

6G 环境下的 IoT 技术发展综述



赵杭生^{1,*}, 王琴¹, 陈春霖¹, 张晖¹, 施渊籍², 卢宁宁³

¹南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏南京 210003

²中科南京移动通信与计算创新研究院, 江苏南京 210008

³中国电科网络通信研究院, 河北石家庄 050002

摘要: 针对第六代移动通信 (6G) 推动物联网 (IoT) 迈入“通感算一体化”与“AI 原生”新变革的背景, 本文系统化、全景式地构建了 6G 环境下新兴物联网技术的演进路线与创新范式。文章的核心贡献在于打破了传统物联网“单纯连接”的局限, 从“频谱革命、原生智能、多维融合”三大维度深刻重塑了未来物联网的体系架构, 并首次系统性提炼出面向 6G 的空天地一体、分布式网络等六大核心特征。在工作层面, 本文不仅深度剖析了无源物联网及人工智能物联网 (AIoT) 的架构革新与自适应闭环管理机制, 更前瞻性地聚焦于卫星与非地面网络 (NTN) 物联网中“时变网络建模”及“时间确定性路由”等核心学术痛点, 并拓展演进至面向星际开发的未来空间物联网 (IoST) 愿景。本文通过三位一体的路径规划, 为海量、泛在、绿色的下一代物联网规模化部署提供了高价值的技术路线图与理论启示。

关键词: 第六代移动通信; 卫星通信; 物联网; 非地面网络

DOI: 10.57237/j.cst.2026.03.002

A Review of the Developments in IoT Technologies Under 6G

Zhao Hangsheng^{1,*}, Wang Qin¹, Chen Chunlin¹, Zhang Hui¹, Shi Yuanji², Lu Ningning³

¹School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

²Zhongke Nanjing Mobile Communication & Computing Innovation Institute, Nanjing 210008, China

³Network Communication Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050002, China

Abstract: In response to the paradigm shift of the Internet of Things (IoT) towards sensing-communication-computing integration and AI-native design driven by 6G, this paper systematically establishes an evolution roadmap and innovation framework for emerging IoT technologies. The core contribution lies in breaking the limitation of "pure connectivity" in traditional IoT and reshaping the future network architecture from three dimensions: spectrum revolution, native intelligence, and multi-dimensional fusion. It uniquely distills six core technical characteristics for 6G-driven IoT, including space-air-ground integration and distributed networking. Methodologically, the work deeply analyzes the architectural innovation and closed-loop management of Passive IoT (P-IoT) and AIoT, prioritizes technical pain points

基金项目: 国家自然科学基金 (92367302); 江苏省基础研究计划 (自然科学基金); 前沿引领技术基础研究专项 (BK20212001); 江苏省前沿技术研发计划 (BF2025059); 南京市重大科技专项 (202405025).

*通信作者: 赵杭生, zhaohs@njupt.edu.cn

收稿日期: 2026-05-05; 接受日期: 2026-06-10; 在线出版日期: 2026-07-07

<http://www.computscitech.com>

such as "time-varying network representation" and "time-deterministic routing" in satellite and Non-Terrestrial Network (NTN) IoT, and forward-lookingly expands to the Internet of Space Things (IoST) for interplanetary exploration. By charting a coherent technical pathway, this review provides a high-value theoretical foundation and deployment blueprint for massive, ubiquitous, and green next-generation IoT systems.

Keywords: 6G Mobile Communication; Satellite Communications; Internet of Things; Non-Terrestrial Network IoT

1 引言

随着第六代移动通信技术（6th Generation Mobile Communication System, 6G）研发的加速，太赫兹（THz）频段、亚毫秒级时延以及可重构智能表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）等核心技术正

推动物联网（Internet of Things, IoT）进入新一轮变革。通过通感算一体化架构与 AI 原生设计的深度融合，6G 有望突破传统物联网在连接规模、实时性与智能化上的瓶颈。



图 1 未来 6G 部署场景与架构

依据 ITU-R M. 2083 建议书, 6G 的峰值速率可达 1Tbps、空口时延低至 0.1ms, 连接密度可达 10^7 终端/平方公里。这些性能指标直接契合物联网对海量接入、超高可靠性、以及实时智能响应的核心需求, 并将催生包括智能工业互联网与全息触觉通信在内的全新应用场景 (见图 1) [1]。

