



研究与开发

面向6G空天地一体化系统的OTA 测试方法与关键技术展望

王皓民¹, 王文超², 奂青周¹, 张锦峰¹, 孙浩³, 李勇¹

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876;

2. 深圳市泰衡诺科技有限公司上海分公司, 上海 201210;

3. 中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘要: 空天地一体化技术是6G网络实现万物智联愿景的核心使能技术之一, 其关键技术验证与设备性能评估急需高效的空口 (over-the-air, OTA) 测试解决方案。首先, 分析了空天地一体化系统的发展现状、网络架构和信道特性, 进而针对6G空天地一体化系统特点和测试需求, 提出了一种能够匹配空天地一体化系统通信设备所处信道环境特点以进行高效测试的星地融合OTA测试系统。最后, 总结了未来6G空天地一体化OTA测试研究所面临的标准化与技术挑战, 并对潜在研究方向进行了展望, 为未来研究提供了理论基础和发展方向。

关键词: 6G; 空天地一体化系统; 空口性能测试; 多探头暗室; 信道重构

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025205

Perspective on OTA testing methods and key technologies for 6G space-air-ground integrated systems

WANG Haomin¹, WANG Wenchao², HUAN Qingzhou¹, ZHANG Jinfeng¹, SUN Hao³, LI Yong¹

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Shenzhen TECNO Technology Co., Ltd., Shanghai Branch Shanghai 201210, China

3. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

Abstract: Space-air-ground integrated technology is one of the core enabling technologies for realizing the vision of ubiquitous connectivity in 6G networks. Efficient over-the-air (OTA) testing solutions are urgently needed for the veri-

收稿日期: 2025-02-28; 修回日期: 2025-05-26

通信作者: 李勇, liyong@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62471061); 北京市自然科学基金-小米创新联合基金资助项目 (No.L243028); 深圳市承接国家重大科技项目协同创新专项 (No.CJGJZD20230724092759005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62471061), Beijing Natural Science Foundation-Xiaomi Innovation Joint Fund (No.L243028), Shenzhen Undertakes the National Science and Technology Major Project Collaborative Innovation Special Project (No.CJGJZD20230724092759005)



fication of key technologies and the performance evaluation of devices. Firstly, the development status, network architecture, and channel characteristics of space-air-ground integrated systems were analyzed. Then, based on the specific characteristics and testing requirements of 6G space-air-ground integrated systems, a satellite-ground integrated OTA testing system was proposed to align with the channel environment characteristics of the communication devices in space-air-ground integrated systems, thereby enabling highly efficient OTA testing. Finally, the standardization and technical challenges that future OTA testing research for 6G space-air-ground integrated systems will encounter were summarized, and potential research directions were outlined, providing a theoretical foundation and guidance for future studies.

Key words: 6G, space-air-ground integrated system, OTA performance testing, MPAC, channel emulation

0 引言

随着5G大规模商用, 高速率、高容量、低时延的地面网络为人类生活提供了巨大便利。为满足人们对移动通信网络需求的进一步提升, 业界已开启对6G移动通信技术的研究探索。相比“万物互联”的5G网络, 为了提供天地一体泛在、高效、安全、虚实结合的“万物智联”, 6G网络需要提供无缝连接和普及覆盖, 并具备高度的适应性和灵活性, 以兼容各种现有用例及技术^[1]。因此, 凭借卫星“站得高、看得远”所提供的广覆盖能力及其与地面网络所能实现的星地融合, 非地面网络(non-terrestrial network, NTN)已被国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)无线通信部门在《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》中列为无线网络关键增强技术, 成为6G网络的核心推动力^[2]。随着火箭发射、卫星平台和载荷技术的研究与突破, 卫星通信技术得到快速发展, 将最终形成以现有地面通信设施为基础、天基通信为扩展的空天地一体化融合发展趋势^[3]。

目前, 星地通信进入以非对地静止轨道(non-geostationary orbit, NGSO)星座为主的发展阶段。低地球轨道(low earth orbit, LEO)卫星由于其具有成本低、体积小、质量轻以及星载功耗小的特点, 成为建立星地链路的首选^[4]。为实现大规模LEO卫星组网, 仍有诸多技术难题亟

待解决。尽管LEO卫星的轨道高度相对对地静止轨道(geostationary orbit, GSO)卫星有所降低, 但其通信系统的路径损耗仍旧较大, 因此, 星地端天线配置将逐渐发展为以相控阵为主, 以提高波束增益。同时, 由于星地距离较远, 需要对较高的时延进行有效处理。此外, LEO卫星相对于地球的运动速度比GSO卫星更快, 导致信道变化更为迅速, 并且当信号穿过大气层时, 将经历复杂的物理现象。因此, 地面终端需要通过物理或电调方式持续对准以维持接入, 在此情况下, 移动性管理技术将为空天地一体化系统提供重要性能保障。同时, 鉴于LEO卫星部署规模较大, 且其与现有地面网络共存时将存在严重的干扰问题, 先进的频谱管理及干扰规避和消除技术同样不可或缺^[3]。

