6G 星地融合的低空智联需求和关键技术

康绍莉[1,2]，秦海超[1,2]，王　可[1,2]，冯云九[2]，王　丹[2]，杨祺欣[2]
（1. 中信科移动通信技术股份有限公司，北京 100083；2. 无线移动通信全国重点实验室，北京 100191）

摘要：低空经济的快速发展对通信、感知、计算融合的低空智联网络提出迫切需求。现有 5G 增强系统在覆盖高度、上行速率及通感协同等方面存在局限，难以独立支撑广域、高动态的低空应用。面向 6G 的星地融合网络，通过统一空口与统一架构等系统级深度融合，以期解决低空智联在覆盖、感知、计算等方面的核心挑战。面向载人出行、低空物流、文体旅培、公共服务 4 类典型场景，分析 6G 星地融合支持的低空智联关键用例，总结其覆盖能力、定位精度与完好性、通信性能、感知能力、计算与智能协同等关键技术指标需求，分析统一帧结构、波形与多址、多模接入与同步、多星多波束传输、协同计算与边缘智能、频谱共享及通导感一体化等潜在关键技术，形成“场景—需求—技术”的框架，为 6G 星地融合服务低空智联应用提供参考。

关键词：低空智联；6G；星地融合网络；计算与智能协同；通导感一体化
中图分类号：TN929.5
文献标志码：A
doi：10.11959/j.issn.2096–8930.tdyt2026049

Requirements and key technologies of low-altitude intelligent networked systems toward 6G satellite-terrestrial integration

Kang Shaoli[1,2], Qin Haichao[1,2], Wang Ke[1,2], Feng Yunjiu[2], Wang Dan[2], Yang Qixin[2]
1. CICT Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, Beijing 100191, China

Abstract: The rapid development of the low-altitude economy poses urgent demands for low-altitude intelligent networked systems that integrate communication, sensing, and computing. Existing fifth-generation mobile communication-advanced (5G-A) systems face limitations in coverage altitude, uplink data rate, and integrated communication and sensing coordination, making it difficult to independently support wide-area, high-dynamic low-altitude applications. The sixth-generation mobile communication (6G) satellite-terrestrial integrated network, with unified air interface and unified architecture through system-level deep integration, is expected to address the core challenges of low-altitude intelligent networking in coverage, sensing, and computing. The key use cases of low-altitude intelligent networking supported by 6G satellite-terrestrial integration for four typical scenarios: manned travel, low-altitude logistics, culture, sports, tourism, and training, and public services were analyzed. The requirements for key technical indicators were summarized, including coverage capability, positioning accuracy and integrity, communication performance, sensing capability, and computing and intelligent collaboration. Potential key technologies were analyzed, such as unified frame structure, waveform and multiple access, multi-mode access and synchronization, multi-satellite multi-beam transmission, collaborative computing and edge intelligence, spectrum sharing, and integrated communication, navigation, and sensing. A "scenario-demand-technology" framework was proposed to provide a reference for 6G satellite-terrestrial integration serving low-altitude intelligent connected applications.

Key words: low-altitude intelligent networked systems, 6G, satellite-terrestrial integrated network, computing and intelligent collaboration, integrated communication, navigation and sensing

收稿日期：2026–03–06；**修回日期：**2026–07–09

通信作者：康绍莉，kangshaoli@cictmobile.com

基金项目：国家科技重大专项（No. 2024ZD1300500）
Foundation Item: The National Science & Technology Major Project (No. 2024ZD1300500)

0 引言

低空经济正成为培育新质生产力、推动经济社会高质量发展的战略新高地。以无人机、电动垂直起降飞行器为代表的低空飞行器，已在载人出行、物流配送、文体旅培及公共服务等领域得到一定应用。随着低空经济从起步走向规模化，传统的低空运营模式以及基础设施难以支撑未来低空安全、高效的服务要求，因此需要有通信、感知、计算、智能深度融合的低空智能网联系统（简称“低空智联”）。低空飞行器在广域低空空域中的高动态运行，要求这一系统提供全域连续覆盖、高可靠的指挥与控制链路、精准的感知与定位能力以及分布式协同计算支撑[1-4]。

当前，低空智联主要通过以5G增强（fifth-generation mobile communication system-advanced，5G-A）为基础的地面系统覆盖，并融合飞行器与万物通信及自组织网络，以保障低空应用的通信、感知与管控需求[4]。然而，现有5G-A主要延续与扩展地面移动通信的模式，面临覆盖高度有限、上行速率难以满足高清视频回传需求、通感协同能力不足等局限，难以独立支撑高动态、广域化的低空作业场景。卫星通信凭借广域无缝覆盖能力，可有效补盲偏远区域并为超视距飞行提供基础通信链路，但单纯叠加卫星链路仍存在星地体制不兼容、时延高及终端复杂度高等挑战[5]。因此，推动卫星与地面网络（terrestrial network, TN）从功能叠加走向体制兼容和系统融合，构建星地融合的低空智能网联系统，成为满足未来低空智联应用需求的必然路径。

与5G-A阶段星地“体制兼容”不同，第六代移动通信（sixth-generation mobile communication, 6G）星地融合主要在于实现统一空口、统一架构等系统级深度融合，从而解决低空应用在覆盖、感知和计算等方面的需求[5-6]。在覆盖维度方面，6G星地融合通过融合地面基站、低地球轨道（low earth orbit, LEO）卫星及高空平台，为不同高度和区域的低空飞行器提供连续无缝服务；在感知维度方面，其借助通信感知一体化能力，让地面基站与卫星成为广域感知设施，以增强对不同目标的探测与追踪能力；在计算维度方面，6G星地融合通过星载计算与地面边缘节点协同，支撑感知数据的实时处理和人工智能模型推理，满足无人机群协同、动态路径规划等任务的需求。目前，工业和信息化部已明确将推动卫星通信业务开放，为6G星地融合的低空应用提供制度保障[7]。然而，6G星地融合仍面临诸多挑战，包括星地信道差异对统一空口设计的制约、卫星平台资源受限对轻量化协议提出的需求，以及低空高动态场景下频谱与移动性管理的复杂性，因此亟须突破星地协同计算、新波形设计、动态频谱共享等关键技术[5,8-10]。

本文建立了“场景—需求—技术”的系统性映射框架。首先，从载人出行、低空物流、文体旅培和公共服务这4类典型场景出发，分析6G星地融合能够支持的低空智联关键用例；其次，总结覆盖能力、定位精度、通信性能、感知能力、计算与智能协同等五维技术指标需求；最后，围绕上述需求，归纳分析统一帧结构、波形与多址、多模接入与同步、多星多波束传输、协同计算与边缘智能、频谱共享及通导感一体化等潜在关键技术。通过上述“场景驱动—需求牵引—技术支撑”分析框架，为面向6G星地融合的低空智联应用提供系统参考。