目前有多项通信技术运用于 IoT 领域, 如图 2 所示[2], 主要有广域网 (WAN), 如 4G、5G; 局域网 (LAN), 如 WiFi; 个域网 (PAN), 如蓝牙, ZigBee, RFID, NFC; 低功耗广域网 (LPWAN), 如 LoRa, SigFox, NB-IoT; 卫星通信网 (SCN)。

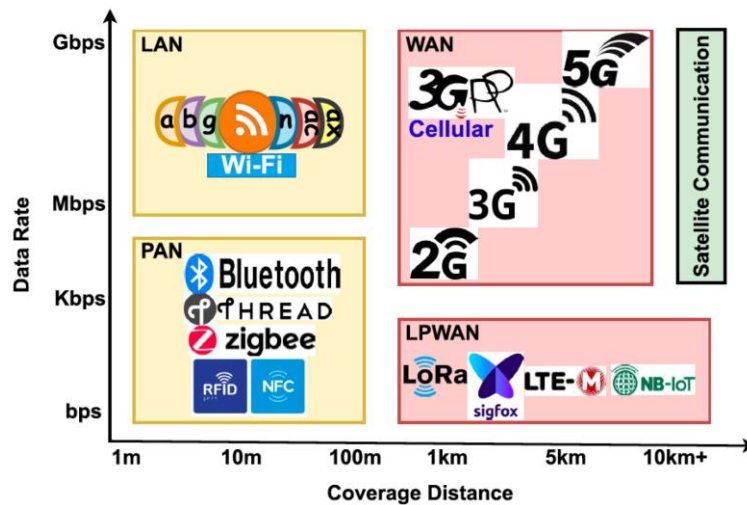


图 2 无线网与覆盖距离分布图

6G 将通过三大创新维度重塑物联网范式：

(1) 频谱革命：

引入 0.1-10 THz 高频段, 使单链路容量显著提升, 可满足工业互联网中 4K/8K 机器视觉的实时回传需求; 同时, 基于可重构智能表面 RIS 的可编程电磁环境有助于降低穿墙损耗。

(2) 原生智能：

在协议栈中集成基于联邦学习的分布式 AI 框架, 使物联网终端具备协同推理与自适应优化能力, 从而使 6G 的用户侧时延较 5G 降低一个数量级, 以满足对极致实时性的根本需求[3]。

(3) 多维融合：

通感算一体化设计打破传统功能边界, 毫米波雷达通信 (RadCom) 技术同步完成环境感知与数据传输, 使无人机物流网络达到厘米级定位精度和百兆级数据速率。

本文第 1 章讨论 6G 驱动下的相关技术研究发展情况; 第 2 章至第 6 章分别讨论无源物联网, 人工智能物联网, 天地一体化物联网, 卫星物联网和非地面网络物联网, 空间物联网等技术的发展; 最后第 7 章为结论与展望。

2 在 6G 驱动下的物联网总体趋势

6G 移动通信技术作为现代通信领域的前沿, 旨在通过人-机-物的深度互联与协同支撑智能化生产与生活, 在 6G 架构以及 IMT-2030 [4]等研究中可以看出, 6G 网络将以空天地一体化网络、分布式网络、通感算一体化、数字孪生、智能内生以及端网云协同六项技术为核心特征, 推动物联网的进一步发展[5, 6]。

面向 6G 的 SAGIN (Space Air Ground Integrated Network) 将空、天、地三者深度融合, 在协议、网络等方面协同优化, 以应对融合网络的多层立体、动态变化等新型技术挑战。关键技术包括统一网络架构、统一空口协议、频率共享与协调管理、星地融合组网等。

在面向未来 6G 的沉浸式通信、超大规模链接等应用场景时, 用户和业务种类、协议数量、网络功能以及连接数量等都将大幅增长, 分布式网络也将成为必然。其关键在于实现多样接入模式融合、连接按需分布、计算多方协同、数据按需编排以及去中心化信任机制, 从而保障分布式子网间的业务互连, 定制子网服务, 实现跨营运商协同, 推动 IoT 的建-用分离。

通感算一体化作为 6G 网络中的基础能力层与核心使能平台,指的是在同一体系中联合通信、感知与计算,统一波形、资源和编排,为网络编排、服务保障提供统一的接口,支撑意图驱动与闭环自优化,降低时延、提升鲁棒性。可为 IoT 提供可感知连接、厘米级定位与边缘计算能力,实现低功耗的海量接入[7, 8]。

