中国科学:信息科学 2026 年 第 56 卷 第 11 期: 2987–3009
SCIENTIA SINICA Informationis
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
评述

面向 6G 空天地与通感智的空口测试技术

洪伟[1,2*], 蒋政波[1,2*], 汪占源[1], 乔尚兵[1,3]

1. 东南大学信息科学与工程学院毫米波全国重点实验室, 南京 210096
2. 紫金山实验室, 南京 211111
3. 中国信息通信研究院, 北京 100191
* 通信作者. E-mail: weihong@seu.edu.cn, jzb@seu.edu.cn

收稿日期: 2026–04–14; 修回日期: 2026–07–15; 接受日期: 2026–09–15; 网络出版日期: 2026–10–28

国家自然科学基金 (批准号: 61627801) 和国家重点研发计划 (批准号: 2023YFF0717804) 资助项目

摘要 空口测试技术贯穿移动通信标准制定、设备研制、网络运维的全生命周期, 发挥着引领和支撑作用, 并正逐渐成为未来移动通信系统的主导测试范式. 本文面向 6G 空天地一体化、通信感知一体化、人工智能通信等新型应用场景, 分析了低轨卫星通信载荷与终端、通信感知一体化系统与低空无人机、智能网联汽车, 以及人工智能通信的空口测试需求与挑战, 最后提出了一种穹顶大规模多探头暗室测试技术框架.

关键词 6G, 空口测试, 空天地一体化, 通信感知一体化, 人工智能, 电磁孪生

1 引言

随着第六代移动通信 (sixth-generation, 6G) 的加速演进, 无线通信系统的范畴正发生深刻变革, 呈现空天地一体化、通信感知一体化 (integrated sensing and communication, ISAC)、人工智能 (artificial intelligence, AI) 与通信一体化的发展趋势. 这些变革将进一步推动电磁理论、信息理论与 AI 的深度融合 [1~6]. 图 1 展示了 6G 空天地与通感智的典型应用场景, 体现了全域立体覆盖的三维网络架构.

无线通信测试是加速通信新技术验证、保障系统性能指标达成、推动信息基础设施成熟可用的核心支撑手段, 测试技术贯穿移动通信的标准制定、设备研制、网络运维全生命周期. 6G 在频谱范围、网络维度与功能边界上的全面拓展, 对测试对象、测试方法与测试环境提出了全新要求.

传统测试范式以传导测试为主导, 即被测设备的射频接口与测量仪器的端口之间用射频线缆连接, 测量信号通过线缆传输. 然而, 随着毫米波、太赫兹频段在 6G 中的广泛应用, 天线与射频前端高度集成, 众多设备不再具备可供连接的射频接口. 同时, 对于采用多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术的设备而言, 传导测试无法真实体现天线方向图、极化特性、波束成形等空间传播因素对系统性能的影响, 难以完整准确地反映设备的实际工作性能. 因此, 在物理电磁辐射环境中对无线设备进行测试评估的空口 (over-the-air, OTA) 测试正逐渐成为 6G 时代不可或缺的核心测试手段 [7~10]. 需要指出的是, 传导测试在低频段一致性验证、低成本量产测试等场景中仍具有不可替代的作用, OTA 测试与传导测试在 6G 时代将长期并存、互为补充.

引用格式: 洪伟, 蒋政波, 汪占源, 等. 面向 6G 空天地与通感智的空口测试技术. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 2987–3009, doi: 10.1360/SSI-2026-0151
Hong W, Jiang Z B, Wang Z Y, et al. Over-the-air testing technologies for 6G integrated space-air-ground and communication-sensing-intelligence networks. Sci Sin Inform, 2026, 56: 2987–3009, doi: 10.1360/SSI-2026-0151

© 2026《中国科学》杂志社

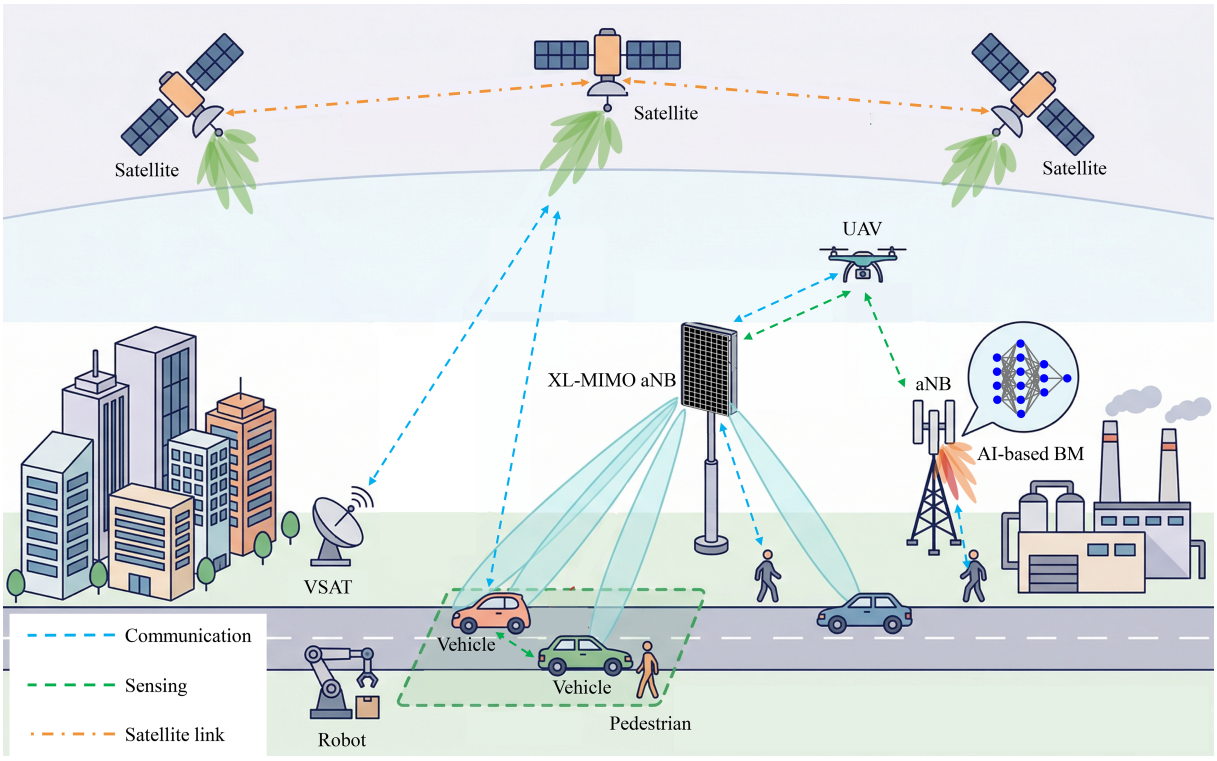

图 1　(网络版彩图) 6G 空天地一体化与通感智融合新场景.

Figure 1　(Color online) Typical scenarios of 6G integrated space-air-ground and communication-sensing-intelligence networks.

在 OTA 测试系统中, 射频测试与系统性能测试是同等重要且相辅相成的两大支柱. 射频测试侧重于评估设备底层的物理发射与接收能力, 测试指标涵盖等效全向辐射功率 (effective isotropic radiated power, EIRP)、总辐射功率 (total radiated power, TRP)、等效全向灵敏度 (effective isotropic sensitivity, EIS)、总全向灵敏度 (total isotropic sensitivity, TIS)、误差矢量幅度 (error vector magnitude, EVM) 以及天线增益、辐射方向图等, 其测试方法成熟、结果量化明确, 易于标准化和合规认证 [11~15]. 针对不同频段与尺寸的被测设备, 射频 OTA 测试已形成了多种成熟方案: 对于物理尺寸较小或工作频段较低的设备, 由于其电尺寸较小, 所需远场距离 (夫琅禾费距离 (Fraunhofer distance), $R_{\mathrm{FF}} = 2D^2/\lambda$) 较短, 通常采用远场 (far-field, FF) 测试方法直接测量; 对于毫米波终端以及大尺寸地面基站与卫星天线阵列, 波长缩短或天线尺寸增大导致电尺寸显著增加, 所需远场距离过长, 可采用紧缩场 (compact antenna test range, CATR) 技术, 利用反射面在较近距离内构建平面波, 或采用球面近场 (spherical near-field, SNF) 和平面近场 (planar near-field, PNF) 等技术通过近场数据采集与数学变换推导其远场辐射特性. 由于系统性能由收发信机、无线信道、基带算法等多种因素决定, 仅用射频指标难以全面表征设备在真实网络中的表现, 因此面向系统级能力评估的系统性能测试同样不可或缺. 系统性能测试的核心是在实验室中重构复杂的空间信道环境, 主要包括混响室法、辐射两阶段法与多探头暗室 (multi-probe anechoic chamber, MPAC) 法. 混响室法通过旋转搅拌器产生统计均匀场, 但对波束成形设备适用性有限; 辐射两阶段法将天线之间的传输特性在信道模拟器中进行抵消来等效传导连接, 但主要针对非自适应波束成形设备; MPAC 则通过在多个角度布置天线探头并控制其幅度和相位, 在静区内合成目标空间特性下的无线信道 [16~25]. 外场测试能够反映设备在真实传播环境中的性能表现, 但由于实际环境复杂且不可控, 测试结果难以保证重复性. 相比之下, 基于暗室环境的 OTA 系统性能测试凭借其可控性和可重复性, 具有不可替代的重要作用.

然而, 面对 6G 所引入的新场景与新技术, 现有 OTA 测试理论与方法体系面临严峻挑战.

(1) 测试对象与场景边界大幅拓展. 6G 空天地一体化网络纳入低轨卫星 (low Earth orbit, LEO)、无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 及智能网联汽车, 这些设备将成为 6G 测试体系中的重要组成部分. 特别是 6G

引入了通信感知一体化功能, 无人机既是感知目标, 也可充当通信节点 [26~29]. 感知性能的测试不仅需要重构无线信道, 还须高精度复现多目标、低慢小特征及背景杂波等要素, 这对测试系统环境重构的综合模拟能力提出了极大挑战 [30~32].

(2) 系统规模与信道复杂度呈现指数级增长. 6G 超大规模多输入多输出 (extremely large-scale MIMO, XL-MIMO) 系统的天线数量可达数千, 基站覆盖区域呈现近场特性, 需考虑球面波传播模型, 并具有空间非平稳性等复杂信道特性 [33~36]. 与此同时, 信道模拟器需支持数千个天线端口的并行仿真, 对通道数量提出了极高要求, 传统信道模拟器架构在数据处理能力与交互带宽方面均难以满足上述规模需求. 此外, 低轨卫星通信系统支持多波束灵活调度与空间复用, 未来波束数量可达数千 [37~39], 而现有测试方案主要针对单波束或少量波束场景, 采用逐一测试的方式评估性能, 不仅测试效率低下, 而且无法有效评估波束间的耦合效应与同频干扰, 据公开报道, 目前尚未见能够实现多波束同步并行测试的测试装置. 在多用户测试方面, 真实网络中多用户并发接入, 网络性能高度依赖多用户调度、干扰管理与资源分配等机制的协同有效性 [40,41], 然而传统 OTA 暗室通常仅配置单一静区, 只能支持单个被测设备的独立测试, 无法真实评估多用户并发场景下的系统级性能.

(3) 在新技术验证方面, 第三代合作伙伴计划 (3rd generation partnership project, 3GPP) 已围绕基于 AI 的波束管理 (beam management, BM) 与基于 AI 的信道状态信息 (channel state information, CSI) 压缩反馈技术开展研究并推进标准化工作, 相关技术也被视为 6G 候选关键技术. 然而, AI 模型对训练数据与部署环境的高度依赖性, 使得传统确定性场景测试方法在新型评价指标构建、跨厂商互操作性验证等方面均面临系统性挑战, 亟需构建面向 AI 通信功能的专项测试验证体系 [42~45].

本文深入分析了以低轨卫星通信载荷与终端、通信感知一体化系统与低空无人机、智能网联汽车及 AI 使能通信为代表的 6G 空天地与通感智测试技术挑战, 并提出一种穹顶大规模多探头暗室空口测试技术框架, 旨在为 6G 测试技术的发展提供理论与方案参考.

本文后续内容按 6G 新场景的空天地智维度展开: 第 2 节面向 “天”, 分析低轨卫星通信载荷与终端的测试挑战; 第 3 节聚焦 “空/感”, 梳理通信感知一体化系统与低空无人机的测试需求; 第 4 节立足 “地”, 阐述智能网联汽车的测试需求; 第 5 节探讨 “智”, 介绍人工智能通信的测试进展; 第 6 节提出基于穹顶大规模多探头暗室的 OTA 测试体系, 为多场景并存的下一代通信测试提供系统性的架构参考. 第 7 节对全文进行总结.

2　低轨卫星通信测试

低轨巨型星座已被认为是未来 6G 空天地一体化网络不可或缺的基础设施 [46,47]. 当前, 全球卫星互联网建设正处于加速扩张的战略机遇期, 以美国 SpaceX 的 Starlink 为代表的系统已步入大规模密集组网阶段 [48], 我国的星网 GW、垣信千帆星座等也在全力推进低轨卫星的批量化制造与发射部署.

相较于高轨卫星, 低轨卫星具备传输时延低与路径损耗小的优势 [49], 但其应用场景与传统的地面蜂窝网络存在显著差异. 在空间段, 低轨卫星极高的在轨运行速度引发了显著的多普勒频移, 并导致星间与星地波束的频繁切换以及网络拓扑的高动态时变 [50]. 在地面段, 由于星地链路的距离远超地面基站的覆盖半径, 且信号需穿透复杂的对流层与电离层, 面临着严重的闪烁效应及长时延特性 [51].

针对空间段的卫星通信载荷与地面段的卫星通信终端开展全面、准确的评估测试, 是保障空天地通信性能、推动关键技术演进的必要手段.

