



专题：移动通信（5G）测试

5G 终端 MIMO OTA 测试方法研究现状与展望

马楠^{1,2,3}, 余菲¹, 杨晓丽¹, 许晓东⁴, 张治¹

- (1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876;
2. 中国电子科技集团公司数据链技术重点实验室, 陕西 西安 710068;
3. 无线通信测试技术北京市重点实验室, 北京 100102;
4. 北京邮电大学移动互联网安全技术国家工程实验室, 北京 100876)

摘要: MIMO (multi-input multi-output) OTA (over-the-air) 测试是评估天线系统辐射性能的重要方法, 也是设备在研发、生产阶段必经的步骤之一。随着 5G 移动通信系统的到来, 毫米波等新特性的引入, 为传统 MIMO OTA 测试方法带来了新的挑战, 也使得 OTA 测试成为 5G 毫米波终端唯一可行的测试解决方案。首先论述了 5G OTA 测试所面临的挑战, 分析了 4G 移动通信系统 OTA 测试方法在 5G OTA 性能测试中的适用性, 并探究了如何将低频测试方法扩展到毫米波终端测试。然后总结了 3GPP 对于 MIMO OTA 测试的研究现状, 详细阐述了简单扇形排列的多探头吸波暗室 (simple-sectored multi-probe anechoic chamber, SS-MPAC) 的系统模型、测试原理以及性能评价指标等, 并验证了 SS-MPAC 配置中利用更少的探头仍可以获得合理的测试精度。最后对未来的研究趋势进行了展望。

关键词: 5G; 多天线终端; SS-MPAC; 空口测试

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021035

Research status and prospect of MIMO OTA test methods for 5G terminals

MA Nan^{1,2,3}, YU Fei¹, YANG Xiaoli¹, XU Xiaodong⁴, ZHANG Zhi¹

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
2. Key Laboratory of Data Link Technology, CETC, Xi'an 710068, China
3. Beijing Key Laboratory of Wireless Communication Testing Technology, Beijing 100102, China
4. National Engineering Laboratory for Mobile Network Technologies, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: MIMO (multi-input multi-output) OTA (over-the-air) testing is an important method to evaluate the radiation performance of the antenna system, as well as an indispensable step of research & development (R&D) and mass production stages. With the advent of the 5G mobile communication system, the introduction of millimeter wave (mmWave) and other new technologies brings new challenges to the traditional MIMO OTA test method, and mean-

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2021-02-07

基金项目: 国防基础科研计划资助项目 (No.JCKY2017210A001)

Foundation Item: Defense Industrial Technology Development Program (No.JCKY2017210A001)

while makes OTA testing the only feasible solution for testing future 5G devices. Firstly, the challenges faced by 5G OTA testing was described. Then the applicability of the 4G mobile communication system OTA test method to the 5G OTA performance test was analyzed, and how to extend the low-frequency test method to the mmWave terminal test was studied. Then the current status of 3GPP's research on MIMO OTA testing was summarized, and the system model, test principle, and performance evaluation indexes of simple-sectored multi-probe anechoic chamber (SS-MPAC) were explained in detail. In addition, smaller setup sizes can still yield reasonable measurement accuracy was verified. Finally, future research trends were prospected.

Key words: 5G, multi-antenna terminal, SS-MPAC, over-the-air testing

1 引言

为了满足网络社会的需求, 5G 移动通信系统在网络容量、数据速率和时延等方面将带来革命性的改进, 显著提高网络的灵活性和效率。毫米波 (mmWave) 和大规模 MIMO (multi-input multi-output) 等 5G 的关键技术^[1], 在显著提高通信系统的数据吞吐量和频带利用率的同时, 其应用也带来了诸多挑战。首先, 相对于 6 GHz 以下频段, 毫米波信号的路径损耗与衰减更大。一方面是由于理论上自由空间的电波传播损耗与工作频率的平方成正比; 另一方面, 氧气、水蒸气对毫米波信号的吸收衰减更大。此外, 毫米波信号绕射, 穿透能力差, 反射效应强, 毫米波信道的角度扩展更小, 功率空间分布更集中, 信号传输过程中障碍物对其的阻碍效应也更为明显。为了克服毫米波信号传输过程中面临的上述挑战, 5G 毫米波终端将天线阵列与波束成形 (beamforming) 技术^[2]相结合, 通过引入天线阵列增益增加设备的等效全向辐射功率 (effective isotropic radiated power, EIRP) 以克服毫米波频段的高路损, 并通过自适应波束成形算法实时优化阵列中每个天线单元馈入信号的幅度和相位权值, 控制波束指向期望的辐射方向, 从而实现波束的扫描及覆盖。其次, 5G 系统充分利用无线电信号的传播空间特性, 传播模型从二维 (2D) 水平面拓展到三维 (3D)。因此, 4G 移动通信系统采用的 2D 信道模型不再能够很好地描述信号的