原生 AI(AI-native)就是将 AI 作为系统原生能力,贯穿终端、网络与边缘三层,并实现系统的自治优化与协同演进。其与移动通信耦合,一方面推动 6G 迈向自治网络,提升运营商的工作效率;另一方面以人工智能即服务(AI as a Service, AlaaS)外化模型与算力,满足大众对 AI 的性能、隐私和个性化的需求。面向 6G 的演进路径将以分布式网络、意图驱动网络为基点,实现网络内生智能能力,提供灵活、高效、泛在的 6G 智能服务体系;同时促成 AI-native IoT 及其终端的开发[9]。

6G 下的数字孪生把通感算一体化、AI 原生网络等融合到“观测,建模,仿真,决策,下发控制,再观测”这一闭环控制链中,提高了其实时性、可信度与可扩展性,推动着物联网在覆盖范围、实时性、能效、可验证性上实现跃迁[10-12]。

面向 6G,网络将由“单纯连接”演进为连接-计算-数据的一体化平台,重塑传统客户端—服务器范式。端网协同包含两个机制,其一,随链路、移动性与拓扑变化进行任务分割与资源重编,并在端、边、网之间动态迁移实例,依赖连接-计算-数据联合编排;其二,终端侧依据算力与网络态势主动上移重载任务,网络侧择优部署并提供“随用随取、用后即释”的调度计量,以突破终端算力与能耗瓶颈,提升端到端效能。网云协同把 6G 网络扩展为依托内生算力的移动应用分发网络,云服务提供商或应用提供商仅给出策略与目标,由网络按请求与位置自动完成实例放置、服务发现与 QoS 保障,在满足个性化需求的同时最大化资源利用率。由此形成的 6G 端-网-云一体,为大规模、高密度的 IoT 部署提供技术支撑。

基于以上几点,可以看出 6G 将对 IoT 起到赋能作用,主要体现在如下方面:

(1)太赫兹通信与极高频谱利用

6G 引入太赫兹(THz)频段,单用户速率预计可达 1Tbps,为智慧园区、沉浸式 XR 等高密度 IoT 场景提供了高吞吐、低延迟链路。当前研究重点在频谱与信道模型、超大规模 MIMO 与低开销波束管理、低功耗 THz 射频与天线-封装协同[13-15]。

(2) RIS 与环境自适应通信

传统无线通信受限于环境阻挡和多径衰落, RIS 通过可编程调控主动重塑信道,有效提升信噪比并扩大覆盖范围,适配海量 IoT 终端接入,实现延长终端续航,增强定位精度。相关研究关注于 RIS 的大规模部署、实时环境感知与控制算法、与 MIMO、THz 通信的协同优化[16, 17]。

(3)人工智能原生网络

人工智能原生网络(AI-Native Networking)指将 AI 作为内生能力嵌入 6G 的感知-连接-计算-安全全栈,实现意图驱动,其可支持智能资源分配、自适应网络切片、动态流量调度和异常检测,显著增强 IoT 网络的自组织、自优化和自愈能力。当前研究聚焦于分布式 AI 架构、边缘智能、AI 驱动的协议与控制以及联邦学习在 IoT 安全中的应用[18-20]。

(4)天地一体与多维网络

6G 网络下将构建天地一体化架构,融合地面蜂窝、低轨卫星、高空平台与无人机通信,实现全球无缝覆盖,面向偏远、海洋与灾害应急等 IoT 场景提供广域接入。同时,多址接入、大规模多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)与动态频谱管理等关键技术将支撑大规模终端的高效并发接入与协同服务保障[21-23]。

(5)超低时延与高可靠性

6G 目标端到端时延低于 0.1ms,网络可靠性提高,满足自动驾驶、远程医疗、远程操控与触觉等要求低时延的 IoT 应用。新型网络架构、协议优化和本地智能决策等是实现超低时延的关键技术[24]。

(6)绿色通信与能效提升

面向海量 IoT 终端的 6G 网络以极低能耗和绿色通信为准则,融合无线能量传输、能量采集等跨层协同,并以 AI 驱动的能效优化与全生命周期能耗建模支撑长寿命、低维护部署[25]。