通信设备性能测试技术对于终端研发与制造至关重要, 因此, 测试方法、测试标准以及相关仪器仪表研制必须与相关技术同步发展。在5G阶段, 能够提供重复可控测试环境从而对整机性能进行精确校验的空口(over-the-air, OTA)测试方法备受青睐。其中, 能够更好地反映目标信道角度域特征的多探头暗室(multi-probe anechoic chamber, MPAC)方法成为OTA性能测试的首选^[5]。然而, 相较于5G地面通信系统, 6G空天地一体化系统的星地融合网络架构和链路特性将存在巨大差别, 导致现有OTA测试系统及方法将不足以应对空天地一体化系统中各类终端的

性能验证需求。为保障相关技术研究和终端研制, 本文从空天地一体化网络架构和信道特点入手, 分析了面向6G空天地一体化系统的OTA测试方法与关键技术所面临的主要挑战, 并探究了其未来发展方向。

1 空天地一体化系统综述

1.1 空天地一体化系统网络架构及链路组成

空天地一体化系统网络架构如图1所示, 包括天基、空基和地基网络^[6]。其中, 地基网络包括传统地面网络、信关站以及各类存量和增量终端。传统地面网络以小区为基本单元, 但由于部署难度和成本问题, 其通常对雨林、沙漠、海上等特殊或偏远地区的覆盖能力受限。天基网络由不同种类且处在不同轨道上的GSO卫星、中地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星和LEO卫星构成, 其中GSO卫星轨道高度最高, 覆盖能力最强, 只需要3颗即可实现全球覆盖, 通常用于时延不敏感业务; LEO卫星轨道高度低, 发射灵活且制造成本较低, 因此将承担最多的通信业务; MEO卫星兼具GSO和LEO卫星的优点, 但发射难度和时延仍旧较高, 目前发射和应用均较少。天基网络中将搭建多轨道协同的大量星间链路, 并且将与空基和地基网络中的多种通信设备和用户联通, 以提供泛在太空连接。空基网络由各类航空器节点、高空平台站(high altitude platform station, HAPS)以及空基用户构成。通常高空飞行器只能通过较低频率与地面联络, 当处于高空作业时易受天气干扰, 稳定性不足, 因此接入卫星通信系统将是保障各类飞行器通信安全的重要手段, 其上用户可通过卫星实现网络接入。低空飞行器则更加灵活, 可为地面网络提供即时覆盖, 或作为中继节点实现天基与地基的高效网络融合。在空天地一体化构想中, 卫星将作为重要枢纽, 通过星间、星-空-地链路将各类通信网络及终端紧密连接, 基于空天地融合组网打

破现有异构网络之间的互通壁垒, 实现空天地海的万物智联和无缝覆盖。

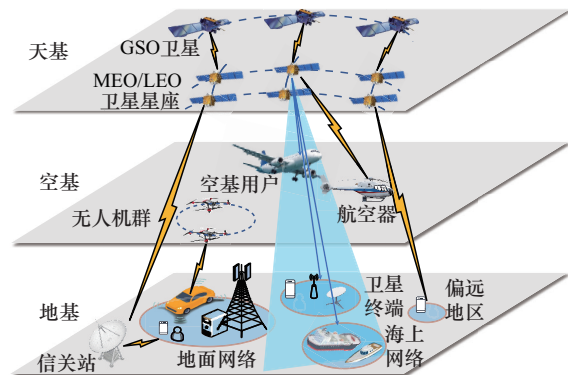


图1 空天地一体化系统网络架构

1.2 现有卫星星座规模及应用

相对于GSO和MEO卫星, LEO卫星通信系统具备低成本、低时延、广覆盖、大容量等特点, 已被认为是6G空天地一体化网络的重要组成部分。尽管相比地面网络, 卫星的部署看似更加灵活, 但轨道资源终究是有限的。截至2024年11月月底, 美国SpaceX公司的星链(Starlink)计划已向近地轨道发射了7 231颗星链卫星, 并计划于2030年年底完成1.5万颗卫星的网络建设。随着Starlink计划的成功落地, 各国均开始规划并构建星座, 从而竞争有限的太空资源。早在2015年, 我国便着手建设低轨卫星通信系统, 通过“虹云”和“鸿雁”项目, 计划发射数千颗中低轨卫星, 以构建天基卫星网络^[7]。2021年, 中国卫星网络集团有限公司正式成立, 并随后提出了国网(GW)星座, 计划发射共12 992颗卫星。目前, 低轨卫星通信系统已经成为我国2030年智能社会建设战略的重要支撑, 以及未来实现全球网络覆盖与多元异构网络融合的重要解决方案。我国典型星座的主要应用场景及构建情况见表1。

由表1可知, 未来我国星地通信将以LEO卫星为主要载体, 基于S/L频段向Ka/Ku以及Q/V频段逐渐扩展, 且为了获得更大的可用带宽, 将向更高的毫米波及太赫兹频段延伸。其中, 手机