传播特性, 采用 3D 信道模型可以为 5G 多种应用场景提供支撑, 但也使测试的信道复现过程变得更加复杂。

5G 时代的测试原理及测试技术也面临革命性的变革^[3]。5G 毫米波终端将采用封装天线 (antenna-in-package, AiP) 解决方案, 这种多通道射频模块与天线阵列深度融合的系统架构意味着天线与射频链路之间没有可连接仪器的测试端口, 天线辐射特性指标与射频指标无法分别独立测试^[4]。因此, 空口 (over-the-air, OTA) 测试将取代传统的传导测试, 成为 5G 终端唯一可行的测试解决方案^[5]。基于信道模拟器的 MIMO OTA 测试可以在实验室内通过模拟目标信道功率谱、极化、时域和频域等方面的特性, 使被测设备 (device under test, DUT) 仿佛置身于真实的信道环境中。在不需要对 DUT 进行任何破坏和有线连接的情况下, 提供了一个可控、可调试和可重复的测试环境。采用 MIMO 技术的移动终端需要通过测试评测用户通过移动终端访问数据业务时的性能, 而 MIMO OTA 测试可以针对移动终端设计中的所有关键部分, 包括天线、射频前端、基带处理单元等, 进行全面测试。因此, 探究适用于 5G 终端的 MIMO OTA 测试方法至关重要。

2 MIMO OTA 测试研究现状

2.1 4G MIMO OTA 测试方法对于 5G 终端测试的适用性

此前针对 4G 终端的 OTA 测试提出的 3 种



OTA 测试方法^[6]分别为：混响室（reverberation chamber, RC）法^[7]、辐射两阶段（radiated two-stage, RTS）法^[8]和多探头吸波暗室（multi-probe anechoic chamber, MPAC）法^[9]。

混响室是一个配备模式搅拌器（stirrer）和转台的封闭金属腔，其原理是通过运行模式搅拌器对电磁波进行扰动，从而在工作区域（working volume）内产生大量具有随机相位的信号，模拟出瑞利衰落环境，从而对 DUT 进行测试。采用 RC 法可以有效地分析与角度扩展无关的天线辐射参数，广泛应用于电磁兼容性测试、SISO（single-input single-output）OTA 天线辐射性能测试及吞吐量性能测试，其缺点是无法准确模拟空间角度。由于在毫米波频段上的信道具有高度稀疏的特点，因此该方法不适合对 5G 终端进行测试。

RTS 方法是第三代合作伙伴计划（the 3rd Generation Partnership Project, 3GPP）、美国无线通信和互联网协会（Cellular Telecommunication and Internet Association, CTIA）、中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）等国际国内标准化组织批准的 MIMO OTA 测试方法^[10]。该方法的基本原理是将 OTA 测试分为两个步骤^[11]：第一步获取 DUT 的天线方向图，第二步根据测量得到的天线方向图求解校准矩阵的逆矩阵，然后应用测量到的方向图和逆矩阵进行吞吐量测量。参考文献[12]分析了将 RTS 方法扩展到 5G 设备的可行性，证明了其对于毫米波终端测试的局限性，该方法的缺点主要有两方面：首先，它只适用于静态毫米波天线的测试，在动态信道条件下 DUT 的天线方向图很可能会发生改变，因此它不适用于动态信道条件下的测试；其次，该方法所需的 OTA 探头天线的数量等于 DUT 上的接收天线数量，导致系统成本随着天线数量的增加而显著增长。

MPAC 方法作为 3GPP、CTIA、CCSA 等标

准化组织认定的 MIMO OTA 基准测试方法^[6]，其进行终端测试的二维系统配置由基站模拟器、空间信道模拟器、吸波暗室和一组在水平圆环上均匀分布的 OTA 探头天线构成。DUT 位于圆环中心的测试区域，通过在 DUT 周围布置一组天线，可以模拟 MPAC 系统到达角的空间分布，使被测设备处于仿真复杂多径远场环境的近场环境中，并且等间隔分布的探针配置可以为模拟复杂信道环境提供一定的灵活性。参考文献[13]总结了采用 MPAC 配置进行 5G 天线系统 OTA 测试的最新研究进展，与前两个方法相比，MPAC 可以通过控制多探头天线的辐射信号在暗室中合成真实的传播环境，被认为是最有潜力成为 5G 毫米波终端测试的方法。但如果用二维探头配置模拟 5G 信道模型，根据 MPAC 方法计算所需探头数 $K=2\lceil \pi D/\lambda \rceil +1$ ，其中， D 为测试区域直径大小， λ 为波长，不同频率下构造一定大小的测试区域所需的探头数如图 1 所示。

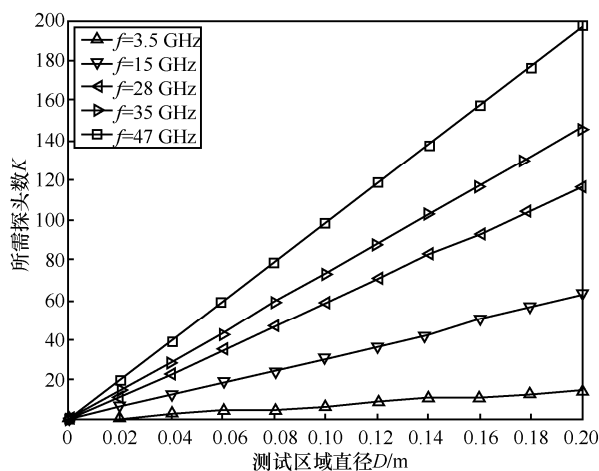


图 1 不同频率下构造一定大小的测试区域所需的探头数

由图 1 可以看出，为了模拟高频信道环境以及创建出更大的测试区域，测试系统可能需要大量的探头才能满足需求。此外，由于 5G 应用场景更加复杂，信道模型由二维扩展为三维，在毫米波频段下，无法用传统的二维 MPAC 方法模拟出三维信道环境。因此，直接将 MPAC 方法扩展到