3 无源物联网

3.1 无源物联网的革新变迁

无源物联网(P-IoT)以反向散射与能量采集为起点,逐步发展到利用 Wi-Fi、蜂窝、广播等环境载波进行通信,显著降低部署成本;结合 MIMO、OFDM 等体制,实现低功耗与高并发的可运营化。尽管通信距离、并发接入与速率仍是瓶颈,在 6G 的赋能作用下,P-IoT 正迎来新的发展机遇与关键突破窗口,网络从“单纯连接”走向“连-算-数”一体化,引入 RIS 与毫米波、太赫

兹宽带反向散射, 叠加 AI-native 的唤醒与自适应调度, 使应用能够按需感知、就近上报与弹性协同。通过“高频宽带、智能表层增益、计算协同”的三位一体路径, P-IoT 有望在保证能效与时延的同时, 达成绿色、长寿命、低维护的规模化部署[24-26]。

3.2 6G 网络下 P-IoT 面临的挑战

(1) 通信可靠性与链路不平衡

P-IoT 设备依赖反射环境中的射频信号, 但反射信号非常微弱时, 会导致通信距离受限且极易受环境变化的影响。此外, 上行链路远比下行链路弱, 会造成严重的链路不平衡[27]。

(2) 网络架构与资源管理挑战

当网络中存在海量无源设备时, 传统的蜂窝网络接入和调度机制会带来巨大的信令开销, 导致“信令风暴”。同时, P-IoT 通信需要与现有的蜂窝通信、D2D 通信等共享频谱资源, 可能产生严重干扰[28]。

(3) 能源采集与协议修订

设备端的能量采集效率仍需大幅提升, 以确保在复杂环境下稳定工作。同时, 将 P-IoT 技术无缝集成到现有的蜂窝网络基础设施中, 需要对网络设备和协议栈进行修改, 面临标准化和兼容性难题[29]。

(4) 安全与隐私挑战

由于计算能力和能源极度受限, P-IoT 设备无法运行复杂的加密算法, 使其容易受到窃听、仿冒和重放攻击。

3.3 6G 网络下 P-IoT 的关键技术

(1) 反向散射通信

反向散射通信 (Ambient backscatter communication, AmBC) 终端不自发射, 仅借助负载调制把环境射频“反弹”回去承载信息。面向 6G, AmBC 与太赫兹通信及 MIMO, RIS 等技术结合, 可显著提升通信距离、数据速率与网络连接密度, 为构建零能耗、超大规模 IoT 提供重要支撑[30, 31]。

(2) 环境能量采集

面向 6G 的 P-IoT 终端依托环境能量自供电, 包括蜂窝/基站射频能, 太阳能与振动能等。得益于 6G 网络下的高密度部署与一系列如无线功率传输 (Wireless Power Transfer, WPT), 无线通信携能 (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT), RIS

辅助供能等新型能量传输技术, 其能量可达性增强, 能量中断概率降低。在端-边-云协同的能量调度下, 无源终端将为大规模普适性连接提供可持续电源路径[32, 33]。

(3) RIS 重塑传播环境

在 6G 环境下, RIS 可以通过动态调控电磁波的相位与幅度, 将传统被动传播环境转变为可编程的智能通信空间。对于无源物联网节点而言, RIS 可在不增加能耗的情况下增强覆盖与连接稳定性, 弥补功率受限设备的通信不足, 从而支持大规模、低功耗的智能感知与数据传输, 为构建高效、可靠、可持续的 6G 物联网提供关键支撑[16, 34]。

(4) 低功耗协议与超大规模接入

为满足无源终端的极低能耗与海量接入需求, 6G 侧重三类机制: ①轻量级控制/唤醒, 以最小化信令与上下文建立开销; ②免授权近无碰撞接入, 融合压缩感知活跃性检测、编码分槽 ALOHA (Coded Slotted ALOHA, CSA) 与迭代干扰抵消, 配合大规模 MIMO 的用户分离, 有望支撑百万级并发; ③短包通信, 在有限码长框架下进行物理层—链路层协同, 可以兼顾能效、可靠性与时延[35, 36]。

(5) AI 赋能的无源终端自适应管理

依托 6G 的网络原生 AI 能力, 可对海量无源终端实施智能识别、动态调度、能量管理与异常检测的闭环优化: 通过多模态感知与表征学习实现鲁棒身份与状态识别; 以预测性资源编排和强化学习算法实现时频、空间的自适应调度; 结合能量采集建模与跨层控制实现供能-通信协同; 并以自监督异常检测保障系统韧性。该范式将形成“感知—决策—执行—反馈”的一体化智能管理框架[37]。