1 6G星地融合的低空智联场景和用例分析

6G星地融合的低空智联由卫星层、低空应用层、地面层组成，最终由核心网统一管理。6G星地融合低空应用场景如图1所示。根据低空智能网联技术委员会发布的《低空智能网联体系发展路径及趋势》[1]，低空应用场景可划分为载人出行、低空物流、文体旅培和公共服务4类。下面将对每个应用场景进行用例分析。

1.1 载人出行

在6G低空载人出行场景下，低空载人飞行器通常在0~1 000 m的空域范围内执行飞行任务，需要通过网络持续获得周边空域内其他飞行器的位置、速度与方向信息，提前识别碰撞威胁并执行避撞操作，同时为机上乘客提供互联网接入、高清视频通话及沉浸式多媒体等服务。6G星地融合网络通过感知与通信能力的融合，提供高可靠、低时延的感知信息传输与大带宽的乘客数据服务[11]。

低空飞行器向网络请求感知服务后，其飞行路径上的基站实时探测关注区域内的目标信息并发送至飞行器，飞行器据此判断安全威胁。同时，乘客可通过智能手机观看4K/8K直播、进行视频会议等媒体服务，且服务体验不因飞行器移动而中断。相较于现有5G-A系统在覆盖高度和感知通信协同方面的局限，6G星地融合可统一调度地面基站与卫星资源，使其在城市边缘、跨市飞行及低覆盖区域的服务保持连续性。当飞行器穿越TN覆盖盲区时，系统可切换至卫星链路，保障感知数据和媒体流的稳定传输。

为满足上述需求，6G星地融合系统依托通感一体化（integrated sensing and communication, ISAC）服务、空地协同的资源调度以及更灵活的网络架构，实现在载人出行场景下的通信覆盖连续性、服务可靠性与业务多样性等方面的全面增强。

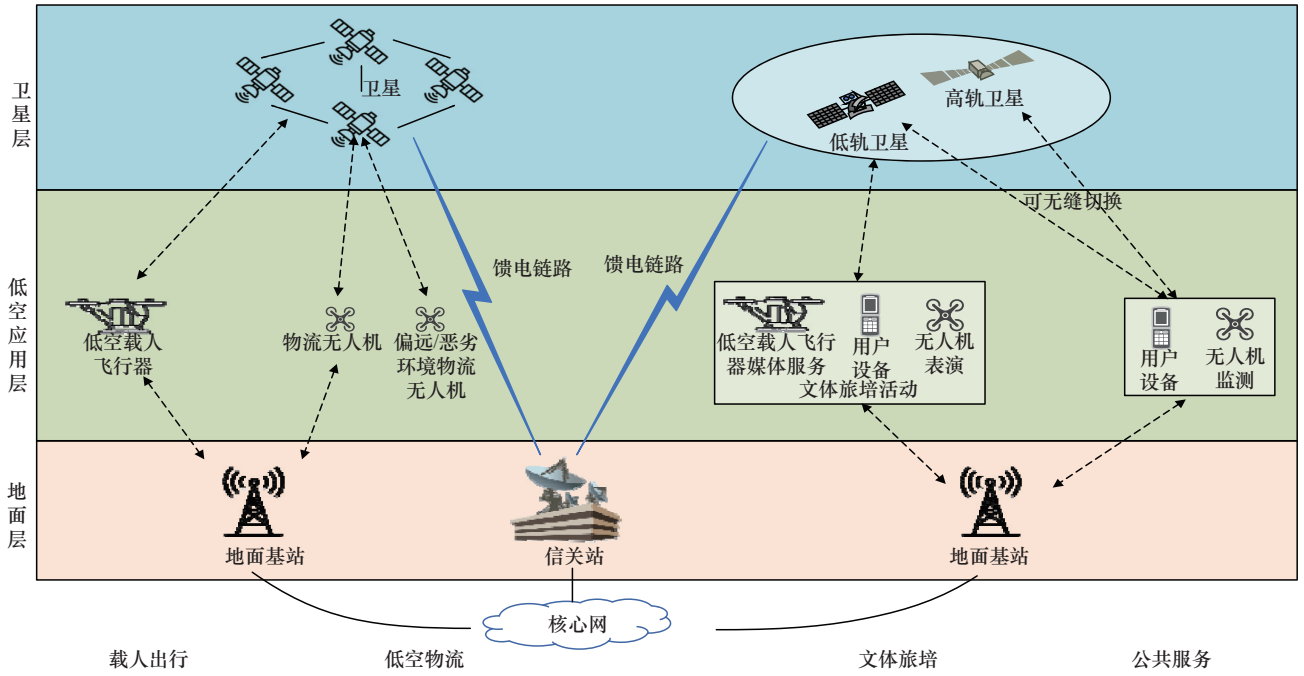


图 1　6G星地融合低空应用场景

1.2　低空物流

在偏远山区、海岛及灾害现场等复杂环境中，传统地面物流网络往往因基础设施匮乏、地形阻隔而难以形成有效覆盖。低空物流主要依托无人机，具备突破地理障碍、快速响应和广域覆盖的能力，展现出广阔的应用前景。在地震或洪水灾区，多架能力异构的无人机可组成机群，执行物资投送任务；在农村或岛屿地区，无人机可沿预定路线飞行，同时能够在恶劣天气、全球导航卫星系统（global navigation satellite system, GNSS）信号丢失等干扰条件下完成配送；在高密度城市空域，系统还可从混杂的鸟类、建筑杂波中准确检测、分类并计数无人机，避免虚警和碰撞，从而实现精准物流配送[11-12]。

6G星地融合通过引入卫星接入能力，为低空物流提供全域覆盖的通信与控制链路，在基站缺失区域保障超视距飞行的安全可控；同时，通过星地协同计算与边缘智能，实现多架异构无人机间的分布式任务协作与星载数据在轨处理，支撑恶劣环境下的动态路径规划。此外，结合ISAC与微多普勒特征识别，网络可对无人机个体进行独立检测、分类与轨迹验证，即使在GNSS受干扰或多径效应严重的条件下仍能维持可靠的环境感知能力，从而系统性地满足低空物流场景对广域连接、协同计算与精细感知的综合需求。

1.3　文体旅培

文体旅培场景涵盖低空旅游观光、沉浸式媒体服务及空中培训等应用形态，用户在飞行过程中对高质量多媒体体验提出了更高需求。典型业务包括多视角8K视频采集、沉浸式虚拟现实/增强现实交互以及飞行状态与环境信息的实时融合呈现[13-14]。

在该类场景中，网络需要支持大规模多媒体数据的持续传输与实时交互。其中，多视角视频及8K超高清视频需要由低空飞行器终端实时传输至地面基站或卫星接入节点，因此终端到网络侧的上行传输速率通常应达到100 Mbit/s及以上，在多路视频并发或更高分辨率场景下可进一步提升[11]。同时，由于低空飞行器处于持续移动状态，业务体验不仅依赖峰值速率，还依赖传输链路的连续性与稳定性。