表1 我国典型星座的主要应用场景及构建情况

星座	主要应用场景	使用频段	星座构型
天通	直连通信	上行频段: 1 980~2 010 MHz 下行频段: 2 170~2 200 MHz	3 GSO
北斗三号	导航 短报文直连通信	B1、B2和B3 (中心频率为1 575.42 MHz、 1 176.45 MHz、1 268.52 MHz)	24 MEO+3 GSO+3 倾斜地球同步轨道卫星
GW	手机直连通信 宽带互联网	S 频段 Ka、Q/V 频段 37.5~39.5 GHz (空对地) 39.5~42.5 GHz (空对地) 47.2~50.2 GHz (地对空) 50.4~51.4 GHz (地对空)	GW-A59 (508 km、590 km、600 km, 共6 080颗) GW-A2 (1 145 km, 共6 912颗)
吉利未来	中低速卫星通信 手机直连通信 宽带通信	暂未公开	一期72颗 二期264颗 三期5 676颗

直连卫星将成为最重要的业务类型。各卫星公司也将逐步开展增量终端的研究和推广,从而加速我国卫星互联网自主可控与高效发展,推动空地一体化泛在网络构建。

1.3 空地一体化系统信道特性

无线信道作为承担信息传输的载体,对其进行充分测量及可靠建模有助于研究者们充分理解新场景下通信系统设计及终端研制所面临的机遇与挑战。相较于传统地基通信系统,空地一体化网络中新增的空基与天基设备与用户,将使得其信道呈现多维异构特征。具体而言,空基与天基中的各类通信节点通常处于高速移动状态,且位于地端通信设备的上部空间。由于距离较远,信道路径损耗相较传统地面网络显著提高,且在传输时受大气环境的强烈影响。考虑天基、空基网络与地基用户间的信道存在相似特性,且星地链路在移动性和传输距离上面临的挑战比空地链路更大,本节重点讨论星地链路的信道特性。所述星地信道的多维异构特征主要体现在以下3个方面。

(1) 传输距离远且大气环境复杂:星地链路传输距离远超地面通信场景,即便是LEO卫星,也部署于距离地面500~2 000 km的高空。为了规避现存地面网络干扰,在低频段资源紧张的情

况下,卫星通信系统将逐渐由S/L频段向Ka/Ku和Q/V等更高频段部署,导致信道的自由空间路径损耗急剧增大。同时,由于可用频段分布极广,信号在穿过大气层时,将在不同频段经历截然不同的大气吸收、降雨和云雾损耗、地物损耗、电离层和对流层闪烁,以及法拉第旋转等复杂物理现象的耦合作用^[8],上述效应使得星地信道对大尺度衰落建模的精细化程度要求更高。

(2) 信道呈现快速时变特性:星地信道动态特性受卫星高速运动主导,以轨道高度为500 km的LEO卫星为例,其线速度约为7.6 km/s,远超地面移动终端,这导致星地信道呈现出更强的动态特性。当载波频率为30 GHz时,最大多普勒频移将高达761.65 kHz,并且这一数值并没有考虑地球自转及地面端运动。该频移量级导致信道相干时间缩短至微秒级别,同时随着星地链路所用频段提高,超宽带信号将会更容易遭遇频率选择性信道。因此,对星地信道的动态特性建模将更加困难。

(3) 多径结构更加复杂:受卫星动态仰角变化及多星和地面散射体空间拓扑约束,星地信道的多径结构相较于地面通信系统将存在巨大差异。随着所用频段提高,受限于路径损耗显著增加,星地链路中的非视距(non-line-of-sight,

NLOS) 信号将易被噪声淹没, 导致通信链路主要依赖视距 (line-of-sight, LOS) 传输, 这使得不同频段和不同场景中将呈现出差异较大的多径结构组成。例如, 在密集城区等场景中, 仍将存在经建筑物反射、地形起伏等原因产生的多径分量。基于上述分析, 典型星地通信场景下的多径信道组成如图2所示, 包括LOS径 (也称直射径)、地面反射径和由各类散射体产生的地面散射簇。在几何关系约束下, 地面反射径与直射径的入射角将存在特定的角度关系, 地面终端周围的散射体物理尺寸及分布将与地面散射簇的空间特性高度相关。此外, 由于传播距离较远, 部分多径分量可能在多次反射后因功率较小而被噪声淹没。因此, 需要对来波角度和多径时延进行精确建模, 采用时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 法和射线追踪 (ray-tracing, RT) 法等确定性建模方法将能更准确地捕获星地链路的多径来波特性。

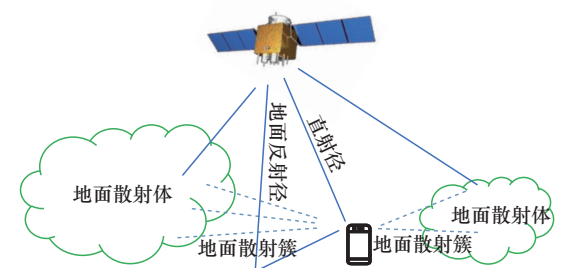


图2 典型星地通信场景下的多径信道组成

1.4 空天地一体化系统标准化建模

针对星地信道在大尺度衰落方面的独特特性, ITU自1986年起便对传输损耗的计算方法展开研究与建模。其中, ITU-R P.618^[9]和P.2108^[10]建议书分别针对空间段和地面段损耗提供了标准化建模框架。进一步地, 在ITU-R P.681^[11]建议书中基于实际信道测量结果, 总结了适用于陆地移动卫星系统的信道模型, 其中窄带模型适用于1.5~20 GHz, 宽带模型仅适用于1~2 GHz的较低频率场景。

