



5G ATG行业应用技术解决方案研究与交叉 时隙干扰等关键问题分析

刘玮¹, 宋静川¹, 夏田², 石一涵¹, 马骠¹, 李天任¹

(1. 中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080;

2. 91917部队, 北京 100080)

摘要: 5G ATG (air to ground, 地空通信) 技术具有超远距离、超高空覆盖优势, 可用于行业特殊场景。5G ATG系统由于构成复杂, 应用场景特殊, 多年来并未积累有效数据得以总结技术可行性。从这一痛点问题出发, 首先设计行业应用技术解决方案, 其次构建真实测试验证环境, 获得一手5G ATG系统性能数据并进行分析, 最后以数据支撑地面通信、通感一体系统将对5G ATG系统造成交叉时隙干扰的程度, 并发现了当前相控阵天线极化增益不平衡的产业问题。

关键词: 5G ATG; 远距离覆盖; 交叉时隙干扰

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025269

Research on 5G ATG industry application technology solutions and analysis of key issues such as cross-timeslot interference

LIU Wei¹, SONG Jingchuan¹, XIA Tian², SHI Yihan¹, MA Biao¹, LI Tianren¹

1. China Mobile Communications Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China

2. Unit 91917, Beijing 100080, China

Abstract: 5G ATG has the advantages of ultra long distance and ultra high altitude coverage, and can be used in special industry scenarios. Due to its complex composition and unique application scenarios, the 5G ATG system has not accumulated effective data to summarize its technical feasibility over the years. Starting from this pain point issue, industry application technology solutions were firstly designed. Next, a real testing and verification environment was built to obtain first-hand 5G ATG system performance data for analysis. Finally, data was used to support the degree of cross slot interference that the integrated ground communication and sensing system caused to the 5G ATG system, and the industry problem of unbalanced polarization gain of phased array antennas was discovered.

Key words: 5G ATG, ultra-long-distance coverage, cross-slot interference



0 引言

5G ATG (air to ground, 地空通信), 是一种以地面5G地空通信基站作为通信链路, 实现飞机空中互联网接入的技术^[1-4]。5G ATG根据航空场景超高覆盖、超高移动性、低时延的特点, 对现有5G通信标准进行了定制化的开发, 实现了飞机和地面的大带宽双向通信^[5-6]。目前, 5G ATG系统端到端设备均已完成研发, 并取得适航证, 满足商用条件^[7-8]。

近年来, 5G行业应用如火如荼, 部分行业提出利用5G ATG远距离高空覆盖优势, 以满足特殊场景应用需求。当前产业大多围绕场景需求进行关键技术攻关, 具体研究如何通过时域、频域补偿技术解决多普勒频移问题^[9-10], 如何通过降低切换频率和提升切换速度2个角度进行优化移动性算法等^[11-12], 仅停留在研究层面, 并未积累有效数据得以总结技术可行性, 针对这一现状, 本文结合行业应用需求, 设计技术方案的同时, 首次构建单基站拉远、多基站连续组网真实场景进行测试验证, 全方位获得5G ATG性能数据并分析得出结论, 更重要的是以数据支撑了地面通信、通感一体系统将对5G ATG系统造成交叉时隙干扰

的程度, 并发现了当前相控阵天线极化增益不平衡的产业问题, 对后续5G ATG行业应用过程中的组网方案与产业成熟均有所帮助。

1 行业应用需求解读

5G ATG行业应用主要为跨海场景, 如约420 km的海岸线为边界, 向外海方向延伸1 000~12 000 m正方形立体区域, 需重点具备如下能力。

(1) 大带宽通信能力。为与现有卫星通信等技术手段形成互补, 需要5G ATG提供上行百兆速率的通信能力。

(2) 远距离传输能力。需提供地空最大300 km以上的小区半径接入能力。

(3) 大规模终端随机接入能力。随着新型行业应用场景的变化, 终端数量规模和种类将提高, 因此需5G ATG为大规模机载终端提供随机接入和灵活组网服务, 并保障业务稳定不中断。