上述需求对6G星地融合网络提出了差异化要求。高上行速率依赖高频谱效率波形与频谱共享机制，移动过程中的业务连续性依赖多模接入与星地协同传输机制，而沉浸式交互的实时性则依赖边缘计算与星载内容处理能力。

1.4　公共服务

公共服务场景涵盖低空飞行器城市巡查、应急通信、灾害救援、生态监测、高空测绘等应用形态，重点关注覆盖能力、定位精度、感知能力、通信延迟[1]。

传统5G地面基站难以满足低空覆盖要求，定位精度通常只能达到亚米级至米级，且覆盖高度仅支持150 m左右，难以满足无人机300~600 m低空核心作业区域的需求。卫星虽能提高覆盖能力，但现有商用卫星上行速率相对较低，难以满足高速率视频回传需求。6G星地融合将采用TN与

非地面网络（non-terrestrial network, NTN）混合定位技术，综合卫星的广覆盖能力和地面通信的高带宽速率。在无GNSS定位且用户设备移动速度较快时，TN与NTN混合定位能满足高精度、低时延的定位需求，在复杂环境下显著提升定位可靠性。

2 6G星地融合的低空智联关键指标需求

6G星地融合的低空智联需要满足覆盖、定位精度与完好性、通信性能、感知能力、计算与智能协同等方面的关键技术指标要求。

2.1 覆盖能力需求

《国家空域基础分类方法》[15]规定，低空领域以3 000 m以下非管制空域为主，覆盖通用直升机、电动垂直起降飞行器（electric vertical take-off and landing, eVTOL）、无人机等飞行器。其根据高度进一步划分为W类空域（120 m以下）、G类空域（120~300 m）、部分E类空域（300~6 000 m）。

W类空域须全域实现监视覆盖，应满足轻小型无人机常态化飞行监管，实现对低空航空器的探测、识别、轨迹追踪能力建设。无人机在此高度飞行须自动广播识别信息，无须空管事前审批，报备后即可飞行。

G类空域须全域实现监视覆盖。无人机在此高度仪表飞行应保持与空管的双向无线电通信，目视飞行要在规定通信频率上保持收听。

E类空域须实现通信、导航、监视一体化全覆盖，满足中大型无人机、eVTOL载人飞行的安全运行要求。无人机在此高度飞行须获得空管部门许可，全程保持双向无线电通信且在3 000 m以上飞行必须安装二次雷达应答机。

2.2 定位精度与完好性需求

在6G星地融合场景中，定位指标需求应重点关注TN和NTN的混合定位技术，其核心思想是将高精度的传统TN与广覆盖的卫星星座、高空平台等NTN深度融合，将定位功能从终端侧移向网络侧。该技术显著降低了无人机等终端的功耗成本，解决了传统依赖GNSS定位在弱信号环境下面临的安全与可靠性问题，对低空经济尤为关键。以无人机为例，6G星地融合低空场景的定位指标需求见表1。

2.3 通信性能需求

在不同场景下，低空应用对6G星地融合的通信性能有不同需求，主要涵盖上下行传输速率、时延、传输间

表1 定位指标需求

场景	业务	指标	来源
低空物流	无人机运输	定位精度≤50 m 感知分辨率≤10 m 刷新率≥1 Hz 时延≤100 ms 可靠性≥99%	TR22.870 7.18节
	无人机起降	定位精度≤0.1 m 感知分辨率≤0.5 m 刷新率≥5 Hz 时延≤500 ms 可靠性≥95%	TR22.870 7.16节
	无人机检测、分类、计数	定位精度≤1 m 感知分辨率≤1 m 刷新率≥1 Hz 时延≤1 s 可靠性≥95%	TR22.870 7.23节
公共服务	无人机监管	定位精度≤10 m 感知分辨率≤10 m 刷新率≥1 Hz 时延≤1 s 可靠性≥ 95%	TR22.870 7.5节
	混合TN和NTN定位服务	定位精度≤3 m 时延≤0.5 s 机载终端速度≤160 km/h 可靠性≥99%	TR22.870 8.10节

隔等。一般场景下的通信性能需求见表2，表2中数据均来自TR22.870以及TS22.261[11,16]。

表2　一般场景下的通信性能需求

应用分类	指标需求
载人飞行	感知数据到飞行器： 传输间隔20 ms，典型消息大小<25 B，端到端时延20 ms， 可靠性99.9%； 对乘客的多媒体服务： 上行传输速率≥500 kbit/s，下行传输速率为100~500 Mbit/s， 端到端时延<50 ms，可靠性≥99%
低空物流	高清视频远程控制： 上行传输速率≥25 Mbit/s，下行传输速率≥300 kbit/s， 端到端时延<100 ms，可靠性≥99%
文体旅培	8K直播服务： 上行传输速率≥100 Mbit/s，下行传输速率≥600 kbit/s， 端到端时延<200 ms，可靠性≥95%
公共服务	视频服务： 上行传输速率≥25 Mbit/s(4K)、9 Mbit/s(1080p)、4 Mbit/s(720p)， 端到端时延<100 ms，可靠性≥95%； 视频监控场景： 上行传输速率≥24 Mbit/s，下行传输速率≥4 Mbit/s

2.4　感知能力需求

低空应用对6G网络提出网络化协同感知能力要求，其关键技术包括目标检测与识别、状态估计与轨迹跟踪、多源感知融合以及跨区域感知连续性保障，上述能力与通信感知一体化研究方向一致[12]。

在性能方面，以无人机为例，不同场景所对应的感知能力指标需求见表3，表3中数据均来自TR22.870[11]。

表3　不同场景所对应的感知能力指标需求

应用场景	指标需求
无人机起降	需具备高精度与低时延能力 速度估计精度：0.1 m/s 感知时延：100~500 ms 置信度：95% 漏检率/虚警率：5%
无人机运输	需满足高可靠与低时延要求 感知服务可用性：99.999% 检测置信度：99.99% 最大感知时延≤100 ms 漏检率/虚警率：1%

因此，低空感知能力应围绕不同业务场景，在精度、时延与可靠性等方面进行有针对性的设计。

2.5　计算与智能协同需求

低空复杂应用对6G网络提出了分布式计算与智能协同能力要求，其关键技术包括任务卸载与计算迁移、跨网络资源调度、多智能体协同决策以及网络状态感知与反馈机制。其中，任务卸载与资源调度问题已在边缘计算研究中得到系统分析，而多智能体协同决策为无人机群协作与复杂任务执行提供基础支撑[17]。

