



5G-A通感一体测评方法 白皮书

(2025年)



发布单位：中移智库

编制单位：中国移动通信研究院

前言

PREFACE

5G-A是5G技术演进的关键阶段，正通过通信感知一体化（Integrated Sensing and Communication, ISAC）技术推动通信与感知能力的深度融合。该技术以“一网多能”为核心理念，通过共享频谱资源、硬件平台及信号处理算法，实现通信传输与环境感知的协同优化，为低空经济、低空安防、航道管理、海域监测等场景提供全新技术路径。随着技术研究向规模化部署迈进，通感一体性能测试方法和指标评估体系缺乏统一标准，成为制约其产业化落地的关键瓶颈。

本白皮书聚焦5G-A通感一体技术的测评方法，首先系统梳理了5G-A通感一体技术原理与典型应用场景，深入分析了测评方法重要性及面临的问题。在此基础上，提出覆盖实验室与外场测试的测评框架，明确关键性能指标定义及统计方法，并结合典型测试案例验证所提方法的可行性与可复制性。通过构建标准化、系统化的测评方法，旨在为5G-A通感一体技术的成熟度验证、技术迭代以及规模化部署提供理论支撑与实践指导。

目录

CONTENTS

01 背景	01
1.1 5G-A通感一体技术原理和应用场景	02
1.2 5G-A通感一体测评方法重要性和面临问题	02
1.2.1 测评方法的重要性	02
1.2.2 测评方法面临的问题	03
02 5G-A通感一体测评方法	04
2.1 5G-A通感一体测试关键性能指标及统计方法	05
2.1.1 感知性能指标及统计方法	05
2.1.2 通感协同性能指标及统计方法	08
2.2 5G-A通感一体实验室测试方案	08
2.2.1 测试系统	08
2.2.2 测试方法	09
2.3 5G-A通感一体外场测试方案	14
2.3.1 测试系统	14
2.3.2 测试轨迹	17
2.3.3 测试方法	19

03 5G-A通感一体典型测试案例	22
3.1 浙江杭州低空通感测试	23
3.2 珠海横琴低空通感测试	25
3.3 广东清远低空通感测试	27
04 总结与展望	29
缩略语列表	30
参考文献	31
参编单位及人员	32



01 背景

1.1 5G-A 通感一体技术原理和应用场景

通感一体技术在传统通信网络的基础上叠加感知能力，将通信和感知功能深度融合，通过共站址、共设备、共频段、共运维赋予通信网络对环境和目标的全方位感知能力，在实现通信的同时获得目标的距离、角度、速度等关键信息，实现基站通信能力向感知能力的扩展。通感一体技术增强了移动通信的网络能力，扩展了其服务边界，在支撑低空经济发展、提升安防能力、促进社会治理等方面发挥着重要作用。

在低空经济领域，针对无人机物流、文旅交通等新兴业务，5G-A 通感一体可在满足网联无人机通信的前提下感知各航线无人机飞行态势，辅助其路径规划和选择，通过目标定位和稳定跟踪实现无人机飞行状态监测和安全管理，同时可对非法入侵飞行器进行监测和告警，保障航线安全。

在低空安防领域，针对监管需求，5G-A 通感一体通过广域探测实现空域内飞行器监测，同时结合目标识别技术或其他技术手段对目标属性进行判别，实现合法飞行器的安全管理和非法飞行物的告警，辅助监管部门高效险情处置，保障低空安全。

在航道 / 海面管理领域，5G-A 通感一体可实现水面 / 海面船只探测，获得其距离、角度、速度和航向等信息，具有连续覆盖和高精定位的优势，通过全天候监测实现船只航行状态感知和非法入侵警告，提升航道 / 海面安全和监管效率。同时 5G-A 大张角优势可实现水空一体或海空一体，在兼顾水面 / 海面的同时，实现低空探测，提升多域协同监管能力。

在机场等地空一体领域，5G-A 通感一体通过大张角可实现对地、对空同时探测。针对机场跑道等高安全需求场景，5G-A 可实现地面人、车辆目标的高精度定位，通过设置电子围栏实现快速入侵响应，提升跑道安全。同时，5G-A 可以兼顾无人机、飞鸟及其他空飘物等低空目标的检测识别，增强机场的立体监管能力，辅助实现险情快速处置，有效保障机场安全。

除上述典型场景外，通感一体技术还可应用于桥梁微形变监测，通过提前发现安全隐患提升城市安全预警能力。同时，通感一体技术在辅助驾驶、行人密集检测，室内入侵检测、生命体征监测等方向的应用也在探索研究当中。当前，5G-A 通感一体技术以低空场景为主，同步探索和研究其它场景方向，持续推进相关技术的产业落地和商业闭环。

1.2 5G-A 通感一体测评方法重要性和面临问题

1.2.1 测评方法的重要性

近年来，5G-A 通感一体在需求场景、关键技术和产品研制等方面取得了较大突破。在标准化方面，国内 IMT-2020（5G）推进组成立专项工作组，致力于推动基于 5G 技术的通感应用需求场景研究，网络

架构、仿真评估方法、空口技术方案研究以及原型验证等工作。第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）国际组织正积极围绕通感用例及需求，信道建模技术等进行相关研究。在技术攻关方面，国内外主要聚焦在 5G-A 通感一体的波形设计与信号处理、网络架构与资源管理、定位与感知算法研究等方面。中国移动在 2021 年启动了通感一体技术可行性研究，2022 年牵头场景和需求调研研究，2023 年在毫米波通感研究的基础上提出了攻关低频通感的技术路线，2024 年基于“一网多能、两个融合、多维兼顾”三大设计原则，围绕“新架构、新空口、新硬件、新组网”等方向提出数据层、网络层和应用层三层协同的通感一体技术体系。在产品研制方面，国内外主流设备商积极投入通感一体样机研发，中国移动基于现有技术体系完成了全球最大规模外场试验。

当前，5G-A 通感一体技术处于从实验室到规模商用的关键时期，构建统一的测评方法体系已成为产业发展的迫切需求。一方面，科学精准的测评方法不仅是验证技术架构可行性的核心手段，更是推动理论成果转化为实际应用的关键环节；另一方面，统一测评体系不仅能确保产品性能全面达标，更可在产业上下游之间搭建起协同创新的桥梁，促进产业链各环节高效合作，加速技术商业化落地。

1.2.2 测评方法面临的问题

尽管 5G-A 通感一体技术发展迅速，但测评方法却存在诸多亟待解决的问题。通感一体融合通信与感知多学科特性，致使传统通信测评方法无法适配新场景需求。由于该技术尚处于研究和试验阶段，成熟的测评方法尚未发布，导致整个行业缺乏权威的测试依据。IMT-2020 虽然给出了场景用例和指标定义，但指标统计方法待进一步明确。业界目前开展的部分试点验证工作，未能形成统一的实验室和外场测试方法。这使得各机构对通感一体性能评估标准不统一，测试结果缺乏横向可比性，难以判断自身产品技术水平，也无法精准定位技术优化方向，阻碍了通感一体技术从实验室研究向大规模商用的转化进程。

本白皮书旨在构建一套系统性的 5G-A 通感一体测评方法，涵盖关键性能指标统计、实验室及外场测试方案等，系统阐述适用于多场景的测试方法论，通过典型测试案例的分析，展现测评方法在实际应用中的落地效果，为行业提供可参考的技术验证与标准化路径，促进业界形成统一的测试手段和客观的评估方法，助力 5G-A 通感一体技术加速向商业化、规模化演进。



