

低空覆盖组网技术方案

曹阳阳, 高松涛, 于一鸣, 潘都, 张琪璇, 斯琴
(中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100085)

摘要: 面向低空经济快速发展对通信与感知能力的双重需求, 系统分析了低空场景下的业务特征与网络挑战, 提出基于5G-A的低空覆盖组网策略。首先, 从低空通信与感知两大维度梳理典型业务需求, 明确高可靠、大带宽、低时延与通感融合等核心指标; 其次, 围绕通信与感知组网架构, 探讨航区与航线覆盖的关键问题, 重点分析传播模型、塔顶弱覆盖等制约因素, 并提出航区蜂窝塔顶补盲、航线蝶形双侧避盲组网结构; 最后, 面向全面保障低空无人机体验, 提出通感增强、多元融合感知等新技术引入方向。研究成果可为低空网络覆盖规模化建设提供技术支撑与参考。

关键词: 低空经济; 低空通感; 蜂窝组网; 蝶形组网

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025290

0 引言

低空经济是一种综合性经济形态, 它以各种有人驾驶和无人驾驶航空器的低空飞行活动为牵引, 辐射带动相关领域的融合发展^[1]。简单来说, 它包括“低空”+“经济”。“低空”指垂直范围在真高1 000 m以下的空域, 但根据具体应用场景、地区特点及政策规定, 可延伸至3 000 m以下。“经济”指围绕低空飞行活动产生的一系列产业链和经济活动, 包括航空器研发制造、飞行运营、基础设施保障和综合服务等。当前低空经济的核心活动集中在300 m以下(尤其是120 m以下的W类空域)。未来随着eVTOL和无人机技术的成熟, 300~600 m可能成为城市空中交通(UAM)的关键高度层, 而1 000~3 000 m空域更多用于特定任务。

低空是一片过去未被充分开发利用的资源。对于通信运营商而言, 新的经济活动意味着网络

覆盖需要同步跟进。相比传统地面通信, 低空网络覆盖需要关注三方面变化^[2]。

(1) 覆盖范围变化。传统通信关注地面覆盖, 它是对某一平面的覆盖, 如道路、广场或建筑物内某一层; 而低空网络是对某一个三维立体空间的覆盖, 实现连续高度层的覆盖, 甚至还需兼顾地面业务需求。

(2) 业务需求变化。通信关注的容量、边缘速率、平均速率、时延等, 而低空还关注各类感知精度、分辨率、漏检/虚警率等指标。需要解决如何组网才能同时满足感知与通信业务。

(3) 设备形态变化。地面通信频段非常丰富, 5G的700 MHz/2.6 GHz/4.9 GHz、4G的900 MHz/1 800 MHz/FA/E等; 设备方面, 地面通信使用宏基站、室分基站、微基站等多站型, 还涉及多种设备形态, 满足各类场景的覆盖及容量需求。而低空设备需要解决频率选择、设备参数、工程参

数如何配置才能满足通信、感知需求的问题。

综合来看,低空在覆盖范围、业务需求、设备形态等方面与传统通信存在明显差异,需面向落地研究低空组网技术方案,确保采用当前设备能满足各种复杂场景下通信与感知双体验。

1 业务需求

无人机已深度融入现代城市治理与产业升级,形成多维度、全场景的创新服务体系,在物流配送、交通巡检、空巡综治、应急救援、农林植保和地理测绘等多领域中发挥关键作用。网络覆盖是支撑低空经济发展的关键基础设施,主要体现在低空通信、低空感知两方面。

1.1 低空通信

低空通信业务主要包括数据传输和飞行控制两类。数据传输类以大上行为主,通信网络必须提供足够的带宽,满足农林植保保护、地理测绘等场景无人机高清图片、视频回传的需求,典型上行带宽要求为 5~25 Mbit/s,少量场景为空中交通,通信需求与地面用户相似;飞行控制类业务指满足无人机中远程控制等,其特点是提供尽可能低的端到端时延,以确保飞行器能够实时响应地面指令,提高飞行安全性和作业效率。典型低空应用场景通信需求见表 1。

表 1 典型低空应用场景通信需求

业务类型	飞行高度/m	上行带宽需求(单机)/(Mbit·s ⁻¹)	视频回传分辨率	端到端时延需求/ms
空巡综治	80~300	10~25	2K/4K	200
物流配送	60~120	5	1 080P	60
空中交通	120~300	10	2K	100
应急救援	300~600	5	1 080P	—
空巡综治	80~300	10	2K	200
农林植保/地理测绘	50~200	5	1 080P	100