在性能层面，不同业务对时延与可靠性的要求存在显著差异。如在载人飞行等高安全场景中，系统需要通过任务卸载、资源调度与边缘协同等机制，支撑高可靠性（如99.999%）的业务需求[4]；在无人机运输及协同控制场景中，系统需要通过计算下沉与资源调度机制降低任务处理时延，并支持多节点间的实时协同[9,18]。

因此，6G网络应实现通信、计算与智能能力的深度融合，以支撑复杂低空业务的实时协同与决策。

3　6G星地融合的低空智联潜在关键技术

为系统阐述6G星地融合低空智联的关键技术体系，本文结合典型应用场景，从其相应需求指标出发，对关键技术进行结构化归纳，场景—需求—技术映射关系如图2所示。

本文在此基础上分别对统一帧结构、波形与多址技术、多模接入与同步技术、波束协同传输技术、协同计算与边缘智能技术、频谱共享技术以及通导感一体化设计等关键技术进行详细分析。

3.1　星地融合的统一无线空口帧结构设计

在6G星地融合低空场景中，系统须同时支持TN与NTN协同通信。然而，卫星链路具有高传播时延、高多普勒频移等特点，而地面链路具有低时延、信道变化相对平缓等特征，两类链路对时频参数配置和调度机制提出了不同要求。目前，第三代合作伙伴计划（3rd generation partnership project, 3GPP） NTN通常基于NR空口进行增强以适配卫星通信需求，而面向未来6G星地深度融合场景，统一无线空口被广泛认为是实现天地一体化通信的重要技术方向之一[19]。本文围绕统一无线空口框架下的帧结构设计展开，探讨通过参数化时频资源配置实现TN与NTN链路的统一适配机制[9,19]。

统一无线空口帧结构主要通过参数化时频资源配置实现TN与NTN链路的统一适配，其中可变子载波间隔（subcarrier spacing, SCS）用于应对不同多普勒扩展。无线帧、子帧与时隙等时域资源可实现自适应配置。本文结合NTN场景中的高往返时延（round trip time, RTT）特

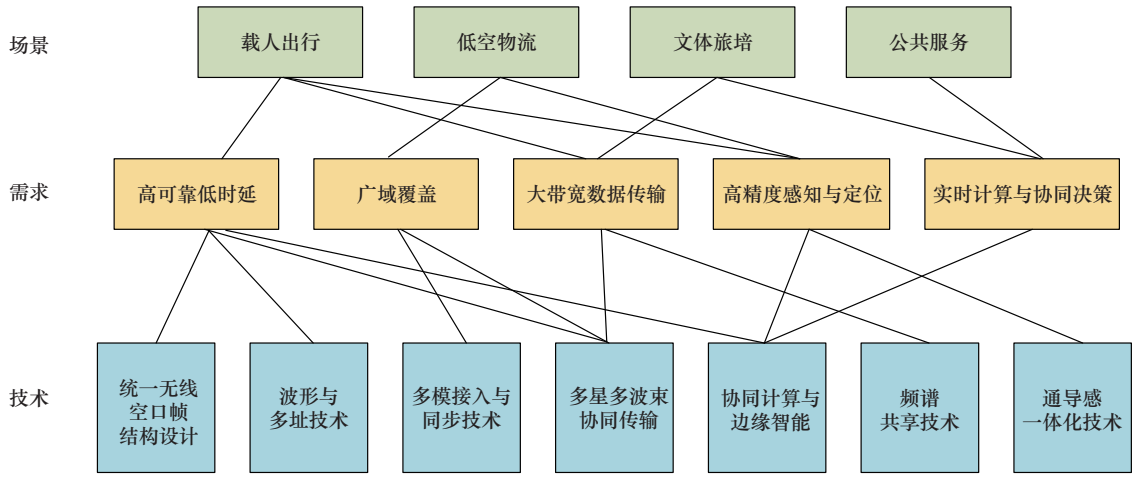


图 2　场景 – 需求 – 技术映射关系

性，引入灵活上下行调度、多时隙调度及时频补偿机制，以增强系统对高时延与高动态场景的适应能力。星地融合统一帧结构如图 3 所示，统一帧结构技术通过灵活的时频组织实现不同链路的资源映射与协同传输。

该技术能够为星地异构网络资源协同调度提供统一的时频组织基础，有助于降低跨网络切换开销，提升低空飞行器业务连续性及频谱利用效率。

3.2　星地融合的波形与多址技术

6G 新增的泛在连接场景要求网络实现全域立体连续覆盖，而波形作为空口设计的基础，是星地融合的重要内容。卫星波形必须在高速移动场景中具备较强的抗多普勒能力、低峰均比（peak to average power ratio, PAPR）以及高频谱利用率。然而，在星地融合场景下，传统的正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing, OFDM）波形面临诸多挑战：多普勒频移远超子载波间隔，导致出现严重的子载波间干扰；高速运动下信道变化速度远高于信道估计导频的更新速度，信道估计开销庞大；同时，其 PAPR 较高，对频率偏移和相位噪声十分敏感。这些缺陷使 OFDM 难以适用于高速星地环境。为此，当前研究聚焦于两类技术——基于滤波器的调制波形和基于变换域的调制波形。

以正交时频空间（orthogonal time frequency space, OTFS）技术为例，OTFS 技术可视为码分多址与 OFDM 的泛化形式，它将时频域（time-frequency, TF）上的时变

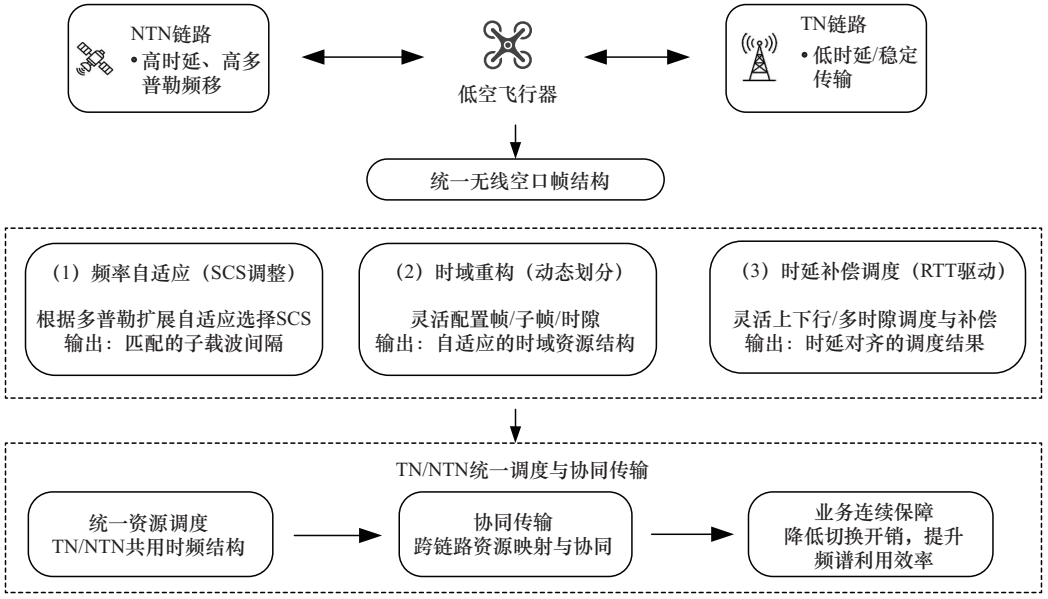


图 3　星地融合统一帧结构

多径衰落信道转换为时延—多普勒（delay-Doppler, DD）域中的二维准静态信道，该域直接反映物理散射体的距离（时延）和相对速度（多普勒频移）。在高速移动场景下，该域的信道响应呈现准静态、稀疏特性，可显著提升系统稳定性。

