离和传输损耗问题,可采用基于金属反射面的紧缩场方案,通过反射面和馈源配合达到远场测试条件,大大缩短了测试距离,在较小的空间形成平面波,完成发射机和接收机的全部性能测试,因此紧缩场也是3GPP推荐的FR2设备射频测试方法。

FR2 UE紧缩场测试系统架构如图2所示,系统由消声暗室、转台、反射面、通信天线、馈源、综测仪、信号发生器、信号分析仪、功放/低噪放、混频器等多个部

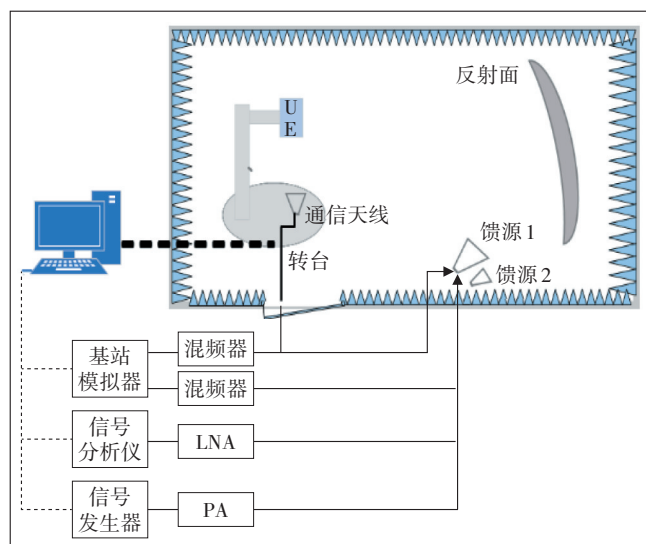


图2 FR2 UE射频测试系统示意

分组成,保证被测终端在有限距离下达到远场测量范围。由于EIRP和TRP是衡量终端设备发射功率大小的关键技术指标,过大的EIRP/TRP有可能对其他频段和系统造成干扰,过小的EIRP/TRP有可能影响覆盖范围,3GPP TS 38.521-2中对功率等级为3的FR2 UE在n258频段的EIRP的限值是22.4~43 dBm,最大的TRP限值小于23 dBm。EIS是接收机性能测试的一个关键技术指标,3GPP TS 38.521-2中对功率等级为3的支持100 MHz带宽的FR2 UE在n258频段的EIS限值是不大于-85.3 dBm,即终端需在-85.3 dBm的下行功率下,吞吐量的误码率小于5%。

2.1.2 射频OTA测试标准进展

在3GPP Release-17研究阶段,3GPP在FR1测试方法上取得了重要进展。一方面,通过5G FR1 TRP和TRS测试方法研究项目,3GPP扩展了3GPP TR 37.902技术报告^[8]中定义的单输入单输出(SISO)OTA方法,使其能够应用于NR FR1(包括NR独立组网SA和NR与E-UTRA非独立组网),并为UE设定了FR1总辐射功率(TRP)和总接收机灵敏度(TRS)的性能要求^[9]。该测试方法覆盖了所有NR FR1频段,支持100 MHz的连续带宽,并定义了EN-DC(1个LTE载波与1个NR载波)的功率设置,同时开展了测量不确定性评估等方面的研究。另一方面,在FR2频段测试方法上,3GPP通过FR2增强测试方法研究项目,完善了FR2射频测试方法,并量化了这些改进措施对UE性能的影响,特别关注了测试设备与UE之间极化基准不匹配的问题,并增加了对极端温度条件下测试的支持^[10-11]。对于FR2 UE,高低温环境实验同样需在OTA测试环境中实施,鉴于极端温度与湿度条件对吸波材料性能有显著影响,且考虑到暗室本身的空间尺度较大,因此需要在暗室内部构建一个采用低损耗材料制成的透波罩,确保电磁波在穿透时仅遭受轻微衰减,不影响辐射性能的精确测试,同时保证温度变化仅限于罩内空间,有效隔绝温度波动对暗室整体温湿度环境的干扰。