相比于ITU更加看重整体框架设计和频谱分配, 第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 则从Release 14阶段开始探索NTN与星地融合技术。2017年, 3GPP发布了面向NR (new radio) 的NTN标准3GPP TR 38.811^[8], 在5G标准信道模型3GPP TR 38.901^[12]的基础上, 给出了密集城区、城区、郊区、农村和空旷场景下的星地信道参数生成方法, 并针对S和Ka频段提供了时间延迟线 (time delay line, TDL) 和簇延迟线 (cluster delay line, CDL) 模型。然而, 由于上述模型采用了基于几何的随机信道 (geometry-based stochastic model, GBSM) 建模方法, 如前文所述, 更强的移动性以及终端与散射体的几何关系限制使得依据3GPP TR 38.811所生成的信道与现地采集信道存在较大差距, 目前学术界与标准化组织均致力于实现更加准确且复杂度较低的星间与星地信道建模。

1.5 已开展的星地通信实验验证

为验证星地通信性能, 国内外研究机构已开展多项关键技术实验验证。2023年10月, 中国电信研究院牵头完成了全球首次运营商NR NTN终端直连卫星的现网环境测试。结果表明, 即使在5 MHz受限带宽条件下, GSO卫星仍可提供稳定的语音、短信及宽带数据服务。作为卫星通信行业的领航者, 美国SpaceX公司于2023年12月获得美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 的特别临时授权, 在1.9 GHz频段, 于加利福尼亚州、堪萨斯州及华盛顿等20多个地点, 通过其840颗Starlink第二代卫星测试了约2 000个测试设备在5种不同功率水平下的性能表现。2023年9月, 美国AST公司宣布通过其测试卫星BlueWalker 3首次实现手机与低轨卫星的5G通信连接, 下行速率约为14 Mbit/s。2024年5月, FCC批准美国电话电报公司 (AT&T) 和AST公司在得克萨斯州和夏威夷进行手机直连卫



星测试，AST使用AT&T的800 MHz频段通过20部商用手机测试与BlueWalker 3 LEO卫星上行链路的连接。此外，AST还获得了AT&T的许可，在2025年5月前使用37.6~40 GHz频段进行测试。然而，上述测试均为外场通断测试，尽管提供了有价值的测试结果，但相比于实验室测试，无法在重复可控的信道环境下获得真实且稳定的性能指标。

2024年5月，中国电信携手银河航天等科研机构完成了6G星地链路级外场地面测试。该实验基于自主研发的卫星模拟器、终端模拟器及软件定义实验平台，构建了完整的卫星接入网外场测试环境，实现了我国首次面向6G接入网的外场高速信息传输测试，也是目前唯一报道的构建了可控环境的OTA测试案例，为后续面向6G空天地一体化系统的OTA测试研究提供了重要参考。

2 面向空天地一体化系统的OTA测试方法与挑战

2.1 OTA性能测试系统及信道重构技术概述

OTA性能测试，作为通信设备出厂前性能验证的最终保障环节，其核心目的在于，在重复可控的真实信道环境中准确评估终端吞吐率、误码率等关键指标。其中，MPAC方法由于能够反映目标信道的多径来波角度特征，在4G与5G阶段OTA性能测试中均占据主要地位。MPAC OTA方法的发展历经了测量维度提高与测量频段演进两个阶段。由于多输入多输出（multiple-input multiple-output, MIMO）技术在水平维度的基础上引入垂直维度，使得真实的传播环境在建模时，需要用三维信道模型代替二维信道建模。同样的，由于早期所使用的二维探头环暗室^[13]无法对三维信道模型进行重构，学术界进行了大量有关三维探头球结构MPAC系统的仿真与实验^[14]。随着毫米波频率范围（frequency range, FR）2的

引入，MPAC OTA方法发展进入第二阶段，由于终端设备的波束能力得到增强，波束更加具有指向性，传统的探头环排列的暗室结构不再适用。因此，针对5G大规模MIMO设备的OTA暗室中须采用三维探头墙结构^[15]。文献[16]提出了采用了扇形探头墙的MPAC结构，该通用模型为毫米波OTA测试奠定了基础。扇形探头墙MPAC OTA测试系统结构如图3所示。