即便卫星速度增大，OTFS仍能保持频谱效率基本不变，凸显其在高速移动场景下优异的鲁棒性。但OTFS系统需要进行DD-TF域变换，高信道维度的计算量大，同时分数多普勒效应也会破坏信道稀疏性假设。

除OTFS外，离散傅里叶变换（discrete Fourier transform, DFT）扩展OFDM（DFT-s-OFDM）、广义频分复用（generalized frequency division multiplexing, GFDM）、滤波器组多载波（filter bank multicarrier, FBMC）也被提议为候选的卫星波形[20]。其中，DFT-s-OFDM在OFDM进行逆快速傅里叶变换（inverse fast Fourier transform, IFFT）前增加了DFT预编码，使得最终生成的时域信号具备单载波特性，大幅降低了PAPR；GFDM以子块为单位传输，对每个子载波的符号单独做循环脉冲成型滤波，大幅降低带外功率；FBMC无须插入循环前缀，通过由并行子带滤波器组成的滤波器组，替代OFDM的矩形窗函数，对每个子载波单独滤波，抑制带外功率泄漏。表4展示了候选卫星波形对比，标红的部分为波形的核心特征。

3.3　星地融合的多模接入与同步技术

在星地融合低空场景中，飞行器需要在TN与NTN之间进行动态接入，因此面临高传播时延、频繁链路切换以及显著多普勒频移等问题。针对上述挑战，现有研究提出了多连接接入、跨网络协同及移动性增强等技术路线。其中，多连接接入能够同时利用地面与卫星网络资源，在高速移动和高业务连续性场景下具有更好的适应性[8]。随着3GPP Release 17/18持续推进NTN增强，星地协同接入与同步已成为重要研究方向。结合低空智联场景特点，本文重点分析多模接入与同步技术。

该技术从接入与同步两方面进行协同设计：针对接入，基于链路质量测量与策略控制实现多网络动态选择及多连接接入；针对同步，现有方案包括GNSS辅助同步和NTN增强无线同步等技术路线，其中基于时间提前量（timing advance, TA）扩展与多普勒预补偿的无线同步机制能够更好地适应NTN高时延、高多普勒特性，这也是3GPP NTN重点研究的同步增强方案。星地融合多模接入与同步技术示意如图4所示。由图4可知，多模接入与同步技术通过联合补偿实现跨网络稳定连接。

该技术能够显著提升接入成功率与切换稳定性，降低同步误差与链路失配风险，从而保障低空场景下通信的高可靠性与连续性。

3.4　星地协同的多星多波束传输技术

在6G星地融合低空应用场景中，LEO星座密集部署与低空飞行器广域机动特性加剧了波束间同频干扰问题。因此，面向载人出行与无人机物流对通信连续性等方面的严苛需求，须引入多星多波束协同传输技术[8]。星地协同的多星多波束传输技术结构如图5所示。

多星协同处理：在透明转发模式下，地面信关站依据卫星实时轨道与用户位置信息统一调度多波束；在再

表4　候选卫星波形对比

技术	高多普勒鲁棒性	PAPR	复杂度	频谱效率	其他特征	技术成熟度	典型场景
OTFS	极强	中	高	高	天然支持ISAC，可直接提取距离、速度参数	实验室阶段	高动态LEO链路
DFT-s-OFDM	中	极低	中	中	可直接兼容现有5G体制，终端开销小	5G商用落地	卫星上行功率受限链路
GFDM	中	较低	高	高	子载波参数可灵活配置，CP开销远低于OFDM	预研阶段	频谱碎片化星间链路
FBMC	较弱	中	极高	极高	无须循环前缀，抗邻道干扰能力强	预研阶段	星地异构系统的频谱共存

