

· 专题:5G移动通信基础理论与关键技术 ·

5G毫米波测试方法研究进展

蒋政波 郭 翀 洪 伟*

东南大学 信息科学与工程学院 毫米波国家重点实验室,南京 210096

[摘要] 5G是我国新型基础设施建设的重点领域,毫米波和大规模MIMO是5G的关键技术之一。对于射频与天线一体化集成的毫米波有源天线单元(Active Antenna Unit, AAU),传统的传导测试方法已不再适用,空口测试(Over-The-Air, OTA)将成为首选的测试形态。这是移动通信发展近三十多年以来测试原理的一次革新。近年来,学术界和产业界针对5G毫米波OTA测试的若干关键问题开展了大量探索性研究,已在多个技术领域取得突破,但分歧依然较大,至今尚未形成系统化和标准化的测试规范。本文将从射频测试和性能测试两个方面,梳理分析5G毫米波OTA测试方法的研究进展。

[关键词] 5G;毫米波;OTA;测试;大规模MIMO

第五代移动通信(5G)近年来已成为全球科技和经济领域的热点,也是支撑我国经济社会数字化、网络化、智能化转型的关键新型基础设施^[1]。2019年6月,中国政府颁发了5G牌照,我国5G商用进程开始加速。截至2019年11月,我国已开通5G基站11万余座^[2]。

5G峰值速率将比4G提高一到两个数量级,这就需要更大的频谱带宽。6GHz以下的频段已经非常拥挤,而毫米波频段的频谱资源丰富。仅四个主要的毫米波大气传播窗口频段的总带宽也可达150GHz左右,在频谱资源日趋紧张的今天无疑极具吸引力。国际标准化组织3GPP(3rd Generation Partnership Project)定义了5G NR(New Radio)的两个工作频段:FR1频段(410~7125MHz)和FR2频段(24.25~52.6GHz)^[3]。2019年11月,世界无线电通信大会(WRC-19)划分了24.25~27.5GHz、37~43.5GHz、45.5~47GHz、47.2~48.2GHz和66~71GHz频段,为5G毫米波网络的未来发展预留频谱资源^[4]。预计到2034年,我国5G毫米波可以为GDP贡献约1040亿美元^[5]。

然而,毫米波的应用也带来诸多挑战。相较于6GHz以下频段,毫米波的路径损耗与衰减更大。



洪伟 博士,东南大学毫米波国家重点实验室主任,教授,博士生导师。教育部长江学者计划特聘教授、IEEE Fellow、CIE Fellow、国家杰出青年科学基金获得者。作为首席科学家或项目负责人完成多项国家973、863、创新群体、科技重大专项项目。主撰学术专著2部,主撰合撰核心及以上期刊论文300余篇。授权发明专利100余项。获国家自然科学奖2项、省部级科技进步一等奖3项等多项科技奖,以及IEEE 802.11aj国际标准杰出贡献奖等。现任中国电子学会微波分会、天线分会副主任委员等职。



蒋政波 2009年于东南大学获博士学位,现为东南大学信息科学与工程学院毫米波国家重点实验室副教授。主要研究方向为无线通信与微波毫米波测试技术、仪器仪表技术。主持了“毫米波5G分析仪开发”、“LTE及LTE-Advanced信号源及信号分析仪开发”等多个国家科技重大专项课题,参与了国家自然科学基金委员会国家重大科研仪器研制项目。

这一方面是由于理论上电磁波在自由空间的传输损耗正比于频率的平方,另一方面原因是氧气、水蒸气等对毫米波波段的信号吸收更大^[6,7]。大量外场测试表明,通常情况下毫米波波段的自由空间路径损耗指数大于2^[8,9]。在毫米波信号传输过程中,障碍物对其阻碍效应明显,散射绕射效应弱、穿透能力