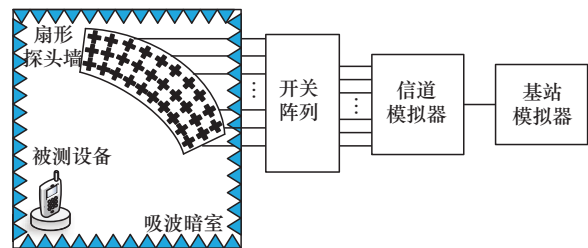


图3 扇形探头墙MPAC OTA测试系统结构

该测试系统由吸波暗室、扇形探头墙、开关阵列、信道模拟器和基站模拟器组成。其中，吸波暗室内壁及机械装置表面覆盖有吸波材料，使得暗室内不存在额外电磁散射。扇形探头墙上配置一定数量的可用探头天线，可以通过开关电路实时选择需要激活的探头天线。扇形探头墙结构减小了暗室覆盖面积，节约了建设成本，并且相较于以往的传统MPAC方案而言，探头墙上的探头分布更加密集，能够实现对三维复杂信道的更精准重构。除扇形探头墙结构的MPAC OTA测试系统外，文献[17]提出了一种双暗室结构OTA测试系统，从而使得端到端OTA测试成为现实。基站模拟器可以通过软件定义无线电（software defined radio, SDR）和相关软件实现对不同网络环境的模拟，从而根据测试需求进行多个核心网和接入网配置，以供被测设备接入。信道模拟器可以创建和模拟测试所需的多径信道环境，且能够直接对路径损耗、时延、多普勒频移和交叉极化比等信道参数进行配置。在实际测试时，具体步骤为：基站模拟器生成传输信号并发送给信道模

拟器；信道模拟器将生成的仿真信道冲激响应与传输信号进行卷积，从而获得经历了真实外场信道环境的衰落信号；之后，通过信道模拟器为探头天线分配适当的权重，最终将所产生的衰落信号通过空口方式发送给被测设备。

信道重构是 OTA 性能测试的核心技术，其关键在于根据所需场景选择合适的信道模型，并于暗室中精准复现多径信道环境。目标信道模型方面，GBSM 在 5G MIMO OTA 测试中占据主要地位，基于 3GPP TR 38.901 的 CDL 模型^[12]在研究和实测中被广泛应用。外场采集信道并于暗室内进行复现的虚拟路测（virtual drive test, VDT）方法，由于能够完整保留目标场景信道特性，也得到大量关注^[18]。重构方法方面，基于 MPAC 方法的信道重构通常采用平面波合成（plane wave synthesis, PWS）和预衰落信号合成（pre-faded signal synthesis, PFS）技术。PWS 技术的目标为复现实际的电磁环境，即重构每个簇内的每条子径，而 PFS 技术则以簇为最小单位，为每个探头配置独立同分布的多簇衰落序列，根据每个簇的角度功率谱（power angular spectrum, PAS）及探头所在位置对每个探头辐射的衰落序列附加权重，以此在期望的区域内合成目标信道的空间统计特征^[5]。通常，PFS 技术采用空间相关性或空间谱相似度作为重构准则，以衡量信道重构

精度^[19]。

2.2 星地融合 OTA 测试系统

为了对空天地一体化愿景中所涉及的通信设备进行 OTA 性能测试，需要结合星地链路特点，在可控实验室环境下通过多个探头天线合成所需的真实信道环境。基于前文对星地信道特性的系统性分析，结合 OTA 测试及信道重构技术特点，本文提出一种面向空天地一体化系统的星地融合 OTA 测试系统，该系统架构如图 4 所示。

该星地融合 OTA 测试系统包括多台基站模拟器和信道模拟器，用于产生空、天、地基中各类通信设备所发出的信号，并模拟它们所经历的衰落。来自空、天、地基网络的衰落信号通过开关阵列被分配给对应的探头天线，从而模拟空天地一体化网络中的复杂来波方向。由于来自不同发射端的信号可能需要被同一个探头天线发出，因此该系统中的开关阵列需要具备信号合路能力。

根据前文对空天地一体化网络信道组成与特性的分析，被测设备端将接收到来自空基与天基网络的高空信号、由于地面反射产生的负俯仰角信号以及通常俯仰角较小的传统地面网络信号。因此，星地融合 OTA 测试系统的探头结构需要与上述信道结构相匹配。与传统暗室相比，星地融合 OTA 测试系统的探头天线布局将存在明显差异，由可用于重构星地信道的顶部探头墙、与被