2.1　卫星通信载荷测试

随着低轨巨型星座的部署和下一代移动通信技术的发展, 卫星通信载荷正呈现出一系列深刻的发展趋势. 在工作原理方面, 载荷正从传统的 “透明转发” 模式向 “再生处理” 方向演进, 通过引入数字信号处理平台, 具备星上路由、处理和交换能力 [52]; 在天线形态方面, 星载天线正由传统的机械抛物面天线全面向大规模有源相控阵天线发展, 依靠数字波束成形技术实现海量波束的灵活覆盖与动态调配 [39,53,54]; 在频段应用上, 通信频段正进一步向更高的 Ka, Q/V 频段拓展 [55]. 这种全数字化、高度集成化以及向高频段化演进的发展趋势, 使得测

试重心转向空口环境, 对测试指标与测试方法提出了全新的挑战. 此外, 再生处理载荷引入星上数字信号处理功能, 其 OTA 测试不再局限于射频链路特性的验证, 而需要进一步覆盖星上处理时延、波束管理性能以及端到端通信质量等系统级指标.

低轨卫星通信载荷的 OTA 测试主要包括相控阵校准、射频指标验证、业务功能与性能验证等. 测试指标与测试方法之间并非严格的一一对应, 通常需根据测量精度、系统成本、测试效率等需求选择对应的测试方法.

大规模相控阵的波束赋形与精准指向能力, 建立在成百上千个射频通道严格的幅相一致性基础之上, 通道幅相不一致会引发波束畸变与指向偏差, 因此空口校准是卫星通信载荷测试的重要环节 [56]. 传统高精度相控阵校准方法通常基于平面近场扫描, 通过近场二维高密度采样获取阵列辐射电磁场的幅度与相位信息, 反演阵列口径面上的复激励分布, 是平面相控阵天线研制与性能标定中的重要校准手段 [57,58]. 随着大规模相控阵和系统级 OTA 测试需求的发展, 面向实际工作状态的空口校准方法逐渐受到关注, 例如支持原生波束扫描模式、无须单元级独立控制的空口校准方法 [56,59], 以及单元旋转矢量法、单元通断法等快速校准技术 [60~62].

在射频指标验证方面, 当前低轨卫星通信载荷普遍采用大规模、高增益的平面相控阵天线, 其电磁能量高度集中, 与平面近场测试的应用特性高度匹配, 因此平面近场已成为低轨卫星通信载荷天线特性测试的主流方案之一, 可实现对辐射方向图、波束宽度、旁瓣电平等无源指标的高精度验证 [63]. 针对平面近场测试中扫描点数过多的问题, 可通过局部截断、稀疏采样以及结合 AI 等技术提升测量速度 [64~66]. 在辐射类有源射频指标评估方面, 紧缩场利用反射面在较短的物理距离内将球面波转化为平面波, 构建出具有高幅相一致性的远场等效静区, 无需近远场数学变换, 直接测量 EIRP、增益噪声温度比 (G/T)、EVM、波束指向精度等有源射频指标 [67,68]. 然而随着低轨卫星尺寸增大与系统复杂度提升, 以及巨型星座量产带来的高效率测试需求、Q/V 频段乃至 W 频段应用对加工精度与静区相位稳定性的极致要求 [69], 传统紧缩场系统在反射面尺寸、静区质量、测试效率以及建设运维成本等方面, 正面临日益严峻的工程挑战.

系统级性能测试同样是卫星通信载荷验证的关键环节, 针对低轨星座高动态、多波束与多用户接入等特性, 卫星通信载荷测试面临新的挑战, 主要包括极端动态多普勒条件下的链路性能评估, 以及复杂波束管理机制下的系统性能验证. 前者涉及频率预补偿、同步与解调性能测试, 后者涵盖波束跟踪、波束切换、单波束内多用户接入以及大量多波束并发处理等场景 [70,71]. 为在实验室内高保真地重现复杂的星地通信场景, 需构建由微波暗室、离散探头、信道模拟器、终端模拟器等组成的多探头暗室测试系统. 当前卫星通信载荷协议级功能验证, 主要依赖紧缩场或远场暗室测试方案, 完成端到端链路建立与基础业务性能验证, 搭配二维伺服转台与信道模拟器, 可模拟低轨卫星角度变化与多普勒频移, 实现基础的动态波束跟踪、波束切换以及多普勒频移补偿能力验证. 然而由于转台转速、探头数量等固有局限, 该方案难以复现低轨卫星宽角、快变的波束扫描过程, 以及多用户、多波束并发的复杂场景, 无法完成卫星通信载荷全工况、高精度的系统级性能验证. 因此, 如何在有限空间的暗室中对高动态复杂星地链路、大量空间分布用户、多波束并发等场景进行高精度模拟, 已成为当前空天地一体化网络卫星通信载荷测试亟待解决的难题.

整星级测试还包括电磁兼容测试, 用于评估载荷与平台其他设备之间的相互电磁干扰 [72~74]. 另外, 热真空环境下的载荷测试也是整星验证的重要组成部分, 确保载荷在极端温度、真空环境下仍能维持设计性能 [75~77]. 上述环境适应性测试与通信能力测试相结合, 共同构成了整星级验证体系.

2.2　卫星通信终端测试

随着低轨巨型星座的密集部署, 卫星通信正从传统专用领域向消费级大众市场转变. 为满足不同的服务需求, 卫星通信终端逐渐分化出两条技术路线 [78]: 在手机直连卫星的场景中, 受制于物理尺寸与功耗, 直连卫星手机仅能配置低增益天线, 需依赖卫星侧高增益波束成形来满足链路预算; 在固定/移动宽带接入场景中, 通常采用高增益抛物面天线或平板相控阵的甚小口径终端 (very small aperture terminal, VSAT), 配合波束跟踪技术以补偿高频段的高路径损耗, 实现高吞吐量数据传输. 两类终端因工作频段、天线形态及链路补偿机制的差异, 需采取针对性的测试方案.

直连卫星手机的测试重点在于极端链路预算下的全空间辐射性能. 3GPP Release 17/18 已定义非地面网络

(non-terrestrial network, NTN) 终端 OTA 测试框架, Release 19 进一步完善了直连卫星手机的辐射性能专项测试要求, 沿用地面蜂窝终端成熟的测试技术框架, 以 TRP, TIS 作为全向辐射性能的核心指标, 同时补充终端对低轨卫星可见弧段内特定仰角下的 EIRP, EIS 测试, 完成定向通信链路的性能验证 [79, 80]. 当前直连卫星手机工作于 L/S 频段, 测试距离约 3 m 的常规远场全电波暗室可满足平面波测试条件.

Ku, Ka 等高频段宽带 VSAT 系统中, 固定宽带接入场景目前仍以高增益抛物面天线为主, 低剖面平板相控阵主要应用于车载、船载及机载动中通等高机动场景 [81]. 受高频短波长特性的影响, 大口径 VSAT 的远场测试距离可达数十米至上百米, 因此在工程实践中为降低测试空间需求, 通常采用紧缩场或近远场变换等技术实现等效远场测量, 测试内容包括 EIRP、G/T、极化特性及频谱合规性等指标. 而对于车载、船载与机载动中通场景下的低剖面平板相控阵终端, 其工作时需持续扫描波束以跟踪卫星, 还需验证波束指向精度、波束扫描性能以及通道一致性等特性 [67, 82]. 平板相控阵终端的 EIRP 等指标随波束扫描角度变化, 辐射性能具有明显的方向依赖性. 为准确表征其空间辐射特性, 需对不同波束指向及空间角度进行联合采样, 传统的单探头全角度完整测量耗时极长, 需要更高效的测试方法.

低轨卫星通信终端所经历的信道环境呈现出极高动态特性以及大时延性, 卫星过顶过程在几分钟内完成大角度范围的变化, 产生显著的多普勒频移, 同时, 星地距离导致往返时延达数十毫秒. 为在实验室环境中精确重构上述卫星信道特征, 可采用信道模拟器与多探头暗室相结合的 MPAC 测试法, 其中信道模拟器负责产生动态大时延、多普勒频移以及大动态范围路径损耗, 暗室中的离散探头则在物理空间重建多径信号的角度, 模拟地面反射引起多径散射以及卫星运动时来波角的连续快速变化. 此外, 多星切换能力也是卫星通信终端测试的关键测试项, 但其测试过程尤为复杂, 需要在暗室内同时模拟多颗卫星信号和实时轨迹, 然而目前多探头暗室的角度覆盖范围和角度精度尚不支持低轨星座的实时动态模拟 [83, 84].

在测试标准化方面, 3GPP Release 17/18 奠定了 NTN 终端测试标准的基础, 目前测试规范仍处于持续迭代完善阶段, 其中 NTN 终端射频一致性测试规范 [79] (如 TS 38.521-5)、NTN 终端协议一致性测试规范 [84] (如 TS 38.523-1)、多 LEO 星座互操作性测试框架以及面向手机直连卫星场景的 OTA 测试方法等, 都是 NTN 测试标准化工作的重要议题.

3　通信感知一体化系统测试

通信感知一体化是 6G 的新场景之一, 旨在通过空口及协议联合设计、频谱资源共享、软硬件平台复用等手段, 在同一系统框架内实现通信与感知两大功能. ISAC 系统的部署形态灵活多样, 可由单基站独立实现, 也可通过多基站协作或基站与终端协同的方式联合完成感知任务 [85]. 3GPP 正持续推进 ISAC, 面向新空口 (new radio, NR) 的 ISAC 专项研究已正式立项 [86], ISAC 感知功能亦已作为核心研究方向被纳入 6G 无线电综合研究项目 [87~89]. 根据 3GPP 无线接入网 (radio access network, RAN) 第四工作组相关公司提案与工作文件中的讨论, 6G 初期应至少具备对无源目标的检测、跟踪能力, 典型应用场景涵盖低空无人机、行人、车辆等 [90~92].

3.1　通信和感知测试

传统基站和终端测试体系聚焦于通信性能, 对感知性能的测试几乎处于空白状态. 感知性能包括探测距离、距离分辨率、速度分辨率、角度分辨率、定位精度、目标识别准确率等指标 [85, 93~95]. 面向 6G 演进, 感知性能的评估维度正发生深刻变化. 在 3GPP RAN WG4 第 118 次会议上, vivo 公司提出检测概率与虚警概率应作为量化感知性能的新型核心指标, 并建议在 6G 标准中建立专用感知信道模型, 以支撑不同部署场景下上述核心指标的准确测试与验证 [90]; 小米公司与中国移动的提案建议将最大感知时延纳入关键性能指标 (key performance indicator, KPI) 体系, 以 3GPP TS 22.137 中已有的 5G 感知 KPI 作为起点推进标准化进程 [91, 95, 96]. 在感知模式与测试配置方面, OPPO 公司提出基于收发点 (transmission reception point, TRP) 的单站感知与用户设备 (user equipment, UE) 参与的双站感知在性能表现上存在显著差异, 二者的性能要求与测试方案应分别制定, 以确保评估结果的准确性 [97].

感知效果高度依赖于目标特性与环境背景. 目标特性方面, 典型参数涵盖雷达散射截面 (radar cross section, RCS)、速度范围及运动模式等; 环境背景方面, 则需考虑地面、植被、建筑物等产生的静态杂波, 以及其他移动物体引发的动态杂波 [98~102]. 感知性能测试的关键在于对各类目标特性与环境背景的高保真模拟, 为此需要信道模拟器与雷达目标模拟器的协同配合. 信道模拟器负责重现无线信道的传播特性, 包括路径损耗、多普勒频移、多径衰落及时延扩展等; 雷达目标模拟器可模拟 RCS、距离、速度等特征参数及环境背景特性. 在通信感知一体化测试中, 还需重点模拟 “低小慢” 型运动目标, 如无人机、鸟类等. 此类目标具有低飞行高度、低飞行速度与小 RCS 的典型特征, 飞行高度通常低于 1000 m, 飞行速度低于 100 km/h, RCS 通常小于 0.1 m^2 [103~105], 且运动轨迹灵活多变, 对模拟器在回波功率、时延、多普勒频移及微多普勒特征等方面的精确控制能力提出了较高要求.

测试系统还需具备多目标并行模拟能力, 支持对每个目标的位置、速度、RCS 及运动轨迹等参数进行独立、灵活的配置. 此外, 背景杂波对感知性能的影响不可忽视, 其统计特性、空间分布与时变行为均会对系统的检测性能产生显著影响, 因此通信感知一体化测试系统还须具备杂波模拟能力 [106~109]. 感知性能与通信性能之间存在复杂的耦合与权衡关系, 现有测试方法仅能分别获取通信与感知的单项性能指标, 缺乏评估二者协同工作性能的理论和方法. 具体而言, 感知 KPI (检测概率、虚警概率等) 与通信 KPI (吞吐量、误块率等) 在共享时频与功率资源时存在权衡, 提升感知性能将占用通信资源, 故 OTA 测试须在同一信道激励下联合评估通感 KPI 之间的折中关系.

目前, 国内外主要通信设备厂商和研究机构已在 5G-A 阶段开展了通信感知一体化技术的外场测试与原型验证, 积累了面向低空监控、无人机探测等场景的初步工程经验, 为 6G 感知测试方法与标准体系的制定提供了重要参考 [110~112]. 仪器厂商也在开展室内 ISAC 测试方案研发, 是德科技针对 ISAC 多站感知需求开发了测试系统, 能够实时模拟目标散射特性、微多普勒特征及动态环境杂波 [113].

在 3GPP RAN4 射频测试规范的相关讨论中, OPPO 公司指出, 在 OTA 暗室中引入真实移动物体进行通感测试在工程上是极具挑战的 [97]. 多探头暗室凭借其多节点物理拓扑优势, 通过将信道模拟器与雷达目标模拟器相结合, 并对各探头的功率与相位实施动态赋值, 可在三维静区内高精度合成空间到达角与多普勒频移的动态变化, 从而具备同时生成来自不同方向的多目标信号的能力. 这一方案有望解决有限尺寸暗室内的动态目标模拟难题, 为实验室环境下多目标感知场景的复现提供技术途径 [8, 14].