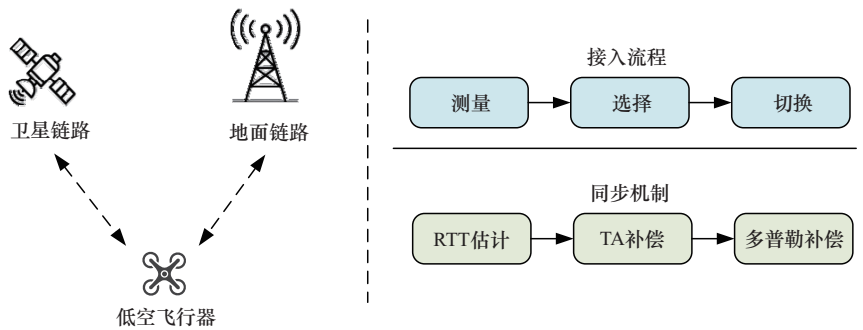


图4　星地融合多模接入与同步技术示意

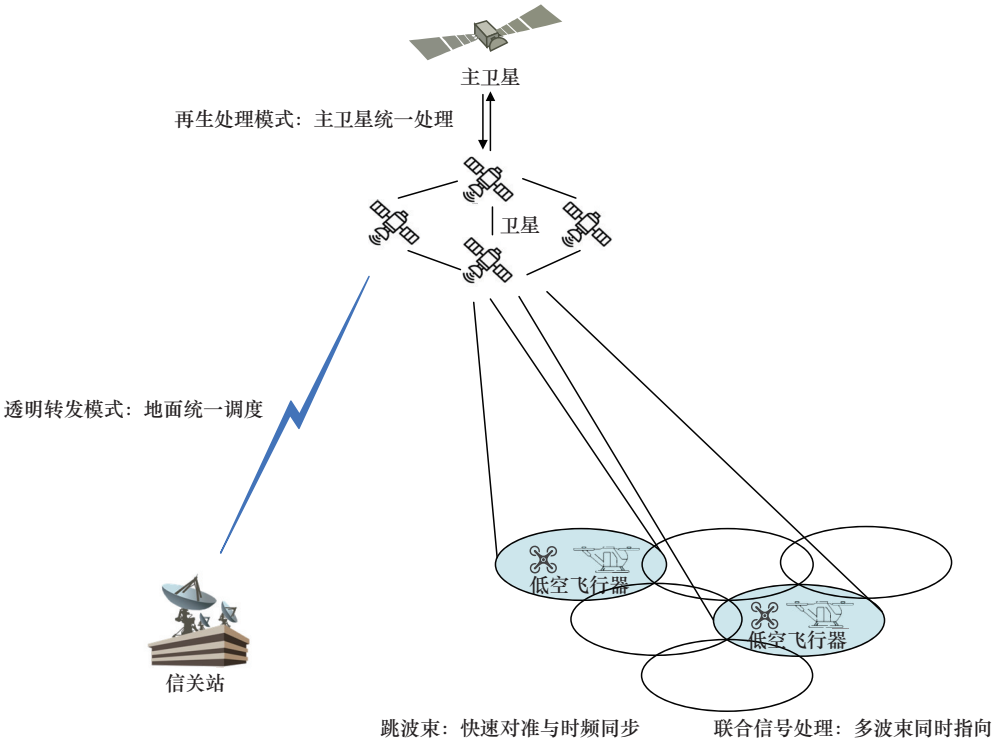


图 5　星地协同的多星多波束传输技术结构

生处理模式下，星座内设主卫星，收集全局状态与用户分布信息，经统一决策后通过星间链路分发指令。

多波束协同传输：在跳波束模式下，终端须具备突发波束快速对准与时频同步能力，系统按需激活波束资源，既降低卫星功耗又减少相邻波束信号交叠；在联合信号处理模式下，终端支持多波束独立指向，能够同时生成多个不同方向的波束。

该技术通过多星同步与多波束协同传输，有效抑制波束间干扰，提升频谱效率和链路可靠性，并为低空飞行器在偏远盲区与城市密集区提供连续、稳定的通信保障。

3.5　星地协同计算与边缘智能技术

在星地协同计算中，LEO 星座每天产生 TB 级的遥感和通信数据。卫星终端将计算卸载到地面云进行处理的传统模式，会引发高时延、星地链路带宽浪费和重复性流量传输问题，难以满足目标跟踪、应急救援等应用的实时响应要求。

边缘智能技术“云－边－端”分层架构如图 6 所示。边缘智能技术通过“云－边－端”3 层协同的分层架构将数据处理和模型推理任务从地面数据中心延伸至卫星边缘，解决了传统模式传输时延高、回传数据量大等核心问题。低空智联的主要任务包括无人机视频回传、目标检测、航路规划、避障决策、模型推理、任务卸载、计算迁移等，这些任务都可利用边缘智能技术优化时延。以无人机任务卸载流程结合边缘智能技术为例，构建“机载边缘－地面边缘－星载边缘－云中心”的动态卸载链路。

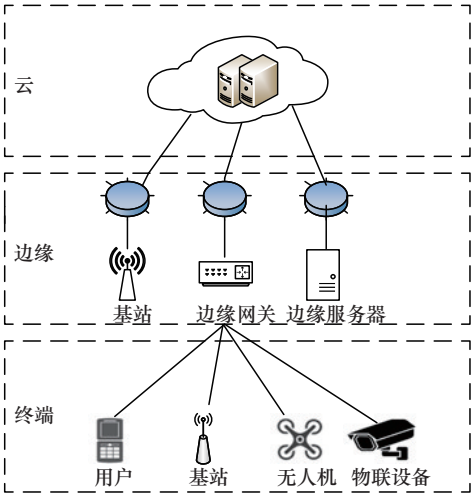


图 6　边缘智能技术“云－边－端”分层架构

机载嵌入式边缘单元对当前任务做复杂度分级，将强实时、小算力的任务留在本地处理。当任务算力需求

超过机载单元阈值时，触发向外卸载的决策流程；当本地算力无法满足任务需求时，系统会扫描当前空域覆盖范围内的地面基站、城市低空管理平台边缘节点运行状态，将任务卸载到附近可用的地面边缘节点，依托地面充足的算力完成任务，结果通过低时延空口链路回传到无人机；当无人机进入TN覆盖盲区或地面边缘节点流量拥塞、算力不足时，系统会将任务卸载到可用的星载边缘，利用LEO卫星的星上算力处理任务，不需要把原始数据下传到地面运算，避免了高额的星地链路传输时延；当任务属于跨周期飞行数据归档分析、低空交通态势统计等非实时、超大算力需求的类型时，系统将边缘节点预处理后的中间特征数据而非原始数据，回传到地面云中心，依托超算集群完成全局级深度计算。

该4阶卸载机制的智能决策逻辑由链路时延、上行速率、星载算力、队列负载、任务截止期、模型缓存状态等核心变量驱动。其中，链路时延表示实时测量的无人机到地面边缘的空口传输时延、无人机到LEO卫星的链路时延、星载节点到地面的回传时延，作为强实时任务卸载的高优先级判定指标。上行速率表示动态检测无人机可用的上行带宽、通信的实时传输速率，如4K超高清视频回传优先选择上行速率高且稳定的链路传输，避免数据分片拥塞导致任务超时。星载算力表示实时同步可用LEO卫星的剩余算力，当多颗卫星同时覆盖同一空域，优先选择算力剩余量高的星载节点卸载任务，防止星载节点过载导致处理时延陡增。队列负载表示同步两类边缘节点的当前任务队列长度、平均等待时长，选择空闲节点分流卸载任务。任务截止期表示不同的任务设置差异化的硬时间约束，相当于给任务划分优先级。模型缓存状态表示实时统计全层级边缘节点的人工智能模型缓存清单，若某节点已预加载对应任务的相关模型，优先选择该节点承载任务。

边缘智能技术的应用可极大减少任务响应时延，节省了大量稀缺的星地链路带宽，实现了低空全场景下算力资源的无缝调度和智能匹配。

3.6　星地融合的频谱共享技术

低空应用的规模化发展对频谱资源提出了较高的需求，而星地融合网络中卫星与地面系统长期采用静态频谱划分，导致资源利用率低下。面向6G低空场景，须突破传统的频谱划分模式，构建星地动态频谱共享机制[5]。

由于低空飞行器在不同地理环境下对卫星链路的需求不同，星地频谱共享通过频谱感知技术或完善的数据库等，在网络控制中心以空间隔离、时间调度、功率控制等技术，实现频谱在时间、空间和业务间的动态复用[21]。星地频谱共享技术示意如图7所示。星地融合的频谱共享技术可以在低空物流无人机穿越地