在Release-18研究阶段,3GPP在FR1与FR2测试方法上均有所突破。在FR1方面,5G FR1 TRP和TRS增强测试方法项目在Release-17仅面向单输出端口UE的基础上,增加了面向具有更多发射链路UE功能的测试方法,如发射分集(Transmitter Diversity, TxD)、上行链路多输入多输出(UL-MIMO)和载波聚合(Carrier Aggregation, CA)等。同时,还增加了RedCap可穿

戴设备的TRP和TRS测试方法,以及基于混响室的测试方法,以支持独立组网(Stand-alone, SA)和演进非独立组网(EN-DC)的TRP和TRS测试。同时,制定了FR1终端实验室比对及技术要求的时间计划,并对实验室提交的结果进行了统计分析,初步得出部分频段TRP和TRS的终端限值,为后续更多频段和FR2终端性能限制奠定基础^[12]。在FR2方面,3GPP研究了能够同时从多达4个下行链路层、多条接收链路(Receiver Chain, Rx chain)接收信号的UE的FR2 OTA测试方法,并对测量不确定度进行了深入研究^[13]。

在Release-19研究阶段,3GPP在FR1与FR2测试方法上的研究更加深入。在FR1方面,射频OTA测试与MIMO OTA测试合并为一个TRP TRS MIMO-OTA项目,在OTA验证领域将展开更广泛研究。业界对扩展现实(Extended Reality, XR)和非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)设备表现出了浓厚兴趣,因此,3GPP决定为XR设备指定OTA要求,同时考虑NR频段的4Rx XR和2Rx XR(其中4Rx为必须支持)。由于NTN设备的天线设计主要用于卫星跟踪的波束成形,与传统陆地网络存在显著差异,因此,传统的FR1 UE OTA性能指标如TRP和TRS可能不适用于NTN设备。为此,该项目增加了NTN设备性能指标和相应测试方法的研究与定义。在FR2方面,FS_NR_FR2_OTA_Ph3项目研究并定义了针对能够同时利用多面板进行传输的FR2非手持UE的射频测试方法,定义了用于同时向多个方向传输的已配置发射功率要求的测量设置和测试程序,研究确定适当的到达角对(AoA pairs),以实现该类终端射频性能验证的目的,同时,将功率等级1和功率等级5设备作为首要目标,并为该测试方法开发了相关的初步不确定性评估。

2.2 MIMO OTA测试

2.2.1 MIMO OTA测试方法

多天线空口接收性能是衡量移动通信无线终端

多天线接收机性能的关键特性之一。在3GPP Release-16阶段,通过对《5G多天线终端接收性能评价指标及测试方法》这一课题的深入探讨,已经为5G多天线终端(涵盖FR1和FR2频段)的空口测试制定了明确的评价指标和测试方法^[14]。5G FR1多天线终端接收性能测试沿用了LTE时期的多探头暗室法(Multi-Probe Anechoic Chamber, MPAC),MPAC方法通过赋予暗室中不同位置的探头不同权重的方式重构空间的无线衰落信道环境,信道的空间特征(如功率时延谱分布、多普勒频偏及空间相关性等)为评价无线信道重构准确性的重要指标。图3所示为3GPP规定的FR1 MIMO OTA MPAC测试系统结构,基站模拟器发送下行5G信号,多径、多普勒等无线信道特征在信道模拟器中被模拟,功率放大器用来补偿链路及暗室带来的衰减,最后通过暗室中的探头辐射到被测终端周围,完成实验室中无线信道环境的重构。

辐射2步法(Radiated Two Stage, RTS)被定义为FR1 MIMO OTA测试的另一种参考方法。与传统的传导2步法相比,RTS的核心在于预先测试天线探头及手机天线之间的传输矩阵,并且通过乘以其逆矩阵的方式将其提前校准,实现“虚拟导线”连接。RTS中第1步通过SISO测试获得被测终端的天线方向图,第2步将信道特征、天线方向图以及空间矩阵的逆矩阵等共同导入信道模拟器中完成吞吐量测试。图4所示为4×4拓扑结构的RTS系统结构,红框部分代表类导线直连的方式。此外,由于某些被测终端不能在第2阶段上报相位信息,目前已经实现了仅通过上报信号功率获得传输矩阵^[15-16]。