3.2　低空无人机测试

无人机在 6G 体系中扮演双重角色: 一方面作为空中通信设备, 承担信息收发功能; 另一方面作为通信感知一体化网络必须精准识别的感知对象, 在 3GPP RAN4 相关公司提案中被视为重要的无源目标探测场景之一 [90, 91]. 3GPP TR 22.837 中对无人机入侵检测场景给出了量化指标: 在 95% 置信水平下, 漏检率不超过 5%, 虚警概率不超过 5% [93]. 这种双重角色定位, 以及标准中对高可靠感知的严格要求, 使无人机的测试需求远比传统手机终端或地面基站复杂. 在通信测试方面, 需综合考虑三维空间的传播特性、高速移动引起的多普勒效应、姿态变化对天线方向图的影响, 以及机身结构对信号的遮挡与散射效应等 [114~117]. 目前, 无人机通信测试主要依赖外场实测, 相关的 OTA 暗室测试方法与评估指标体系有待研究.

无人机通信的信道特性与地面通信存在显著差异, 因此需在三维空间维度上开展系统性的信道测量与建模 [114, 117~122]. 整体而言, 无人机飞行高度通常高于地面建筑, 视距传播概率较地面通信场景更高, 莱斯 K 因子更大, 但受飞行高度、俯仰角、地形及环境类型等因素制约, 信道统计特性呈现出复杂多样的规律. 在建模维度上, 无人机信道主要涵盖三类需求: 一是空地信道建模, 重点考察飞行高度、仰角及城市、郊区、农村等典型环境类型对路径损耗、时延扩展、莱斯 K 因子等统计特性的影响 [121, 122]; 二是空空信道建模, 此类信道整体呈准视距特性, 但仍受多径效应、大气折射及气象条件的影响, 在高空或远距场景下尤为突出, 需覆盖从数十米到数十千米的距离范围 [114, 119]; 三是动态非平稳信道建模, 无人机快速机动导致信道统计特性随时间快速变化, 需基于几何随机信道模型刻画功率时延谱、多普勒谱及散射簇生灭过程等时变特性, 以支撑测试系统对动态飞行场景的高保真复现 [120, 122]. 目前, 上述三类信道建模研究已积累了较为丰富的成果, 但面向 6G 毫米波及高移动性

无人机场景的宽带非平稳信道模型仍有待进一步完善.

如前所述, 作为通信感知一体化系统的感知目标, 无人机具有典型的 “低小慢” 特征 [104, 123]. 大多数民用无人机机体由塑料或碳纤维制成, 物理尺寸小, 对雷达波的反射能量较弱. 此外, 旋翼的高速旋转会在回波中叠加独特的微多普勒调制, 形成机身平动与旋翼转动的复合散射响应. 因此, 在测试 6G 基站的感知能力时, 必须精确模拟无人机特有的复合特征, 以验证 6G 感知算法能否有效区分无人机与飞鸟等类似目标.

无人机飞行的低空空域是地面蜂窝网络与低轨卫星网络的交叠区域, 各层网络在覆盖范围、传播特性、移动性及时延特性等方面存在显著差异, 须协同工作方能实现无缝立体覆盖 [124~126]. 传统网络测试以地面蜂窝网络为对象, 用户在二维平面内移动, 通过路测手段评估覆盖范围与干扰特性, 这种二维测试体系难以适应低空三维异构网络的需求, 亟需建立面向多层协同覆盖的新型测试方法, 综合考量地形、建筑、植被等三维环境因素, 以及卫星轨道参数等, 对多层网络的联合覆盖性能、基站部署方案及天线配置进行系统评估, 并支持依据实测数据对天线俯仰角、发射功率、频率分配等关键参数实施动态优化.

4　智能网联汽车测试

智能网联汽车是指搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置, 并融合现代通信与网络技术, 实现车与车 (V2V)、车与路 (V2I)、车与人 (V2P) 及车与云 (V2C) 等全方位网络连接的新型交通工具. 车辆的通信与感知性能直接影响驾驶安全性与用户体验, 必须经过严格且系统的测试评估. 当前, 智能网联汽车通信测试正从零部件级向整车级、从单一功能验证向综合性能评价转型, 其中, 整车 OTA 测试技术能够对车辆的有源辐射性能、空口接收灵敏度、天线系统装车表现以及整车综合通信性能进行一体化评估, 已成为智能网联汽车研发验证和质量控制的核心环节 [127].

在整车 OTA 射频指标测试中, 主要关注点在于整车收发系统的有源性能, 同时结合天线系统的无源指标进行综合评估. 无源指标主要包括远场辐射方向图、天线增益与效率等, 用于评估天线装车后的辐射特性; 有源指标则主要包括 TRP 和 TIS 等, 用于综合评估整车在实际工作状态下的信号收发能力. 整车 OTA 射频测试主要包括紧缩场、球面近场等标准测试方法, 此外, 中场测试法也可作为预研测试与快速诊断场景下的可选技术路径.

(1) 紧缩场在无源方向图以及 TRP, TIS 等有源指标的测试中均具备较高的精度, 目前已在整车测试领域投入商用 [128]. 反射面是紧缩场的关键组件, 由于测试频段向毫米波延伸, 大型整车反射面的精密加工成为测试系统建设的核心难题, 此外, 反射面的物理截断会引起边缘衍射效应, 导致测试静区内产生非理想纹波. 在宽频带整车 OTA 测试中, 低频段的边缘衍射效应增强与高频段对表面加工精度的更高要求相互制约, 使得在整个频带内同时维持静区幅相特性的高均匀性十分困难, 对反射面与馈源系统设计提出了极高要求 [129, 130].

(2) 球面近场常用于测量整车天线方向图等无源指标, 结合多探头阵列同步采样可大幅提升测试效率, 通过对三维空间信号幅度与相位的快速采集, 结合近远场变换算法可得到全空间辐射方向图等指标, 目前基于球面近场的整车测试系统已被广泛应用于各大汽车厂商与检测机构 [131]. 在测试挑战方面, 当被测整车存在天线偏心时, 等效最小包围球的半径显著增大, 根据球面近场模式展开理论, 包围球越大则模式展开的截断阶数越高, 引入的高阶模式增多, 而高阶模式对暗室残余反射与环境散射更为敏感, 从而导致相位测试结果受暗室环境影响增大; 在高频场景下, 由于波长短, 满足奈奎斯特准则所需的采样点数多, 测试时间长; 在有源指标测试中, 球面近场难以直接获取被测设备的发射信号相位参考, 需依赖相位补偿技术进行相位恢复, 增加了系统复杂度 [132, 133].

(3) 中场测试是一种介于近场与远场之间的折中方案, 其测试距离取决于被测天线的电尺寸, 通常可缩短为远场距离的 1/5~1/4 [134]. 在 TRP, TIS 等有源指标的测试中, 其优势在于保证一定测量精度的前提下降低系统成本. 相比于近场方案, 中场测试无需应对稳定参考相位获取以及整车偏心所带来的算法复杂度挑战, 经过算法修正的中场测试结果能够与紧缩场达到较高的可比性, 而其建设成本显著低于紧缩场 [135, 136]. 但其劣势在于, 中场波前仍有球面曲率, 测得的天线方向图存在畸变误差, 难以通过简单的线性算法消除, 因此其无源指标测量精度弱于紧缩场与球面近场.

在智能网联汽车的性能评估体系中, 整车在复杂电磁环境下的实际通信性能, 还需通过系统级的 MIMO OTA 测试来验证. 车载 MIMO 系统的性能不仅取决于收发信机与天线阵列, 更受到车体材质耦合、天线布局以及外部多径散射环境的影响. 针对整车级 MIMO OTA 测试, 基于多探头暗室与信道模拟器的 MPAC 测试方案已成为目前实现复杂无线传播环境可控复现的重要技术路径. 然而, 将传统面向移动终端的 MPAC 技术迁移至整车级测试, 面临着巨大的理论与工程挑战, 其关键在于如何在有限探头数量和有限空间条件下, 通过信道建模、探头选择及权重优化等方法, 在整车测试区域内高精度重构高速移动场景下的三维空间衰落信道, 实现对多径传播、角度扩展以及多普勒效应的准确模拟. 近年来, 国内整车 MIMO OTA 测试技术取得了快速发展, 深圳市通用测试公司研制了面向整车的 MIMO OTA 测试系统, 可在实验室内复现多种行驶场景下的空间衰落信道, 对整车 4G/5G MIMO 吞吐量等性能进行评估 [137]. 此外, 中国信息通信研究院已为多家整车企业提供了多探头暗室的 MIMO OTA 测试方案, 实现整车级无线系统性能评估 [138]. 目前, 整车 OTA 测试正向着系统集成化、场景真实化与高频化的方向演进. 测试系统正逐步在共用暗室平台上整合无源天线测试、有源射频测试与 MIMO 通信性能测试等多种功能, 实现从天线级参数表征到系统级通信能力验证的一体化测试.

近年来, 随着低轨宽带卫星星座的密集部署, 以及卫星通信技术在多款量产车型上的应用, 智能网联汽车的通信架构正从单一的陆基蜂窝网络向空天地一体化网络迈进, 这对现有的整车 OTA 测试体系提出了全新的挑战, 需在以下关键领域实现理论与方法突破.

(1) 现有暗室探头多集中于水平面或较低仰角范围, 难以模拟高仰角甚至过顶的星地链路信号, 构建覆盖高仰角的探头阵列导致硬件成本与系统复杂度骤增. 此外, 车顶的强电磁散射极易破坏高仰角空间场的幅相均匀性, 引发复杂的系统校准难题.

(2) 为克服极高的空间路径损耗, 车载卫星终端需通过相控阵天线实时精准追踪卫星. 这要求 OTA 测试系统从传统的开环静态测量转向低延迟的闭环反馈验证, 以定量评估车辆在动态移动下的波束捕获、保持与跨星切换性能.

(3) 车顶高度集成的蜂窝通信、卫星导航、卫星通信天线在并发工作时面临严峻的电磁兼容问题. 高功率发射信号的带外泄漏与杂散可能导致高灵敏度的卫星接收机发生阻塞, 因此, 如何在 OTA 测试中构建可控干扰场景, 并定量评估整车无线系统射频共存性能, 是亟待研究的课题.

在整车测试标准体系的建设方面, 国内已于 2025 年开始起草《道路车辆整车天线系统射频性能要求及试验方法》推荐性国家标准 (GB/T) 计划 (计划号 20251778-T-339) [139]. 全球范围内, 整车天线系统射频性能的测试标准体系仍在构建中, 5G 汽车联盟 (5GAA) 发布了针对整车级 OTA 测试的技术报告 “Vehicular Antenna Test Methodology” [140], 3GPP 的相关规范主要面向终端设备和基站层面, 尚未覆盖整车级测试.

5　人工智能通信测试

为突破传统 “测量 – 反馈” 机制在 5G 时代面临的时延与开销瓶颈, 3GPP 在 Release 18 研究项目中正式探讨了引入人工智能技术的可行性 [42], 其中基于 AI 的波束管理与 CSI 压缩反馈技术在互操作性和可测试性方面引起了业界的广泛关注. 基于 AI 的波束管理技术聚焦空域波束预测与时域波束预测两大应用场景, 对现有空口测试体系提出了多维技术挑战 [44,141~144]. 高通公司的研究团队在毫米波频段针对这两大场景开展了探索, 完成了基于深度学习的时域波束预测原型系统的外场 OTA 测试验证 [145], 以及支持端侧模型实时自适应空域波束预测原型系统的外场 OTA 测试验证, 实验结果表明端侧模型自适应预测可在 30 s 内完成并达到基准性能水平 [146]. 这类基于真实物理场景的外场 OTA 测试虽然能够初步反映算法的实际通信效能, 但与标准化的微波暗室 OTA 测试存在本质区别, 主要体现在: 外场环境不可控、不可重复, 难以为一致性认证提供统一且可复现的测试激励; 外场仅能反映特定地理与电磁条件下的算法表现, 无法系统性地遍历标准所要求的多样化信道场景; 而标准化暗室 OTA 测试可在受控条件下定量评估 AI 模型对训练分布之外场景的鲁棒性与失效边界, 这恰是外场测试难以实现的.