表 2 典型低空应用场景感知需求

场景分类	场景	目标 RCS/m ²	位置精度/m	精度置信度	漏检率	虚警率
空域监管	防黑飞电子围栏	0.01	30	95%	5%	5%
	机场防护	0.01	30	95%	5%	5%
农林植保/地理测绘	航路保护	0.01	20	95%	10%	10%

1.2 低空感知

高精度、低时延、全天候的感知技术是支撑无人机实现有效、便捷监控和飞行任务管理的基础,主要面向物流运输、巡检巡查等生产作业场景,警务安防、应急救援等公共服务场景,以及空中交通、低空文旅等消费出行场景。各类场景业务感知需求主要集中在对无人机、飞鸟、空飘物等物品进行监测。典型低空场景感知业务需求见表 2。

2 组网策略

2.1 通信组网

对于不同高度层,低空通信可采取如下策略^[3]。

(1) 优先复用现网,按需新建专网满足 120 m 以下需求。目前地面 4G、5G 网络已形成良好覆盖,可在一定程度上兼顾低空覆盖。对于 120 m 以下无人机的通信需求,可优先对现网进行优化,以最低成本形成低空基础覆盖层,如有更高带宽、更低时延需求,可局部新建专网满足。

(2) 新建 5G 低空专网满足 120~300 m 以下需求,地面网络无法为 120 m 以上低空用户提供稳定通信速率和时延的通信能力。为实现低空广域连续、稳定可靠通信,建议新建 5G 低空通信专用网络,实现专频专用,为低空飞行器提供高可靠、低时延、稳定速率的通信能力。



(3) 探索 5G 低空专网覆盖 300~600 m 能力。300~600 m 低空应用以空中交通为主, 对网络能力要求在大上行基础上叠加了下行速率需求, 5G 低空一张网需要满足 600 m 空域内所有通信需求。考虑现阶段 300~600 m 低空业务较少, 不同高度层对通信能力的要求存在差异, 低空通信增强技术仍在不断演进, 建议结合业务发展、设备能力、技术迭代等情况, 探索 300~600 m 覆盖能力。

(4) 600 m 以上需求, 5G+卫星通信融合方案对于 600 m 以上的网络良好覆盖需求, 现有 5G 通信设备实现存在难度, 后续持续开展设备硬件能力提升、软件功能增强, 进一步提高 5G 低空网络覆盖能力。当前可考虑采用移动通信与卫星通信融合的方式解决, 结合低轨卫星发射情况及产业成熟度, 未来可考虑通过低轨卫星与 5G 网络融合, 为低空飞行活动提供服务保障。

2.2 感知组网

空域安全是发展低空经济的基本要求, 感知系统以零容忍容错为追求目标。对于不同高度及感知性能需求, 可使用多种感知能力, 实现对低空目标(如无人机、载人机)的米级定位、轨迹追踪与行为预测, 同时利用通信网络实时传输数据至管控平台, 形成“感知-通信-决策”闭环。

(1) 120 m 以下: 多种感知手段配合

面向 120 m 以下的低空场景, 地物环境与电磁环境比较复杂, 为保障感知可靠性与稳定性, 可结合 5G-A 通感一体、TDOA 与光电探测等手段, 5G-A 通感一体技术进行主动感知探测, 配合 TDOA、Remote ID 技术, 针对常见无人机特征库内的机型, 迅速确认目标身份, 并联动光电系统进行视觉验证, 以满足 120 m 以下的低空感知需求。

(2) 120~600 m: 5G-A 通感一体作为主要感知手段

面向 120~600 m 低空场景, 5G-A 通感一体可凭借规模组网优势成为主要感知手段, 叠加高低频协同能力, 针对低空网络实现三维空间立体连

续覆盖, 满足基本感知业务需求。还可在局部重点区域, 按需叠加 TDOA、光电探测、低空雷达、Remote ID 等多模感知能力。

(3) 600 m 以上: 低空雷达作为主要感知手段 600 m 低空场景, 相较 600 m 以下视距环境相对较好, 低空雷达可凭借其远覆盖能力成为主要感知手段, 以应对常态化运行服务保障的运行监控场景。低空雷达可进行较大范围内的目标跟踪与轨迹预测, 同时可配合 TDOA、Remote ID 等手段进一步提高感知性能。