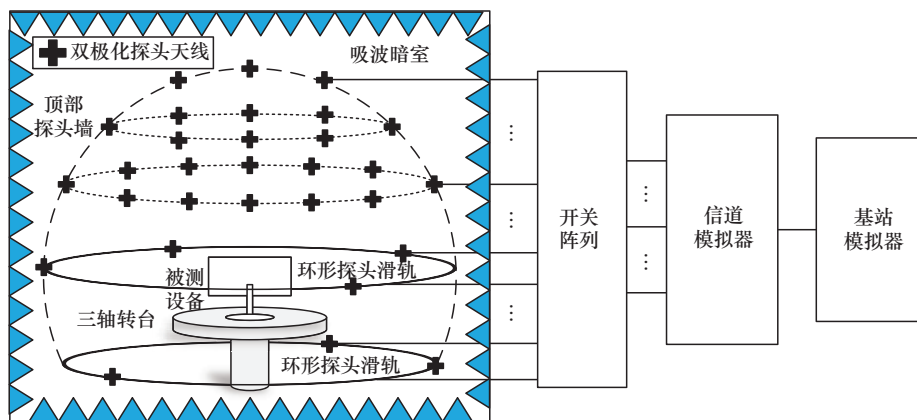


图4 面向空天地一体化系统的星地融合 OTA 测试系统架构



测设备水平高度一致用于重构现存地面网络环境的水平环形探头滑轨以及低于被测设备水平高度的地面反射径探头滑轨构成。其中，顶部探头墙探头密度较大，可用于精确复现快速过顶的卫星，以及空基网络中与被测设备保持相对静止或持续移动的无人机等通信节点所建立的通信链路。环形探头滑轨上的探头可通过外部控制器实现实时的位置调整。其中，高度较高的环形探头滑轨与被测设备高度平齐，可被用于重构来自传统地面网络的信号，对这些信号进行二维重构通常不会带来明显误差。底部环形滑轨高度低于被测设备，用于重构星地和空地链路中的地面反射径。值得一提的是，滑轨结构比探头墙结构拥有更高的灵活性，因为它们能够通过机械结构实现探头位置的平滑调整，从而实现重构信道功率和来波角度的连续变化，且能够对滑轨结构的俯仰角度进行调整，从而实现三维重构。尽管滑轨结构更加灵活，但考虑空基网络中将存在大量卫星，其中 GEO 卫星相对被测设备的位置相对固定，LEO 与 MEO 卫星的移速较快，因此，该测试系统结构未考虑在顶部使用多个探头滑轨，而是采用了更加可靠的密集探头墙结构。

在信道重构技术方面，由于 PWS 技术需要为探头天线赋以复数权重，计算和验证的复杂性均较高，因此，PFS 技术更适用于星地融合场景下的 OTA 测试。鉴于空天地一体化系统将在星地链路中采用更高频段以提升通信速率，测试区域内的空间相关性较高，因此，空间谱准则具有更强的应用潜力。

当采用空间谱准则时，被测天线端所接收到的信号可以表示为：

$$y = \sum_{B=\{S,A,G\}} \oint \sqrt{P_B(\Omega)} \mathbf{h}_B(\Omega) d\Omega \cdot x_B \quad (1)$$

其中， S 、 A 、 G 分别表示天基、空基和地基， Ω 表示角域方向角， $P_B(\Omega)$ 为天基、空基或地基中

目标信道的多簇 PAS，满足 $\oint P_B(\Omega) d\Omega = 1$ 。

$\mathbf{h}_B(\Omega) = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为包含了被测设备每个阵列单元所接收到的对应基中的信道响应向量， x_B 为对应基中的接收信号。

对于一个给定的 $P_B(\Omega)$ ，空间谱被定义为：

$$P(\Psi) = \mathbf{a}^H(\Psi) \left[\sum_{B=\{S,A,G\}} \oint \mathbf{h}_B(\Omega) \sqrt{P_B(\Omega)} \mathbf{h}_B^H(\Omega) d\Omega \right] \mathbf{a}(\Psi) \quad (2)$$

其中， $\mathbf{a}(\Psi)$ 为在特定角度方向 Ψ 上的归一化阵列导向矢量。当天、空、地基分别采用 K_S 、 K_A 和 K_G 个探头对 $P(\Psi)$ 进行重构时，探头的角度为 $\Omega_{K_B} = \{\Omega_{k_B}\}$ ，探头权重为 $\omega_{K_B} = \{\omega_{k_B}\}$ 。重构信道的空间谱可以表示为：

$$P(\Psi) = \mathbf{a}^H(\Psi) \left[\sum_{B=\{S,A,G\}} \sum_{k_B=1}^{K_B} \mathbf{h}_B(\Omega) \omega_{k_B} \mathbf{h}_B^H(\Omega) \right] \mathbf{a}(\Psi) \quad (3)$$

此时，对应的优化问题可以写作：

$$\begin{aligned} \min \quad & \|\mathbf{P}(\Psi) - \hat{\mathbf{P}}(\Psi)\|_2^2 \\ \text{s.t.} \quad & \|\omega_B\| = 1, 0 \leq \omega_{k_B} \leq 1, B = \{S, A, G\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $\mathbf{P}(\Psi) = [P(\Psi_1), \dots, P(\Psi_N)]^T$ ， $\hat{\mathbf{P}}(\Psi) = [P(\Psi_1), \dots, P(\Psi_N)]^T$ ， N 为被测设备的天线数。对于该问题的求解，关键在于如何为空、天、地基分配合适的可激活探头数量，从而在可接受的信道重构精度下对每个时刻的探头权重进行求解。此外，对于星地动态信道重构，需要定义合适的误差衡量方法并设计动态探头演化方法，从而最大限度发挥探头滑轨的动态信道重构性能。

尽管本文提出了一种基于现有技术的星地融合 OTA 测试系统，但在工程化实现过程中，仍需要对其进行深入研究和进一步改进。受限于建设成本与硬件资源，需要评估实现现存地面网络与星地信道重构的最低探头数量限制，并提出新的

重构准则和更高效的探头选择及赋权方法。此外,当被测设备的电尺寸增大时,由于暗室尺寸较小所引发的近场效应同样会影响信道重构精度,需要提出针对性方法予以补偿。同时,由于在4G、5G阶段,终端仅采用单上行天线配置,因此上行信道的测试通常采用单探头天线单独进行评估,缺乏针对双工场景上下行信道的有效测试方法,这些问题仍需要在后续研究中得到解决。