波束管理是大规模 MIMO 通信系统的核心功能, 涵盖波束训练、波束跟踪与波束切换等关键环节. 人工智

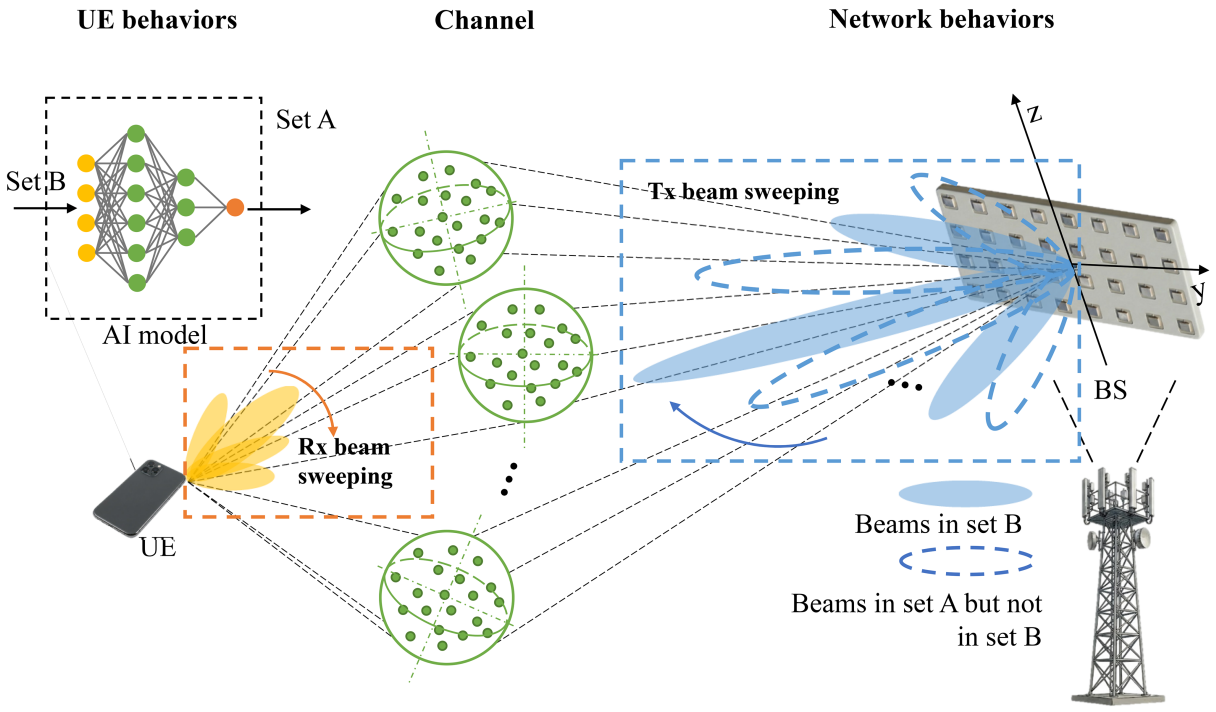

图 2　(网络版彩图) 基于 AI 的波束管理空域工作原理示意图.

Figure 2　(Color online) Schematic of the spatial-domain operating principle of AI-based beam management.

能技术, 尤其是深度学习, 在波束管理领域展现出显著优势, 通过学习信道特征与最优波束之间的映射关系, AI 模型可直接预测最优波束, 从而大幅降低窄波束测量与参考信号传输开销. 在性能评估方面, 基于 AI 的波束预测引入了区别于传统通信指标的新型评价体系, 主要包括 Top-1 准确率、Top-K 准确率及参考信号接收功率预测精度三类核心指标, 分别衡量最优波束预测的精准性、候选波束集合的覆盖能力及接收功率估计的可靠性. 这一新型指标体系决定了基于 AI 的波束管理测试不能沿用传统单波束非 AI 场景下仅评估通信性能的测试方法, 须至少在空域波束预测与时域波束预测两个维度上分别建立新的测试方法与评价准则.

在空域维度, AI 模型通过基于稀疏测量集 (Set B) 的输入预测全空间波束集 (Set A), 如图 2 所示. 这种以少测多的核心机制, 要求测试环境具备对多个空间波束的信道重构能力. 然而, 传统多探头暗室受限于探头切换速度与数量, 难以在高动态扫描场景下完整复现多波束的空域分布. 针对这一挑战, 本文作者团队提出基于基站滤波效应的改进型多探头暗室方法, 在考虑波束赋形对信道功率分布的非线性影响后, 仅需重构能量占主导的散射簇即可满足 AI 模型的输入需求, 从而大幅降低硬件复杂度, 同时引入波束功率角度谱相似度百分比 (beam power-angular-spectrum similarity percentage, BPSP) 指标, 有效弥补了传统功率角度谱相似度百分比指标在多波束并发场景下对空域分布描述不足的局限性 [147].

在时域维度, AI 模型通过历史测量序列预测未来时刻的最优波束, 从而延长测量周期、降低终端功耗与网络开销 [148~150]. 由于时域预测性能对终端的移动轨迹与姿态变化高度敏感, 现有静态 OTA 测试标准难以揭示真实场景下的动态失效风险. 因此, 时域 AI 波束管理 OTA 测试须在空域信道高保真复现的基础上, 进一步引入终端运动状态与多波束非平稳信道环境的时变仿真, 由此带来比空域测试更高的技术挑战.

基于双边 AI 模型架构的 CSI 压缩是 3GPP 从 Release 18 到 Release 20 持续推进的重要课题 [42~44]. 该技术通过终端侧编码器与网络侧解码器的联合推理, 借助深度学习的非线性特征提取能力, 大幅降低大规模 MIMO 通信系统的信道反馈开销 [151]. 然而, 收发两端模型的耦合特性引发了可测试性与互操作性的标准化讨论 [44]. 当待测设备为终端时, 若终端侧采用的编码器无法与测试设备模拟的网络侧解码器匹配, 通信性能将大幅下降, 从而失去测试意义. 为此, 在 Release 18/19 阶段, 3GPP RAN4 工作组引入了参考模型机制: 厂商可在参考模型

基础上开发私有化模型, 以保证一致性测试中不发生模型失配; 该机制同时为 RAN4 提供统一的仿真基准, 进而制定一致性测试所需的性能门限. 在 Release 20 阶段, 3GPP RAN4 工作组进一步确立了以保障跨厂商协作为核心目标的标准化技术路径, 并聚焦两个技术维度 [152]: 一是全定义参考模型, 旨在明确参考编码器与解码器的完整技术细节, 涵盖网络骨架、层级结构、激活函数类型及量化后的固定权重参数, 要求相关模型在技术规范中完整定义结构与参数, 以保障跨厂商测试与协作的一致性; 二是标准化编码器结构与参数交互机制, 在复用全定义参考模型核心设计及 3GPP RAN1 可扩展性方案的基础上, 通过网络侧向终端传递模型参数, 以标准化结构保障互操作性, 同时为厂商预留参数灵活配置空间, 实现兼容性与灵活性的平衡.

在产业界, 罗德与施瓦茨公司与高通公司联合验证了跨厂商 AI CSI 压缩反馈技术, 利用 R&S CMX500 综合测试仪支持开放神经网络交换格式 ONNX, 实现了网络侧解码器与终端侧编码器的解耦集成与互操作, 验证反馈开销与系统吞吐量 [153].

需要指出的是, 上述互操作性相关研究与标准化讨论目前仍主要基于传导测试. 在 OTA 测试时, 终端天线的辐射特性叠加至真实信道响应之中, 将会导致 AI 模型的推理域与训练域之间产生偏移, 进而可能造成基于传导假设建立的参考模型在 OTA 场景下性能大幅衰减乃至失效. 具体而言, OTA 域偏移主要来自三方面: 终端天线辐射方向图与极化对信道响应的叠加、暗室探头离散化对连续角度谱的近似、实际硬件非理想性 (幅相误差、互耦等), 三者共同导致 OTA 推理域偏离基于传导/理想信道训练的参考模型训练域. 因此, 如何在非理想硬件与辐射条件下构建有效的测试评估体系, 是亟需深入研究的课题.

6　新一代穹顶大规模多探头暗室测试系统

6G 空天地与通感智对 OTA 测试提出了前所未有的挑战, 在诸多 OTA 测试技术中, MPAC 凭借信道重构精度高、场景复现能力强等优势, 已成为 MIMO、波束成形等无线技术测试的主流方案 [154~158]. MPAC 源于天线测量领域, 通常将多个天线探头安装于圆弧形测试架上, 结合被测天线的机械旋转实现球面采样, 相较于单探头方案, 具备一定的多角度信道模拟能力, 因而也被用于 MIMO 信道重构.

随着 6G 新场景、新技术的引入, 传统 MPAC 已无法满足新一代无线通信系统的测试需求. 在空域覆盖方面, 传统多层圆环布局的俯仰角覆盖范围有限, 难以支撑卫星通信、低空无人机通信等需要上半球空域覆盖的测试场景; 受限于探头规模, 角度分辨率亦不足以满足 6G 毫米波及太赫兹频段高精度波束成形的测试需求. 单静区架构无法复现多用户接入、多基站协作与用户间干扰等复杂网络场景, 制约了系统级性能评估能力. 在信道重构精度方面, 6G 信道呈现出三维空间非平稳性、高速时变性与多域耦合等复杂特征, 有限的探头规模与布局自由度使传统系统难以精准复现 XL-MIMO 阵列的空间非平稳信道特性.

从数个探头增加至数十个探头, 本质上仍属于信道模拟范畴, 仅是可模拟空间角度数量的扩展. 当探头数量进一步增加且探头间距缩小至波长乃至亚波长尺度时, 系统则具备了精确合成电磁波的能力, 从而能够在特定区域内构建目标电磁环境. 这一能力的理论根基在于经典电磁场理论中的等效原理、唯一性定理与 Stratton-Chu 积分 [159~161]. 根据等效原理, 封闭曲面上的等效电流与磁流分布可以在曲面内部区域产生满足麦克斯韦方程组的目标电磁场; Stratton-Chu 积分则将内部场与边界上的切向场量建立了严格的积分关系, 为电磁环境重构提供了数学框架. 在工程实现中, 连续分布的等效面电流由大量离散天线探头阵列取代, 每个探头的幅度与相位可独立控制, 当探头数量与间距满足一定条件, 可以在曲面内的特定静区中高保真地重构目标电磁场.

在探头阵列的几何构型方面, 球面分布具有独特优势: 球面上任意一点到球心的距离相等, 意味着各探头到静区中心具有一致的空间衰减与相位延迟, 有利于大幅降低幅相控制算法的复杂度. 基于上述原理, 本文提出一种穹顶大规模多探头暗室架构, 可实现 360° 方位角与接近 90° 俯仰角的探头覆盖范围, 在保留球面分布优势的同时, 有望成为支撑 6G 全空域测试需求的新一代 OTA 测试平台.

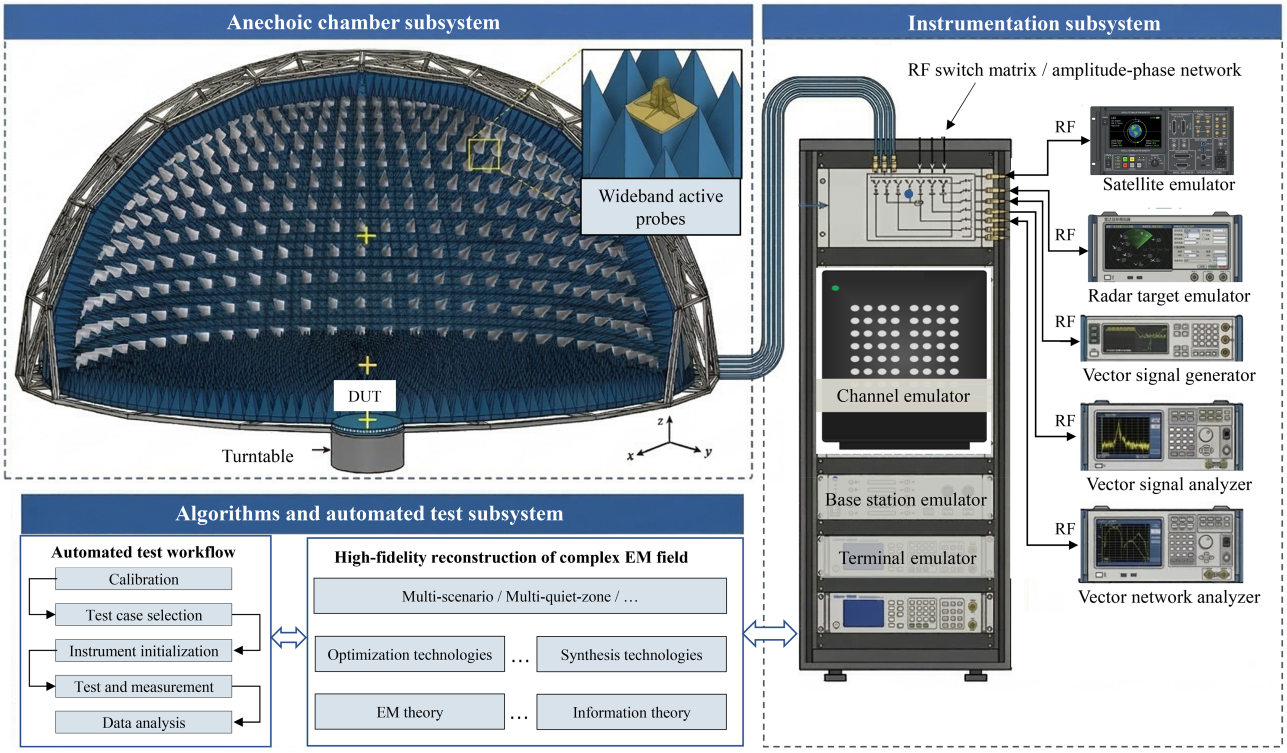

图 3　(网络版彩图) 新一代穹顶大规模多探头暗室测试系统架构示意图.

Figure 3　(Color online) Architecture schematic of the next-generation dome-shaped large-scale multi-probe anechoic chamber testing system.

表 1　穹顶大规模多探头暗室测试系统典型参数.

Table 1　Typical parameters of the dome-shaped large-scale MPAC testing system.

Parameter	Typical value/range
Probe scale	Thousands (high-density distribution over the hemisphere)
Frequency range	Sub-6 GHz to mmWave
Spatial coverage	Azimuth 360°× elevation ∼90° (upper hemisphere, ∼2π sr)
Quiet-zone size	Electrically large, reconfigurable (multi-zone supported)
Probe pattern	Directional
Core instruments	Channel emulator; satellite/radar-target/base-station/terminal emulators; vector signal generator; vector signal analyzer; vector network analyzer

6.1　系统架构与关键技术

穹顶大规模多探头暗室测试系统 (以下简称 “穹顶系统”) 是在近似半球形的曲面载体上布设数千个高密度分布的探头阵列, 实现上半球约 2π 立体角全覆盖, 被测设备置于半球中心的测试转台, 结合仪器设备, 对测试区域内电磁信号的幅度、相位、时延、极化等参数精确调控, 实现复杂电磁环境的高保真重构, 如图 3 所示, 其典型设计参数列于表 1.