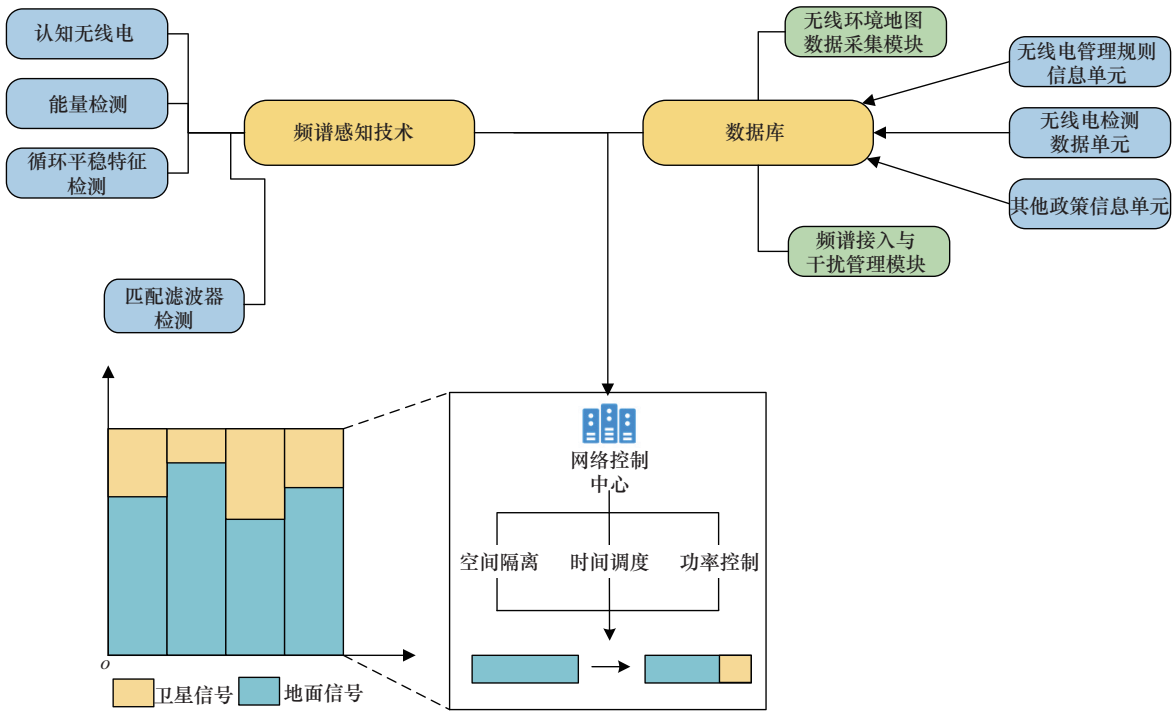


图7　星地频谱共享技术示意

面基站覆盖盲区时，优先将卫星频段动态分配给控制链路，保障超视距飞行安全；在城市密集区，通过星地协同感知飞行器位置与业务负载，半静态调整频谱分配方案，避免频谱拥塞，保证传输速率。同时，网络控制中心可加载多种智能算法，结合低空飞行计划提前计算频谱资源，在满足载人出行高可靠性需求的同时提升频谱利用效率。

3.7　星地融合的通导感一体化设计

在低空应用场景中，高精度定位与环境感知是保障飞行安全的关键能力。传统GNSS在遮挡及干扰环境下性能受限，而独立感知系统难以实现广域连续覆盖。当前通信、导航与感知融合已形成ISAC、通导融合及通导感一体化等不同技术路线[5,8]。其中，通导感一体化能够充分发挥星地融合的优势。由于网络具备广域覆盖、多源信息融合等特性，更适用于低空复杂场景。

通导感一体化通过信号与资源复用实现多功能协同。在TN覆盖区域，可复用OFDM波形实现通信与环境感知一体化；在高速星地NTN链路中，可结合OTFS等抗多普勒波形保障高速通信，并支撑定位信息可靠传输。针对不同场景需求，通信波形的选择存在差异。星地融合低空场景中典型技术方案的适用边界见表5。

通过融合GNSS、卫星测距及地面基站定位信息，实现多源联合定位，并通过星地协同机制实现广域覆盖与高精度能力互补。星地融合通导感一体化示意如图8所示，通信信号通过功能复用实现“通信—定位—感知”一体化处理。

该技术能够提升复杂环境下的定位精度与环境感知能力，实现资源复用与系统开销降低，为无人机监管与应急通信等提供关键支撑。

4　结束语

本文系统分析了6G星地融合网络在载人出行、低空物流、文体旅培、公共服务这4类场景下的低空应用，并从中提炼出覆盖、定位、通信、感知、计算协同5个维度的具体技术需求。基于此，探讨了星地融合统一帧结构、波形与多址、多模接入与同步、多星多波束协同传输、

表5　星地融合低空场景中典型技术方案的适用边界

功能需求	典型技术方案	主要适用场景	说明
通信与环境感知	OFDM通信波形复用(ISAC)	TN覆盖区域、低速移动	通信波形成熟，可直接复用实现通导感一体化
高速通信与定位信息传输	OTFS	高速NTN链路	抗多普勒能力强，更适应高速星地信道