与FR1采用的二维探头布局不同,FR2采用了6个三维分布的双极化探头布局,图5所示为FR2 MIMO OTA测试系统的示意,变频放大模块的引入使得sub 6 GHz的信道模拟器可应用在毫米波终端的测试系统中。除了功率时延谱密度、多普勒频偏及交叉

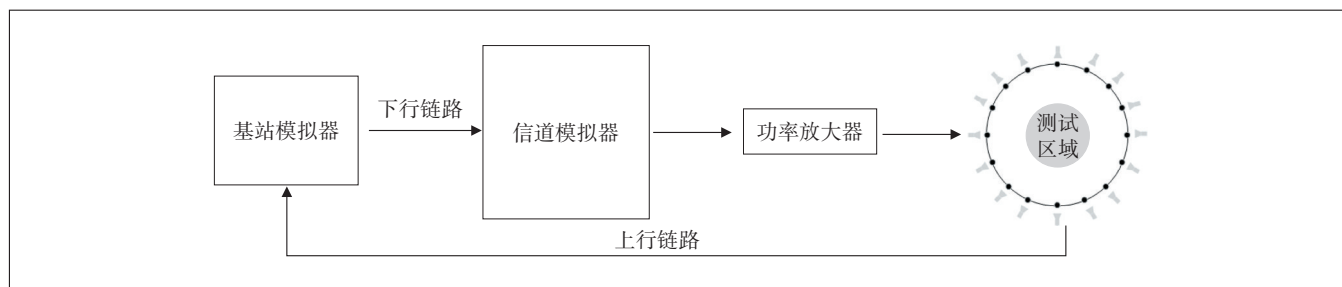


图3 FR1 MIMO OTA MPAC测试系统示意

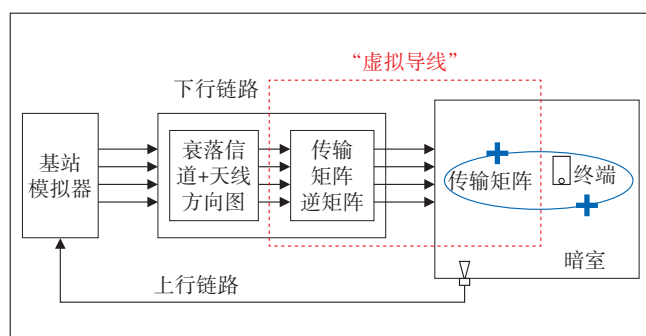


图4 FR1 MIMO OTA RTS测试系统示意

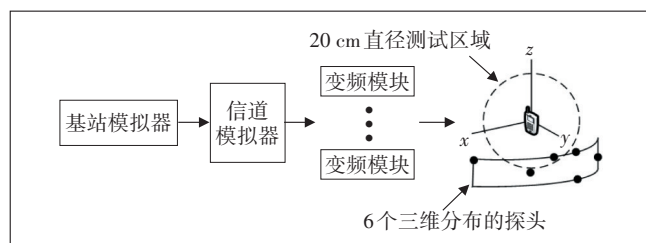


图5 FR2 MIMO OTA MPAC测试系统示意

极化比指标外,FR2采用功率角度谱相似度作为另一个判断信道重构准确度的重要指标。

2.2.2 MIMO OTA 测试标准进展

依据Release-16阶段确定的包括测试方法及信道模型在内的研究报告,面向5G终端的多天线空口测试性能限值的确定成为3GPP Release-17至Release-18阶段的核心议题,旨在确定FR1及FR2终端在不同频段下的多天线接收性能限值^[17]。

在Release-17的第1阶段研究中,确定了城市宏小区簇延迟线模型(UMa CDL-C)和城市微小区(UMi CDL-C)信道分别作为4天线终端和2天线终端的性能测试衰落信道,并设定了这2种信道模型信道验证的理论参考值及实验室信道验证的通过门限。同时,制定了FR1终端实验室比对及性能限值测试的时间计划,并对实验室提交的结果进行了初步统计分析。Release-17的第2阶段进一步确定了UMi CDL-C信道为FR2终端性能测试的衰落信道,并为其设定了信道验证的理论参考值及门限。此外,还筛选出了5家实验室,其FR1频段的测试结果达到了性能测试门限。基于这5家实验室的终端测试结果,得出了n41及n78频段的终端限值,分别为-93.3 dBm/30 kHz和-94.8 dBm/30 kHz。尽管Release-17阶段未能确定FR2频段终端的性能限值,但已圆满完成了项目初期的各项既定目标,为后续Release-18阶段FR1其他频段以及FR2的