穹顶系统由三大核心子系统构成: 提供基础测试环境的暗室子系统、负责信号收发与路由的设备子系统, 以及控制整个测试流程的算法与自动测试子系统. 暗室子系统负责空域电磁调控, 利用高性能屏蔽壳体与吸波材料构建纯净的无回波电磁环境, 按照一定空间分布和密度装配有大量探头, 高精度转台位于球心处. 设备子系统负责时域、频域、码域信号处理, 集成了矢量信号源、矢量信号分析仪、矢量网络分析仪等基础仪器, 信道模拟器、感知目标模拟器、卫星模拟器、基站模拟器、终端模拟器等专用仪器, 以及大规模矩阵开关、幅相控制网络

等控制与路由设备. 算法与自动测试子系统负责集成与应用, 包含电磁波合成算法、校准与误差补偿算法、场景测试例、仪器同步与远程控制、自动化测试流程等.

穹顶系统是一种融合电磁与信息理论的大型科学装置, 从理论到应用尚有一系列关键科学与技术问题亟需突破.

(1) 大规模探头阵列布局与半球曲面空间采样: 穹顶系统须在半球面上布设大量天线探头, 探头布设是一个三维半球曲面上最优拓扑排布与采样间距问题, 需要在底层的数理边界上解决半球面空间场重构的防混叠与采样效率问题, 建立阵列规模、系统复杂度、电磁构建精度的多目标优化模型. 该探头排布机制直接决定了系统空间域模拟能力的上限. 依据球矢量波函数展开理论, 半径为 r_0 的静区内目标场截断阶数一般取 $N=\lceil k_0 r_0\rceil + n_s$ (k_0 为自由空间波数, n_s 为保证收敛的安全裕量, 通常取 10∼15), 对应的模式系数总数 (即探头阵列所需的最少自由度) 为 $P=2N(N+2)$; 当静区边界采样点数远大于探头总数 M 时, 重构方程可形成超定最小二乘问题. 当 $M \geqslant P$ 时, 系统在自由度数量上具备表征截断至 N 阶目标场的条件, 但其适定性仍取决于系统矩阵的秩与条件数; 是否发生空间混叠则由目标场截断阶数与采样密度共同决定. 当 $M < P$ 时, 重构方程在模式空间中欠定, 可借助 Tikhonov 正则化获得稳定的正则化解并抑制弱耦合模式的放大. 该模式数下限对应的空间采样要求与 $\lambda/2$ 准则一致: 欲无混叠地重构静区内截断至 N 阶的目标场, 需在静区边界以不超过约半波长 ($\lambda/2$) 的间隔进行空间采样, 探头阵列在相应角域上的采样间隔亦须满足该奈奎斯特空间采样条件.

(2) 大动态范围射频链路设计: 被测对象涵盖终端、基站以及卫星通信载荷等多形态的设备, 这些被测设备在 EIRP, EIS 等指标上存在很大差异, 测试系统的射频链路应具备极大动态范围, 需研究多级链路增益与衰减的分布式动态调配机制、高隔离度射频切换网络的拓扑优化, 以及基于软硬件协同的链路状态自适应方法.

(3) 大规模探头阵列的高效协同校准与电磁散射抑制: 大量射频通道使得传统逐点或逐通道的串行校准机制耗时过长, 需建立基于多源并行激励或阵列互校准的 OTA 高效协同校准机制. 探头自身具有散射特性, 且无法被吸波材料包裹, 探头数量越多散射问题越严重, 并且高密度排布的相邻探头间也可能存在电磁互耦, 从而影响探头天线的方向图, 导致测试静区内合成的目标电磁场产生相位畸变与幅度纹波. 各通道的幅相误差会共同影响静区内的归一化场合成误差, 其量级取决于各通道权重及相干叠加关系. 可通过定向探头方向图设计 (如具有空间耦合抑制能力的定向辐射结构) 与幅相校准补偿加以抑制; 含互耦、散射、量化与链路噪声联合贡献的完整误差预算应针对具体合成场景在设计阶段给出.

(4) 多静区独立信道生成与多用户交互信道模拟: 多静区测试技术面临着两大核心技术瓶颈, 一是如何在同一物理空间内生成多个电磁隔离的独立静区, 实现各静区内信道环境的独立配置与并行重构, 同时抑制静区间的信号串扰与信道耦合; 二是如何精准模拟多用户、多基站间的信道交互与干扰耦合特性, 实现多节点信道的协同调控与联合映射. 需建立基于超大规模阵列的多静区电磁波构建理论, 研究静区间电磁隔离与串扰抑制方法, 构建多用户、多节点交互信道的联合映射与协同调控模型.

(5) 多域耦合复杂电磁环境生成理论与方法: 6G 通信感知一体化、空天地一体化的核心技术特征, 要求测试系统能够同时复现通信信道、感知目标回波、背景杂波、空间电磁干扰等多域耦合的复杂电磁环境. 需突破传统测试系统单一功能模拟的局限, 建立基于超大规模探头与多台测量设备的多域信号联合映射模型, 提出多维度协同调控方法, 实现不同空域、时域、频域、极化域、码域信号的一体化生成, 同时突破多目标协同模拟、非均匀杂波空时特性复现、复杂电磁干扰精准注入等关键技术, 构建多域耦合复杂电磁环境的一体化生成体系.

表 2 给出了这五项关键技术与前文总结的测试需求之间的对应关系. 需指出的是, 穹顶系统是一个有机整体, 上述关键技术并非相互独立.

远场法的适用范围已在第 1 节中说明. 为进一步分析主要工程化 OTA 测试架构的适用性, 表 3 从空域/角域覆盖、天线方向图测量、射频性能测试、多径与动态信道仿真、静区/测量区域、多静区能力、探头规模、成本与工程复杂度等维度, 对紧缩场、球面近场、传统 MPAC 与本文穹顶系统四类方案进行了综合对比.

由表 3 可见, 紧缩场与球面近场主要面向天线方向图和射频性能测试, 多径与动态信道仿真并非其原生能力; 传统 MPAC 可实现多径与动态信道仿真, 但典型配置为空域覆盖受限的单静区. 穹顶系统将上半球空域覆盖、高自由度三维信道重构与可扩展的多静区并行能力集成于同一平台, 构成其面向 6G 复杂场景测试的差异

表 2　关键技术与测试需求及应用场景对应表.

Table 2　Mapping between key technologies, testing requirements, and application scenarios.

Key technology	Primary correspondence to testing requirements and application scenarios
(1) Large-scale probe array layout and hemispherical spatial sampling	Mainly supports the large elevation-angle and overhead-link requirements in satellite communications and low-altitude UAV scenarios (Sections 2 and 3 and Subsections 6.2.1 and 6.2.2), by providing upper-hemisphere angular coverage and high-density spatial sampling.
(2) Large-dynamic-range RF link design	Supports heterogeneous DUTs across Sections 2∼5, including satellite payloads and terminals, ISAC/UAV devices, intelligent vehicles, base stations, terminals, and AI-enabled communication devices, by covering diverse EIRP/TIS levels and link-budget ranges.
(3) Efficient cooperative calibration and scattering suppression for large probe arrays	Particularly important for ISAC sensing-performance testing in Section 3 and Subsection 6.2.2, where target angle, RCS, micro-Doppler features, and clutter reconstruction rely on accurate amplitude/phase control and low probe-induced scattering.
(4) Independent multi-zone channel generation and multi-user interaction	Supports satellite multi-beam/multi-terminal testing in Section 2, UAV and low-altitude network testing in Section 3, and terrestrial cellular/mobile or vehicular testing in Section 4 and Subsection 6.2.6, by enabling parallel quiet zones and controllable inter-node interference.
(5) Multi-domain coupled complex EM environment generation	Especially supports ISAC testing in Section 3 and Subsection 6.2.2 by jointly generating communication channels, sensing echoes, background clutter, and electromagnetic interference; it can also be extended to controlled robustness testing for AI-enabled communications in Section 5 and Subsection 6.2.4.

表 3　不同 **OTA** 测试方案对比. 注. **(1)** 表中有关穹顶系统的条目描述的是所提架构的预期或设计能力, 而非经过充分验证的产品化系统所具备的能力. **(2)** 成本与工程复杂度的定性比较是在被测设备尺寸、工作频率和目标测试能力可比的条件下进行的.

Table 3　Comparison of different OTA testing solutions. Notes. (1) Entries for the dome system describe intended/design capabilities of the proposed architecture rather than a fully validated production system. (2) Cost and engineering complexity are qualitative comparisons under comparable DUT size, operating frequency, and target test capability.

Aspect	CATR	SNF	Conventional MPAC	Dome-shaped large-scale MPAC
Spatial/angular coverage	Single plane-wave direction per feed	Spherical scan (mechanical scanning/rotation)	Mainly azimuth/limited elevation	Upper hemisphere ($\sim 2\pi$ sr)
Antenna pattern measurement	Yes	Yes	Yes	Yes
RF performance testing	Yes (high accuracy)	Limited	Yes	Yes
Multipath channel emulation	Not inherent	Not inherent	2D or limited 3D	Upper-hemisphere 3D
Dynamic channel emulation	Limited/not inherent	Limited/not inherent	Yes	Yes
Quiet zone/ measurement region	Large	No far-field quiet zone; scanner-defined volume	Small to medium	Large and reconfigurable
Multi-zone capability	Single-zone	Not applicable; typically single-DUT	Single-zone	Scalable to parallel multi-zone operation
Probe scale	Single feed + reflector	One or several scanning probes	Few to tens of probes	Thousands of distributed probes
Cost	Medium-high	Medium-high	Medium	High to very high
Engineering complexity	High	High	Medium	High to very high

化优势.

在频段适应性方面, 由于探头数下限随 k_0r_0 增大而增大, 向更高频段 (毫米波/太赫兹) 扩展会提升探头数需求, 但波长减小允许探头间距与静区半径按比例缩小, 部分抵消该需求; 因此, 高频扩展的主要挑战并非理论适用性, 而在于如何实现足够数量、低散射、高动态的探头. 在建设成本与工程可行性方面, 穹顶系统的建设成本主要由探头数量、信道模拟器与开关矩阵等仪器设备的通道规模、屏蔽暗室体量等部分决定; 相比紧缩场以大型高精度反射面为主要成本、球面近场以精密机械扫描系统为主要成本, 穹顶系统将成本集中于可批量化的探头与射频通道, 具备随器件成本下降而摊薄的潜力. 此外, 通过探头选择与稀疏化可降低有源通道数与系统复杂度, 为分阶段建设与成本控制提供途径.

从标准化衔接角度看, 现有 3GPP 及行业标准化路线已经覆盖了部分基础测试项目: NTN 终端测试主要围绕终端射频/协议一致性及特定仰角下的 OTA 性能展开, 通信感知一体化仍处于场景、KPI、信道模型与测试方法的研究和完善阶段, AI 通信的可测试性讨论主要聚焦参考模型、互操作性和传导测试假设, 整车级 OTA 测试标准体系亦仍在构建中. 总体而言, 现有标准仍主要面向单设备、准静态、传导/单探头或单静区测试, 尚缺乏面向高仰角/过顶链路、多目标感知、多用户/多基站系统级交互、高动态场景及 AI 鲁棒性的统一 OTA 测试方法. 穹顶系统可作为现有标准化路线从单设备一致性测试向系统级、高动态、可重复 OTA 验证扩展的候选平台与方法储备.

6.2　测试应用展望

基于全空域覆盖、高精度重构与多场景适配能力, 穹顶系统可全面支撑 6G 空天地一体化网络从器件级、设备级到系统级的全维度测试验证. 针对前文第 2∼5 节所述的典型测试挑战, 本节阐述基于穹顶系统的解决思路.

6.2.1　卫星通信测试

现有紧缩场与平面近场等测试系统已能对卫星通信系统的基础射频指标进行测量. 然而, 在系统性能评估层面, 受限于物理静区尺寸及空间采样的稀疏性, 传统多探头暗室仅能支持少量链路、准静态的连通性测试, 无法重现真实星地网络中连续高动态的复杂通信场景. 穹顶系统凭借探头阵列的高自由度配置与上半球全立体角覆盖特性, 通过开关网络的高速切换替代机械滑轨的物理运动, 结合高密度探头布局, 有望突破传统测试架构的维度限制, 可实现对复杂星地传播场景的高保真模拟, 为卫星通信载荷与终端的高动态业务性能验证提供了系统级解决思路.

在卫星通信载荷性能评估方面, 通过激活大量探头构建电大尺寸测试静区, 可将卫星载荷视为空间基站进行全维动态验证. 针对高通量卫星的多波束特征, 可同时激活多组分布于不同角度的探头簇, 模拟多用户节点, 结合独立的信道衰落与通信参数配置, 可实现同时多波束性能测试. 可并发的波束/目标数量本质上取决于可用探头簇数量与各簇所需角度间隔, 受静区电尺寸与探头总规模约束, 即由探头阵列自由度与静区隔离度共同决定.

在卫星通信终端测试方面, 通过穹顶探头从低仰角至天顶方向的平滑切换, 模拟卫星的实时轨迹, 评估地面终端高动态通信能力. 对于更为复杂的星座组网场景, 可同时分配多组独立的探头簇, 模拟多颗卫星共存与跨星切换场景, 验证终端在复杂星座切换下的性能.

针对星地链路特有的复杂电磁传播条件, 还可灵活叠加对流层/电离层闪烁、多径衰落以及地面复杂地理环境带来的非平稳背景杂波. 支持灵活配置特定探头模拟干扰源, 实现多源共存的复杂电磁环境下的综合测试验证.

6.2.2　通信感知一体化系统与低空无人机测试

在传统 OTA 暗室中引入真实移动物体进行通感一体测试是极其困难的, 大规模多探头暗室测试系统基于大规模探头阵列的高自由度配置能力, 为上述挑战提供了解决思路.