毫米波频段的测试并不可行。

综上所述, 现有 4G MIMO OTA 测试方法并不适用于毫米波频段的测试, 找到适合毫米波终端的 OTA 测试方法是目前亟待解决的问题。

2.2 3GPP MIMO OTA 测试研究现状

目前 3GPP 已经逐步对 5G OTA 测试进行了标准化: 参考文献[14]对 0.5~100 GHz 频率的信道模型进行了研究, 其中规定了毫米波终端测试适用的信道模型, 参考文献[15]规定了 5G 新无线电(new radio, NR)的用户端射频(radio frequency, RF)、无线资源管理器(radio resource management, RRM)和解调等的 OTA 测试方法, 为了进一步测试多天线用户设备的接收性能, 参考文献[16]定义了 5G 运行的两个频段: (1) 450~7.125 GHz 为频率范围 1 (frequency range 1, FR1); (2) 24.25~52.6 GHz 为频率范围 2 (frequency range 2, FR2), 并验证了 FR1 和 FR2 频段下进行 MIMO OTA 测试的辐射指标和端到端测试方法。其中, MPAC 和 RTS 方法已在标准中被认定为 5G FR1 的测试方法。此外, 简单扇形排列的多探头吸波暗室 (simple-sectored multi-probe anechoic chamber, SS-MPAC) 法也被确定为毫米波 5G 终端的测试方案。

2.2.1 FR1 测试方法

对于低频 MPAC OTA 系统, 允许采用 16 个等间距双极化探头配置进行测试, 适用于最多采用 4×4 MIMO 且大小在 20 cm 内的设备, 对于大小超过 20 cm 的设备, 其测试方案仍待进一步研究。研究结果表明测试距离可以不满足远场要求, 在测试区大小为 20 cm 时测试距离只需大于 1.2 m 即可。

对于低频 RTS OTA 系统, 第一阶段是获取被测设备的天线方向图, DUT 需要具有测量入射到 DUT 天线的已知信号的幅度和相对相位的能力, 此功能通常称为天线测试功能 (antenna test function, ATF)。使 DUT 相对已知的入射信号进行旋

转, 可以根据 DUT 的辐射幅值和天线之间的相对相位构造 3D 或 2D 天线方向图。第二阶段是在进行吞吐量测试之前校准探针天线和被测设备接收器之间的传输矩阵。基站天线方向图作为发射端天线方向图加载到信道仿真器中, 在第一阶段获得的被测 DUT 天线方向图作为接收端天线方向图加载到信道模拟器中, 然后两者都与选择的信道模型卷积, 使 DUT 接收预定的信号。但在吞吐量测试之前, 为了校准消声室中信号传播的影响和装置中接收天线的影响, 需要测量消声室内的传播矩阵, 并通过乘以传播矩阵的逆矩阵修改传输信号。RTS 方法也只能支持测试最多 4×4 MIMO 且大小在 20 cm 内的设备, 并且需要用于具有天线测试功能的 DUT 的测试。由于第一阶段的天线方向图测试需要满足远场条件, 因此最小测试距离需要大于 $\max\{R_{TZ} + 2D_{rad}^2/\lambda, 3D, R_{TZ} + 2\lambda\}$, 其中, R_{TZ} 为测试区半径, D_{rad} 为有效辐射孔径的直径。

FR1 频段下的 MIMO OTA 测试模拟的信道传播环境为二维无仰角模型, 与参考文献[15]中确定的基准信道模型相比, 参考文献[16]更新了不同场景下的信道参数: 采用城市宏小区信道模型进行 2×2 MIMO 终端的测试, 采用城市微小区测试 4×4 MIMO 终端。

2.2.2 FR2 测试方法

根据参考文献[16], 进行毫米波 MIMO OTA 测试的 SS-MPAC 系统配置如图 2 所示, 在距离测试区域中心最小半径为 0.75 m 的扇区上放置 6 个双极化探头 (由图 2 中的黑色圆点表示) 组成的 SS-MPAC 系统可用于 5G 毫米波终端测试, 每个探头的位置在信道模型坐标系下的坐标见表 1。SS-MPAC 系统目前支持的最大测试区域大小为 20 cm。

对于 MIMO OTA 测试来说, 实际 SS-MPAC 系统的校准和 SS-MPAC 配置中仿真信道模型的验证是必要的过程。信道验证测试的目的是确保目标信道模型在测试区域内能够正确实现。FR1 信道

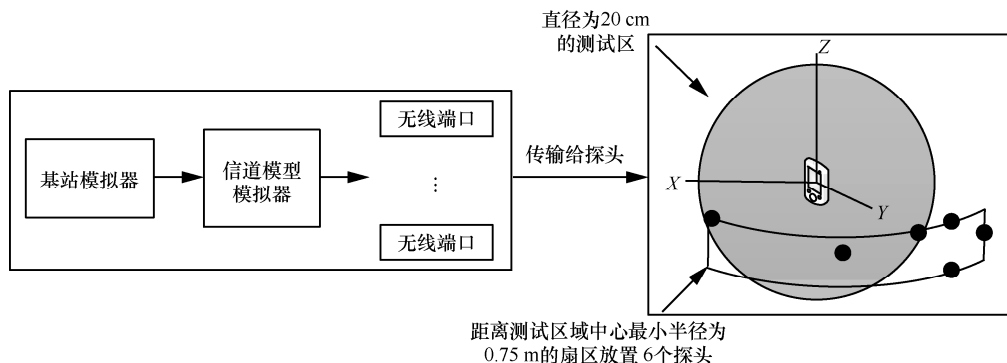


图2 进行毫米波 MIMO OTA 测试的 SS-MPAC 系统配置

模型验证测试主要包括功率时延分布（PDP）、多普勒/时间自相关函数、空间相关性、交叉极化、功率验证；FR2 信道模型验证与 FR1 的不同之处在于去掉了空间相关验证，新增了 PAS 总变距指标。