3 5G-A 组网技术

3.1 关键问题

3.1.1 传播模型

当前, 空地一体网络存在仅通信与通信、感知融合两种关键需求。为满足以上两种需求, 应选用适当的传播模型进行立体覆盖规划。

面向仅通信的网络建设需求, 应在充分考虑覆盖场景特征的情况下选用传播模型。低空网络场景以视距环境为主, 基站与用户终端之间的通信链路上无明显遮挡物, 可复用经典自由空间路径损耗公式对传播损耗进行初步估算, 进而得出最远覆盖距离。经典自由空间路径损耗表达式如下:

$$\text{PathLoss} = 32.45 + 20 \lg f + 20 \lg d \quad (1)$$

其中, f 代表信号频率, 单位为 MHz; d 代表传播距离, 单位为 km。

面向通信与感知融合的网络建设需求, 不仅要考虑覆盖场景内的通信基本需求, 还要满足对移动目标的精确感知需求。为保证感知性能, 要求基站与感知目标间尽量无遮挡物。传播模型可选用式 (2) 进行路径损耗计算, 得出可满足感知性能需求的最远覆盖距离^[4]:

$$\text{PathLoss} = 103.4 + 20 \lg f + 40 \lg d - 10 \lg \text{RCS} \quad (2)$$

其中, f 代表信号频率, 单位为 MHz; d 代表传播

距离, 单位为 km; RCS 代表感知目标截面积, 单位为 m^2 。

传播损耗模型参数取值结合场景特征与外场测试数据修正。

3.1.2 塔顶弱覆盖

对于低空网络, 要实现三维空间立体连续覆盖, 但基站上方存在弱覆盖/覆盖空洞。在非主瓣区, 旁瓣增益不足及天线零陷导致无法保证通信与感知性能, 组网地址结构应重点考虑如何解决塔顶盲区问题。

低空网络基站覆盖示意如图 1 所示。其中, O 点为基站高度位置, h 为站址高度; O_1 为最小高度需求覆盖点, H_1 为最小高度需求; O_2 为最大高度需求覆盖点, H_2 为最大高度需求。A 点、B 点分别为波束主瓣上、下 3 dB 点, M 点为波束主瓣法线方向, 也即最远覆盖点。F₂ 点为波束主瓣上 3 dB 点与最大高度需求的水平线交叉位置; α 为下倾角, 主要由机械下倾与电下倾共同决定; β 为波束主瓣半波宽角。非主瓣区为在基站头顶由波束旁瓣覆盖的区域, 该区域通信与感知性能相比波束主瓣区域较为受限, O_1 、 O_2 、F₁、F₂ 为其 4 个顶点。R 为该基站覆盖半径。

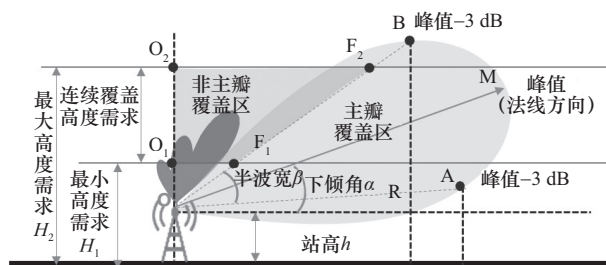


图1 低空站塔顶弱覆盖示意图

为计算非主瓣区面积, 可通过计算 O_2F_2 的长度来保障空地一体网络连续覆盖:

$$O_2F_2 = \frac{H_2 - h}{\tan\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right)} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 非主瓣区范围受覆盖高度需求、站址高度、下倾角配置、波束配置等因素影响。

3.2 航区蜂窝塔顶补盲

航区特点为区域内自由飞行, 随时随地可接入网络, 广域连片区域无缝覆盖, 干扰管理复杂, 对信号稳定性要求高。为解决塔顶弱覆盖, 建议采用小区互补对打进行覆盖, 如图 2 所示, 利用邻站补盲方式消除塔顶弱覆盖, 保障低空网络连续性, 实际部署可结合覆盖需求减少扇区数, 实现区域内高效组网。