收稿日期:2020-03-31;修回日期:2020-04-09

* 通信作者,Email:weihong@seu.edu.cn

本文受国家自然科学基金项目(61627801)和国家科技重大专项(2018ZX03001027)资助。

差、反射效应强^[10, 11]。并且,毫米波频段信道的角度扩展(Angular Spread, AS)更小^[12],信道在空间的功率分布更集中。为了克服毫米波信号的上述传输问题,5G毫米波将采用大规模多输入多输出(Massive MIMO)天线阵与多波束成形(Beam Forming)技术,大幅提高基站天线增益,增加设备的(波束的)等效全向辐射功率(Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP)。终端设备天线也将小规模组阵,增强上下行通信链路的增益和可靠性。大规模MIMO天线阵的多个波束通过扫描和自适应跟踪等算法实现覆盖和多用户传输,不同波束之间有一定的空间隔离度,可进一步降低用户间干扰,充分利用空间资源,增加系统容量。因此,5G毫米波设备也具有MIMO属性。

在移动通信产业链中,测试技术贯穿于基站、芯片、终端的研发、生产、验收等各环节,支撑着每一代移动通信技术的演进。测试技术的发展对于加快推动5G毫米波商用具有重要意义,同时也面临新的挑战。从2G、3G到4G,通信系统的工作频率均在6GHz以下,信号带宽在百兆赫兹以内,测试仪器的核心技术指标没有发生巨大的变化,属于在同一层级的演进,甚至同一硬件平台进行软件升级就可以应对新一代的测试需求。但是在5G时代,由于带宽、通道数、频段都有了数量级的飞跃,测试仪器的后向兼容性被打破了,测试原理也需要重新探索。

在5G之前的移动通信系统,射频与天线有各自独立的指标体系和测量方法,可以分开测试、独立评估。射频指标一般采用传导测试方法,通过线缆将被测射频组件的端口与仪器直接相连,测量精度和成本主要取决于仪器;测量天线指标时,将天线的馈电端口与仪器(例如矢量网络分析仪或信号源与测试接收机)相连,进行驻波测量,或在暗室环境中测量方向性指标。然而,在毫米波频段,天线单元与射频单元之间的毫米波信号传输更易受传输线长度、转接匹配等因素的影响,5G毫米波设备的射频与天线将趋向一体化集成,在基站侧合并为有源天线单元(Active Antenna Unit, AAU),在终端侧采用新的集成天线封装技术(Antenna-in-Package, AiP)^[13-15]或天线与多通道幅相控制芯片一体化集成的相控阵模组。这种一体化集成的新架构意味着天线和射频之间没有可连接仪器的测试端口,天线和射频单元无法分开测试。空口(Over-The-Air, OTA)测试将取代传导测试,成为5G毫米波系统的主要测试形态,如图1所示。

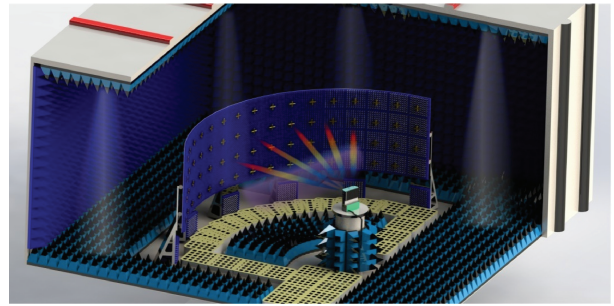


图1 5G毫米波OTA测试示意图

OTA曾在4G时代被用于MIMO设备的端到端性能测试,因为它包含了天线的方向特性,比传导测试更接近实际应用场景,但只是作为传导测试的一个简单补充。而5G毫米波设备天线单元更多、频段更高、信道模型更复杂、波束更灵活,传统的OTA性能测试方法面临一系列问题。基于OTA的射频测试则迎来更大的挑战,在原理、方法、效率等方面都需要新的探索。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了积极的探索研究,尝试重构与5G毫米波多波束工作方式相适应的OTA测试指标体系,探索精确、高效、实用的测试方法,开发满足毫米波、大带宽、大规模MIMO关键技术特点的测试设备。本文将从射频测试和性能测试两个方面,梳理5G毫米波OTA测试技术的进展。