表1 SS-MPAC 中的探头位置

探头数量	Theta/ZoA	Phi/AoA
1	90°	75°
2	85°	85°
3	85°	55°
4	85°	95°
5	95°	95°
6	90°	105°

3 针对5G毫米波终端的MIMO OTA测试方法

在毫米波频段下，终端测试的挑战之一在于如何用更少的 OTA 探头和信道模拟器实现一个足够大的测试区域。由于毫米波频段下信道高度稀疏且具有很强的反射性，并且信道被通信链路另一端的波束成形操作过滤后会使终端所处的毫米波信道更具有指向性，因此用有限数量的探头构成的 SS-MPAC 配置，可以在降低系统成本的同时再现目标三维信道模型；同时，由于可以自由选择有源探头，因此保留了再现真实、动态信道模型的能力。本节将进一步分析 SS-MPAC 的系统模型、目标信道与 SS-MPAC 配置的信号模型、SS-MPAC 信道重

构方法以及相应的系统性能评价因子。

3.1 SS-MPAC 系统模型

SS-MPAC 是一种 3D MPAC 测试方法，该配置已应用于 5G 大尺寸低频设备、大规模 MIMO 和毫米波系统天线系统的测试。通过在被测设备周围布置天线阵列，在 DUT 周围构造类似于复杂多径远场环境的近场环境，可以模拟 3D MPAC 系统中到达角的空间分布。SS-MPAC 系统模型示意图如图 3 所示，信号通过模拟的空间信道从基站模拟器传输到 DUT，信道模拟器为信号的每条路径加入信道衰落，然后通过探头天线阵列将所有方向的信号同时辐射到暗室中。和非模拟多径环境下的测试过程相同，测试区域内产生的场由 DUT 天线集成后由接收器进行处理。其中，信道模拟器与探头天线之间使用的开关电路可以减少所需的模拟器数量，从而降低测试系统的成本。该方法的成本主要由所需的探头数和探头与 DUT 之间的距离（range length）决定。由于毫米波频段的波长仅有几毫米，为了在终端测试中满足 Fraunhofer 远场条件（ $2D^2/\lambda$ ）需要至少 3~5 m 的暗室，这会使测试成本激增。目前已有许多文献对测试距离进行了深入的讨论，其中，参考文献[17]研究了在多探头吸波暗室中进行毫米波 MIMO OTA 测试时合适的测试距离和暗室大小，证明了即使在不满足 Fraunhofer 远场距离的条件下也可以使测量精度达到要求。此外，参考文献[9]通过仿真进一步验证了在测试距离

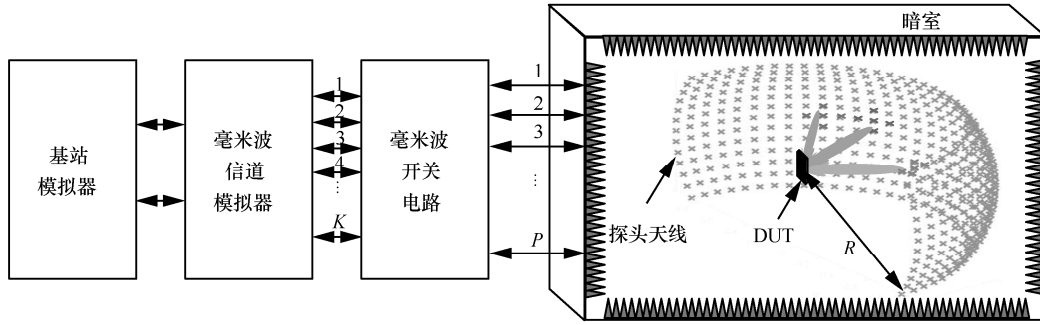


图 3 SS-MPAC 系统模型示意图

为 1 m 的条件下可以达到远场相近的仿真精度。因此对于 SS-MPAC 配置最大的问题是如何在扇区内放置探头，在使用尽可能少的探头的同时保证测试准确度。

3.2 目标信道与 SS-MPAC 配置的信号模型

含有 U 个天线单元的毫米波终端信号模型可以表示为：

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}_{P \times U} \cdot \mathbf{H}_{U \times S} \cdot \mathbf{X}_{S \times 1} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{X}$ 为 S 个发射端天线单元的信号矢量， $\mathbf{H}$ 为 S 个发射端天线单元到终端上的 U 个接收端天线单元的信道传递函数，加权矩阵 $\mathbf{W}$ 可以控制波束指向不同的方向， $\mathbf{Y}$ 是终端天线端口 P 接收的信号矢量。

对于几何信道模型，信道的传递函数 $\mathbf{H}$ 被定义为：

$$\mathbf{H}(f, t) = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n(f, t) \quad (2)$$