在感知目标模拟方面, 结合感知目标模拟器, 控制回波信号的功率、时延、多普勒频移、探头位置, 精准模

拟目标的 RCS、距离、速度、角度等参数. 为不同目标分配独立的探头组, 同步模拟多个目标的回波特性, 复现密集多目标场景. 对于旋翼无人机等特殊目标, 叠加微多普勒频移, 复现机身平动与旋翼转动所形成的复合散射响应, 从而验证感知设备区分无人机与飞鸟等相似目标的能力. 低空城市场景中建筑物与植被产生的强烈地物杂波对无人机弱目标检测的掩盖效应, 亦可通过探头功率的空间分配加以精确复现. 此外, 系统还可灵活配置探头作为干扰源, 模拟多干扰源共存的复杂电磁环境, 测试被测系统的干扰分离与抑制能力. 同一测试环境中加载通信信道与感知目标场景, 可同时测试通信吞吐量、感知检测概率与虚警概率等跨域指标, 联合评估通感一体性能.

无人机作为通信感知一体化网络中兼具通信节点与感知目标双重角色的典型对象, 对穹顶测试系统提出了综合需求. 在无人机作为感知目标的测试场景中, 模拟不同飞行高度与仰角下的无人机回波特性, 支持大仰角乃至天顶方向的目标角度, 支撑对 3GPP TR 22.837 所规定的无人机入侵检测完整场景的测试验证. 在无人机作为通信节点的测试场景中, 系统可同步复现三维空地信道的路径损耗、多径衰落、多普勒频移, 以及无人机姿态变化引起的天线方向图偏转与机身遮挡效应, 在静区内高保真重现无人机通信链路的全维信道特性. 还可以同时验证无人机感知探测性能与空地通信链路性能.

6.2.3　智能网联汽车测试

智能网联汽车测试验证的重点与难点正从射频指标合规转向端到端系统性能评估. 传统多探头暗室依赖机械转台旋转, 本质为准静态测量模式, 无法验证快时变非平稳信道下的 V2V 通信拓扑动态重构、波束快速跟踪等动态业务性能. 穹顶系统为整车全场景业务评估提供了时空连续的三维信道重构平台, 可支撑智能网联汽车的关键业务性能测试.

通过探头阵列动态切换与信道参数实时变化, 复现车辆高速运动中的信道快变特征, 模拟车辆穿越多个基站覆盖区时的信号波动、多普勒变化, 验证多小区切换成功率、中断时长及高移动性下的吞吐量保持能力, 支持高动态移动通信业务测试. 根据预设轨迹实时控制探头阵列, 复现两车高速会车、超车等动态场景中的信号遮挡、多普勒突变及多径衰落, 验证安全消息的端到端传输时延与可靠性. 对于毫米波频段, 能够模拟波束在移动中的动态对齐与跟踪过程, 验证车辆维持高数据速率链路的稳定性. 通过重构城市环境中导航信号的衰落与多径干扰, 验证融合定位系统的精度与鲁棒性, 与此同时, 通过同步生成通信与雷达感知回波信号, 支持多链路并发场景下的业务性能验证, 评估通信链路对感知链路的干扰影响, 确保复杂电磁环境下基本安全预警功能的可靠性.

6.2.4　AI 通信测试

在 AI 通信测试领域, 穹顶系统不仅可作为传统的硬件验证工具, 还可作为连接物理世界与数字空间的电磁孪生平台. AI 模型的核心在于数据驱动, 其泛化能力与预测精度高度依赖于训练及验证环境的保真度与多样性. 穹顶系统通过全空间高密度探头阵列与高精度幅相控制能力, 能够将虚拟电磁场数据在暗室静区内进行物理重现, 精准生成包含复杂散射、绕射与动态多普勒效应的三维空间信道, 为 AI 模型提供纯软件仿真难以获取的真实电磁边界条件, 从而有效弥合算法从理论仿真走向实际部署时的性能落差.

面对基于 AI 的波束管理及 CSI 压缩等高度非线性的通信技术, 穹顶系统的全域精确重构能力可用于应对高动态、非平稳信道环境下的可测试性难题. 更为重要的是, 深度学习模型在遭遇训练分布之外的边界极端场景时易出现性能骤降, 穹顶系统可作为场景生成引擎, 通过刻意重构极端多径分布、信道剧烈突变或复杂空间电磁干扰, 对底层算法实施可重复的对抗性电磁压力测试.

相较于环境单一且不可控的外场验证, 穹顶系统能够在极短时间内实现差异化信道特征的无缝切换, 为模型端侧微调的触发阈值、收敛速率及跨场景泛化能力提供受控评估环境. 在连续环境切换场景下, 端侧模型还面临对新环境快速适应与对历史环境知识保持之间的权衡, 即深度学习领域所关注的灾难性遗忘问题, 穹顶系统的高效场景生成能力为这一问题的系统性研究提供了可行的实验平台. 综合而言, 穹顶系统以其物理层高保真重构能力与海量场景动态生成能力, 贯通了 AI 通信模型从数据获取、泛化性验证到鲁棒性评估的完整测试链路, 为智能化通信时代的全生命周期测试体系建设提供了新的技术路径.

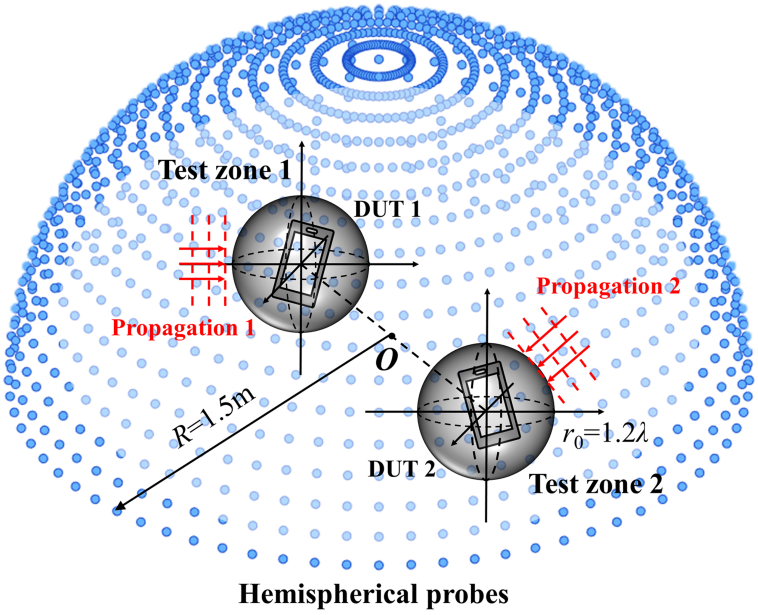

图 4　(网络版彩图) 穹顶系统下多设备并行 OTA 测试概念示意图.

Figure 4　(Color online) Conceptual schematic of multi-device parallel OTA testing under a dome system.

6.2.5　超大规模 MIMO 系统性能验证

XL-MIMO 技术是 6G 提升频谱效率与实现高精度波束成形的核心技术, 其天线阵列规模可达数千单元. 随着阵列口径的急剧扩大, 信道呈现出显著的空间非平稳特性, 即阵列不同位置的天线单元经历差异化的信道条件; 与此同时, 用户与阵列之间的距离可能落入近场区域, 电磁波的球面波前特性取代了传统远场平面波假设, 信道的距离维度信息得以显现. 上述特性使传统测试系统无法完成对 XL-MIMO 系统的精准测试 [162~164].

在近场测试方面, 穹顶系统凭借数千个探头的高密度分布, 通过对各探头的幅相进行联合调控, 可在静区内合成具有球面波前特征的入射场, 模拟不同距离处散射体对阵列各单元的差异化激励, 支撑 XL-MIMO 近场信道建模与近场波束聚焦性能的系统级验证. 在波束成形测试方面, 配合三维角度覆盖能力, 穹顶系统可同步在水平与垂直维度加载多用户信道, 评估 XL-MIMO 在三维空间内的多流空间复用增益、用户间干扰抑制能力及波束扫描精度, 为大规模天线系统的预编码算法提供完整的 OTA 验证环境. 针对 XL-MIMO 与通信感知一体化的融合场景, 穹顶系统还可在模拟大规模天线通信信道的同时叠加感知目标的回波特征, 支撑对通感联合波束赋形方案的系统级性能评估, 有望弥补传统多探头暗室在 XL-MIMO 测试领域的能力不足.

6.2.6　多用户多基站系统级性能评估

真实 6G 网络的性能不仅取决于单设备的射频指标, 更由多用户调度、多基站协作、干扰管理与资源分配等系统级机制共同决定. 传统单静区多探头暗室仅能完成单设备测试, 无法评估上述系统级性能, 与真实网络部署场景之间存在根本性的验证缺口.

穹顶系统凭借高密度、大规模的探头阵列, 通过电磁场合成技术可在暗室内同时构建多个相互独立的测试静区, 支持多个基站与终端被测设备并行接入, 真实复现多用户同时接入、小区间协作与用户间干扰等复杂网络场景. 图 4 展示了一个穹顶系统下合成双静区的双 UE 并行测试示意图, 可以看出, 测试区域 1 和测试区域 2 内的场分别对应两个独立的平面波传播方向, 两个被测设备在同一套多探头系统下进行了独立的 OTA 测试. 针对穹顶系统下的多静区合成问题, 本文作者团队基于球谐函数展开框架建立了多静区电磁场合成的数学模型, 通过全局等效场优化方法将多静区问题转化为统一的探头激励求解问题, 并首次在多静区多探头暗室系统中实现了符合 3GPP 标准的信道模型重构 [165]. 多静区独立信道生成能力主要补足现有单静区 OTA 方案在多用户、

多基站并行接入、交互信道重构和干扰耦合验证方面的能力缺口, 是穹顶系统面向系统级性能评估的关键支撑.

7　总结

6G 移动通信技术正在从愿景走向现实, 其关键技术特征包括空天地一体化、通信感知融合、内生 AI 等, 对 OTA 测试技术提出了前所未有的挑战. 传统测试体系是在 2G∼5G 演进过程中逐步建立的, 其理论基础、技术手段和标准规范主要针对地面蜂窝网络和相对简单的通信场景. 面向 6G 新场景, 本文系统梳理了传统测试体系的局限性, 深入分析了低轨卫星通信、通信感知一体化、智能网联汽车、AI 通信等典型场景的测试需求. 这些需求要求测试系统具备大静区、高动态、多场景、高保真的电磁环境重构能力.

本文提出了一种穹顶大规模多探头暗室技术, 通过在半球形表面高密度分布大量探头, 实现三维全空间覆盖、超高角度分辨率、多静区并行测试等传统 MPAC 难以实现的能力, 以应对 6G 全方位的测试挑战. 该系统以电磁场合成理论为基础、以信息域信道与场景的高保真重构为目标, 是电磁理论与信息理论深度交叉融合的典型测试范式, 有望为 6G 乃至未来移动通信系统的关键技术验证、标准演进与产业应用提供重要的平台支撑.

参考文献

1 ITU-R. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2030 and Beyond. Recommendation ITU-R M.2160-0. 2023. https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2160-0-202311-I/en

2 Xiao Y, Ye Z, Wu M, et al. Space-air-ground integrated wireless networks for 6G: basics, key technologies, and future trends. IEEE J Sel Areas Commun, 2024, 42: 3327–3354

3 Wu N, Jiang R, Wang X, et al. AI-enhanced integrated sensing and communications: advancements, challenges, and prospects. IEEE Commun Mag, 2024, 62: 144–150

4 Wang C X, Yang Y, Huang J, et al. Electromagnetic information theory: fundamentals and applications for 6G wireless communication systems. IEEE Wireless Commun, 2024, 31: 279–286

5 Wan Z, Zhu J, Dai L. Near-field channel modeling for electromagnetic information theory. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 18004–18018

6 Wang C X, You X, Gao X, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds. IEEE Commun Surv Tutorials, 2023, 25: 905–974

7 Hong W, Jiang Z H, Yu C, et al. The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications. IEEE J Microw, 2021, 1: 101–122

8 Wang Z, Li C, Sun H, et al. Channel emulator-enabled over-the-air testing platform for integrated sensing and communication systems: framework and experimental validation. IEEE Trans Instrum Meas, 2025, 74: 1–11

9 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. IEEE Commun Mag, 2018, 56: 64–71

10 Qiao S, Zhang X, Zhu Y, et al. Study of channel model validation in millimeter wave MIMO OTA test. In: Proceedings of the 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2022. 1–5

11 Barani I R R, Bronckers L A, Reniers A C F. Integrated-antenna over-the-air testing for millimeter-wave applications: an overview of systems and uncertainty [Measurements Corner]. IEEE Antennas Propag Mag, 2022, 64: 97–110

12 3GPP. NR; Base Station (BS) Conformance Testing Part 2: Radiated Conformance Testing. 3GPP TS 38.141-2. v19.4.0, Release 19. 2026

13 3GPP. NR; User Equipment (UE) Conformance Specification; Radio Transmission and Reception; Part 2: Range 2 standalone. 3GPP TS 38.521-2. v19.2.0, Release 19. 2026

14 3GPP. Study on Test Methods for New Radio (NR). 3GPP TR 38.810. v16.7.0, Release 16. 2023

15 3GPP. NR; User Equipment (UE) Radio Transmission And Reception; Part 2: Range 2 Standalone. 3GPP TS 38.101-2. v19.4.0, Release 19. 2026

16 Holloway C L, Shah H A, Pirkl R J, et al. Reverberation chamber techniques for determining the radiation and total efficiency of antennas. IEEE Trans Antennas Propagat, 2012, 60: 1758–1770

17 Chen X M. Throughput modeling and measurement in an isotropic-scattering reverberation chamber. IEEE Trans Antennas Propagat, 2014, 62: 2130–2139

18 Shen P, Qi Y, Yu W, et al. An RTS-based near-field MIMO measurement solution—a step toward 5G. IEEE Trans Microwave Theor Techn, 2019, 67: 2884–2893