1 5G毫米波OTA测试

针对移动通信产品的不同生命周期,根据测试目的可以分为认证测试、研发测试、生产测试。认证测试一般由具有资质的组织(如PTCRB、CGF等)以3GPP、CTIA等规范为基础,采用相应测试例对设备进行测试,以一致性测试为主,测试精度要求和成本都比较高;研发测试关注指标是否达到设计要求,也用来排查研发过程中的问题;生产测试更关注测试效率和成本,往往采用自动化的测试系统。

针对移动通信系统组成,根据测试对象可分为基站测试、终端测试等。3GPP已经完成了FR1频段基站和终端的技术要求和测试方法^[16-26],FR2频段相关测试方法正在研究中。基站和终端的技术要求不同,测试方法有明显差异,但也有很多共性的问题。

针对5G毫米波系统的指标,根据测试指标的特点可分为:(1)射频测试,主要针对基站AAU、终端AiP相控阵模组等;(2)性能测试,主要针对基站

和终端整机设备,或端到端的通信系统。

1.1 射频测试

移动通信设备的射频指标通常包括:(1)与天线相关的方向类指标,如 EIRP、等效全向灵敏度(Equivalent Isotropic Sensitivity, EIS)、波束方向图(Beam Pattern)、总辐射功率(Total Radiated Power, TRP)等,这类指标一般在暗室环境用矢量网络分析仪进行测量^[27]。TRP 虽然不是某个方向的指标,但要通过测量 EIRP 再积分得到。(2)与调制信号相关的射频指标,如误差矢量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)、邻道抑制比(Adjacent Channel Leakage Ratio, ACLR)、频谱发射模板(Spectrum Emission Mask, SEM)等,通常采用信号分析仪进行传导测试^[17]。如前所述,5G 毫米波基站 AAU 的射频和天线之间没有可供测试的端口,并且 5G 无线网络基于波束来进行覆盖和复用,需要重新定义与空间波束相关的新射频指标,才能更好地表征 5G 毫米波设备的特性。Marko E. Leinonen 等人将传导测试中的误差矢量幅度指标与 OTA 测试相结合,定义了 EVM 波束宽度的概念,依据波束 EVM 的变化来确定毫米波基站的扫描范围与覆盖距离,并将暗室测量结果与外场测量结果进行了对比分析,证明 EVM 波束宽度定义的合理性^[28]。本课题组提出了波束等效全向辐射功率(Beam Equivalent Isotropic Radiated Power, BEIRP)、波束误差矢量幅度(BEVM)、波束邻道抑制比(BACLRL)等波束域 5G 射频指标的概念^[29]。

具有空间特性的 5G 射频性能指标需要在暗室中进行 OTA 测试。根据测试天线探头与被测设备(Device Under Test, DUT)之间的距离,可分为直接远场(Direct Far Field, DFF)、间接远场(Indirect Far Field, IFF)、中场(Midfield, MF)和近场(Near Field, NF)测试^[30]。

直接远场要求测试距离满足夫朗霍夫(Fraunhofer)条件,即 $R \geq 2D^2/\lambda$,其中 R 表示测试距离, D 表示天线口径, λ 为工作波长。球面电磁波经过该距离,到达天线口径内不同点的信号相位差不超过 22.5 度,可近似为平面波。应该指出的是,直接远场的定义来源于天线测量。但是 5G 毫米波采用的是带宽不低于 400MHz 的调制信号,它的射频指标对 OTA 测试的相位差有什么新的要求?传统的远场定义是否依然合适?这些都还是需要深入研究的问题。众所周知,DUT 的天线口径与天线单元数量、间隔及布局有关。5G 毫米波终端一般会布