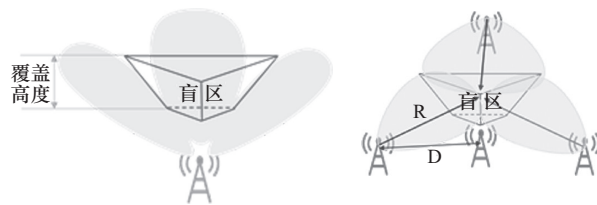


图2 航区组网结构

其本质上还是基于蜂窝组网, 站址部署更灵活, 网络更稳定, 对于通感场景 A 发 A 收、A 发 B 收均适用, 且更容易实现多基站融合感知, 提升感知精度。站间距 D 的计算式如下:

$$D = R \times \cos \alpha \quad (4)$$

其中, R 为覆盖半径, α 为上倾角。

对于低空通信、感知 A 发 A 收, 理论上都是一种单站工作模式, 典型单站三扇区蜂窝组网, 如图 3 所示。

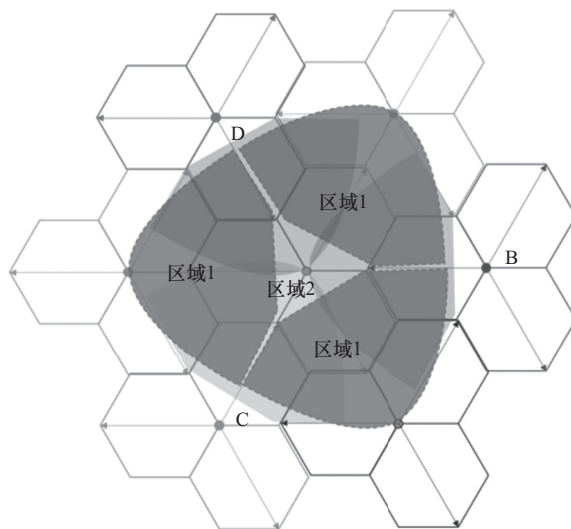


图3 A发A收蜂窝组网



A发B收是一种双站及以上感知方式, 基站对目标的感知至少由两个站完成。组网结构为三角+蜂窝, 需要先规划选取3个站形成一个簇, 每个三角形代表一个感知簇, 每个顶点是一个三扇区站, 三角形的外接六边形是这个感知簇的有效覆盖范围, 按簇组网形成连片覆盖。

连片覆盖时的单簇结构如图4所示。

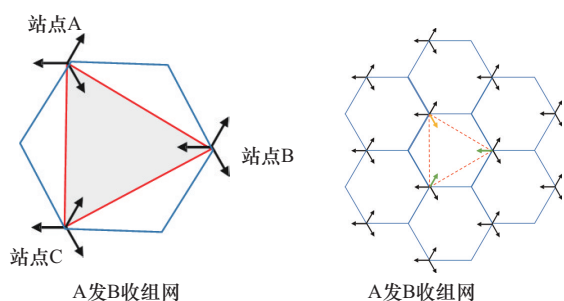


图4 A发B收航区组网结构

3.3 航线蝶形双侧避盲

航线特点为沿固定方向飞行, 满足特定飞行任务的需求, 覆盖范围小, 通信资源集中, 干扰易规避。为解决塔顶弱覆盖, 可合理设置基站与航线边界距离, 避免航线落在塔顶非主瓣区。为避免航线与通感站塔顶盲区交叉, 要求通感站与航线边界之间大于一定距离, 站点距离航线过远会导致能覆盖的航线宽度不足, 因此 M 应尽量小, 具体可结合垂直波宽计算。

(1) 双侧蝶形

对于低空通信、感知A发A收, 采用双侧蝶

形组网结构, 如图5所示, 可结合实际部署环境增减扇区, 实现航线良好连续覆盖。

站间距与覆盖半径 R 、航线宽度 L 有关:

$$L \leq R - 300, D_1 = 2 \times R / 1.4, D_2 = R + 300 \quad (5)$$

$$R - 300 < L \leq 2 \times (R - 300), D_1 = 0, L + 600 \leq D_2 \leq 2R \quad (6)$$

当 $R - 300 < L \leq 2 \times (R - 300)$ 时, 基站成对正对覆盖, 不同基站对之间的水平距离设为 $2 \times R / 1.4$ 。