19 Fan W, de Lisbona X C B, Sun F, et al. Emulating spatial characteristics of MIMO channels for OTA testing. IEEE Trans Antennas Propagat, 2013, 61: 4306–4314

20 Li Y, Xin L, Liu X, et al. Dual anechoic chamber setup for over-the-air radiated testing of 5G devices. IEEE Trans Antennas Propagat, 2020, 68: 2469–2474

21 Jiang Z, Xu Y, Guo C, et al. A trigger-free multi-active-probe anechoic chamber system for 5G/6G millimeter wave OTA test. IEEE Trans Microwave Theor Techn, 2023, 71: 4449–4458

22 Kyosti P, Hentila L, Fan W, et al. On radiated performance evaluation of massive MIMO Devices in multiprobe anechoic chamber OTA setups. IEEE Trans Antennas Propagat, 2018, 66: 5485–5497

23 Jiang Z, Wang Z, Guo C, et al. Time-domain nonstationary channel emulation in multiprobe anechoic chamber setups for over-the-air testing. Antennas Wirel Propag Lett, 2021, 20: 2511–2515

24 Zhang X, Qiao S, Peng M, et al. Probe selection for over-the-air test in 5G base stations with massive multiple-input multiple-output. China Commun, 2019, 16: 1–12

25 Wang Z, Jiang Z, Hao Z C, et al. A novel probe selection method for MIMO OTA performance testing. Antennas Wirel Propag Lett, 2020, 19: 2359–2362

26 Liu D, Gao Y, Hu S, et al. Trajectory design for integrated sensing and communication enabled by cellular-connected UAV. IEEE Wireless Commun Lett, 2024, 13: 1973–1977

27 Song Y, Zeng Y, Yang Y, et al. An overview of cellular ISAC for low-altitude UAV: new opportunities and challenges. IEEE Commun Mag, 2025, 63: 88–95

28 Geraci G, Garcia-Rodriguez A, Azari M M, et al. What will the future of UAV cellular communications be? A flight from 5G to 6G. IEEE Commun Surv Tutorials, 2022, 24: 1304–1335

29 Meng K, Wu Q, Xu J, et al. UAV-enabled integrated sensing and communication: opportunities and challenges. IEEE Wireless Commun, 2024, 31: 97–104

30 Wei Z Q, Qu H Y, Wang Y, et al. Integrated sensing and communication signals toward 5G-A and 6G: a survey. IEEE Internet Things J, 2023, 10: 11068–11092

31 Lu S, Liu F, Li Y, et al. Integrated sensing and communications: recent advances and ten open challenges. IEEE Internet Things J, 2024, 11: 19094–19120

32 Meng K, Masouros C, Petropulu A P, et al. Cooperative ISAC networks: opportunities and challenges. IEEE Wireless Commun, 2025, 32: 212–219

33 Cui M, Dai L. Near-field wideband beamforming for extremely large antenna arrays. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 13110–13124

34 Lu H, Zeng Y, You C, et al. A tutorial on near-field XL-MIMO communications toward 6G. IEEE Commun Surv Tutorials, 2024, 26: 2213–2257

35 Lu H, Zeng Y. Communicating with extremely large-scale array/surface: unified modeling and performance analysis. IEEE Trans Wireless Commun, 2022, 21: 4039–4053

36 Carvalho E D, Ali A, Amiri A, et al. Non-stationarities in extra-large-scale massive MIMO. IEEE Wireless Commun, 2020, 27: 74–80

37 You L, Qiang X, Zhu Y, et al. Integrated communications and localization for massive MIMO LEO satellite systems. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 11061–11075

38 You L, Qiang X, Li K X, et al. Hybrid analog/digital precoding for downlink massive MIMO LEO satellite communications. IEEE Trans Wireless Commun, 2022, 21: 5962–5976

39 Su Y, Liu Y, Zhou Y, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies. IEEE Wireless Commun, 2019, 26: 55–61

40 3GPP. NR; Physical layer procedures for data. 3GPP TS 38.214. v19.3.0, Release 19. 2026

41 Ammar H A, Adve R, Shahbazpanahi S, et al. Distributed resource allocation optimization for user-centric cell-free MIMO networks. IEEE Trans Wireless Commun, 2022, 21: 3099–3115

42 3GPP. New Study Item: Study on Artificial Intelligence (AI)/Machine Learning (ML) for NR Air Interface. Document RP-213599, TSG-RAN#94e. 2021

43 3GPP. Revised WID on Artificial Intelligence (AI)/Machine Learning (ML) for NR Air Interface. Document RP-250792, TSG-RAN#107. 2025

44 3GPP. Study on Artificial Intelligence (AI)/Machine Learning (ML) for NR Air Interface: 3GPP TR 38.843. v18.0.0, Release 18. 2024

45 Zuo J, Zhang J, Cao Y, et al. Artificial intelligence-based spatial domain beam prediction for 5G beyond. In: Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2022. 1460–1465

46 Zhou D, Sheng M, Li J, et al. Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: a survey and future challenges.

IEEE Commun Surv Tutorials, 2023, 25: 975–1019
47 Liu S, Gao Z, Wu Y, et al. LEO satellite constellations for 5G and beyond: how will they reshape vertical domains? IEEE Commun Mag, 2021, 59: 30–36
48 Ma S, Chou Y C, Zhao H, et al. Network characteristics of LEO satellite constellations: a Starlink-based measurement from end users. In: Proceedings of IEEE INFOCOM, 2023. 1–10
49 Al-Hraishawi H, Chougrani H, Kisseleff S, et al. A survey on nongeostationary satellite systems: the communication perspective. IEEE Commun Surv Tutorials, 2023, 25: 101–132
50 Kodheli O, Lagunas E, Maturo N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges. IEEE Commun Surv Tutorials, 2021, 23: 70–109
51 Lin X, Rommer S, Euler S, et al. 5G from space: an overview of 3GPP non-terrestrial networks. IEEE Comm Stand Mag, 2021, 5: 147–153
52 Yahia O B, Garroussi Z, Bélanger O, et al. Evolution of high-throughput satellite systems: a vision of programmable regenerative payload. IEEE Commun Surv Tutorials, 2025, 27: 1565–1597
53 Tuzi D, Aguilar E F, Delamotte T, et al. Distributed approach to satellite direct-to-cell connectivity in 6G non-terrestrial networks. IEEE Wireless Commun, 2023, 30: 28–34
54 Chen K, Xu J, Gang H, et al. An integrated shared-aperture active phased array enabling STAR LEO satellite communication: concept, design, and validation. IEEE J Sel Areas Commun, 2026, 44: 3185–3200
55 Yang Y Q, Wang H, Li M, et al. Highly integrated Q/V-band multi-beam phased array antenna for LEO communication satellite. In: Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), 2022. 1–3
56 Wang Z, Zhang F, Gao H, et al. Over-the-air array calibration of mmWave phased array in beam-steering mode based on measured complex signals. IEEE Trans Antennas Propagat, 2021, 69: 7876–7888
57 Patton W T, Yorinks L H. Near-field alignment of phased-array antennas. IEEE Trans Antennas Propagat, 1999, 47: 584–591
58 Tang Y, Wang Z, Chen X, et al. Near-field uniform linear array calibration based on the extrapolation of measured complex signals. IEEE Trans Antennas Propagat, 2023, 71: 8407–8412
59 Takahashi T, Inasawa Y. Theoretical study on estimation accuracy of phased-array calibration using beam-steering modes. IEEE Trans Antennas Propagat, 2025, 73: 1505–1514
60 Yoon H J, Min B W. Improved rotating-element electric-field vector method for fast far-field phased array calibration. IEEE Trans Antennas Propagat, 2021, 69: 8021–8026
61 Takahashi T, Konishi Y, Makino S, et al. Fast measurement technique for phased array calibration. IEEE Trans Antennas Propagat, 2008, 56: 1888–1899
62 Fan W, Zhang Y, Wang Z, et al. Large-scale phased array calibration based on amplitude-only measurement with the multiround grouped-REV method. IEEE Trans Antennas Propagat, 2024, 72: 454–465
63 IEEE. IEEE recommended practice for near-field antenna measurements. IEEE Std 1720-2012. 2012
64 Migliore M D. A compressed sensing approach for array diagnosis from a small set of near-field measurements. IEEE Trans Antennas Propagat, 2011, 59: 2127–2133
65 Zhang L, Feng Y R, Pu B, et al. A novel machine-learning-based batch selection method in sparse near-field scanning. IEEE Trans Microwave Theor Techn, 2022, 70: 5019–5028
66 Gu Y, Sun H H, van der Weide D W. A near-field super-resolution network for accelerating antenna characterization. IEEE Trans Antennas Propagat, 2025, 73: 1732–1742
67 IEEE. IEEE recommended practice for antenna measurements. IEEE Std 149-2021. 2022
68 Xiao P H, Li F H, Lin B, et al. OTA test method of EVM in 5G RF performance evaluation. Safety & EMC, 2021, 3: 35–40 [肖鹏晖, 黎福海, 林斌, 等. 5G 射频性能评估中的 EVM 空口测试方法. 安全与电磁兼容, 2021, 3: 35–40]
69 Rohde & Schwarz. Enabling terminal testing for new space. 2023. https://www.rohde-schwarz.taipei/data/activity/file/1696569964019375677.pdf
70 Liu W, Hou X, Wang J, et al. Uplink time synchronization method and procedure in Release-17 NR NTN. In: Proceedings of the IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring), 2022. 1–5
71 3GPP. NR; Satellite Access Node Radio Transmission And Reception. 3GPP TS 38.108. v19.4.0, Release 19. 2026
72 Chahat N E, Gonzales E, Decrossas E, et al. EMI-EMC qualification of the NASA SWOT mission using high fidelity modeling. IEEE J Microwaves, 2025, 5: 116–129
73 European Cooperation for Space Standardization. Space Engineering—Electromagnetic Compatibility. Standard ECSS-E-ST-20-07C Rev. 2. 2022
74 U.S. Department of Defense. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. MIL-STD-461G. 2015

75 Dennison J R, Bray M G. Radial line slot array antenna high power thermal vacuum testing. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, 2020. 257–258
76 European Cooperation for Space Standardization. Space Engineering—Testing. Standard ECSS-E-ST-10-03C Rev. 1. 2022
77 NASA. General environmental verification standard for GSFC flight programs and projects. GSFC-STD-7000B. 2021
78 3GPP. Study on New Radio (NR) to Support Non-Terrestrial Networks. 3GPP TR 38.811. v15.4.0, Release 15. 2020
79 3GPP. NR; User Equipment (UE) Conformance Specification; Radio Transmission and Reception; Part 5: Satellite Access Radio Frequency (RF) and Performance. 3GPP TS 38.521-5. v19.1.0, Release 19. 2026
80 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. v17.2.0, Release 17. 2022
81 Gupta U, Tan A, Liu J, et al. Modern flat panel antenna technology for Ku-/Ka-band user terminals in LEO satellite communications systems. Microwave J. 2021. https://www.microwavejournal.com/articles/36729
82 Chen Y, Abdollah Chalaki M, Boumaiza S. High-accuracy, fast calibration of large-scale phased antenna arrays via novel constellation modeling method. IEEE Trans Microwave Theor Techn, 2025, 73: 10771–10785
83 Cartón Llorente I, Fan W, Pedersen G F. MIMO OTA testing in small multiprobe anechoic chamber setups. IEEE Antennas Wirel Propag Lett, 2016, 15: 1167–1170
84 3GPP. User Equipment (UE) Conformance Specification; Part 1: Protocol. 3GPP TS 38.523-1. v19.4.0, Release 19. 2026
85 Liu F, Cui Y, Masouros C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond. IEEE J Sel Areas Commun, 2022, 40: 1728–1767
86 3GPP. New SID: Study on Integrated Sensing and Communication (ISAC) for NR. Document RP-251861, RAN#108. 2025
87 3GPP. New SID: Study on 6G Radio. Document RP-251881, TSG RAN Meeting #108. 2025
88 Nokia. Sensing in 6G Networks. Document R4-2601746, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026
89 Samsung. Sensing in 6G Networks. Document R4-2600723, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026
90 vivo. Discussion on 6G Sensing. Document R4-2600688, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026
91 CMCC. Discussion on 6G Sensing. Document R4-2600809, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026
92 ZTE Corporation. WF on 6G Sensing. Document R4-2602286, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026
93 3GPP. Study on Integrated Sensing and Communication. 3GPP TR 22.837. v19.4.0, Release 19. 2024
94 IEEE Standards Association. Standard for Performance Metrics for Integrated Sensing and Communication Systems. IEEE P3383. 2023
95 3GPP. Integrated Sensing and Communication. 3GPP TS 22.137. v19.1.0, Release 19. 2024
96 Xiaomi. Overview for 6GR ISAC Scope. Document R4-2600463, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026
97 OPPO. Discussion on 6G Sensing. Document R4-2601453, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026
98 Wei Z, Jia J, Niu Y, et al. Integrated sensing and communication channel modeling: a survey. IEEE Internet Things J, 2025, 12: 18850–18864
99 Uluisik C, Cakir G, Cakir M, et al. Radar cross section (RCS) modeling and simulation, part 1: a tutorial review of definitions, strategies, and canonical examples. IEEE Antennas Propag Mag, 2008, 50: 115–126
100 Luo H, Wang Y, Luo D, et al. Integrated sensing and communications in clutter environment. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 10941–10956
101 Zhang J A, Rahman M L, Wu K, et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—a survey. IEEE Commun Surv Tutorials, 2022, 24: 306–345
102 Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2006, 42: 2–21
103 Rosamilia M, Balleri A, De Maio A, et al. Radar detection performance prediction using measured UAVs RCS data. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2023, 59: 3550–3565
104 Ezuma M, Anjinappa C K, Funderburk M, et al. Radar cross section based statistical recognition of UAVs at microwave frequencies. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2022, 58: 27–46
105 Khawaja W, Ezuma M, Semkin V, et al. A survey on detection, classification, and tracking of AAVs using radar and communications systems. IEEE Commun Surv Tutorials, 2026, 28: 3272–3310
106 Li Y, Wang X, Ding Z. Multi-target position and velocity estimation using OFDM communication signals. IEEE Trans Commun, 2020, 68: 1160–1174
107 Shnidman D A. Radar detection in clutter. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2005, 41: 1056–1067
108 Behdad Z, Demir Ö T, Sung K W, et al. Multi-static target detection and power allocation for integrated sensing and communication in cell-free massive MIMO. IEEE Trans Wireless Commun, 2024, 23: 11580–11596
109 ETSI. Integrated Sensing and Communications (ISAC); Channel Modelling, Measurements and Evaluation Methodology. Group Report ETSI GR ISC 002, v1.1.1. 2025