02 5G-A 通感一体测评方法

本白皮书测评方法包含两大部分：指标统计方法和测试方案。

指标统计方法包含单点指标和网络性能指标的明确定义及统计方法，其核心在于通过科学的统计方法量化系统的整体性能。

测试方案包含实验室和外场测试方案，主要包含测试系统、测试轨迹、测试方法等。

实验室测试是功能和性能验证的重要手段。相比外场测试，在实验室环境中能够精确控制各种环境变量，不受天气等不可控因素影响，同一测试用例可重复执行，获取稳定的测试结果。实验室测试还可以模拟大容量目标，设计复杂轨迹，不受目标机动性、政策限高的约束，测试成本低。

外场测试是推动技术成熟和商用落地的关键环节。与实验室测试相比，外场测试更贴近真实应用场景，能够有效验证技术在复杂环境中的性能表现。外场测试分为单站 / 单簇技术验证和规模组网测试。单站 / 单簇技术验证主要测试单点性能及关键技术特性；规模组网测试主要通过部署多基站，验证典型场景下组网性能，为技术成熟度提供实证支持，同时验证不同场景下的建网方案以及探索商业落地模式。

2.1 5G-A 通感一体测试关键性能指标及统计方法

2.1.1 感知性能指标及统计方法

2.1.1.1 位置精度

● **定义：**系统感知结果与目标真实值的位置差距，分为水平精度和垂直精度，单位为 m

● **统计方法：**在一定速度范围内，通过统计基站上报的感知数据和高精度 AIS/RTK 上报的数据来计算感知精度，建议采用地心坐标系 WGS84，统计样本在 CDF 曲线 95% 的精度。（统计位置精度，可由采样点水平精度和垂直精度的平方和开根得出）

AIS/RTK 真值与感知结果时间戳插值对齐，采用拉格朗日插值法，对齐时间

水平误差累积分布函数（CDF）：采用半正矢公式，计算真值与感知结果对应样本点地球面距离差；

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

$$F(x) = P \left(2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \leq x \right)$$

r ：地球半径 6371138

$\phi_1\phi_2$ ：点 1 的纬度和点 2 的纬度，以弧度制度量

$\lambda_1\lambda_2$ ：点 1 的经度和点 2 的经度，以弧度制度量

垂直误差累积分布函数（CDF）：计算真值与感知结果海拔高度差

$$F(x) = P(|h_2 - h_1| \leq x)$$

角度误差累积分布函数（CDF）：计算真值与感知结果角度差

$$F(x) = P(|av' - av| \leq x)$$

速度误差累积分布函数（CDF）：计算真值与感知结果速度差

$$F(x) = P(|v' - v| \leq x)$$

计算所有样本点误差累计分布函数

2.1.1.2 距离分辨率

- **定义**：系统可区分两个目标的最小距离，单位为 m
- **统计方法**：分别感知记录不同目标的位置，并统计计算可区分两个目标距离的最小差值

2.1.1.3 速度范围

- **定义**：系统可感知到的目标运动速度范围，单位为 m/s
- **统计方法**：控制感知目标以不同速度沿轨迹运行，平台可稳定感知航迹后，记录目标速度，并计算所记录到的最大和最小速度范围

2.1.1.4 速度精度

- **定义**：系统所感知到的目标速度与目标真实速度的差距，单位为 m/s
- **统计方法**：在一定速度范围和加速度下统计基站感知的速度结果，并计算与实际无人机飞行速度的差值

2.1.1.5 速度分辨率

- **定义**：系统可区分两目标速度的最小粒度，单位为 m/s
- **统计方法**：分别感知记录不同目标的速度，并统计计算可区分两个目标速度的最小差值

2.1.1.6 虚警率

● **定义：**系统在预定义的时间内检测到虚假感知结果的概率，单位为 %

● **统计方法：**统计预定义时间周期内（如 1 小时及以上），统计在多小区组网覆盖范围内，轨迹虚警点总个数为 X（不包括航迹时间小于如 5s 或长度小于如 25m 的短航迹），通过目标类型识别等非多源融合技术手段，在如 30s（从目标进入覆盖区域开始计时）的目标识别时间内可正确判断感知目标类型为非关注真实动目标的感知点个数为 Y，预定义时间周期理论总打点数为 M，则虚警率为： $\frac{X-Y}{M}$

2.1.1.7 漏检率

● **定义：**系统在预定义的时间内未能检测到正确感知结果的概率，单位为 %

● **统计方法：**统计预定义时间周期内（如 1 小时及以上），覆盖区域内所有关注目标的轨迹断点 A 及漏报轨迹的点数 B，预定义时间周期内所有关注目标理论总打点数为 N，统计漏检率为： $\frac{A+B}{N}$

2.1.1.8 目标识别正确率

● **定义：**系统识别目标类型正确的概率，单位为 %

● **统计方法：**统计系统在一定时间内，对于某一类型的目标，测试目标个数（或次数）Y，识别正确目标个数（或次数）S，则识别正确率为：S/Y

2.1.1.9 刷新率

● **定义：**系统上报给高层应用感知结果的时间周期，单位为 s

● **统计方法：**统计基站上报给平台先后两个感知结果的时间差值

2.1.1.10 目标类型识别时间

● **定义：**系统认为感知的目标是某种类型所使用的时间，单位为 s

● **统计方法：**统计从目标进入感知覆盖范围开始到上报感知目标类型结果的最小时间差值

2.1.1.11 平飞起航迹时延

● **定义：**目标平飞进入感知覆盖范围的时刻起，到 AF 平台显示完整稳定轨迹为止，起止时刻之间的时间差，单位为 s

● **统计方法：**记录从目标平飞进入感知覆盖范围的初始时刻 T1，在平台显示完整稳定轨迹的时刻 T2，则平飞起航迹时延为 T2-T1

2.1.1.12 垂直起飞起航迹时延

● **定义：**目标从地面垂直起飞的时刻起，到 AF 平台显示完整稳定轨迹为止，起止时刻之间的时间差，单位为 s

● **统计方法：**记录目标从地面垂直起飞的初始时刻 T1，在平台显示完整稳定轨迹的时刻 T2，则垂直起飞起航迹时延为 T2-T1

2.1.1.13 悬停复飞起航迹时延

● **定义：**从目标在感知覆盖范围内悬停至目标消失后复飞的初始时刻起，到 AF 平台显示完整稳定轨迹为止，目标 ID 不变下的最大起止时刻之间的时间差，单位为 s

● **统计方法：**记录目标的悬停点位置及开始悬停的初始时刻 T1，复飞后目标在平台显示完整稳定轨迹的时刻 T2，且目标 ID 不变，则悬停复飞时延为 T2-T1