2 5G ATG行业应用技术方案

为实现前述立体区域内的4.9 GHz ATG网络连续覆盖, 总体组网架构包括地面网络、机载网络和近海基站3部分, 双无线基站天线单元 (active antenna unit, AAU) 立体覆盖方案如图1所示。

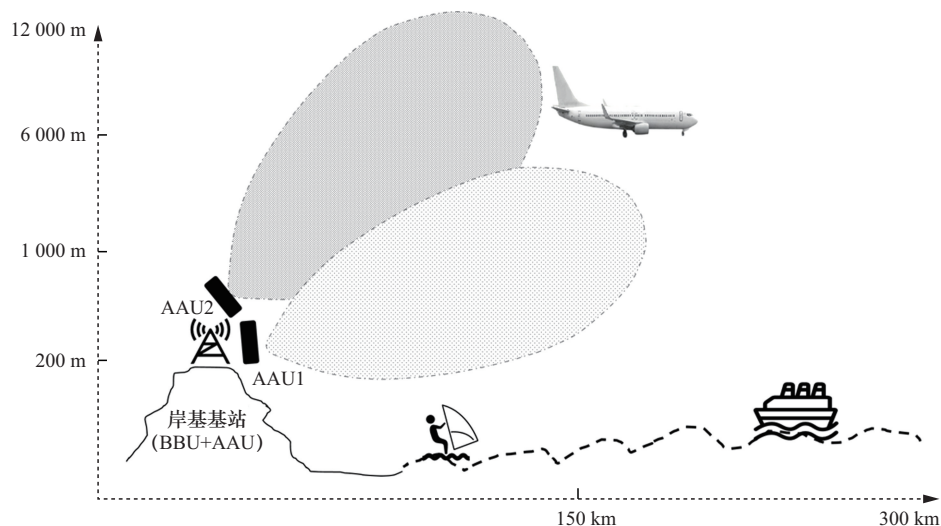


图1 双AAU立体覆盖方案

(1) 地面网络：包括 5G ATG 岸基基站、AAU、5G 核心网。

(2) 机载网络：包括 5G ATG 全向或相控阵天线与 5G 机载终端。

(3) 近海基站：当前岸基基站仅可实现 170 (全向天线)~270 km (相控阵天线) 拉远覆盖，为解决 300~500 km 超远覆盖，需在距离海岸 200~300 km 处部署近海基站进行覆盖补充。对于空域 1 000~12 000 m 的超厚覆盖需求，基站可采用双层 AAU 分层立体覆盖的方案，即在同站址下部署 2 个上倾角不同的 AAU，其中 AAU1 负责 1 000~6 000 m 连续覆盖，AAU2 负责 6 000~12 000 m 连续覆盖，具体实现方案如图 1 所示。由于双 AAU 立体覆盖方案目标指向性强，为避免被监听侦测，平时可保持 AAU1 的静默，在行业应用时通过网管设置随时开启。

3 5G ATG 行业应用技术方案可行性研究

为验证 5G ATG 行业应用可行性，本文设计了一套测试验证方案，该测试方案重点包含 3 部分内容。

(1) 验证多基站连续组网性能，包括 5G ATG 地空三维覆盖范围，如横向覆盖宽度，纵向覆盖长度，垂直覆盖深度等，为后续 5G ATG 组网规划、站址选择与建设实施提供数据指导。

(2) 验证单基站孤立时，ATG 远距离覆盖极限能力，包括机载终端掉线、接入的最远覆盖距离等，与多基站连续组网测试结果相结合还可进一步支撑向外海方向延伸覆盖的技术方案可行性。

(3) 验证行业应用快速响应能力，包括远程 5G ATG 频率等参数修改能力，远程重启基站能力等。

满足上述测试需求，共建设 4 个基站，测试覆盖空域与站址信息如图 2 所示，其中，沿基站 2 南向航线用于验证单基站孤立时，ATG 远距离覆盖能力；基站 3 和基站 4 所覆盖的 ABCD 空域用

于验证多基站连续组网性能；基站 1 与远程网管系统组合验证行业应用快速响应能力。测试过程采用 4 900~4 960 MHz (60 MHz) 带宽配置，机载客户终端设备 (customer premise equipment, CPE) 配套使用相控阵天线，5G ATG 基站关键参数见表 1。