局多个不同的天线模组以减小手握对于信号的影响,因此计算远场距离所代入的天线口径值 D ,一般大于单个天线模组自身的尺寸。如在天线口径 15 cm、频率 28 GHz 时,远场距离达 4.2 米,路径损耗 73.9 dB。终端 OTA 射频测试可分为“白盒法”与“黑盒法”,前者需要终端厂商提供准确的关于天线位置、尺寸等先验信息;后者则把整个终端视为一个天线阵,具有更强的通用性,但对暗室空间的要求也更高。5G 大规模 MIMO 基站的 AAU 天线数更多,通常在 64/128/256/512 等,天线口径更大,远场测试所要求的相应暗室空间也大很多。因此,5G 基站 AAU 或终端 AiP 相控模组射频测试技术的一个重要研究方向,就是如何在精度、空间、成本等多目标之间寻求优化的方案。

通过对电磁波的幅度和相位进行变换,在 DUT 所处的测试区域创造出远场环境,这是一种间接远场法,其中代表性的有紧缩天线测试范围(Compact Antenna Test Range, CATR),也称为紧缩场测试法^[30]。该方法基于光学变换原理,通过抛物面反射器将球面波变换到平面波,产生测试静区。静区内电磁场幅度和相位变化较小,其相位变化可小于直接远场的 22.5°。静区要完全覆盖 DUT,静区范围大小决定了 DUT 的最大尺寸,而静区的大小主要取决于抛物面反射器的大小。通常,静区大小约为反射面口径的 1/2^[31]。反射面的大小与制造工艺决定了测试系统的成本与精度。因此,静区是 CATR 的研究重点^[32, 33]。CATR 缩短了测试距离,减小了路径损耗,也降低了对测试设备动态范围的要求。CATR 可用于 5G 毫米波基站射频指标测试^[34],但目前更多还是用于用户端(UE)测试。

与基于反射原理的 CATR 不同,平面波变换测试方法(Plane Wave Converter, PWC)采用一种双向天线阵列,通过调整每个天线单元的加权系数,在特定的距离合成平面波^[35]。相较直接远场,缩减了测试距离,同时又避开了 CATR 中抛物面反射器的设计与实现难度。但由于相位转换是与频率相关的,该方法亟待解决的关键问题是如何拓展工作频段。并且对于宽带调制信号 EVM、ACLR 等射频参数的平面波变换,还有待深入研究。CATR 和 PWC 这两种间接远场法都是通过特殊的硬件装置,将球面波转换为平面波,产生测试静区,测试结果不再需要其他的变换处理。

中场 OTA 测试法(MF)是由是德科技(Keysight)提出的一种 OTA 射频性能测试方

法^[36, 37]。所谓“中场”是指测量距离对于每个天线单元满足 Fraunhofer 远场条件,但对整个天线阵列则仍处于近场区。在中场进行测量,再通过校正因子(CF),从中场测量数据推算到远场,实验表明中场法测得的波束主瓣方向的 EIRP、EIS、EVM 与远场测量结果接近。它可以分别用于基站和终端测量,但由于基站的直接远场距离更大,采用 MF 射频测试时更能体现节省空间的优势。由于 CF 与 DUT 天线、测试距离等具体的测试系统配置有关,因此 MF 在测试之前要进行校准,据此对测量数据进行修正。它在测量过程并不改变电磁波特性,而是基于校准原理对测量数据进行变换。MF 为 5G 毫米波 OTA 射频测试提供了一种新的技术路线,但仍需要更多的对比试验和分析,目前尚未纳入 3GPP 测试规范。

电磁波从天线辐射后在空间由近至远连续传播,理论上如果已知近处某一时刻所有点的幅度和相位,则可以推算出此后自由空间任一时刻的幅度和相位。近场测量法(NF)直接在近场距离($R \geq 0.62 \sqrt{D^2/\lambda}$)进行测量,然后由电磁场的数学变换导出远场的值。然而,近远场变换是有严格的条件限制的,它需要在近场以较高的空间分辨率进行采样,才能满足转换精度的要求,因此测量过程较为耗时。传统的近场天线测量主要是对连续波信号的功率和相位进行测量,但 5G FR2 实际使用带宽 400 MHz 以上的调制信号,宽带信号的电磁场变换应该如何处理?对于 EVM、ACLR 等综合的性能参数进行近远场转换的理论依据是什么?这些问题有待进一步深入研究。