2.1.1.14 感知连续覆盖范围

● **定义：**由多个通感一体基站多扇区感知覆盖边界所围成的立体区域，单位为 km²

● **统计方法：**结合覆盖区域内小区数、单小区覆盖面积、站间距计算连续覆盖范围面积

2.1.2 通感协同性能指标及统计方法

2.1.2.1 感知资源占比

● **定义：**在频率带宽一定的情况下，感知占用的整体时域资源比例，单位为 %

● **统计方法：**统计通感一体帧结构中感知信号符号个数 C，通信信号和感知信号总符号个数 T，则感知资源占比为：C/T

2.2 5G-A 通感一体实验室测试方案

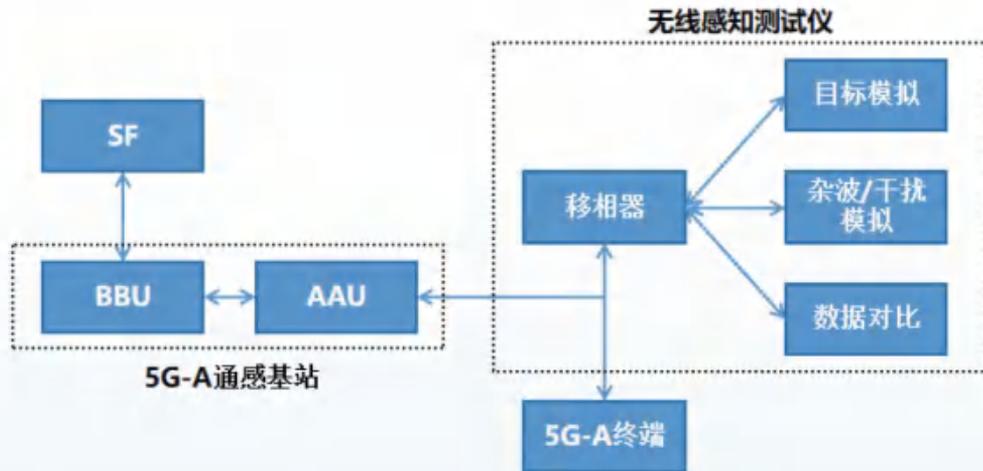
2.2.1 测试系统

通感一体实验室测试系统主要通过通感一体基站样机、无线感知测试仪、测试终端等对接（感知测试需通感一体基站样机与无线感知测试仪对接，通信测试需通感一体基站样机与移相器、5G-A 终端对接），完成通信与感知新功能可行性研究以及位置精度、虚警率、感知目标数、小区容量等关键通感性能验证。其中，无线感知测试仪、通感基站样机是通感一体实验室测试系统中最核心的两个模块。

无线感知测试仪由移相器、目标 / 杂波模拟仪以及数据对比模块构成。其中，移相器模块通过相位

调整模拟目标回波、杂波、干扰的角度变化；目标 / 杂波模拟模块模拟目标回波、杂波的距离、RCS、速度变化，以及同频 / 邻频干扰；数据对比模块通过将基站感知数据与真值数据进行比对，统计感知位置精度、虚警率、漏检率等关键性能指标。

通感基站样机，包含基带处理模块、射频与天线收发模块，同时支持通信、感知功能。



2.2.2 测试方法

依据 2.2.1 章节所述测试系统，可完成通信与感知测试，其中通信测试方法业界已有成熟方案，本章主要阐述感知指标的测试方案。

2.2.2.1 通用测试方案框架

感知测试方案主要包含测试场景设计、半实物平台仿真测试、测试数据评估分析 3 个主要步骤。

1、测试场景设计

根据目标场景、关注感知性能指标（包括基站感知范围、感知精度、感知分辨率、感知用户数、虚警率和漏检率等），通过场景与任务规划，生成特定场景配置文件。

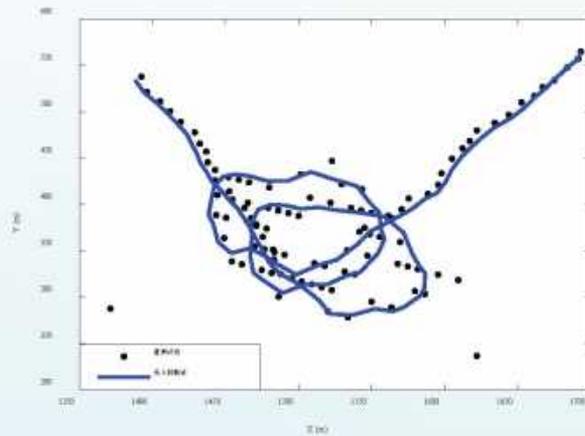
三维场景构建方面，基于城市建筑、道路、植被等模型库，灵活编辑低空无人机适用的三维城市场景；组网规划方面，可视化显示探测范围，优化点位布局以消除盲区并形成监测网络；关注目标任务设计，支持多无人机及数量配置，规划起降点、飞行路径与任务区域，可添加非关注目标，如飞鸟、空飘物、直升机等。基于上述设计生成测试平台所需的场景文件，文件按照毫秒级的时间粒度对场景进行离散化参数表征。



2、半实物平台仿真测试

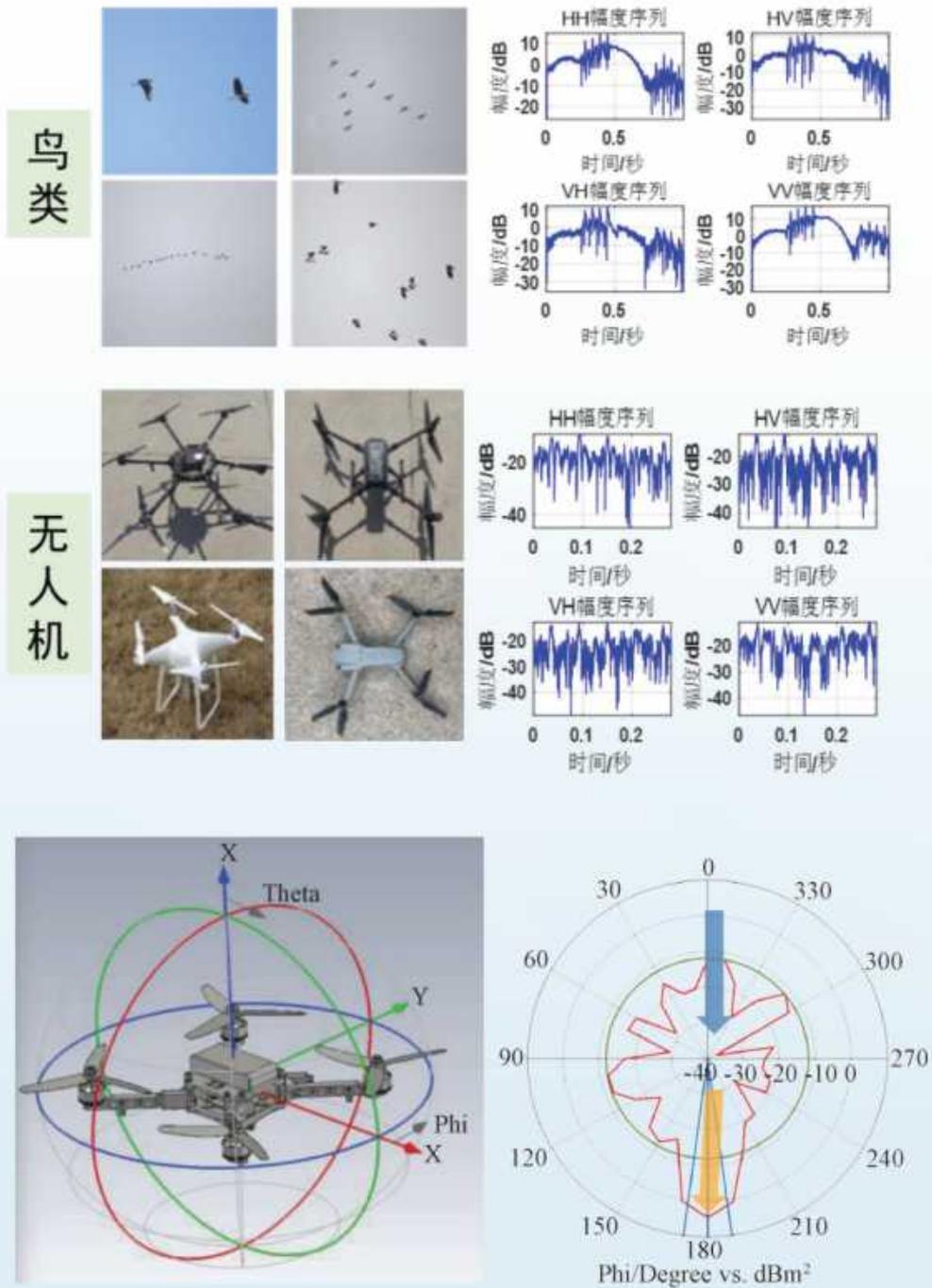
基于毫秒级时间切片引擎，系统实现时空联合坐标系下的离散化处理，满足海量目标、多类型干扰、非线性运动场景等的测试需求。