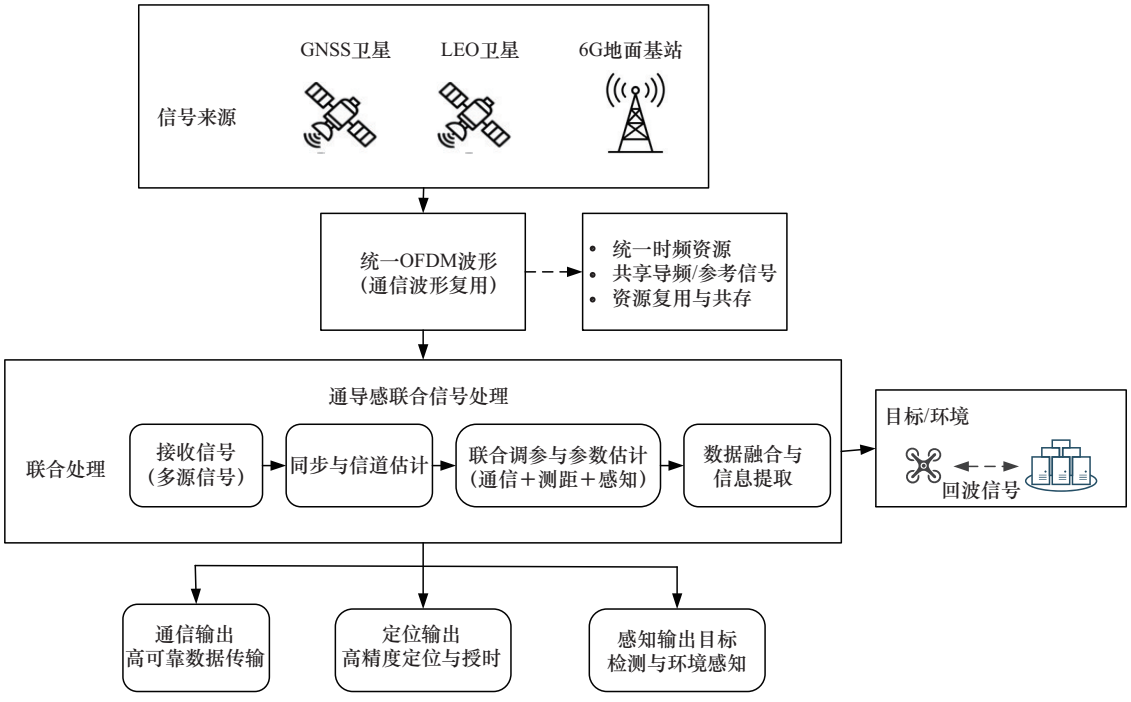


图8　星地融合通导感一体化示意

计算与边缘智能、频谱共享、通导感一体化等关键技术方向，归纳总结了“场景—需求—技术”的映射框架，为6G星地融合网络服务低空智联应用提供指导。

面向未来，低空智联在网络覆盖上有望实现空天地一体化覆盖，构建“LEO卫星星座—浮空平台—地面基站—机载终端”4级立体覆盖架构。从产业政策看，相关文件提出到2027年全国低空公共航路地面移动通信网络覆盖率不低于90%[2]。在应用场景上，低空智联有望成为低空经济的核心基础设施，从时延、接入终端数、通信速率等方面推动4类低空场景升级演进。6G星地融合的低空智联仍面临许多挑战，包括星地异构网络的协同、频谱和轨道资源的稀缺、星地链路的稳定性、终端性能和功耗等，后续研究需要在标准体系、频谱抗干扰和共享、智能算法、高性能低功耗终端等方面持续推进。

参考文献

[1] 低空智能网联技术委员会. 低空智能网联体系发展路径及趋势[R]. 2025.
Low-Altitude Intelligent Connected Technology Committee. Development path and trend of low-altitude intelligent connected system[R]. 2025.

[2] 工业和信息化部. 工业和信息化部等五部门办公厅(秘书局、综合局、综合司)关于加强信息通信业能力建设 支撑低空基础设施发展的实施意见[Z]. 2026.
Ministry of Industry and Information Technology. General offices (secretariat, general affairs bureau, general department) of the ministry of industry and information technology and four other departments. Implementation opinions on strengthening the capacity building of the information and communications industry to support the development of low-altitude infrastructure[Z]. 2026.

[3] 张学军, 刘法旺, 张祖耀, 等. 低空智能网联体系[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(6): 1793-1815.
Zhang X J, Liu F W, Zhang Z Y, et al. Overview of low-altitude intelligent networked system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(6): 1793-1815.

[4] 中信科移动通信技术股份有限公司. 低空智联网场景和关键技术白皮书: 星地融合助力数字低空发展[R]. 2025.
CICT Mobile Communications Technology Company Limited. White paper on scenarios and key technologies of low-altitude intelligent connected network: satellite-terrestrial integration empowers digital low-altitude development[R]. 2025.

[5] 缪德山, 邓凌越, 孙建成, 等. 6G星地融合无线网络及关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 42-49.
Miao D S, Deng L Y, Sun J C, et al. Terrestrial and satellite network integration based 6G system and its key technologies[J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(4): 42-49.

[6] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
Chen S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.

[7] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于优化业务准入促进卫星通信产业发展的指导意见[Z]. 2025.
Ministry of Industry and Information Technology. Guiding opinions of the Ministry of Industry and Information Technology on optimizing business access to promote the development of satellite communication industry[Z]. 2025.

[8] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1177-1214.
Chen S Z, Sun S H, Kang S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(5): 1177-1214.

[9] 康绍莉, 缪德山, 索士强, 等. 面向6G的空天地一体化系统设计和关键技术[J]. 信息通信技术与政策, 2022, 48(9): 18-26.
Kang S L, Miao D S, Suo S Q, et al. System design and key technologies for the integrated air-space-terrestrial communication toward 6G[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022, 48(9): 18-26.

[10] 闫志宇, 宋国超, 周吉喆. 6G天地一体化标准发展探究[J]. 移动通信, 2026, 50(3): 2-7.
Yan Z Y, Song G C, Zhou J Z. Study on the standardization evolution of integrated space-terrestrial networks toward 6G[J]. Mobile Communications, 2026, 50(3): 2-7.

[11] 3GPP. Study on 6G use cases and service requirements (V1.1.0): TR 22.870[R].2025.

[12] 交通运输部办公厅. 交通运输部办公厅关于印发低空交通运输应用场景典型案例名单的通知[Z]. 2025.
General Office of the Ministry of Transport. Notice of the general office of the ministry of transport on printing and distributing the list of typical cases of low-altitude transportation application scenarios[Z]. 2025.

[13] IMT-2030(6G)推进组. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
IMT-2030(6G) Promotion Group. White paper on 6G network architecture vision and key technology prospects[R]. 2021.

[14] Gao S J, Yan J, Huang P Y, et al. Integrated sensing, communication, and computation for low-altitude networks towards seamless connectivity and connected intelligence[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2026, 9(3): 63-71.

[15] 中国民用航空局.国家空域基础分类方法[Z]. 2023.
Civil Aviation Administration of China. National airspace basic classification method[Z]. 2023.

[16] 3GPP. Service requirements for the 5G system (V20.6.0): TS 22.261[R]. 2026.

[17] Mach P, Becvar Z. Mobile edge computing: a survey on architecture and computation offloading[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1628-1656.

[18] Saad W, Bennis M, Chen M Z. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 134-142.

[19] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (V16.0.0): TR 38.821[R]. 2020.

[20] 罗潇景.基于滤波器组的多载波调制系统的研究及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
Luo X J. Research and implementation of optimization algorithm for modulation based on filter bank multicarrier(FBMC) [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

[21] 陈山枝. 星地融合移动通信系统与关键技术: 从 5G NTN 到 6G 的卫星互联网发展[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2024.
Chen S Z. Satellite-terrestrial integrated mobile communication system and key technologies: from 5G NTN to 6G satellite internet development[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2024.

[作者简介]



康绍莉（1974− ），女，中信科移动通信技术股份有限公司系统研究高级技术专家，无线移动通信全国重点实验室星地融合学术带头人、教授级高级工程师，主要研究方向为多址接入、频谱共享、卫星通信及6G等。

秦海超（1977− ），男，中信科移动通信技术股份有限公司创新中心总体部经理，长期从事移动通信技术的验证工作，主要研究方向为5G及6G等。

王可（1977− ），男，中信科移动通信技术股份有限公司创新中心总经理，长期从事移动通信技术的国际国内标准制定工作，主要研究方向为5G及6G等。

冯云九（2002− ），男，无线移动通信全国重点实验室硕士生，主要研究方向为低空智联网。

王丹（2002− ），女，无线移动通信全国重点实验室硕士生，主要研究方向为低空智联网。

杨祺欣（2002− ），男，无线移动通信全国重点实验室硕士生，主要研究方向为低空智联网。