其中， $\mathbf{H}_n(f, t)$ 中的第 (u, s) 项表示：

$$h_{u,s,n}(f, t) = \sum_{m=1}^M \begin{bmatrix} g_u^V(\Omega_{n,m}^{\text{Rx}}) \\ g_u^H(\Omega_{n,m}^{\text{Rx}}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \chi_{n,m}^{\text{VV}} & \chi_{n,m}^{\text{VH}} \\ \chi_{n,m}^{\text{HV}} & \chi_{n,m}^{\text{HH}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_s^V(\Omega_{n,m}^{\text{Tx}}) \\ g_s^H(\Omega_{n,m}^{\text{Tx}}) \end{bmatrix} \exp(j2\pi\vartheta_{n,m}t + \Phi_{n,m}) \exp(-j2\pi f\tau_n) \quad (3)$$

其中， $\Omega_{n,m}^{\text{Tx}}$ 、 $\Omega_{n,m}^{\text{Rx}}$ 、 $\vartheta_{n,m}$ 、 $\Phi_{n,m}$ 分别为第 n 条簇中第 m 条子径的离开角、到达角、多普勒频率和一个服从 $[-\pi, \pi]$ 内均匀分布的随机变量， τ_n 是第 n

条簇的时延， g_s^V 和 g_s^H 分别为发射端天线单元 s 的垂直极化和水平极化天线方向图，同理， g_u^V 和 g_u^H 分别为接收端天线单元 u 的垂直极化和水平极化天线方向图，系数 $\chi_{n,m}^{ab}$ 为第 n 条簇中第 m 条子径信号发射极化 b 和接收极化 a 。

在第 3.1 节描述的 SS-MPAC 配置的 OTA 测试下，传递函数 $\hat{\mathbf{H}}$ 由信道衰落模拟器和 SS-MPAC 配置组成， $\hat{\mathbf{H}}$ 可以表示为：

$$\hat{\mathbf{H}}(f, t) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{H}_{\text{OTA}}(f, t) \quad (4)$$

其中， $\mathbf{F}$ 是 K 个 OTA 探头天线和 U 个 DUT 天线间的传输矩阵，在 SS-MPAC 系统中，传递函数 $\mathbf{F}$ 由 OTA 探头天线、自由空间传播损耗和 DUT 天线特性决定， $\mathbf{H}_{\text{OTA}}(f, t)$ 是信道模拟器产生的第二个传输矩阵， $\mathbf{H}_{\text{OTA}}(f, t)$ 水平极化和垂直极化的第 (k, s) 项可表示为：

$$h_{k,s,n}^{\text{V,OTA}}(f, t) = \sum_m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \chi_{n,m}^{\text{VV}} & \chi_{n,m}^{\text{VH}} \\ \chi_{n,m}^{\text{HV}} & \chi_{n,m}^{\text{HH}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_s^V(\Omega_{n,m}^{\text{Tx}}) \\ g_s^H(\Omega_{n,m}^{\text{Tx}}) \end{bmatrix} \exp(j2\pi\vartheta_{n,m}t + \Phi_{n,m}) \exp(-j2\pi f\tau_n) \cdot \sqrt{g_{k,n}} \quad (5)$$

$$h_{k,s,n}^{\text{H,OTA}}(f, t) = \sum_m \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \chi_{n,m}^{\text{VV}} & \chi_{n,m}^{\text{VH}} \\ \chi_{n,m}^{\text{HV}} & \chi_{n,m}^{\text{HH}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_s^V(\Omega_{n,m}^{\text{Tx}}) \\ g_s^H(\Omega_{n,m}^{\text{Tx}}) \end{bmatrix} \exp(j2\pi\vartheta_{n,m}t + \Phi_{n,m}) \exp(-j2\pi f\tau_n) \cdot \sqrt{g_{k,n}} \quad (6)$$

其中， $g_{k,n}$ 是为了重现第 n 条簇在第 k 个 OTA 探



头分配的探头功率权重，它基于信道重构方法进行计算，其目标是优化探头天线的功率权重，从而重建目标空间信道模型。

3.3 SS-MPAC 信道重构方法

参考文献[18]中介绍了两种不同的信道重构方法，分别为平面波合成（plane wave synthesis, PWS）和预衰落合成（prefaded signal synthesis PFS）技术，参考文献[19]针对这两种方法对 SS-MPAC 的适用性进行了比较，证明了 PFS 比 PWS 更准确，并且 PWS 属于相干合成技术，需要对系统内多个探头的辐射功率和相位进行精确校准，因而目前 SS-MPAC 基本采用 PFS 方法。

预衰落合成技术基于多径信道模型中“簇”的概念，针对每簇信道响应的统计特征，控制暗室内测试探头使得其辐射信号的统计特性与经历目标信道环境衰落后的信号统计特征一致，如平均功率时延、多普勒频谱、垂直水平极化比等。每簇信道都具有一定的来波角度分布，通常使用中心来波角、角度扩展等参数描述其平均功率随入射角度的分布，也称功率角度谱（power azimuth spectrum, PAS），因此为了这种角度散布效果，系统需要使用多个不同方位角度的探头，其中各个探头辐射信号统计独立，且分布特性均与目标簇信道的统计特征相同，同时通过优化控制多个探头的发射功率权重模拟目标簇信道功率随方位角度散布的特征。在某种程度上，可理解为系统使用离散的、有限个探头对目标信道连续的功率角度谱进行了“采样”和“再现”。由于信道的功率角度谱与衡量测试精确度的评价指标密切相关，因此预衰落合成技术最关键的环节就在于优化探头的发射权重精确模拟预期信道模型的来波角和角度扩展等功率角度谱特性^[20-21]。