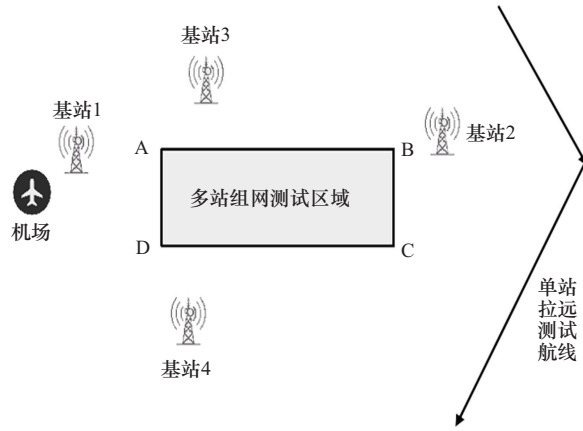


图 2 测试覆盖空域与站址信息

表 1 5G ATG 基站关键参数

5GATG 基站参数	
主要参数	性能指标
工作频段	4 840~4 900 MHz
发射功率	46 dBm
扫描能力	机腹下侧半球空域连续扫描
波束宽度	20°
天线增益	20 dB

5G ATG 多基站连续组网飞行轨迹如图 3 所示，5G ATG 多基站连续组网上、下行吞吐量随时间变化曲线如图 4 所示，多基站连续组网上、下行吞吐量统计见表 2。其中，图 3 表示飞机在空中不同经纬度处的下行吞吐量，横坐标为飞机在空中经度信息，纵坐标为飞机在空中纬度信息，不同数据点的形状代表下行吞吐量所在区间；图 4 表示上、下行吞吐量随时间变化曲线，横坐标为时间轴，纵坐标虚线表示上、下行吞吐量，实线表示飞机与主服务小区之间投影距离。飞机搭载 5G ATG 机载终端在 5 700 m 高空沿图 3



的ABCD轨迹飞行,以200 km/h速度历时1 h 10 min完成测试,得出结论。(1)上、下行吞吐量随时间变化曲线,可以看出距离时远时近,最近处约15 km,最远处约90 km,比照当前5G ATG站间距70~100 km的网络建设规范,此次测试验证可全面反映5G ATG系统在近、中、远点的性能表现;(2)根据数据统计,整个飞行轨迹平均参考信号接收功率(reference signal received power, RSRP) -113.7 dBm,平均信号与干扰加噪声比(signal to interference plus noise ratio, SINR) 21 dB,说明干扰条件良好,5G ATG系统吞吐量真实无影响;(3)根据数据统计,5G ATG机载终端全程在线无掉线,上行平均吞吐量38.1 Mbit/s,下行平均吞吐量145.9 Mbit/s,上行边缘吞吐量