2.3 星地融合OTA测试面临的挑战与展望

为了实现空天地一体化系统通信设备的多维度性能评估,未来研究需要聚焦以下关键问题,以进一步优化上述星地融合OTA测试系统,并探索更高效、精确的信道重构方法,从而提升对空天地一体化系统的测试精度及适用性,为技术研究和产业化应用提供有力支撑。

(1) 典型星地测试场景分类:针对空天地一体化系统的多样化应用场景,面向空天地一体化系统的MPAC OTA测试系统必须能够适应空、天、地、海等场景下的真实多径信道环境,以评估空天地一体化系统中所有类型设备的通信性能。因此,定义典型测试场景并明确网络构成及多径信道特征至关重要。针对卫星通信载荷,需要对星间和星地场景进行有效复现,即对多星间通信和星地信道进行重构。对于地面端卫星通信终端,需要评估其与多星以及现存地面网络互通时的通信性能。随着对空天地一体化组网的研究深入,亟须形成统一的测试场景划分标准化框架,包括空-天-地基异构网络组成、网络切片类型、多用户拓扑以及服务质量(quality of service, QoS)保障要求等,从而开展相关测试系统构建与关键技术研究。

(2) 多维星地核心性能指标:目前,OTA测试以测量稳定接入状态下被测设备的吞吐量为最终目的,由于地面网络的基站覆盖较为稳定,通常忽略对接入、抗噪声和抗干扰能力的测试。然

而,低轨卫星过顶时间较短,尽管对短信等业务的影响较小,但为了实现长时间通信,则需要多星间进行选择接入并频繁切换。因此,除了单星稳定接入能力,对多星快速切换和抗星间及现存网络干扰能力的评估,将是衡量空天地一体化系统下设备通信能力的关键。后续研究需要针对接入、切换以及抗干扰能力,如接入速度、切换时延和信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)等关键指标提出相应的测试方法和评价体系,以确保星地融合通信系统的高效稳定运行。

(3) 空-天-地融合信道建模:星地通信系统的传播环境较传统地面通信系统更为复杂,涉及更丰富的衰落特征和物理效应,现有信道模型难以准确刻画空-天-地融合系统在多频段、大带宽条件下的信道特性。因此,亟须开展针对包括S/L、Ka/Ku、Q/V以及更高的毫米波及太赫兹频段的精细化信道采集及建模研究。首先,尽管ITU已经就大尺度衰落特性建模提供了一系列建议书,但由于星地链路会经历多种复杂物理现象,因此,仍需要结合实地信道测量与建模进一步细化各频段下的独特传播特性。同时,与传统地面通信环境信道模型不同,星地融合信道的多径结构与收发端相对位置和散射体分布存在更直接的对应关系,且会在不同频段下呈现差异化,因此,需要在不同频段与场景下进行广泛信道采集,从而实现有效信道模型表征。此外,多星拓扑结构、地球自转效应以及多种异构网络的不同信道特性均需要在不同频段下的信道模型中被正确表征。因此,针对星地信道建模,采用混合信道建模方法将有望在确保信道模型精度的同时,降低其复杂度。为了更好地对空天地一体化系统的通信设备性能进行测试,亟须获取更为准确的宽频段空-天-地融合信道模型,以便研究并提出具有针对性的星地融合信道重构技术和测试方法。

(4) 动态星地融合信道重构:动态信道重构



方法是目前 OTA 测试面临的关键技术瓶颈之一, 现有方法均采用切片方式, 即将动态信道离散为多个静态切片, 通过快速切换所开启的探头天线以及其上的功率权重来近似实现动态信道重构。然而, 该方法无法复现信道功率和来波角度的连续变化, 需要进一步评估切片方法对于动态环境通信设备性能测试结果的影响, 或探索其他可行的连续时间信道重构方案。由于转台和滑轨能够实现来波角度的平滑演化, 业界和学术界普遍认为, 其具备复现目标信道平滑演化特性的潜力, 这一技术方向仍需要进一步研究。

(5) 相关测试仪器仪表研制: 作为测试评估体系中的核心组成, 仪器仪表的研制水平直接决定测试系统的能力、精度与效率。针对空天地一体化系统通信频段覆盖广、动态环境复杂以及多维异构协同等特点, 亟须在大带宽多元信号生成、多业务测试网络构建以及广频段异构网络协同等方面推动专用测试仪器仪表的研发。具体而言, 为了适应空天地一体化系统的异构网络协同特性, 基站模拟器需要根据不同测试场景灵活构建多类网络切片并生成多波形传输信号。随着更高频段的引入, 信号源的带宽需求显著提升, 信道模拟器需要具备多通道大带宽合成能力并支持更广的频率范围。然而, 现有商用信道模拟器只支持 Sub-6 GHz 频段, 对于更高频段通常需要采用上/下变频生成/处理传输信号。因此, 亟须研制具有更高可用带宽、更高峰值功率与低相位噪声的可靠变频模块。此外, 考虑高频段下路径损耗显著增加, 为提升系统的动态范围, 应研制具备大功率输出能力且带内增益平坦度较高的功率放大器。在动态测试场景中, 为实现探头的快速启用与切换, 还需要开发具有高连接度和低时延特性的开关矩阵系统。与此同时, 采集与分析类仪器仪表亦需要进行迭代, 以实现测试数据的高实时性、高精度采集与处理。