(1) 支持用户导入场景配置文件，快速定义目标运动、杂波环境、基站视角等参数。通过高精度时间切片引擎，将场景参数转化为动态数据，实时推演目标运动、角度变化等，提升测试场景复用性与配置灵活性，缩短复杂场景搭建周期。



(2) 无线感知测试仪基于场景配置文件进行精细化信号模拟。

目标回波信号模拟方面，为了适配无人机、船舶等不同目标模拟需求，可按需模拟点目标、扩展点目标、不同电磁散射特性目标回波信号。



杂波 / 干扰环境信号模拟方面，为了更好地还原不同场景的杂波环境，可按需模拟多种类型杂波，包含楼宇、人车等地面杂波、不同海情下的海面杂波、城市中树木叶簇杂波、复杂天气中的云、雨、雾杂波以及雨后湿度对基站造成的杂波影响。此外，可按需模拟外场环境中的同频、邻频干扰。通过全面而精准的杂波、干扰模拟，为感知性能测试提供逼真的环境条件，使测试得到的感知指标更具备实际参考价值。



3、测试数据评估分析

获取基站感知数据后，需进一步通过测试数据评估获取感知关键性能指标，测试数据评估包含数据对齐、门限匹配、评估指标计算 3 个主要步骤。

数据对齐，通常情况下，基站上传的平台感知数据周期大于测试仪模拟的时间周期，因此需将测试轨迹文件的时间用插值算法与感知数据进行对齐，对齐准则包含：线性差值算法、拉格朗日插值算法、0 阶保持器算法等。

门限匹配，在多目标场景下，需完成同一目标的感知数据与测试平台数据匹配。假定当前时刻基站检测到的距离和速度信息分别为： $[x_0, y_0, z_0, v_0]$ ，测试平台模拟的目标的距离和速度信息分别为： $[x_1, y_1, z_1, v]$ ，需在这几个维度上进行信息匹配，假定距离和速度的探测精度分别为： δR δv ，若为

同目标，则需满足如下条件：

$$\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \leq n\delta R$$

$$|v_0 - v_1| \leq n|\delta v|$$

设定 δR 与 δv 取值； n 为精度系数。每一时刻的真值轨迹与感知轨迹对比，根据门限匹配准则，误差在某一范围内可认为设定目标的运动轨迹匹配成功。

评估指标计算，通过统计计算公式（如 RMSE、比例统计、极值测量等）量化各指标，结合实测数据统计均值、标准差及分位数（如 CDF 95%），形成包含精度、分辨率、检测效率、响应速度的多维性能参数，为系统感知能力提供可量化评估依据。

2.2.2.2 典型测试方法

一、感知范围、位置精度测试

测试目的	验证单站感知能力范围边界、位置精度
预置条件	测试环境：通感实验室测试平台
测试方法	<ol style="list-style-type: none"> 1、设定目标类型、目标轨迹信息（目标与基站距离由近及远），并生成场景配置文件，形成参数化表征 2、通过测试平台构建测试场景，模拟目标回波信号的运动特征 3、观测目标移动过程中基站能否正常感知，并记录感知数据 4、根据感知数据与真值数据，进行时间维度、门限匹配等处理，根据基站正常感知的最大距离、最小距离确定感知范围，并统计位置精度

二、目标容量测试

测试目的	验证大容量多目标测试
预置条件	测试环境：通感实验室测试平台
测试方法	<ol style="list-style-type: none"> 1、设定 32 个目标类型及目标轨迹信息，并生成场景配置文件，形成参数化表征 2、通过测试平台构建测试场景，模拟 32 个无人机回波信号的运动特征 3、观测基站能否正常感知，并记录 32 个目标感知数据 4、根据感知数据与真值数据，进行时间维度、门限匹配等处理，形成目标容量的评估结果（如某时刻感知数据与真值数据速度、距离等在门限内，则认为该时刻目标可匹配，目标测试轨迹整体匹配度高于 95% 认为可正常感知该目标）

三、感知资源开销测试方法

测试目的	验证感知资源开销测试
预置条件	测试环境：通感实验室测试平台
测试方法	1、观察感知帧结构的配置，并通过频谱仪观察感知信号的时域发送位置 2、根据感知时隙位置，计算感知资源占比

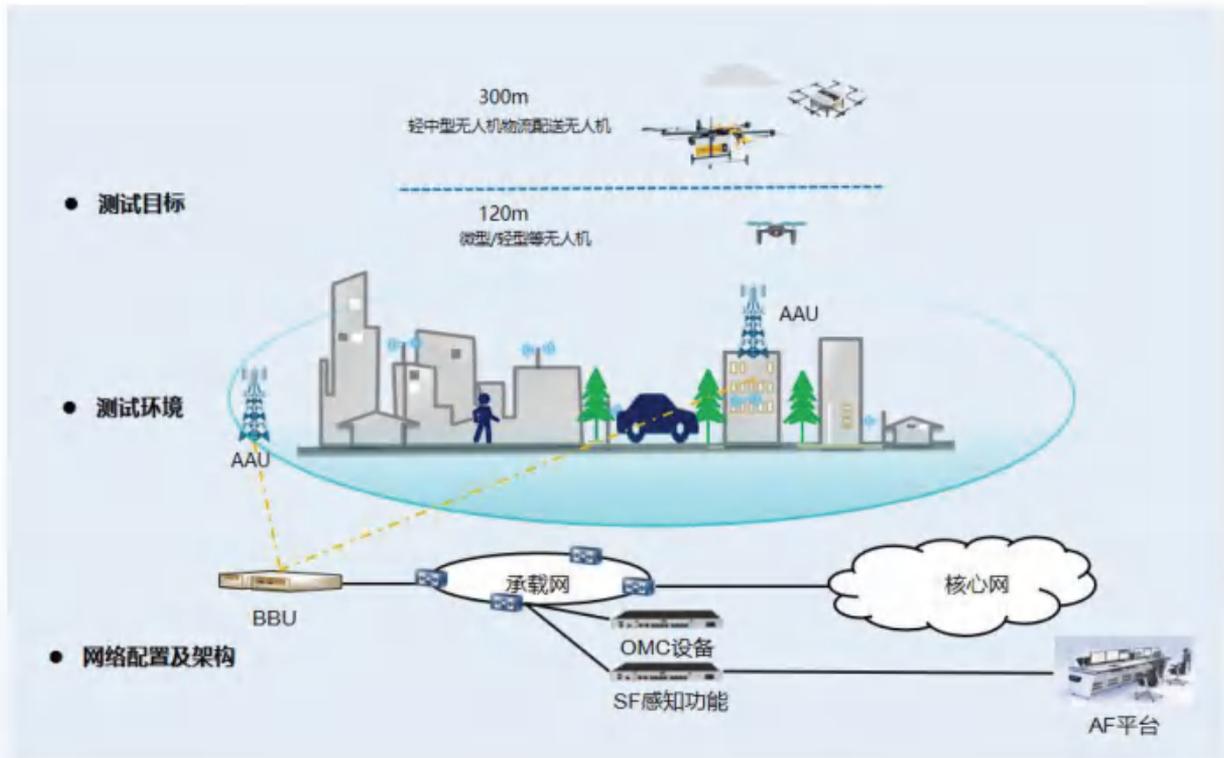
四、通信峰值速率测试

测试目的	验证感知业务开启下的通信单小区峰值速率
预置条件	测试环境：通感实验室测试平台 测试工具：商用 5G 通信终端
测试方法	1、配置测试小区带宽，感知时隙打孔不用于通信业务 2、多个测试终端同时接入小区，发起上行 UDP 业务，进行上行传输至少持续 1 分钟，记录小区当前的流量 3、多个测试终端同时接入小区，发起下行 UDP 业务，进行下行传输至少持续 1 分钟，记录小区当前的流量