31.9 Mbit/s,下行边缘吞吐量41.33 Mbit/s,如果按照720P视频回传业务需求计算,站间距70~100 km时,5G ATG在小区边缘仍可同时满足7路720P视频回传,满足行业应用对大带宽通信能力的需求。

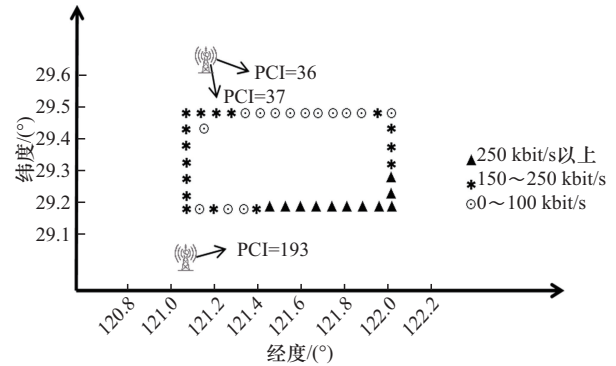
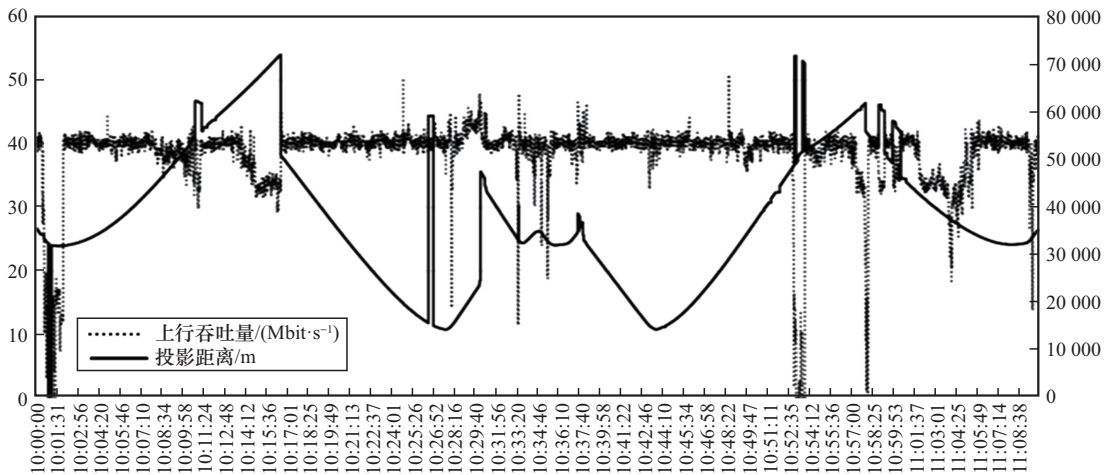
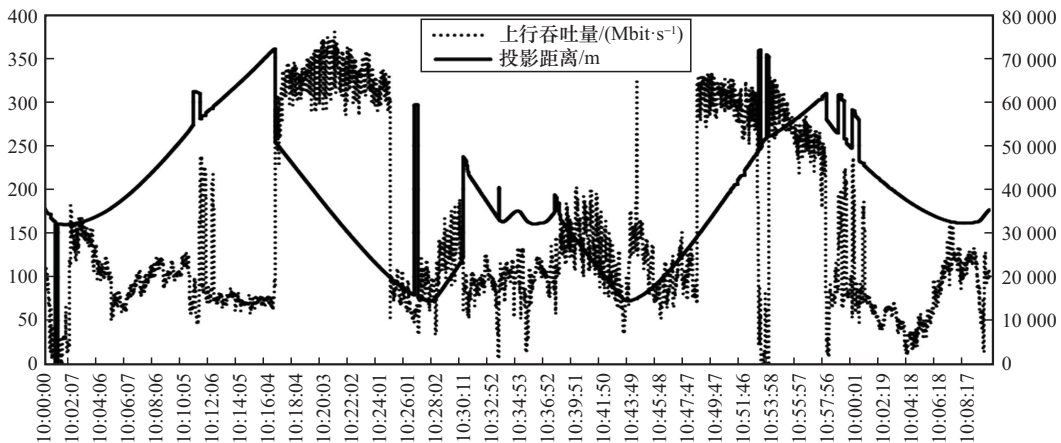


图3 5G ATG多基站连续组网飞行轨迹



(a) 上行吞吐量、投影距离随时间变化



(b) 下行吞吐量、投影距离随时间变化

图4 5G ATG多基站连续组网上、下行吞吐量随时间变化曲线

表2 多基站连续组网上、下行吞吐量统计

对比项	上行吞吐量/ (Mbit·s ⁻¹)	下行吞吐量/ (Mbit·s ⁻¹)	RSRP/ dBm	SINR/dB
平均值	38.1	145.9	-113.7	21.0
最大值	50.6	379.7	-98.7	35.3
95%边缘值	31.9	41.33	-119.7	4.25

5G ATG单基站拉远飞行轨迹如图5所示,图5为整个测试轨迹,横纵坐标分别表示飞机飞行位置的经度与纬度,数据点的不同形状代表下行吞吐量所在区间。5G ATG单基站拉远上、下行吞吐量随距离变化曲线如图6所示,横坐标表示飞机与主服务小区之间投影距离,纵坐标柱状图为落在该投影距离段的样本点数,曲线为上、下行平均吞吐量。在距离基站290 km处手动 detach 和 attach 接入成功。飞机搭载5G ATG机载终端在5 700 m高空沿图5中航线轨迹飞行,以200 km/h速度历时3 h完成测试,得出结论。