值得一提的是,在进行 OTA 测试之前,阵列校准十分必要。由于大规模 MIMO 技术的引入,5G 毫米波阵列的校准需要考虑更多的因素。本文作者的课题组针对毫米波大规模 MIMO 远场(DFE)校准中存在的球面波效应、发射多波束方向图测量、阵列自校准方法等若干问题,开展了相应的研究工作^[38, 39]。

1.2 性能测试

5G 性能测试中的“性能”通常包括吞吐量、时延、UE 移动性能(注册成功率、接入成功率、寻呼成功率、掉线率、切换成功率)、波束管理等,性能测试应该在包含信道和天线的无线环境下进行,才更逼近真实的使用场景。外场测试(Field Testing)是一种在真实环境中的性能测试方法,但是信道参数不可控制、不可重复,场景种类受

限。基于信道模拟器的实验室测试可以仿真真实环境,精确设置信道参数,加载标准信道模型,应用范围更广。信道模拟器是 5G 性能测试的关键仪器,在频率范围、信号带宽、通道数、信道模型等方面都比传统信道模拟器有更高的要求。在 5G 毫米波 OTA 测试中,信道模拟器通过天线探头及其他相关配置,创造出特定的信道环境,测试 DUT 在该信道下的性能。这“最后一米”的配置对测试精度和成本有很大影响。

混响室法(Reverberation Chamber, RC)是一种性价比较高的测试方法,可以提供端到端的测试配置。它通过搅拌器(Stirrer)对电磁波进行扰动,产生大量具有随机相位的信号注入测试区,可模拟出瑞利衰落环境,对 DUT 进行测试^[40]。RC 可用于电磁兼容测试和天线辐射性能测试,也可用于吞吐量等性能测试。但是 RC 难以实现用户定义的复杂信道特性,尤其对空间角度的模拟上存在缺陷,因此在 5G 毫米波设备的整机性能测试中应用较受限^[41]。

如前所述,与传导测试相比,信道模拟器与 UE 之间有一段无线传输信道,相当于额外附加了一个转移矩阵(Transfer Matrix)。如果可以消除该转移矩阵的影响,那么整个链路就变成了类似传导测试环境。2013 年,Keysight 等公司向 3GPP 提出了辐射两步法(Radiated Two-Stage, RTS)^[42]提案。顾名思义,它需要执行两个测试步骤,第一步通过测量获得天线探头与 UE 之间的信道转移矩阵,第二步在信道模拟器中加入逆矩阵来校准该转移矩阵,以达到接近传导测试的效果。然而,在校准转移矩阵的同时,UE 天线的方向性也被校准了,有学者认为 RTS 不能算真正的端到端测试方法,而且不适用于自适应天线系统^[41]。RTS 已被 3GPP 批准为 MIMO OTA 测试的方法之一^[43-45],为某些静态场景的测试提供了一个选择。

相对于低频段信道,毫米波信道环境更加稀疏,且基站侧三维(Three Dimensional, 3D)波束成形技术的引入使得三维信道更受关注^[46]。多探头暗室法(Multi-Probe Anechoic Chamber, MPAC)可以构建 2D 或 3D 信道环境,在 4G 时期就是 3GPP 批准的 LTE UE MIMO OTA 测试方法^[45],当前也是 5G OTA 性能测试的研究热点。MPAC 是在暗室内不同位置按一定的空间密度布置多个天线探头,可以呈球面或其他分布,模拟多个人射角或到达角,实现 3D 信道环境的仿真测试。5G 毫米波设备广泛