3.4 系统性能评价因子

任何测试系统或测试方法都需要特定的评价指标评估测试的准确度，目前对于 5G 毫米波终端测试的评价因子主要有以下 5 种^[22]。

（1）空间相关误差（spatial correlation error）

该评价因子通过计算 OTA 配置中特定测试区域内的空间相关性误差，间接地评估再现的 PAS 与目标 PAS 之间的偏差。该指标对于低频段 MIMO OTA 测试至关重要。由于毫米波频段将更关注波束选择过程，因此空间相关指标对于毫米波测试显得没有那么重要。但需要指出，当相关系数接近于 1 时，即使计算出的偏差很小也会对空间复用性能等指标产生很大的影响；而在相关系数本身的值就很小的情况下，即使产生很大的误差也不会对系统性能造成很大的影响。因此通过加权可以对不同大小的相关值区别化处理，使计算出的误差更加精准。

任一空间位置对 $q = (p_{q1}, p_{q2})$ 之间的相关性可以表示为：

$$\hat{\rho}_q = \oint P(\Omega) \exp(j\Omega \cdot (p_{q1} - p_{q2})) d\Omega \quad (7)$$

其中， $P(\Omega)$ 是空间 Ω 的角度功率谱， p_{q1} 和 p_{q2} 分别表示空间位置对 q_1 和 q_2 的空间位置矢量，采用 SS-MPAC 配置得到的空间相关函数为：

$$\hat{\rho}_q = \frac{\sum_{k=1}^K g_k^2 L(d_{p1,k}) L(d_{p2,k}) \exp(j\|\Omega\|(d_{p1,k} - d_{p2,k}))}{\sqrt{\sum_{k=1}^K L^2(d_{p1,k}) g_k^2 \sum_{k=1}^K L^2(d_{p2,k}) g_k^2}} \quad (8)$$

其中， Ω 是已知空间角 Ω 的波矢量， K 是探头数， g_k 为第 k 个探头的权重， $d_{p1,k}$ 和 $L(d_{p1,k})$ 分别是第 k 个探头和空间位置 p_{q1} 之间的距离和路径损耗。由此最终计算出的加权均方根（RMS）相关误差表示为：

$$e_\rho = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q |\rho_q - \hat{\rho}_q|^2 \max(|\rho_q|, |\hat{\rho}_q|)} \quad (9)$$

（2）波束峰值距离（beam peak distance）

波束峰值距离是指波束的概率加权平均方向之间的角距离，该角距离以度为单位，计算式可表示为：

$$D_b = \left\| \sum_{b=1}^B \Omega_b p_r(\Omega_b) - \Omega_b p_o(\Omega_b) \right\| \quad (10)$$

其中, B 是固定波束的数量, 即 DUT 预分配的码本大小, $\Omega_b = (\phi_b, \theta_b)$ 代表第 b 个波束的方位角和仰角, p_r 和 p_o 分别表示采用参考目标信道和 OTA 配置时的波束分配概率。波束峰值距离越小表示信道模拟得越精确。

(3) 波束分布总变化距离 (total variation distance of beam allocation distributions)

波束分布总变化距离与波束峰值距离一样, 都属于波束选择性指标, 计算二维波束分布总变化距离的计算式为:

$$D_s = \frac{1}{2} \sum_{b=1}^B |p_r(\Omega_b) - p_o(\Omega_b)| \quad (11)$$

其中, D_s 的取值范围为 $[0, 1]$, 0 表示完全相似, 1 表示完全不同。

(4) 固定波束功率损耗 (fixed beam power loss)

该评价因子假设系统具有固定波束, 即具有 DUT 天线权重的离散码本, 用于评估测试距离 R 小于 Fraunhofer 距离造成的测试区波前弯曲平均损失了多少功率。该指标的推导如下: 探头位置由位置向量 $\bar{a}_n$ 和 DUT 天线单元位置向量 $\bar{b}_m$ 确定, 从探头 n 到 DUT 天线单元 m 的球面波相对原点相位的相位偏移可计算为:

$$a_{nm} = (\|\bar{a}_n - \bar{b}_m\| - R) \frac{2\pi}{\lambda} \quad (12)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示范数矢量运算, λ 是载波中心频率的波长, 同理平面波前第 n 个探头方向上的相位偏移可表示为:

$$\beta_{nm} = \frac{-\bar{a}_n \cdot \bar{b}_m}{\|\bar{a}_n\|} \frac{2\pi}{\lambda} \quad (13)$$

其中, $\cdot$ 代表点积运算。在固定波束系统中, 假设来自波束主方向的平面波会使来自基站天线的信号相干结合, 而在球面波中部分结合的信号互不相干, 导致接收功率损耗, 从而降低了信噪比。利用余弦函数可以计算出第 n 个探头方向上的损耗:

$$Q_n = \left| \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \cos(\beta_{nm} - a_{nm}) \right|^2 \quad (14)$$

因此在所有 N 个探头位置上取平均求得的固

定波束功率损耗可表示为:

$$Q_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q_n \quad (15)$$

(5) PAS 总变化距离 (total variation distance of PAS)

该评价因子用于评估 OTA 配置重建目标 PAS 的能力, 目前在 3GPP 中已被广泛讨论^[16], 是一项重要的信道仿真精确度评价指标。功率角度谱的总变化距离定义如下。首先, 利用经典的 Bartlett 波束形成器和假设的 DUT 阵列来估计 PAS, 这相当于利用 DUT 阵列有限的孔径对传输信道的实际功率角度分布进行滤波。对理论参考模型进行 PAS 估计可以通过以下计算式计算:

$$\hat{P}_r(\Omega) = \mathbf{a}^H(\Omega) \left(\oint \mathbf{a}(\Omega') P(\Omega') \mathbf{a}^H(\Omega') d\Omega' \right) \mathbf{a}(\Omega) \quad (16)$$