(1) 距离基站300 km处时,机载CPE尚未掉线,

下行仍有约50 Mbit/s吞吐量,上行仍有约3 Mbit/s吞吐量,满足行业应用远距离传输能力需求;(2) 5G ATG系统为满足远距离随机接入需求,定义了新的随机接入前导格式,因此,在距离基站290 km处,手动进行去激活和重新接入测试,随机接入成功,进一步验证了5G ATG具备远距离传输能力。

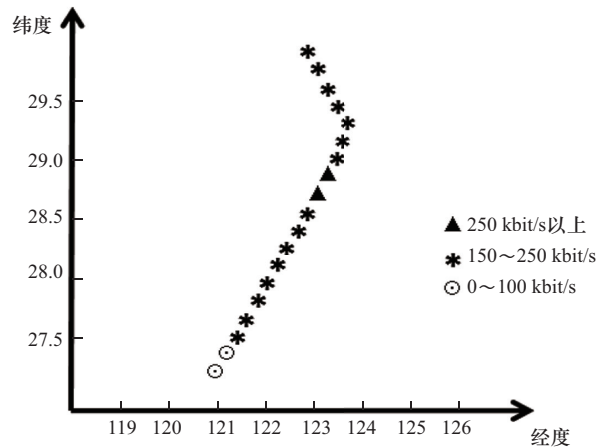


图5 5G ATG单基站拉远飞行轨迹

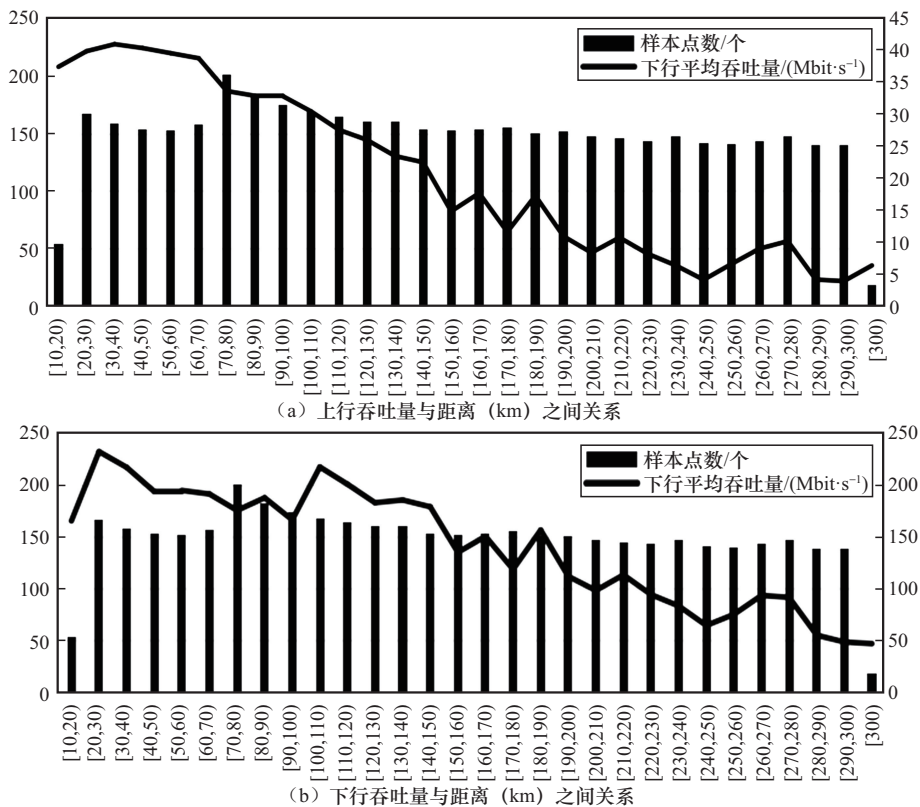


图6 5G ATG单基站拉远上、下行吞吐量随距离变化曲线



4.9 GHz 5G ATG 系统具有 TDD 系统灵活子帧配置优势, 常规配置时, 上行时隙占比仅为 15%, 受限于设备能力, 当前设备最大仅支持上行时隙占比为 25%, 不同时隙配置下的 5G ATG 上、下行峰值吞吐量见表 3, 表 3 中测试验证 2 种时隙配置时上、下行峰值吞吐量变化。可以预见, 在上行时隙占比增大后, 5G ATG 在小区边缘所能支持的 720P 视频回传将更多, 从而更有利于行业用户开展多种数据实时回传业务。需要说明的是, 上行时隙占比的不同配置是通过远程网管系统进行的, 侧面反映了 5G ATG 具备行业应用快速响应能力。

表 3 不同时隙配置下的 5G ATG 上、下行峰值吞吐量

对比项	上行峰值速率/ (Mbit·s ⁻¹)	下行峰值速率/ (Mbit·s ⁻¹)
上行时隙 15%	66	420
上行时隙 25%	162	293