2.3 5G-A 通感一体外场测试方案

2.3.1. 测试系统

外场测试系统包含三大部分：测试目标、测试环境、网络配置及架构。测试目标是指为验证系统或设备在特定场景下能否满足预设的性能指标需求而开展测试工作所指向的具体对象和测试设备。测试环境主要涵盖站址坐标、站点海拔高度或相对高度、测试区域的地理特征（如地形地貌、建筑物分布等）等信息。相比通信网络，通感网络新增了感知特性，其网络架构也带来一些变化，其中 AAU 采用低空和地面兼容张角设计，BBU 新增感知板用来处理感知数据和融合数据，OMC 新增通感网络参数的配置、感知统计数据处理与分析等功能，新增 SF 网络单元，用于感知业务的下发及感知识别结果上报等功能，新增 AF 网络单元，主要提供感知任务管理并通过标准化接口管理管辖范围内的 SF，同时支持实时探测统计、探测目标轨迹实时呈现等功能。



2.3.1.1 测试环境

● **站址部署：**通感一体基站应部署在环境中的相对高点，确保与测试区域保持直射径。同时，为确保站点安全，应避免站点高度较高或单管塔安装的情况出现。

● **站点高度：**低空经济、低空安防、地空一体场景推荐站址高度为 25-40 米。航道管理场景，需结合航道周边站点情况与岸边距离灵活部署，推荐站址高度为 25-40 米。海面监测场景，受到地球曲率影响，直射距离将受到海域船只高度与岸边站址高度影响，可根据以下理论公式计算适合的站址高度：

$$R_s = 4.1 * (\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2})$$

其中， R_s 是直视距离，单位 Km； H_1 是站址海拔高度， H_2 是感知物体高度，单位 m。可根据目前需求方对于最远距离需求进行站址高度折算，进而挑选适合的站高。

● **测试区域属性划分：**结合通感业务需求与所处测试区域环境特征，分为密集城区、一般城区、广域场景三类。

密集城区：建筑物密集，楼高大于站高，信号多遮挡；测试区域附近存在城市主干道、快速路、高架桥等，车流量大；（低空经济、低空安防场景适用）

一般城区：郊区、小城市、城镇，楼高相对较低，少量遮挡；少量主干道；（低空经济、低空安防

场景适用)

广域场景：无建筑或极少量建筑或低矮建筑，无遮挡；（航道管理、海面监测场景适用）

2.3.1.2 网络配置

相比传统通信配置外，通感网络配置需新增感知配置，主要包括：站点工参、感知基础配置、感知 FOV 范围、航迹处理、虚警抑制、干扰规避等。如下表所示，给出了通感一体主要网络配置参数。

参数分类	参数名
站点工参	经度、纬度、高度、角度等
感知基础配置	感知功能开关
	NR 感知小区带宽 /MHz
	感知类型
	感知时序模式
	感知帧周期
FOV 范围	垂直覆盖范围
	水平覆盖范围
航迹处理	轨迹起始时长 /s
	RCS 最小值 /dB
	RCS 最大值 /dB
	轨迹存续时长 /s
	轨迹最小距离 /m
	轨迹最大距离 /m
	轨迹最小高度 /m
	轨迹最大高度 /m
	轨迹最小速度 /km/h
	轨迹最大速度 /km/h
	轨迹分段接续保护时长 /s
虚警抑制	杂波虚警学习开关
	杂波虚警学习时刻 /hh:mm:ss
	杂波虚警学习持续时间 /min
干扰规避	感知资源频域位置
	感知波形时域位置
	连续波梳分模式

2.3.1.3 测试目标

通感一体外场测试目标的选取需以场景需求驱动，兼顾技术验证与标准化指标。典型目标包括无人机、车辆、船只等动态物体，测试需覆盖不同速度、轨迹及环境复杂度，重点验证定位精度、分辨率（距离 / 速度 / 角度）及干扰抑制能力。如下给出通感一体测试目标相关参数。

测试场景	待测目标	RCS (m ²)	数量	测试目的	RTK 模块
低空经济 / 低空安防	无人机	0.01	不少于 1	感知（为主）、通信	是
低空经济 / 低空安防	无人机	0.04	不少于 1	通信（为主）、感知	是
航道管理 / 海面监测	航道船只	4 (游艇) 10 (观光船)	不少于 1	感知	是
航道管理 / 海面监测	海域船只	40 (货轮)	不少于 1	感知	是
地空一体	地空一体人员	1	不少于 1	感知	是
地空一体	地空一体车辆	10	不少于 1	感知	是

注：RCS 值是目标在暗室不同角度下测试结果的平均值

2.3.2 测试轨迹

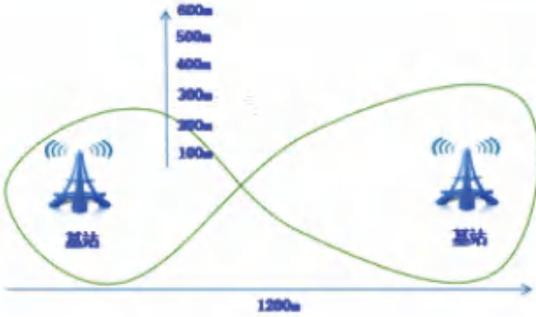
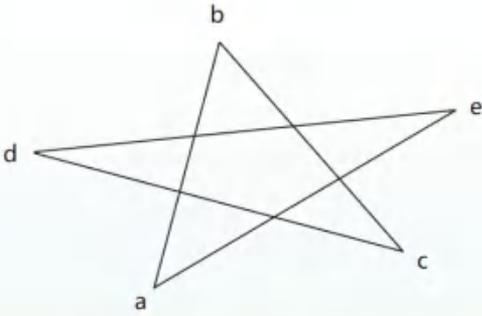
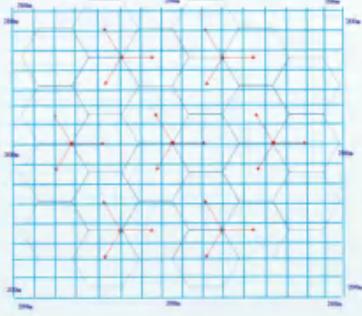
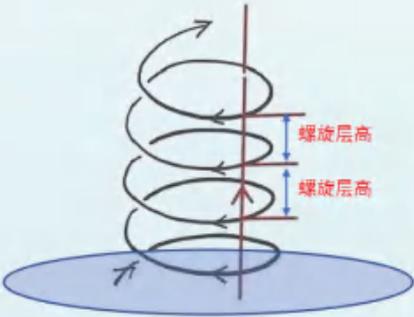
通感一体外场测试轨迹的选取需结合典型业务需求及指标特征，从多维度验证系统的感知性能。