随着空天地一体化系统的持续推进与深入探

索, 完善其设备测试和性能评估方法显得尤为关键。成熟可靠的测试方法不仅能够有效支持关键技术验证, 还能为设备研发、系统优化及产业化落地提供重要技术支撑。通过构建高效精准的测试手段, 可以加快新一代通信技术的成熟, 提升整体系统的有效性与可靠性, 从而推动空天地一体化技术的快速部署与广泛普及, 为未来通信网络发展奠定坚实基础。

3 结束语

本文首先介绍了空天地一体化系统的研究进展, 包括网络架构、现有星座规模和应用, 随后介绍了星地信道特点和标准化建模进展, 并总结了具有代表性的星地通信实验验证案例, 之后介绍了 OTA 性能测试系统和信道重构技术, 并结合空天地一体化系统特点提出了一种星地融合 OTA 测试系统。最后, 本文对空天地一体化系统 OTA 测试所面临的挑战进行了深入探讨, 给出了针对下一步研究的启发性思路。

参考文献:

- [1] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication: the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. *China Communications*, 2020, 17(12): 156-171.
- [2] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond: ITU-R M.2160-0[S]. 2023.
- [3] 孙耀华, 冯昕澳, 彭木根. 低轨巨型星座组网: 挑战与关键技术[J]. *天地一体化信息网络*, 2024, 5(4): 57-74.
SUN Y H, FENG X A, PENG M G. Mega LEO satellite constellations networking: Challenges and key technologies[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2024, 5(4): 57-74.
- [4] 承楠, 陈芳炯, 陈文, 等. 6G 全场景按需服务: 愿景、技术与展望[J]. *中国科学: 信息科学*, 2024, 54(5): 1025-1054.
CHENG N, CHEN F J, CHEN W, et al. 6G omni-scenario on-demand services provisioning: vision, technology and prospect[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2024, 54(5): 1025-1054.
- [5] GAO H Q, WANG Z Q, ZHANG X, et al. Over-the-air performance testing of 5G new radio user equipment: standardization

- and challenges[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2022, 6(2): 71-78.
- [6] CORREIA R, VARUM T, MATOS J N, et al. User terminal segments for low-earth orbit satellite constellations: commercial systems and innovative research ideas[J]. IEEE Microwave Magazine, 2022, 23(10): 47-58.
- [7] SU M D, SU X, ZHAO Q L, et al. BeiDou augmented navigation from low earth orbit satellites[J]. Sensors, 2019, 19(1): 198.
- [8] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 (V15.4.0)[S]. 2020.
- [9] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems: ITU-R P.618[S]. 2023.
- [10] ITU-R. Prediction of clutter loss: ITU-R P.2108[S]. 2021.
- [11] ITU-R. Propagation data required for the design systems in the land mobile-satellite service: ITU-R P.681[S]. 2019.
- [12] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 17): TR38.901 (V19.0.0)[S]. 2025.
- [13] FAN W, CARREÑO BAUTISTA DE 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.
- [14] FAN W, KYÖSTI P, FAN S, et al. 3D channel model emulation in a MIMO OTA setup[C]//Proceedings of the 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [15] FAN W, CARTON I, KYÖSTI P, et al. A step toward 5G in 2020: low-cost OTA performance evaluation of massive MIMO base stations[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2017, 59(1): 38-47.
- [16] KYÖSTI 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.
- [17] LI Y, XIN L J, LIU X Q, et al. Dual anechoic chamber setup for over-the-air radiated testing of 5G devices[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 2469-2474.
- [18] FAN W, CARTON I, KYÖSTI P, et al. Emulating ray-tracing channels in multiprobe anechoic chamber setups for virtual drive testing[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(2): 730-739.
- [19] LI Y, XIN L J, ZHANG X. On probe weighting for massive MIMO OTA testing based on angular spectrum similarity[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(7): 1497-1501.

[作者简介]



王皓民 (1997-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院博士生, 主要研究方向为无线信道建模、无线信道重构理论及空口测试技术。



王文超 (1985-), 男, 深圳市泰衡诺科技有限公司上海分公司高级硬件工程师, 主要研究方向为卫星通信终端及应用、无线通信网络和智能手机技术。



免青周 (1999-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为无线信道建模、无线信道重构理论及空口测试技术。



张锦峰 (2001-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为空天地融合通信关键技术、5G/6G 系统优化及仿真。



孙浩 (1997-), 男, 中国信息通信研究院工程师, 主要研究方向为 5G 空口测试、信道测量和信道建模。



李勇 (1979-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院教授, 主要研究方向为空天地融合通信关键技术、无线信道重构理论及空口测试技术、5G/6G 系统优化及仿真。