值得注意的是, 图 6 中上行吞吐量均保持在一个较低较为稳定的状态, 在 40 Mbit/s 上下, 没有出现较高的峰值吞吐量, 不符合理论预期, 为了分析具体原因, 统计机载 CPE 两通道 RSRP 测量一致性时发现, 当前相控阵天线存在双通道天线极化增益不平衡的问题, 2 个通道在同一位置处测量得出的 RSRP 值有近 10 dB 差异。比照图 6 分析可知, 上行吞吐量较低较稳定的原因即在于当上行启动功率控制时, 上行天线由于有效全向辐射功率 (effective isotropic radiated power, EIRP) 受限无

法抬高发射功率从而获取较高调制与编码策略 (modulation and coding scheme, MCS) 而被消峰。因此, 当前相控阵天线尚需进一步完善与优化, 通过优化后, 5G ATG 系统性能将会得到进一步提高。

4 4.9 GHz 交叉时隙干扰关键问题分析

当前 4.9 GHz 涉及地面通信、通感一体、5G ATG 三大使用场景, 其中地面通信和通感基站设备支持 4 800~4 960 MHz (160 MHz), 5G ATG 使用 4 840~4 900 MHz (60 MHz), 3 个系统采用了不同的时隙配置方式, 因此需要重点考虑交叉时隙干扰问题, 由于本文主要关注 5G ATG 系统性能, 故主要分析地面通信、通感一体对 5G ATG 系统的干扰。地面通信、通感一体对 5G ATG 系统的干扰方向如图 7 所示, 分别描述了 5G 地面通信、5G ATG、5G 通感一体 3 个系统 10 ms 时隙配置情况, 其中, 黑色实线表示地面通信基站、通感一体基站上行链路对 5G ATG 下行链路的干扰, 会引起机载 CPE 底噪抬升与下行吞吐量下降; 黑色虚线为地面通信基站、通感一体基站下行链路对 5G ATG 上行链路的干扰, 会引起 5G ATG 基站本身底噪抬升与上行吞吐量下降。其中, 由于通感一体基站需重点覆盖 300 m 以下低空, 基站下倾角相比于地面通信基站要更小, 甚至为负值, 所以与 5G ATG 系统重叠区域会更大, 干扰更强烈。