其中, $P(\Omega')$ 是参考模型的 PAS, 利用 OTA 系统对参考模型进行离散化实现得到的相应的 PAS 估计值可表示为:

$$\hat{P}_o(\Omega) = \mathbf{a}^H(\Omega) \mathbf{R}_o \mathbf{a}(\Omega) \quad (17)$$

其中, $\mathbf{a}(\Omega)$ 表示 DUT 阵列对应空间角 Ω 的阵列控制矢量, $\mathbf{R}_o = \{\rho_q\}$ 是空间相关矩阵, 矩阵中的元素代表 DUT 天线单元位置间的空间相关系数。然后将两个功率角度谱估计值归一化, 使它们可以表示为二维概率分布的形式, 并计算出归一化的 PAS 之间的总变化距离为:

$$D_p = \frac{1}{2} \int \left| \frac{\hat{P}_r(\beta)}{\int \hat{P}_r(\beta') d\beta'} - \frac{\hat{P}_o(\beta)}{\int \hat{P}_o(\beta') d\beta'} \right| d\beta \quad (18)$$

其中, D_p 的范围在 $[0, 1]$, 0 表示完全相似, 1 表示完全不同。

以具有一个 8×8 子阵列的毫米波终端为例, 采用如图 3 所示的 SS-MPAC 配置, 探头所在的扇形角度区域在水平方位角和俯仰角的角度范围分别为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 和 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 。假设在方位角和俯仰角域都以 5° 的角度间隔放置探头, 则水平方位角域所需的探头数为 $\frac{180}{5} + 1 = 37$, 俯仰角域所



需的探头数为 $\frac{60}{5}+1=13$ ，系统共需要配置 $K=37 \times 13=481$ 个探头进行测试。以 3GPP TR38.901 中的 CDL-B 信道模型为例，在目标信道模型下计算出的角度功率谱如图 4 (a) 所示，与之相比，图 4 (b) 为配置了 481 个探头的 SS-MPAC 系统模拟出的角度功率谱，其与目标角度功率谱的 PAS 总变距 D_p 为 5%，表明采用 481 个探头可以很精确地模拟出目标信道环境。为了进一步说明 SS-MPAC 可以有效减小系统成本，图 4 (c) 显示了从 481 个探头中选取 8 个权重最大的主探头进行 PAS 模拟的仿真，计算出此时的 D_p 为 14%。结果表明在 SS-MPAC 配置下仅采用 8 个探头就能使模拟出的 PAS 与目标 PAS 近似度达到 85% 以上，所选择的探头数越多，模拟精确度越高。

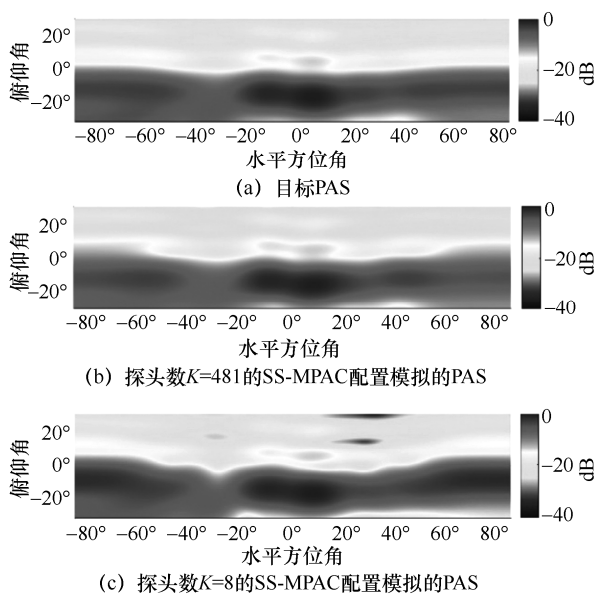


图 4 CDL-B 信道模型下的角度功率谱对比

4 MIMO OTA 测试前景展望

目前 3GPP 对于 5G MIMO OTA 测试系统配置的设计都是基于“黑盒”法，即 DUT 天线阵列信息未知，假设天线阵列覆盖整个终端。而实际上 DUT 内的天线只会放置在终端内某几个大小有限的位置上，如果将整个被测物都视为天线阵列会忽

视天线阵列偏移对测试的影响，并且可能会为测试系统带来不必要的硬件成本。对此，Spirent 在已知 DUT 内天线阵列信息的假设下比较了摆放在不同位置天线对于测试性能的影响^[23]，该提案证明了在同一个信道模型和缩放场景下，不同位置天线阵列中计算出的 PAS 相似百分比差异很大。随后，Keysight 在参考文献[24]中讨论了 DUT 偏移对于性能因子的影响，并在参考文献[25]中比较了“白盒”法与“黑盒”法对测试方法的影响。考虑到“白盒”法为测试性能的提升带来的潜力，或许可以成为进一步研究的方向。由于目前测试系统仅能测试尺寸在 20 cm 内的设备，对测试大于 20 cm 的设备还需要进一步研究。