110 3GPP. Study on 6G Scenarios and Requirements. 3GPP TR 38.914. v0.4.0, Release 20. 2026

111 IMT-2020 (5G) Promotion Group. Research Report on Enhanced 5G-Advanced ISAC Air Interface Technology Solutions. Beijing: IMT-2020 (5G) Promotion Group, 2025 [IMT-2020 (5G) 推进组. 5G-Advanced 通感融合空口技术方案增强研究报告. 北京: IMT-2020 (5G) 推进组, 2025]

112 IMT-2020 (5G) Promotion Group. Research Report on Enhanced 5G-Advanced ISAC Network Architecture. Beijing: IMT-2020 (5G) Promotion Group, 2022 [IMT-2020 (5G) 推进组. 5G-Advanced 通感融合网络架构增强研究报告. 北京: IMT-2020 (5G) 推进组, 2022]

113 Keysight Technologies. 6G Research and Innovation: From 0 to PHY and Beyond. 2025. https://www.keysight.com/us/en/assets/7125-1085/ebooks/6G-Research-and-Innovation-From-0-to-PHY-and-Beyond.pdf

114 Khawaja W, Guvenc I, Matolak D W, et al. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles. IEEE Commun Surv Tutorials, 2019, 21: 2361–2391

115 Rodríguez-Piñeiro J, Domínguez-Bolaño T, Cai X, et al. Air-to-ground channel characterization for low-height UAVs in realistic network deployments. IEEE Trans Antennas Propag, 2021, 69: 992–1006

116 Ma Z, Ai B, He R, et al. Impact of UAV rotation on MIMO channel characterization for air-to-ground communication systems. IEEE Trans Veh Technol, 2020, 69: 12418–12431

117 Hua B, Ni H, Zhu Q, et al. Channel modeling for UAV-to-ground communications with posture variation and fuselage scattering effect. IEEE Trans Commun, 2023, 71: 3103–3116

118 Mao K, Zhu Q, Zhong W, et al. A survey on channel sounding technologies and measurements for UAV-assisted communications. IEEE Trans Instrum Meas, 2024, 73: 1–24

119 Khuwaja A A, Chen Y, Zhao N, et al. A survey of channel modeling for UAV communications. IEEE Commun Surv Tutorials, 2018, 20: 2804–2821

120 Chang H, Wang C X, Liu Y, et al. A novel nonstationary 6G UAV-to-ground wireless channel model with 3-D arbitrary trajectory changes. IEEE Internet Things J, 2021, 8: 9865–9877

121 Matolak D W, Sun R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—part III: the suburban and near-urban environments. IEEE Trans Veh Technol, 2017, 66: 6607–6618

122 Jiang H, Zhang Z, Wang C X, et al. A novel 3D UAV channel model for A2G communication environments using AoD and AoA estimation algorithms. IEEE Trans Commun, 2020, 68: 7232–7246

123 Wang Q, Xu H, Lin S, et al. A low-slow-small UAV detection method based on fusion of range-doppler map and satellite map. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2024, 60: 4767–4783

124 3GPP. Study on Supporting Unmanned Aerial Systems (UAS) Connectivity, Identification And Tracking. 3GPP TR 23.754. v17.1.0, Release 17. 2021

125 3GPP. Unmanned Aerial System (UAS) Support in 3GPP. 3GPP TS 22.125. v17.2.0, Release 17. 2021

126 Sun Y, Peng M, Zhang S, et al. Integrated satellite-terrestrial networks: architectures, key techniques, and experimental progress. IEEE Netw, 2022, 36: 191–198

127 Kildal M S, Mansouri Moghaddam S, Razavi A, et al. Verification of the random line-of-sight measurement setup at 1.5–3 GHz including MIMO throughput measurements of a complete vehicle. IEEE Trans Veh Technol, 2020, 69: 13165–13179

128 State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. The world's first automotive compact antenna test range system independently developed by CATRC officially launched. 2024 [国务院国有资产监督管理委员会. 中汽中心自主研发的全球首套汽车紧缩场测试系统正式上线. 2024] http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c30870062/content.html

129 Lee T, Burnside W.D. Performance trade-off between serrated edge and blended rolled edge compact range reflectors. IEEE Trans Antennas Propagat, 1996, 44: 87–96

130 Zhang X, Wang Z, Pan C, et al. Dual-polarized inverted quad-ridged flared horn antenna with one-decade bandwidth for OTA testing. Antennas Wirel Propag Lett, 2022, 21: 1233–1237

131 Chongqing Liangjiang New Area Party Working Committee. Investing 3.5 billion yuan with over 20 world-class laboratories: Exploring the Global Automotive ICT Testing and Evaluation Technology Innovation Base Under Construction in Liangjiang New Area. 2024 [重庆两江新区党工委管委会. 投资 3.5 亿元、超 20 个全球先进实验室 ..... 探秘两江新区在建全球汽车信息通信测评技术创新基地. 2024] https://www.liangjiang.gov.cn/mixmedia/a/202406/13/WS666a47c0e4b0541d1b280528.html

132 Rodríguez V F, Galocha I B, Sierra C M. Fast spherical near-field to far-field transformation for offset-mounted antenna measurements. IEEE Antennas Wirel Propag Lett, 2020, 19: 2255–2259

133 Rodríguez V F, Fernandez Á J, Galocha I B, et al. Numerical and experimental investigation of phaseless spherical near-field antenna measurements. IEEE Trans Antennas Propag, 2021, 69: 8830–8841

134 Chen K, Ma Y C, Yang X H, et al. Discussion on whole vehicle testing technology for intelligent connected vehicles. Commun World, 2024, 3: 28–31 [陈凯, 马宇辰, 杨晓航, 等. 智能网联汽车整车测试技术探讨. 通信世界, 2024, 3: 28–31]

135 Kong H, Wen Z, Jing Y, et al. Midfield over-the-air test: a new OTA RF performance test method for 5G massive MIMO devices. IEEE Trans Microwave Theor Techn, 2019, 67: 2873–2883

136 Kong H, Jing Y, Wen Z, et al. Mid-field OTA RF test method: new developments and performance comparison with the compact antenna test range (CATR). In: Proceedings of the 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020. 1–5

137 General Test Systems. An OTA test system supporting full vehicle 5G MIMO measurement. 2025 [深圳市通用测试系统有限公司. 整车系列: 支持整车 5G MIMO 测量的 OTA 测试系统. 2025] https://www.generaltest.com/products/automotive

138 Li L, Wei G M, Jiang G K, et al. MIMO OTA performance testing of vehicles. Telecommun Sci, 2021, 37: 32–38 [李雷, 魏贵明, 姜国凯, 等. 面向汽车的 MIMO OTA 测试技术. 电信科学, 2021, 37: 32–38]

139 China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd. Road vehicles—RF performance requirements and test methods for whole vehicle antenna systems: 20251778-T-339. 2025 [中国汽车技术研究中心有限公司, 中汽研检测中心 (天津) 有限公司. 道路车辆整车天线系统射频性能要求及试验方法: 20251778-T-339. 2025] https://std.samr.gov.cn

140 5G Automotive Association. Vehicular Antenna Test Methodology. 2024. https://5gaa.org/content/uploads/2024/04/5gaa-wg3-vatm-technical-report.pdf

141 vivo. Topic Summary for [116bis][110] 6G Testability and OTA. Document R4-2514517, RAN4#116bis. 2025

142 CMCC. Discussion on UE RRM/Demodulation Testability. Document R4-2600844, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026

143 Nokia. OTA and Testability for 6G. Document R4-2601793, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026

144 Qualcomm Incorporated. Views on 6G UE Testability. Document R4-2601495, TSG-RAN WG4 Meeting #118. 2026

145 Li Q, Sisk P, Kannan A, et al. Machine learning based time domain millimeter-wave beam prediction for 5G-Advanced and beyond: design, analysis, and over-the-air experiments. IEEE J Sel Areas Commun, 2023, 41: 1787–1809

146 Li Q, Rana M, Tatsumi M, et al. On-device machine learning model adaptation for 6G communications: from standardization to over-the-air prototyping experiments based on beam Prediction. IEEE J Sel Areas Commun, 2026, 44: 3152–3167

147 Wang Z, Yan M, Zhao W, et al. Over-the-air testing on artificial intelligence-based beam management evaluation of millimeter-wave devices. IEEE Trans Antennas Propagat, 2026, 74: 2770–2781

148 Lin C, Kao W, Zhan S, et al. BsNet: a deep learning-based beam selection method for mmWave communications. In: Proceedings of the IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2019. 1–6

149 Echigo H, Cao Y, Bouazizi M, et al. A deep learning-based low overhead beam selection in mmWave communications. IEEE Trans Veh Technol, 2021, 70: 682–691

150 Shah S H A, Rangan S. Multi-cell multi-beam prediction using auto-encoder LSTM for mmWave systems. IEEE Trans Wireless Commun, 2022, 21: 10366–10380

151 Guo J, Wen C K, Jin S, et al. Overview of deep learning-based CSI feedback in massive MIMO systems. IEEE Trans Commun, 2022, 70: 8017–8045

152 3GPP. New WI: Artificial Intelligence (AI)/Machine Learning (ML) for NR Air Interface Enhancements. Document RP-251870, RAN#108. 2025

153 Rohde & Schwarz. Rohde & Schwarz successfully validates ML-enhanced channel-state information feedback with Qualcomm for 5G-Advanced. 2025. https://www.rohde-schwarz.com/us/about-us/news-press/all-news/rohde-schwarz-successfully-validates-ml-enhanced-channel-state-information-feedback-with-qualcomm-for-5g-advanced_229356-1545609.html

154 Keysight Technologies. F9660A 3D Multi-Probe Anechoic Chamber (3D MPAC) Data Sheet. Santa Rosa: Keysight, 2023

155 Kyösti P, Jämsä T, Nuutinen J P. Channel modelling for multiprobe over-the-air MIMO testing. Int J Antennas Propag, 2012, 2012: 1–11

156 Zhang X, Liu X, Wei G, et al. The study of 5G massive MIMO end-to-end MPAC test solution. In: Proceedings of the 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020. 1–5

157 Pei H L, Chen X M, Huang X Y, et al. Key issues and algorithms of multiple-input-multiple-output over-the-air testing in the multi-probe anechoic chamber setup. Sci China Inf Sci, 2022, 65: 131302

158 Gao H, Wang Z, Zhang X, et al. Over-the-air performance testing of 5G new radio user equipment: standardization and challenges. IEEE Comm Stand Mag, 2022, 6: 71–78

159 Stratton J A. Electromagnetic Theory. Piscataway: IEEE Press; Hoboken: Wiley-Interscience, 2007 (reprint of 1941)

160 Colton D, Kress R. Inverse Acoustic and Electromagnetic Scattering Theory. 3rd ed. New York: Springer, 2013

161 Harrington R F. Time-Harmonic Electromagnetic Fields. Piscataway: IEEE Press; Hoboken: Wiley-Interscience, 2001 (reprint of 1961)

162 Wei X, Dai L. Channel estimation for extremely large-scale massive MIMO: far-field, near-field, or hybrid-field? IEEE Commun Lett, 2022, 26: 177–181

163 Dong Z, Zeng Y. Near-field spatial correlation for extremely large-scale array communications. IEEE Commun Lett, 2022, 26:

1534–1538
164 Cui M, Wu Z, Lu Y, et al. Near-field MIMO communications for 6G: fundamentals, challenges, potentials, and future directions. IEEE Commun Mag, 2023, 61: 40–46
165 Wang Z, Zhang H, Guo C, et al. Multiple test zones synthesis in multiprobe anechoic chamber setups for over-the-air testing. Antennas Wirel Propag Lett, 2026, 25: 1777–1781

Over-the-air testing technologies for 6G integrated space-air-ground and communication-sensing-intelligence networks

Wei HONG[1,2*], Zhengbo JIANG[1,2*], Zhanyuan WANG[1] & Shangbing QIAO[1,3]

1. *National Key Laboratory of Millimeter Wave, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*
2. *Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China*
3. *China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China*
* Corresponding author. E-mail: weihong@seu.edu.cn, jzb@seu.edu.cn

Abstract Over-the-air (OTA) testing technology runs through the entire lifecycle of mobile communications, spanning standard development, equipment manufacturing, and network operation and maintenance, playing a leading and supporting role, and is gradually becoming the dominant testing paradigm for future mobile communication systems. This paper addresses the emerging 6G application scenarios including space-air-ground integration, integrated sensing and communication, and communication-intelligence integration, and analyzes the OTA testing requirements and challenges in typical domains such as low-Earth-orbit satellite communication payloads and terminals, integrated sensing and communication systems with low-altitude unmanned aerial vehicles, intelligent connected vehicles, and artificial intelligence-enabled communications. Finally, a dome-shaped large-scale multi-probe anechoic chamber testing framework is proposed.

Keywords 6G, over-the-air testing, space-air-ground integration, integrated sensing and communication, artificial intelligence, electromagnetic twin