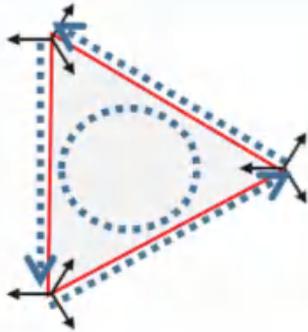
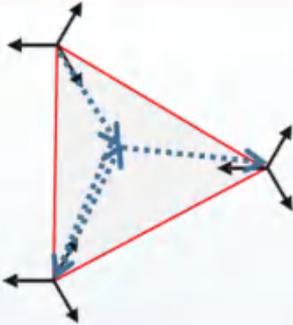
● **场景需求驱动：**根据通感一体的典型业务需求来设计轨迹，低空经济轨迹应包括无人机常见的飞行路径和动作，如平飞、转弯、悬停复飞、垂直升降等，低空安防场景下应设计“低慢小”特征轨迹。

● **指标特征：**可以根据指标特点专门设计不同轨迹以验证性能边界，也可以设计一种轨迹验证感知整体性能。

通感一体低空典型测试轨迹如下：

轨迹描述	图示	目的
轨迹 1：构建“斜线拉远轨迹”		验证单站感知能力边界、多目标感知、距离分辨率

<p>轨迹 2: 从站址覆盖区域内起飞, 并沿着不同高度按照“8 字形”遍历组网覆盖区域, 最远端应覆盖对应塔顶上方</p>		<p>验证多站融合、塔顶补盲的感知能力、距离分辨率</p>
<p>轨迹 3: “五角星”变高变速飞行, 结合垂直起降、悬停和变速机动性。如图所示 a、b、c、d、e 点为五角星的五个角, a 点和 e 点高度相同, b 点, c 点, d 点高度不同。</p>		<p>验证目标动态特性下通感性能、感知时延、速度精度等感知性能指标</p>
<p>轨迹 4: 从覆盖区域内任意位置起飞 / 降, 按照“几字型”间隔固定距离纵横交错直线飞行, 不同高度轨迹遍历。</p>		<p>验证组网覆盖能力、虚警率、漏检率等感知性能指标</p>
<p>轨迹 5: 构建“螺旋上升轨迹”, 螺旋起始点、层高、半径根据外场实际情况指定</p>		<p>验证基站切向和垂直维感知性能</p>

<p>轨迹 6: 构建“边缘性能验证轨迹”，验证簇内边缘区域感知性能，设定轨迹需沿着站址三角形连线方向飞行，并在簇间覆盖内部画圆飞行</p>		<p>验证协作感知模式下边缘覆盖感知性能</p>
<p>轨迹 7: 构建“覆盖变速轨迹”，验证簇内覆盖区域物体感知性能，按照“Y字形”依次飞行，在簇内覆盖区域中心点位置换方向</p>		<p>验证协作感知模式下覆盖区域不同速度下的感知性能</p>

2.3.3 测试方法

通感一体外场测试主要包含两大核心环节：一是针对感知性能指标的系统性测试，具体涵盖位置精度、距离分辨率、虚警率、漏检率等关键指标；二是对目标识别、多目标感知与数据去重、感知与通信间干扰抑制、感知与感知间干扰抑制等功能效果的实际验证。

在测试方法设计上，采用搭载高精度 RTK 模块的无人机作为动态测试目标，遵循 2.3.2 章节中预先制定的多层次级轨迹路线（如不同水平距离、垂直高度、飞行速度的立体飞行路径等），对组网覆盖区域内的全维度空间进行遍历测试。测试过程中，无人机实时采集的 RTK 真值数据与基站感知的目标轨迹数据（含经纬度、高度、速度等信息）同步上报至 AF 平台，通过平台内置的数据融合算法实现双源数据的时空精准对齐与动态可视化呈现。AF 平台将基于 2.1 章节定义的统计指标体系，完成关键性能参数的量化分析，结合不同测试场景（如单扇区、跨扇区重叠覆盖、多基站协同等）生成测试报告，为通感组网的参数优化与性能调优提供数据支撑。如下提供了一些典型低空测试方法：

2.3.3.1 单站拉远测试

测试目的	验证单站感知能力边界
预置条件	测试目标：1 架符合测试要求的无人机 测试区域：5G-A 通感一体连续覆盖区域内进行测试
测试方法	1、无人机启动 RTK 功能，与 AF 平台连接成功，实时上报无人机 RTK 真值信息 2、采用 2.3.2 测试轨迹 1 中路线 5 可以验证感知最大覆盖距离，其它路线可以验证边缘覆盖收缩距离、扇区可支持的最大感知水平张角与垂直张角，根据所有路线测试结果可以得出感知大致覆盖包络

2.3.3.2 双机伴飞测试

测试目的	验证通感系统同时兼顾不同高度的感知能力
预置条件	测试目标：两架符合测试要求的无人机 测试区域：5G-A 通感一体连续覆盖区域内进行测试
测试方法	1、无人机启动 RTK 功能，与 AF 平台连接成功，实时上报无人机 RTK 真值信息 2、主测无人机采用 2.3.2 测试轨迹 5 飞行，另外一架辅测无人机采用测试轨迹 2 或其它轨迹（圆形、正方形等）在最高感知高度伴飞。通过 AF 平台观察轨迹完整度，同时分析无人机位置精度、漏检率等性能指标衡量系统感知能力

2.3.3.3 多目标测试

测试目的	验证系统的多目标的感知能力
预置条件	测试目标：大于 5 架符合测试要求的无人机 测试区域：5G-A 通感一体连续覆盖区域内进行测试
测试方法	1、无人机启动 RTK 功能，与 AF 平台连接成功，实时上报无人机 RTK 真值信息 2、采用 2.3.2 测试轨迹 1 的不同路线、不同速度同时飞行。通过 AF 平台观察轨迹完整度，同时分析无人机位置精度、速度范围等性能指标衡量系统感知能力

2.3.3.4 去重融合测试

测试目的	验证多站对目标的去重融合能力
预置条件	测试目标：1 架符合测试要求的无人机 测试区域：5G-A 通感一体连续覆盖区域内进行测试
测试方法	1、无人机启动 RTK 功能，与 AF 平台连接成功，实时上报无人机 RTK 真值信息 2、无人机从重叠覆盖区域内起飞，并按采用 2.3.2 轨迹 2 进行平飞，飞行轨迹应尽可能遍历重叠覆盖区域内的所有可达位置，记录感知目标的 ID 数

2.3.3.5 机动性测试

测试目的	验证系统对机动性目标的感知能力
预置条件	测试目标：1 架符合测试要求的无人机 测试区域：5G-A 通感一体连续覆盖区域内进行测试
测试方法	1、无人机启动 RTK 功能，与 AF 平台连接成功，实时上报无人机 RTK 真值信息 2、采用 2.3.2 轨迹 3 进行验证，如在 a 点，垂直起飞，以 5-10m/s 的速度飞至 b 点后悬停 10s；在 b 点，以 20m/s 的速度飞至 c 点后悬停 10s；在 c 点，以 5-10m/s 的速度飞至 d 点后悬停 10s；在 d 点，以 20m/s 的速度飞至 e 点后，垂直降落。通过记录时延、速度等信息验证系统的垂直悬停复飞航迹时延、垂直起飞航迹时延以及速度精度

2.3.3.6 连续组网测试

测试目的	验证系统组网覆盖能力
预置条件	测试目标：1 架符合测试要求的无人机 测试区域：5G-A 通感一体连续覆盖区域内进行测试
测试方法	1、无人机启动 RTK 功能，与 AF 平台连接成功，实时上报无人机 RTK 真值信息 2、采用 2.3.2 轨迹 4 进行验证，按照“几字型”间隔 200 米纵横交错直线飞行，应确保穿过基站正上方的轨迹线尽量多，纵向、横向边界距离最外圈基站至少 1km，每隔 100m 高度轨迹遍历，通过分析位置精度、虚警率、漏检率等性能指标衡量组网覆盖能力