性能限值的确定奠定了坚实基础。

进入Release-18阶段,由于RAN WG4收集的商用终端数量已达到一定规模,测试方法成为确定终端性能限值的唯一途径。在此阶段,3GPP成功完成了对FR1优先频段及FR2目标频段的终端性能限值的确定工作。具体而言,对于FR1频段,n28、n5及n1频段的性能限值分别确定为-84.6 dBm/15 kHz、-88.0 dBm/15 kHz及-96.0 dBm/15 kHz;对于FR2频段,终端性能限值确定为-100.0 dBm/120 kHz。Release-17及Release-18阶段的工作不仅确定了静态信道模型下典型FR1及FR2频段终端的性能限值,还为业界商用5G多天线终端的性能评级提供了明确标杆,进一步推动了5G终端的研发与性能改进。

Release-17及Release-18中的测试方法主要关注固定测试场景,这在一定程度上限制了其在静态信道模型下验证终端多天线接收性能的能力。在静态多天线空口测试中,诸如终端运动方向、调制编码方案以及到达角、离开角等因素均保持固定,导致现有的FR1多天线空口测试系统无法充分验证终端在现实环境中的性能。因此,在Release-19阶段,研究动态信道模型并开发相应的信道验证解决方案,以构建更贴近现实的FR1多天线空口测试场景显得尤为重要。

在Release-19阶段,3GPP主要对动态测试进行了深入研究与讨论。鉴于动态信道模型与静态信道模型在信道模型定义及测试方法上的显著差异,Release-19的主要目标是确定动态信道模型参数、信道验证的理论参考值及通过门限、终端性能测试的吞吐量统计方法等问题。此外,在解决MIMO OTA要求时,还需综合考虑运营商的需求以及当前Release-17的静态测试方法,并定义其他5G频段的要求。目前达成的共识包括:3GPP动态信道模型以静态信道模型为基础,通过插值处理不同CDL信道模型,构建随时间变化的信道模型参数;测试方式则采用与LTE及NR静态测试相同的降低功率测试吞吐量变化的方法,同时综测仪采用自适应调制编码方式,以更准确地评估终端在动态信道环境中的性能变化。此外,Release-19阶段还需确定针对动态信道的信道验证方案。信道验证是空口性能测试的关键环节之一。在静态性能测试中,由于多径时延谱、多普勒/时间相关性、交叉极化比、角度功率谱相似度的值是统计不变的,因此可以取一段时间内的平均值作为验证结果。然而,在动态信道中,这些参数的值并非统计不变,因此无法简

单地取一段时间内的平均值作为整个场景的信道特征。目前,3GPP已初步确定将动态信道分成多个时间段,并对每个时间段内的信道特征进行单独处理。

3 结论和建议

本文全面梳理并分析了3GPP关于5G OTA测试方法和相关标准的最新进展,并在此基础上提炼出以下关键建议。

首先,为顺应5G技术的持续演进,亟需对现有5G测试方法进行优化升级。特别是在FR1和FR2频段的测试方法上,应继续加强对射频OTA测试方法和更多场景需求的研究。此外,进一步完善MIMO天线动态信道模型,对于打造更加贴近实际的测试场景至关重要。这一举措不仅能确保对终端性能的精确评估,还能有效提升5G终端的整体效能和网络服务质量,进而推动5G技术的广泛应用与深化发展。

其次,为了满足5G-A乃至未来6G技术的测试需求,构建新型测试设备与测试环境显得尤为迫切。在研发新型测试设备方面,应重点关注高频段(例如毫米波和太赫兹频段)、大规模MIMO以及智能超表面等前沿技术的测试需求。为了准确衡量5G-A及6G系统的性能表现,测试设备必须具备更高的灵敏度、更宽广的频率响应范围以及更强大的动态性能。同时,测试环境的设计也应更加贴近实际网络条件,充分模拟复杂的多路径传播环境、动态信道变化以及多样化的物理场景(如空、天、地等环境)。这些新型测试设备与测试环境的构建,将为5G-A乃至未来6G技术的验证、优化及标准化工作提供更加坚实可靠的支撑。