当 $2 \times (R - 300) < L$ 时, 则该区域按航区组网结构考虑。

(2) 单侧蝶形

对于感知A发B收模式, 对于空域中的每个位置, 需要两个扇区同时覆盖到, 可采用单侧蝶形组网结构, 如图6所示。

站间距与覆盖半径 R 、航线宽度 L 关系可类比A发A收计算方式。

4 新技术引入建议

低空经济作为新兴的综合性经济形态, 其典型网络覆盖需求呈现出立体化、高可靠、大带宽、低时延、可感知、高安全等特征, 面向商用规模组网, 还需结合业务要求引入关键增强技术。

4.1 低空通信

虽然可通过部署专用基站、专用频率为低空用户提供专用无线网覆盖, 但由于空域间无遮挡, 且无人机移动速度快、范围广, 低空通信网络相较地面通信网络面临着干扰严重抬升、切换

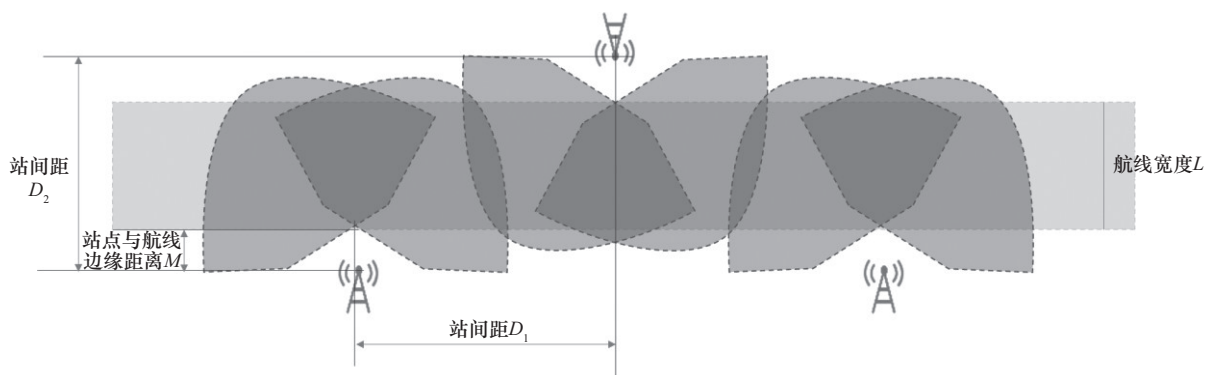


图5 A发A收航线组网

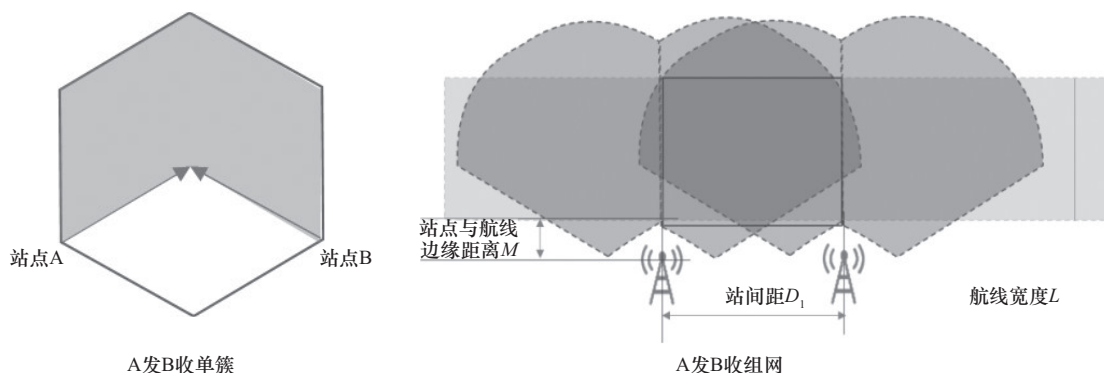


图6 A发B收航线组网

次数增多、业务体验较差等挑战。为全面保障低空无人机体验，建议引入以下关键新技术。

(1) 低空专用用户识别策略，区分无人机与地面用户。

(2) 低空用户差异化保障方案，如业务保障、干扰控制及移动性管理增强等技术，整体提升低空网络能力，保障无人机用户通信体验。

(3) 基于QoS与切片分层分级保障方案，为低空用户配置个性化QoS参数，包括5QI、GFBR、MFBR、AMBR等，基站可基于QoS参数对低空用户进行调度。针对不同的切片与QoS需求，无线网可通过调度优先级、预调度等参数/算法配置，实现面向不同无人机群体、同一无人机不同业务保障空口速率、时延、可靠性等性能需求。