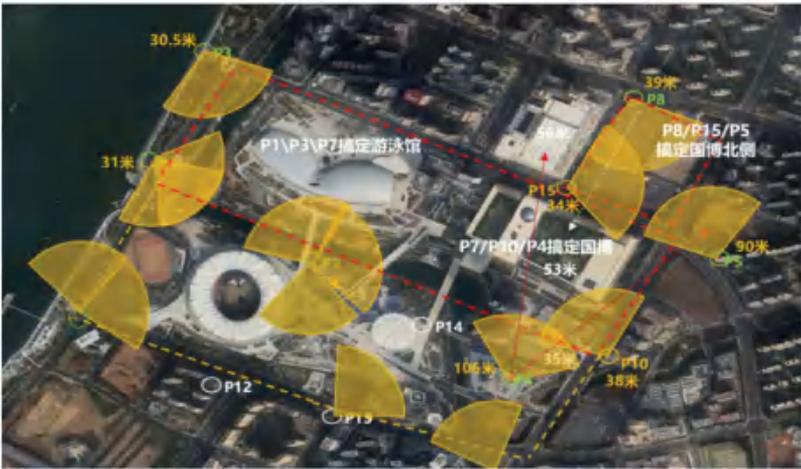
03

5G-A 通感一体典型测试案例

中国移动基于 5G-A 通感一体外场测试方案，已在多地成功开展通感一体化技术外场试验，通过科学搭建测试系统、精准规划测试轨迹、落地可操作的测试方法，不仅高效采集到全面且精准的数据，更在实际场景中充分验证了系统的感知覆盖范围与探测性能，测试结果以直观数据印证了该测试方案在技术应用层面的可行性与科学严谨性。

3.1 浙江杭州低空通感测试

一、测试系统

<p>站址情况</p>	<p>通过 8 站 15 扇区组网方式覆盖奥体中心 - 游泳馆 - 国博中心 - 网球中心四块连片区域，站高平均 30m，平均站间距 750m</p> 
<p>测试区域属性</p>	<p>建筑物密集、多遮挡、多反射、各场馆高度平均 60 米，周边高楼平均高度大于 100 米，最高建筑物 310 米，周边有多条主干道路，高峰时段车流密集，属于典型密集城区场景</p>
<p>测试目标</p>	<p>采用大疆御 3 行业级无人机，RCS $\approx 0.01\text{m}^2$</p> 

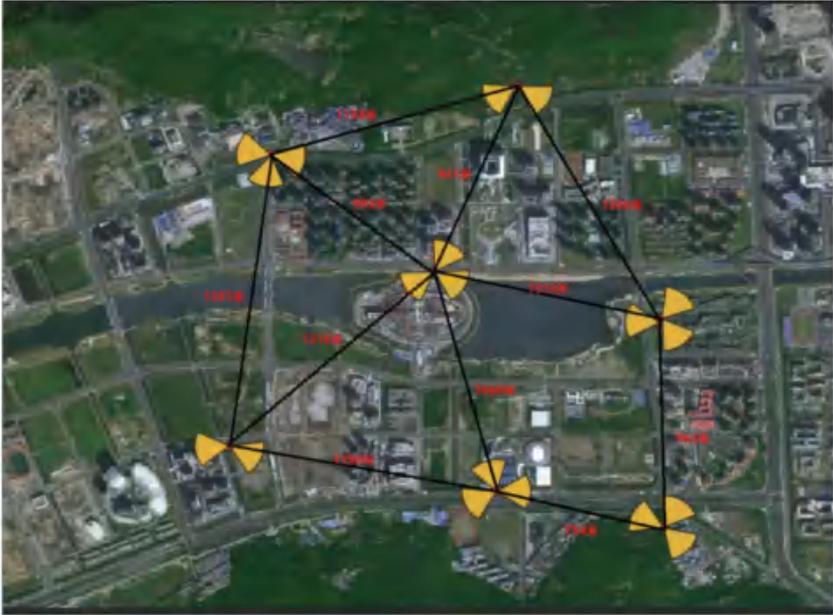
二、组网通感性能测试

无人机按照 2.3.2 中轨迹 1~4 进行飞行，使用 2.3.3 中的测试方法验证了系统在连续覆盖、机动性、速度范围、时延等方面的感知能力，测试结果符合预期。



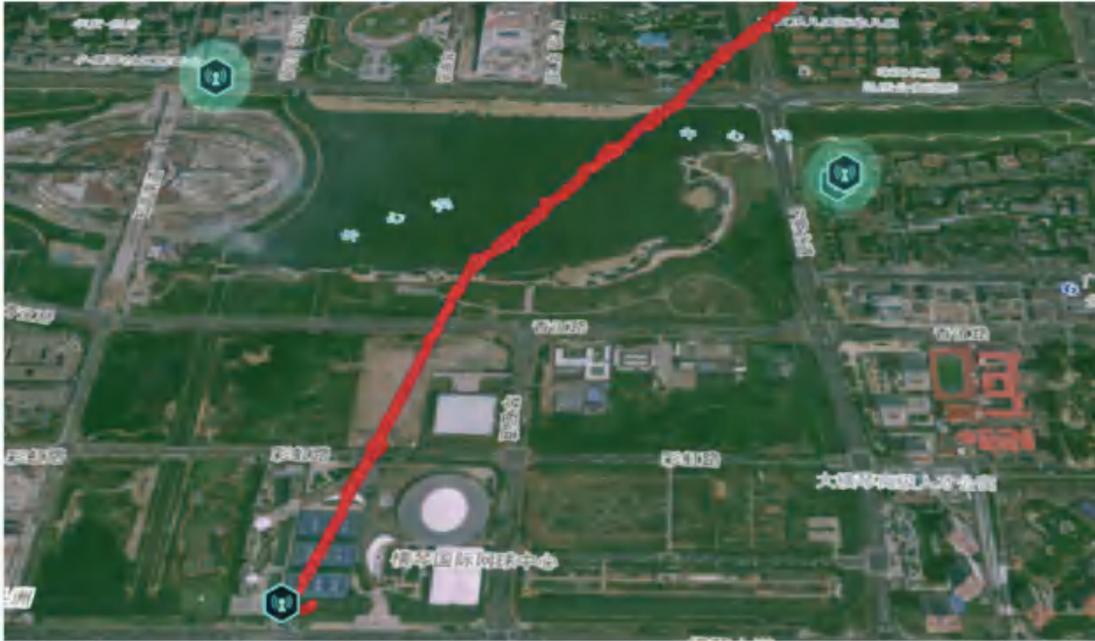
3.2 珠海横琴低空通感测试

一、测试系统

<p>站址情况</p>	<p>在横琴粤澳深度合作区打造的 5G-A 通感一体低空通感网络示范区，通过 7 站 19 扇区组网方式覆盖 6km² 区域，站高平均 34m，平均站间距 1km</p> 
<p>测试区域属性</p>	<p>测试区域包含居民区、商务办公楼宇、体育场馆等平均楼高 50m 以上，最高建筑 120m 以上，属典型密集城区场景</p>
<p>测试目标</p>	<p>采用大疆御 3 行业级无人机，RCS $\approx 0.01\text{m}^2$</p> 

二、单站感知覆盖能力测试

无人机按照 2.3.3.1 中的测试方法进行单扇区边界覆盖能力测试，无人机采用 1.4m/s 的速度沿系统最大感知边界进行非法线方向拉远运动，起点高度 30m，终点高度 300m，结果表明无人机感知轨迹连续，系统边界覆盖能力得到有效验证。