参考文献:

- [1] 3GPP. Release 19[EB/OL]. [2024-12-23]. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-19>.
- [2] LI Y, XIN L J, LIU X Q, et al. Dual anechoic chamber setup for over-the-air radiated testing of 5G devices[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 2469-2474.
- [3] ZHANG X, QIAO S B, PENG M G, et al. Probe selection for over-the-air test in 5G base stations with massive multiple-input multiple-output[J]. China Communications, 2019, 16(7): 1-12.
- [4] WANG Z Q, REN Y X, ZHANG Y, et al. A novel mode-stirred reverberation chamber design for 5G millimeter wave bands[J]. IEEE Access, 2021(9): 38826-38832.
- [5] LI Y, LI J L, ZHANG X, et al. Over-the-air testing for dual-polarized MIMO devices: setup design and validation[J]. China Communications, 2022, 19(11): 268-281.

- [6] CTIA Certification. Test plan for wireless large-form-factor device over-the-air performance[EB/OL]. [2024-06-03]. https://ctiacertification.org/wp-content/uploads/2021/02/CPWG_CTIA-Certification-Test-Plan-for-Wireless-Large-Form-Factor-Device-Over-the-Air-Performance-V1.2.pdf.
- [7] 施竹雨, 王斌, 陈业刚. 浅析 OTA 测试[J]. 科技资讯, 2019, 17(1): 102, 104.
- [8] 3GPP. Measurements of user equipment (UE) radio performances for LTE/UMTS terminals; total radiated power (TRP) and total radiated sensitivity (TRS) test methodology: 3GPP TR 37.902[S/OL]. [2024-06-03]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [9] 3GPP. Measurements of user equipment (UE) over-the-air (OTA) performance for NR FR1; total radiated power (TRP) and total radiated sensitivity (TRS) test methodology: 3GPP TR 38.834[S/OL]. [2024-06-03]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [10] 3GPP. Study on enhanced test methods for frequency range 2 (FR2) NR user equipment (UE): 3GPP TR 38.884[S/OL]. [2024-06-03]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [11] 3GPP. NR; study on test methods: 3GPP TR 38.810[S/OL]. [2024-06-03]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [12] 3GPP. Enhanced over-the-air (OTA) test methods for NR FR1 total radiated power (TRP) and total radiated sensitivity (TRS): 3GPP TR 38.870[S/OL]. [2024-06-03]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [13] 3GPP. Study on NR frequency range 2 (FR2) over-the-air (OTA) testing enhancements: 3GPP TR 38.871[S/OL]. [2024-06-03]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [14] 3GPP. Study on radiated metrics and test methodology for the verification of multi-antenna reception performance of NR user equipment (UE): 3GPP TR 38.827[S/OL]. [2024-06-03]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [15] FAN W, KYÖSTI P, HENTILÄ L, et al. MIMO terminal performance evaluation with a novel wireless cable method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4803-4814.
- [16] ZHANG F C, FAN W, WANG Z P. Achieving wireless cable testing of high-order MIMO devices with a novel closed-form calibration method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(1): 478-487.
- [17] 3GPP. NR; user equipment (UE) multiple input multiple output (MIMO) over-the-air (OTA) performance requirements: 3GPP TS 38.151[S/OL]. [2024-06-03]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

作者简介:

朱颖, 高级工程师, 硕士, 主要从事移动通信测试技术研究及标准推进工作; 李勇, 高级工程师, 博士, 主要从事无线通信技术研究及测试验证工作; 杨晓航, 工程师, 硕士, 主要从事5G MIMO OTA测试及物理层FPGA硬件开发工作; 赵珍玉, 工程师, 博士, 主要从事计算电磁学仿真、无线信道建模、OTA测试系统研发相关工作; 马宇辰, 高级工程师, 博士, 主要从事OTA测量理论与方法研究工作。