从研发到一致性测试、生产、安装和维护，测试系统在 5G 设备的开发和验证过程中起着至关重要的作用。为了评估多天线终端的辐射性能需要对设备进行 MIMO OTA 测试，但在 5G NR 系统中应用毫米波频率、可控阵列、有源波束成形等技术会使终端设备的测试面临新的挑战。而且，由于毫米波的引入，5G 终端的天线将是小型且高度集成的单元，因此 OTA 测试成为 5G 终端唯一可行的测试方法。本文针对 MIMO OTA 测试方法进行了相关研究，首先讨论了 4G OTA 测试方法对于 5G 终端测试的适用性，虽然其中的 MPAC 方法和 RTS 方法适用于 5G 低频段终端测试，但如果扩展到毫米波频段仍存在许多挑战。随后通过对相关文献的综述，分析了 5G 毫米波终端在信道环境、系统配置等方面的测试需求，并从系统模型、测试原理、系统性能评价因子方面详细阐述了目前毫米波终端 MIMO OTA 测试方法。最后，基于 3GPP 的标准化进程，总结了 MIMO OTA 测试的研究现状，并对未来的研究方向进行了展望。由于目前对于 5G OTA 测试的大部分研究工作仍在理论分析阶段，为了确定未来毫米波终端测试解决方案，仍需要进行实际的测试验证。

参考文献:

- [1] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.
- [2] ZHANG M, CHEN X M, ZHANG A X. A simple tridiagonal loading method for robust adaptive beamforming[J]. Signal Processing, 2019, 157: 103-107.
- [3] FAN W, KYOSTI P, RUMNEY M, et al. Over-the-air radiated testing of millimeter-wave beam-steerable devices in a cost-effective measurement setup[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(7): 64-71.
- [4] KEYSIGHT. OTA test for millimeter-wave 5G NR devices and systems white paper[R]. 2018.
- [5] 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, 2019, 68(3): 2469-2474.
- [6] CTIA. Test plan for 2x2 downlink MIMO and transmit diversity over-the-air performance version 1.1.1[R]. 2018.
- [7] CHEN X M. Throughput modeling and measurement in an isotropic-scattering reverberation chamber[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(4): 2130-2139.
- [8] YU W, QI Y H, LIU K F, et al. Radiated two-stage method for LTE MIMO user equipment performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6): 1691-1696.
- [9] YANG X L, FAN W, MA N, et al. On simple-sectorized multi-probe anechoic chamber design for mmWave adaptive terminal[J]. IEEE Access, 2020(8): 26419-26432.
- [10] 3GPP. Verification of radiated multi-antenna reception performance of user equipment: TR37. 977 V14. 5. 0[R]. 2017.
- [11] 沈鹏辉, 漆一宏, 于伟, 等. 适用于 MIMO OTA 认证及研发测试的辐射两步法[J]. 安全与电磁兼容, 2019(2): 37-40, 69.
SHEN P H, QI Y H, YU W, et al. Radiated two stage method for MIMO OTA certification and R&D measurement[J]. Safety & EMC, 2019(2): 37-40, 69.
- [12] HEKKALA A, KYOSTI P, KYROLAINEN J, et al. Performance evaluation of sectorized MPAC for 5G UE antenna systems[C]//Proceedings of 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [13] FAN W, PEDERSEN G F, KYOSTI P, et al. Recent advances on OTA testing for 5G antenna systems in multi-probe anechoic chamber setups[C]//Proceedings of 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [14] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: TR38. 901 V15. 0. 0[R]. 2018.
- [15] 3GPP. NR; Study on test methods: TR38. 810 V16. 5. 0[R]. 2019.
- [16] 3GPP. Study on radiated metrics and test methodology for the verification of multi-antenna reception performance of NR user equipment (UE): TR38. 827 V2. 0. 0[R]. 2020.
- [17] KYOSTI P, FAN W, PEDERSEN G F, et al. On dimensions of OTA setups for massive MIMO base stations radiated testing[J]. IEEE Access, 2016, 4: 5971-5981.
- [18] KYOSTI P, JAMSA T, NUUTINEN J P. Channel modelling for multiprobe over-the-air MIMO testing[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2012, 2012(Pt. 3): 1-11.
- [19] PEI H L, CHEN X M, FAN W, et al. Comparisons of channel emulation methods for state-of-the-art multi-probe anechoic chamber based millimeter-wave over-the-air testing[C]//Proceedings of 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [20] KYOSTI P, HENTILÄ L. Criteria for physical dimensions of MIMO OTA multi-probe test setup[C]//Proceedings of 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Piscataway: IEEE Press, 2012: 2055-2059.
- [21] FAN W, LISBONA X C B, SUN F, et al. Emulating spatial characteristics of MIMO channels for OTA testing[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(8): 4306-4314.
- [22] KYOSTI P, HENTILÄ L, FAN W, et al. On radiated performance evaluation of massive MIMO devices in multiprobe anechoic chamber OTA setups[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(10): 5485-5497.
- [23] SPIRENT. Effect of range length to PSP: 3GPP R4-1907948[R]. 2019.
- [24] KEYSIGHT. System implementation of FR2 3D MPAC: 3GPP R4-1909729[R]. 2019.
- [25] KEYSIGHT. On white box testing: 3GPP R4-1915080[R]. 2019.

[作者简介]



马楠 (1979—), 男, 博士, 北京邮电大学讲师, 中国电子科技集团公司数据链技术重点实验室流动研究人员, 无线通信测试技术北京市重点实验室主任, 主要研究方向为无线通信测试技术、物联网。

余菲 (1996—), 女, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信测试技术。

杨晓丽 (1990—), 女, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为无线通信测试技术。

许晓东 (1980—), 男, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为无线组网及通信测试技术。

张治 (1977—), 男, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为无线信号智能检测与高效通信技术。