采用大规模天线阵与波束成形技术,其辐射波束宽度相对较窄,而且多个波束同时工作,不同指向下的波束,因其覆盖区域较窄,其能量仅能被部分天线探头采集。根据这些特点,已有一些研究者提出了基于扇区的 3D 多探头测量法 (Sectorized MPAC)^[47-50],根据 5G 基站天线实际工作时水平和垂直方向的覆盖范围,只需将探头布置在一个扇形区域,不必布满整个球面或半球面。根据优化算法,仅需使用其中少量的激活探头 (Active Probes),这些激活的天线探头通过开关矩阵与 MIMO 信道模拟器相连接,减少激活探头数可以降低对信道模拟器通道数的要求。在毫米波频段,基站和终端都没有传导测试连接口,针对终端与基站进行端到端测试的场景,YongLi 等人提出了基于双暗室的 OTA 性能测试和利用空间协方差矩阵来确定天线探头权重系数的方法^[51],进一步拓展了 MPAC 法的应用范围。

需要补充的是,MPAC 也可用来测量基站设备的总辐射功率 (Total Radiated Power, TRP)。采用球形 MPAC 需要较多的测量探头数目,系统构建成本和测量时间较高^[52],并且系统校准十分繁琐。有文献报道了利用方向图对称性的简化方法,测量两个正交平面的辐射功率方向图,使用方向图相乘原理估算 TRP^[27, 53]。另一种方法是采用波束扫描的思想,等效增加波束的宽度,从而在不增加探头数目情况下得到较准确的 TRP 值^[53]。

对于性能测试系统,需要科学的指标去评估该系统所合成的信道与期望的目标信道是否一致,针对目前常用的预衰落合成法 (PFS) 和平面波合成法 (PWS),可采用空间相关性等指标来分析仿真信道与目标信道一致程度。文献[41]提出了基于波束方向相似度 (Beam Pattern Similarity, BPS) 的定量评价指标 S,给出了 S 的计算公式,并研究了测量距离、总天线探头数、激活的天线探头数的不同配置对 S 的影响。测试是为了评估,但是测试方法本身首先需要被评估,否则测试结果就不具有说服力。5G 毫米波测试的不同技术路线各有优势,也都存在问题,需要进行更多的定量评估,以促进 5G 毫米波测试标准的完善。

2 结 语

本文从 5G 毫米波的关键技术特点出发,介绍了测试技术面临的挑战。从射频测试和性能测试两个方面分别梳理了当前 5G 毫米波 OTA 测试的关

键技术问题和研究进展。当前的研究主要聚焦于:(1) 射频测试是如何以更低的成本 (优化暗室空间、节省测试时间等) 来实现逼近直接远场的效果,一般以直接远场的测量结果为参考,但是直接远场的定义、射频指标的内涵等更深层次的问题也值得再探讨;(2) 性能测试是如何以更低的成本 (优化天线探头数、减少模拟器通道数等) 来实现逼近目标信道的效果,通常以空间相关性等作为评价因子,但在评价标准上仍希望有更多的共识。未来的工作重点是针对存在的问题继续优化测试方法,开发测试设备,尤其在测试效率和成本上期待更大的突破,完善测试标准,促进 5G 毫米波测试技术在产业各环节得到更大规模的应用。

参 考 文 献

- [1] 人民网:工信部召开加快 5G 发展专题会. <http://www.miit.gov.cn/n973401/n7647394/n7647409/c7796223/content.html>.
- [2] 工信部:全国已开通 5G 基站 11.3 万个. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1650795796301529325&wfr=spider&for=pc>.
- [3] 3GPP TS 38.104. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception.
- [4] AET: 聚焦 WRC-19 主要成果及未来愿景. <http://www.chinaaet.com/tech/designapplication/3000111157>.
- [5] 21 世纪经济报道:国内 5G 应用探索加速,毫米波仍等待商用. http://www.21jingji.com/2020/3-20/1NMDEzODFfMTU0NDg1Ng.html?utm_source=tuicool&utm_medium=referral.
- [6] Pozar DM. Microwave engineering. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [7] Niu Y, Li Y, Jin DP, et al. A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges. *Wireless Networks*, 2015, 21(8): 2657—2676.
- [8] Zhao XW, Li S, Wang Q, et al. Channel measurements, modeling, simulation and validation at 32 GHz in outdoor microcells for 5G radio systems. *IEEE Access*, 2016, 5: 1062—1072.
- [9] Rappaport TS, Maccartney GR, Samimi MK, et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(9): 3092—3056.
- [10] Zhao H, Mayzus R, Sun S, et al. 28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York City. *Communications (ICC)*, 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013.