三、组网感知探测性能测试

无人机按照 2.3.3.2 测试方法在覆盖范围内进行感知探测性能测试。采用两架无人机同步飞行，主测无人机采用速度 5m/s、10m/s 以及 5-10m/s 变速在覆盖区域内螺旋上升，起点高度 50m，终点高度 250m，伴飞无人机固定在高度 300 米全程持续伴飞，结果显示两架无人机均被感知且感知轨迹连续，虚警率、漏检率等指标符合预期。



左:5m/s、中: 10m/s、右: 变速

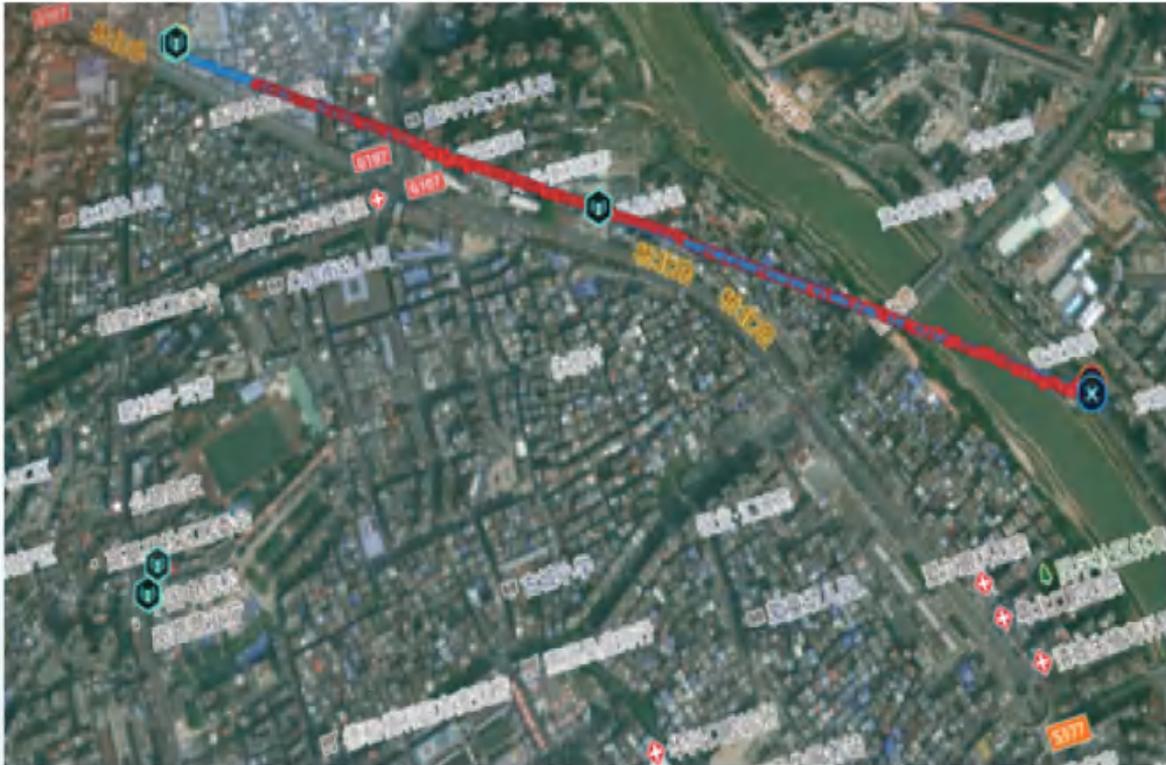
3.3 广东清远低空通感测试

一、测试系统

<p>站址情况</p>	<p>在广东清远打造的 5G-A 通感一体低空通感网络示范区，通过 8 站 24 扇区组网方式覆盖 5.36km² 密集城区场景，平均站间距 850 米，平均站高 29.6 米</p> 
<p>测试区域属性</p>	<p>测试区域包含居民区多层住宅、商务办公楼宇、商业中心等，平均楼高 65 米，60 米（20 层）以上的大楼 20 栋以上，最高建筑 100m 以上，属典型密集城区场景</p>
<p>测试目标</p>	<p>采用大疆御 3 行业级无人机，RCS $\approx 0.01\text{m}^2$</p> 

二、单站感知覆盖能力测试

无人机按照 2.3.3.1 中的测试方法进行单扇区最大覆盖能力测试，无人机采用速度 5m/s 沿法线方向进行拉远运动，结果表明无人机感知轨迹连续，最大覆盖距离、位置精度等指标符合预期。



三、组网感知探测性能测试

无人机按照 2.3.3.4 测试方法在覆盖范围内分别在 100 米、200 米、300 米高度进行感知去重融合测试，测试全程仅有一个感知目标 ID 且感知轨迹连续符合测试预期，同时虚警率，漏检率，精度等指标也满足相关要求。



左：100 米高度、中：200 米高度、右：300 米高度



04 总结与展望

通感一体是 5G-A/6G 移动通信重要技术方向，已经成为服务国家低空经济战略、增强国家低空安防能力重大共性关键技术。随着 5G-A 通感一体从技术研究、单站 / 单簇技术验证向规模化部署迈进，统一的通感一体性能测试方法和指标评估方法尤为重要，本白皮书阐述了 5G-A 通感一体测评方法，包括关键性能指标定义及统计方法、实验室测试方案以及外场测试方案，为通感一体技术的性能验证和评估提供了科学依据，推动了相关技术的标准化发展。

展望未来，随着 5G-A 通感一体技术的不断成熟，其在低空等领域的应用将更加广泛和深入，有望为社会创造更大的价值。同时，需要持续完善测评方法，以适应技术的快速演进，不断提升通感一体技术的可靠性和稳定性，推动其在全球范围内应用推广，书写通感融合的新篇章。

缩略语列表

缩略语	英文全名	中文解释
SF	Sensing Function	感知功能
AF	Application Function	应用功能
RTK	Real-time kinematic	实时动态载波相位差分技术
5G-A	5th Generation Advanced Mobile Communication Technology	第五代增强移动通信技术
ISAC	Integrated Sensing and Communication	通信感知一体化
RCS	Radar Cross Section	雷达散射截面积
SF	Sensing Function	感知功能
AIS	Automatic identification System	船舶自动识别系统
CDF	Cumulative Distribution Function	累积分布函数
AAU	Active Antenna Unit	有源天线单元
WGS84	World Geodetic System 1984	全球坐标系统
FOV	Field of View	视场角

参考文献

- [1] 5G-Advanced 通感一体场景需求研究报告, IMT-2020 (5G) 推进组, 2022.
- [2] 通信感知一体化技术研究报告, IMT-2030 (6G) 推进组, 2022.
- [3] 通感融合系统设计研究报告, IMT-2030 (6G) 推进组, 2023.
- [4] 5G-A 通感一体典型场景技术解决方案白皮书, 中国移动, 2024.
- [5] 低空智联技术体系白皮书, 中国移动, 2024.

参编单位及人员 (排名不分先后)

中国移动通信研究院: 黄宇红、丁海煜、邓伟、刘亮、张俪、韦剑峰、孙朝、杨月霜、吴碧莲、曹丽芳、
张永丽、富英洲、曾凯越、席云飞

华为技术有限公司: 石建、邹向毅、全明、陆晨皓、吴园

中兴通讯股份有限公司: 赵志勇、梁婷、周青波、肖翔

中信科移动通信技术股份有限公司: 何青春、李翔、李楠楠、张凌雁、李天寇

北京理工雷科电子信息技术有限公司: 盛蒙蒙、康凯、刘怡晓、牛亚雷

罗德与施瓦茨（中国）科技有限公司: 潘轶、朱轶智、王立磊、张红云

是德科技（中国）有限公司: 杨怀志、乐翔、张坤利、魏永杰