4.2 低空感知

(1) 感知能力增强

面向低空感知业务应用和指标要求，通信和感知可深度融合，在组网场景下建议从感知资源扩展、干扰抑制增强、通感融合互助等角度进行感知性能提升。感知资源拓展方面，可将通信资源进一步用于感知，并同步设计地空一体、水空一体、海空一体帧结构，支持更多低空飞行场景。干扰抑制增强方面，为有效解决由三维立体覆盖、感知信号引入带来的低空通感网络中的多种干扰，对于感知间干扰，需引入时频梳码等多域资源配置技术，错开感知

小区间使用资源，提升复杂环境下的感知性能；对于感知与通信间干扰，需要引入动态精准打孔功能，使感知小区准确定位出高干扰同频通信小区，进行动态时隙打孔，减少资源冲突的通信小区数量、降低通信下行损失。通感互助增强是指通过通信与感知两网融合、信息互通，进一步提升通信、感知性能。当前重点聚焦感知辅助通信功能，基站基于感知到的无人机位置和轨迹，自适应调整本站及邻站广播波束，减少波束碰撞概率，动态实现业务波束成形，提升用户速率。

(2) 多元融合感知

随着低空经济、低空安防等需求不断增强，单一感知技术存在不能完全满足业务场景感知需求的情况，可考虑在5G-A通感一体基站构建的低空智联网的基础上，融合毫米波、低空雷达、TDOA、Remote ID、光电探测等手段^[5]，多种感知技术按需配置、相互配合、优势互补、灵活部署，形成多模态融合感知技术方案，实现对低空合作目标、非合作目标、空飘物、鸟类等正常运行无人机与潜在威胁目标的感知，推动感知性能及稳定性进一步提升，助力空域监管能力增强。

5 结束语

本文首次将低空网络覆盖中的“塔顶弱覆



盖”等盲区问题，从一个定性描述的挑战，转化为一个可量化计算、可通过特定组网策略补偿的系统性工程问题。针对不同场景和不同业务模式，本文给出了具体的组网方案：航区采用“蜂窝塔顶补盲”组网，利用邻站协同消除盲区，实现广域无缝覆盖；航线采用“蝶形双侧避盲”组网，通过精准的站点布局避开塔顶盲区，实现高效定向覆盖。同时，本文提出通过引入通感增强技术（如资源扩展、干扰抑制、通感互助）和多元融合感知（融合5G-A通感一体、雷达、TDOA等多种技术）来持续提升网络性能，以全面保障低空无人机通信与感知体验，支撑低空经济的规模化发展。本文为解决低空网络覆盖的核心难题提供了一套从理论分析到工程实践的可实施、可演进的完整技术方案框架。

参考文献：

- [1] 中国信息通信研究院. 低空经济发展白皮书(2023)[R]. 2023.
- [2] 许方敏, 陶小峰, 张平, 等. 低空无人机通信网络关键技术挑战与发展趋势[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 200-214.
- [3] 中国移动通信集团有限公司. 5G-A通感一体典型场景技术

解决方案白皮书[R]. 北京: 中国移动, 2024.

- [4] 张胜利, 裴郁杉, 高晖, 等. 面向5G的低空空地信道测量与建模研究[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 1-9.
- [5] 金耀, 张贺, 邓中亮, 等. 5G-A/6G+北斗通感导技术在低空经济中的应用与展望[J]. 电信科学, 2025, 41(3): 1-16.

[作者简介]

曹阳阳（1990-），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/5G-A无线通信、低空智能组网技术等。

高松涛（1987-），男，中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师，主要研究方向为移动通信无线网前沿技术、组网规划技术等。

于一鸣（1994-），男，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5G-A通感一体、低空智能网、移动蜂窝网络等。

潘都（1994-），女，中国移动通信集团设计院有限公司工程师，主要研究方向为天线阵列技术、5G无线网组网技术、5G-A通感一体干扰控制技术等。

张琪璇（1994-），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5G无线网规划、通感一体组网技术等。

斯琴（1997-），女，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5G无线网关键技术与解决方案等。