- [11] Rappaport TS, Sun S, Mayzus R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work. *IEEE Access*, 2013, 1:335—349.
- [12] Wang HM, Zhang P, Li J, et al. Radio propagation and wireless coverage of LSAA based 5G millimeter-wave mobile communication systems. *China Communications*, 2019, 016(005):1—18.
- [13] Zhang YP, Liu DX. Antenna-on-Chip and Antenna-in-Package solutions to highly integrated millimeter-wave devices for wireless communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(10)(SI): 2830—2841.
- [14] Liu DX, Gu XX, Baks CW, et al. Antenna-in-package design considerations for Ka-band 5G communication applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(12): 6372—6379.
- [15] Huang HC. Overview of 5G mm-wave antenna design solutions in cellular phones: AiP, AiA, and AiAiP. 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019.
- [16] 3GPP TS 38.141. NR; Base Station (BS) conformance testing.
- [17] 3GPP TS 38.141-1. NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing.
- [18] 3GPP TS 38.141-2 NR; Base Station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing.
- [19] 3GPP TS 38.521-1. NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 1: Range 1 standalone.
- [20] 3GPP TS 38.521-2. NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 2: Range 2 standalone.
- [21] 3GPP TS 38.521-3. NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 3: Range 1 and Range 2 Interworking operation with other radios.
- [22] 3GPP TS 38.521-4. NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 4: Performance.
- [23] 3GPP TS 38.522. NR; User Equipment (UE) conformance specification; Applicability of radio transmission, radio reception and radio resource management test cases.
- [24] 3GPP TS 38.523-1. 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 1: Protocol.
- [25] 3GPP TS 38.523-2. 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 2: Applicability of protocol test cases.
- [26] 3GPP TS 38.523-3. 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 3: Protocol test suites.
- [27] CTIA Test Plan for Wireless Device Over-The-Air Performance.
- [28] Leinonen ME, Jokinen M, Tervo N, et al. System EVM characterization and coverage area. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(12): 5282—5295.
- [29] 郭翀, 胡云, 蒋政波, 等. 5G毫米波基站的OTA校准与测试方法研究. *微波学报*, 2019, 35(6):65—70.
- [30] 3GPP TR 38.810 v16.5.0. NR; Study on test methods.
- [31] Rodriguez V. Basic rules for anechoic chamber design, part two: Compact ranges and near field measurements. *Microwave Journal*, 2016, 59(2): 80—90.
- [32] Tancioni LM, Jernberg A, Noren P, et al. Over-the-Air testing of active antenna system base stations in compact antenna test range. *European Conference on Antennas & Propagation*, 2019.
- [33] Hu YP, Wang SY, An SG. Over the air testing and error analysis of 5G active antenna system base station in compact antenna test range. 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall, 2019.
- [34] 周亮. 中国信通院 5G毫米波紧缩场射频测试系统已验证成功. <http://www.elecfans.com/tongxin/20190227875892.html>.
- [35] Rowell C, Tankielun A. Plane wave converter for 5G massive MIMO bases station measurements. 12th European Conference on Antennas and Propagation, 2018
- [36] Kong H, Jing Y, Wen Z, et al. A compact millimeter wave (mmWave) mid-field over the air (OTA) RF performance test system for 5G massive MIMO devices. *IEEE International Wireless Symposium*, 2018.
- [37] Kong HW, Wen Z, Jing Y, et al. Midfield Over-the-Air test: anew OTA RF performance test method for 5G massive MIMO devices. *IEEE Tans on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(7): 2873—2883.
- [38] Hu Y, Hong W, Yu C, et al. A digital multi beam array with wide scanning angle and enhanced beam gain for millimeter-wave massive MIMO applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 5827—5837.
- [39] Yu Y, Hong W, Jiang ZH, et al. Multi-beam generation and measurement of a DDS-based digital beam-forming array transmitter at Ka-band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 3030—3039.
- [40] Gustafsson M, Jämsä T, Högberg M. OTA methods for 5G BTS testing-survey of potential approaches. *General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, 2017.
- [41] Zhang F, Fan W, Ji Y, et al. Performance testing of massive MIMO base station with multi-probe anechoic chamber setups. 12th European Conference on Antennas and Propagation, 2018.