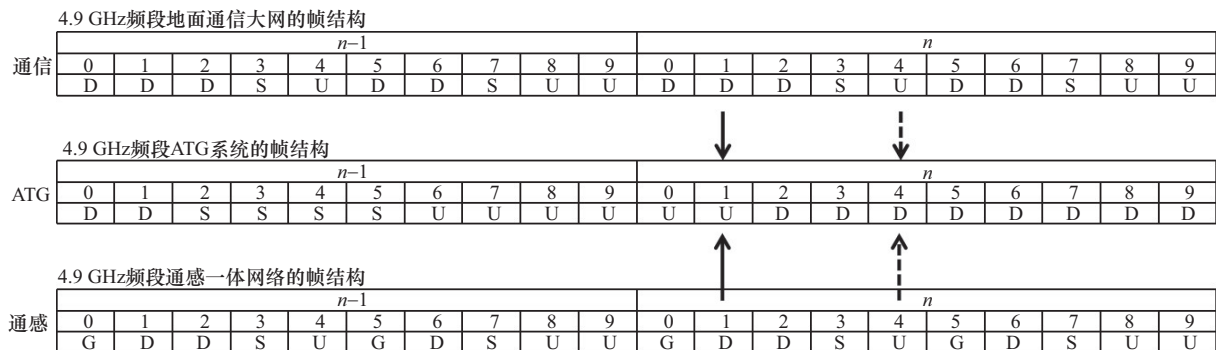


图 7 地面通信、通感一体对 5G ATG 系统的干扰方向

多基站连续组网测试初期,局部出现下行吞吐量较低现象如图8所示,本文发现整个飞行轨迹下行吞吐量均较低,且吞吐量较低(小于50 kbit/s)的数据采样点均集中在PCI=37和409这两个小区,而其他属于PCI=503小区的数据采样点吞吐量正常,说明整个5G ATG系统运行正常,怀疑是干扰导致。因此,本文进一步提取PCI=37和409这两个小区基站侧底噪数据,与机载CPE侧调度数据进行分析。

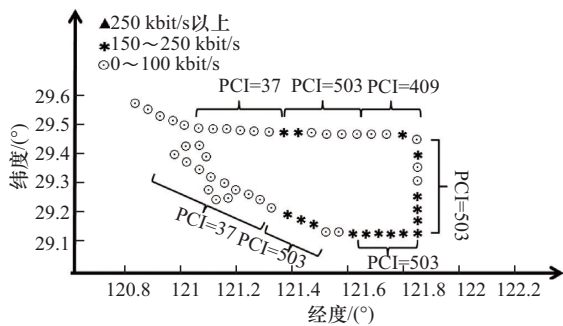


图8 多基站连续组网测试初期,局部出现下行吞吐量较低现象

通过逐时隙分析,本文发现PCI=409小区在时隙10和时隙11底噪抬升至 -98.56 dB,相比于 -117 dB白噪声抬升了近18 dB,追溯干扰源,干扰主要来源于周边地面通信基站,其中,离PCI=409最近的地面通信基站距离约6 km。同时,每个PCI小区对应的机载CPE调度次数、MCS与bler情况,发现PCI=37和409小区在时隙0和时隙1处,均存在:(1)BLER过高,已大于10%;(2)MCS掉0吞吐量陡降;(3)整个调度次数不足1500的问题。追溯干扰源,发现距离PCI=37,10 km处有1通感一体基站,下倾角 -17.9° ,应该是主要干扰源之一。为避免影响5G ATG真实性能的验证,在实际测试验证过程中,采取将周边地面通信、通感一体化基站闭塞的方式,消除干扰后,下行吞吐量有近100 Mbit/s的提高。值得注意的是,由于场景限制,本文并没有精细化分析距5G ATG基站不同距离处的地面通信基站、通感一体基站对5G ATG系统交叉时隙干扰程度与性

能影响,是后续关注的重点,也是4.9 GHz地面通信、通感一体、5G ATG三大使用场景网络建设过程中需要解决的主要问题。

5 结束语

针对4.9 GHz涉及地面通信、通感一体、5G ATG三大使用场景之间交叉时隙干扰问题,本文建议进一步精细化研究与分析,具体可分析距5G ATG基站不同距离处的地面通信基站、通感一体化基站对5G ATG系统交叉时隙干扰程度与性能影响,同时反过来,也需要分析距离地面通信基站、通感一体基站不同距离处的5G ATG基站对通信基站、通感一体基站交叉时隙干扰程度与性能影响,用于指导5G ATG行业应用组网方案。针对当前相控阵天线极化增益不平衡的产业问题,建议推动解决,因为相控阵天线具有赋型能力,可有效降低干扰提高吞吐量,将是后续商业应用的优选。此外,5G ATG技术在行业应用拓展过程中,还需要系统研究无人机飞行高度、飞行姿态对网络性能的影响等问题。

参考文献:

- [1] BILEN T, AHMADI H, CANBERK B, et al. Aeronautical networks for in-flight connectivity: a tutorial of the state-of-the-art and survey of research challenges[J]. IEEE Access, 2022, 10: 20053-20079.
- [2] CHEN Y, LIN X Q, KHAN T, et al. 5G air-to-ground network design and optimization: a deep learning approach[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [3] GARCIA A E, OZGER M, BALTACI A, et al. Direct air to ground communications for flying vehicles: measurement and scaling study for 5G[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 310-315.
- [4] 安建平, 李建国, 于季弘, 等. 空天通信网络关键技术综述[J]. 电子学报, 2022, 50(2): 470-479.
AN J P, LI J G, YU J H, et al. Key technologies of space-air-ground communication networks: a survey[J]. Acta Electronica



- Sinica, 2022, 50(2): 470-479.
- [5] 刘毅, 邱宝刚. 基于通信感知与ATG技术的空域覆盖研究[J]. 山东通信技术, 2025, 45(2): 1-6.
LIU Y, QIU B G. Research on airspace coverage based on communication perception and ATG technology[J]. Shandong Communication Technology, 2025, 45(2): 1-6.
- [6] 曹伟, 施嵘, 张楠, 等. 跨海地空通信技术及应用[J]. 移动通信, 2024, 48(11): 109-114.
CAO W, SHI R, ZHANG N, et al. Air-ground communication technology and applications for transoceanic coverage[J]. Mobile Communications, 2024, 48(11): 109-114.
- [7] 刘蕾, 侯继江, 蔡云斌, 等. 3.5 GHz频段5G系统对ATG系统干扰分析[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 477-482.
LIU L, HOU J J, CAI Y B, et al. Analysis of interference of 5G system to ATG system in 3.5 GHz[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(3): 477-482.
- [8] 张少伟, 侯继江, 王骏彪, 等. 基于5G的ATG组网形式及容量研究[J]. 移动通信, 2020, 44(7): 1-6.
ZHANG S W, HOU J J, WANG J B, et al. Research on ATG network form and capacity based on 5G[J]. Mobile Communications, 2020, 44(7): 1-6.
- [9] 田开波, 杨振, 张楠. 空天地一体化网络技术展望[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 2-6.
TIAN K B, YANG Z, ZHANG N. Prospects for the air-space-ground integrated network technology[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(5): 2-6.
- [10] 陈洁. 5G ATG网络关键技术及组网方案探讨[J]. 广东通信技术, 2023, 43(8): 2-6.
CHEN J. Discussion on key technologies and networking scheme of 5G ATG network[J]. Guangdong Communication Technology, 2023, 43(8): 2-6.
- [11] 李宗林, 骆润, 郭世伟, 等. 基于5G的ATG实现方式及网络部署规划[J]. 移动通信, 2020, 44(9): 14-18.
LI Z L, LUO R, GUO S W, et al. 5G-based ATG implementation and network deployment planning[J]. Mobile Communications, 2020, 44(9): 14-18.
- [12] 王洪超, 李奕霖. 5G扬帆, 天地互联: 5G+ATG地空宽带产业链解析[J]. 中国电信业, 2021(11): 30-33.
WANG H C, LI Y L. 5G sailing, interconnection between heaven and earth: analysis of 5G+ATG ground-to-air broadband industry chain[J]. China Telecommunication Trade, 2021(11): 30-33.

[作者简介]



刘玮 (1986-), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司正高级工程师, 主要研究方向为5G、5G-Advanced在行业应用关键技术。



宋静川 (1989-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师, 主要研究方向为5G及5G-Advanced前沿技术、5G航空互联网专网和轨道交通专网等。



夏田 (1983-), 男, 91917部队通信工程专业工程师, 主要研究方向为通信行业基础设施施工, 有线传输等行业应用技术。



石一涵 (1996-), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司工程师, 主要研究方向为智慧交通、车联网和5G+高精度定位等。



马骠 (1995-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司咨询设计师, 主要研究方向为交通领域、智慧能源和软件工程等。



李天任 (1997-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司助理工程师, 主要研究方向为智慧民航、AI+DICT能力建设。