- [42] 3GPP R4-66AH-0012. Incorporating self-interference into the two-stage method.
- [43] 3GPP TS 37.144. User Equipment (UE) and Mobile Station (MS) GSM, UTRA and E-UTRA over the air performance requirements.
- [44] 3GPP TS 37.544. Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Evolved UTRA (E-UTRA); User Equipment (UE) Over The Air (OTA) performance; Conformance testing.
- [45] 3GPP TR 37.977. Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Verification of radiated multi-antenna reception performance of User Equipment (UE).
- [46] Verizon 5G TFAir interface working group; verizon 5th generation radio access; physical layer procedures.
- [47] Pekka K, Lassi H, Wei F, et al. On radiated performance evaluation of massive MIMO devices in multi-probe anechoic chamber OTA setups. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(10): 5485—545497.
- [48] Wei F, Pekka K, Moray R, et al. Over-the-air radiated testing of millimeter-wave beam-steerable devices in a cost-effective measurement setup. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(7):64—71.
- [49] Kyösti P, Fan W, Pedersen G F, et al. On dimensions of OTA setups for massive MIMO base stations radiated testing. *IEEE Access*, 2016, 4: 5971—5981.
- [50] Fan W, Carton I, Kyosti P, et al. A step toward 5G in 2020: Low-cost OTA performance evaluation of massive MIMO base stations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine*, 2017, 59(1): 38—47.
- [51] Li Y, Xin LJ, Liu XQ, et al. Dual anechoic chamber setup for over-the-air radiated testing of 5G devices. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 2469—2474.
- [52] Hansen JE. Spherical Near-Field Antenna Measurements. P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1988.
- [53] Friden J, Razavi A, Stjernmen A. Angular sampling, test signal, and near-field aspects for over-the-air total radiated power assessment in anechoic chambers. *IEEE Access*, 2018, 6: 57826—57839.

Research and Progress in 5G Millimeter Wave Testing: an Overview

Jiang Zhengbo Guo Chong Hong Wei*

State Key Laboratory of Millimeter Waves, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract The 5th generation (5G) wireless communication is one of the important parts of the new form of infrastructure construction in China, and millimeter wave (mmWave) and massive MIMO are two key technologies of the 5G mobile wireless communications. It is impractical to perform conventional conduct testing anymore in testing the mmWave Active Antenna Unit (AAU) and the Antenna-in-Package (AiP) equipment, for their antennas and radio frequency (RF) modules are highly integrated. As a result, Over-The-Air (OTA) test will be the prior choice, which represents a milestone in testing field of the wireless communications over the past three decades. Recently, academia and industry have addressed several key issues of the 5G mmWave OTA test, but a systematic and standardized test specification has not been officially approved yet. This paper reviewed the research and progress in 5G millimeter wave testing from two aspects: the RF index testing and the systematic parameter testing.

Keywords 5G; millimeter wave; OTA; test; massive MIMO

(责任编辑 姜钧译 吴妹)

* Corresponding Author, Email: weihong@seu.edu.cn