4 人工智能物联网

图 3 是未来 6G 时代 IoT 运用愿景[38]。由图可知 IoT 的基本应用目标是把对象联网并数据化建模, 使其状态可以被感知与计算, 从而实现对设备的监测、控制与优化。

在传统物联网框架上, 融合了云计算、云存储、人工智能, 形成一种新的协同范式, 人工智能 IoT (Artificial Intelligence of Things, AIoT) 通过模型下沉与网络编程, 突破海量数据的采集与分析瓶颈, 提供低时延、高可靠的智能感知与闭环控制。

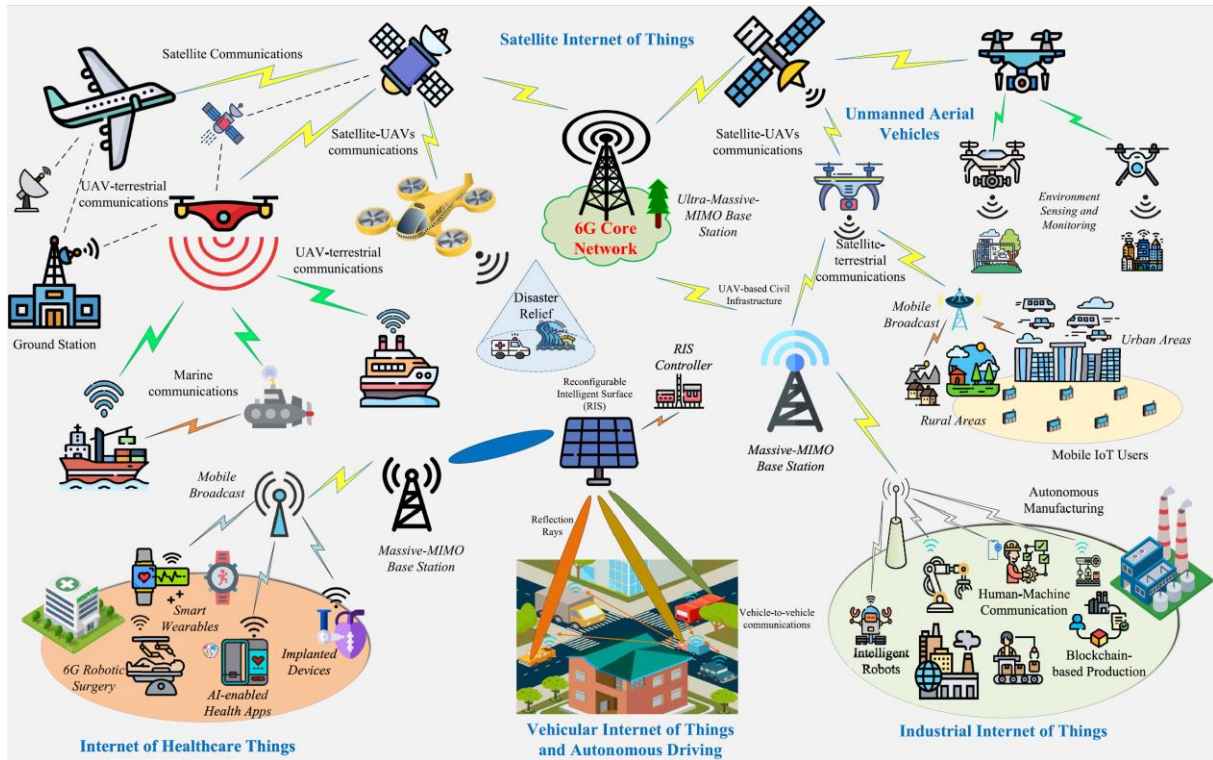


图 3 未来基于 6G 的 IoT 应用示意图

4.1 AIoT 架构模型

AIoT 架构分为：终端层、边缘层、云层[39]。终端层由互联传感器与执行器构成，面向物理世界的感知与控制，并承担轻量本地推理与预处理；边缘层以就近的计算/存储/网络节点

为主体，负责数据汇聚、实时处理与结果下发，承接部分模型推理；云层提供跨域编排与数据治理，执行复杂分析、全局决策与模型训练，并统一管理终端与边缘以实现闭环优化与控制。

图 4 是 ITU-T 给出的 AIoT 的模型[40]，在 IoT 架构中纵向插入了 AI 分析单元，同时在数据层的数据获取环节增加了基于 AI 机制的数据发现和分析功能。

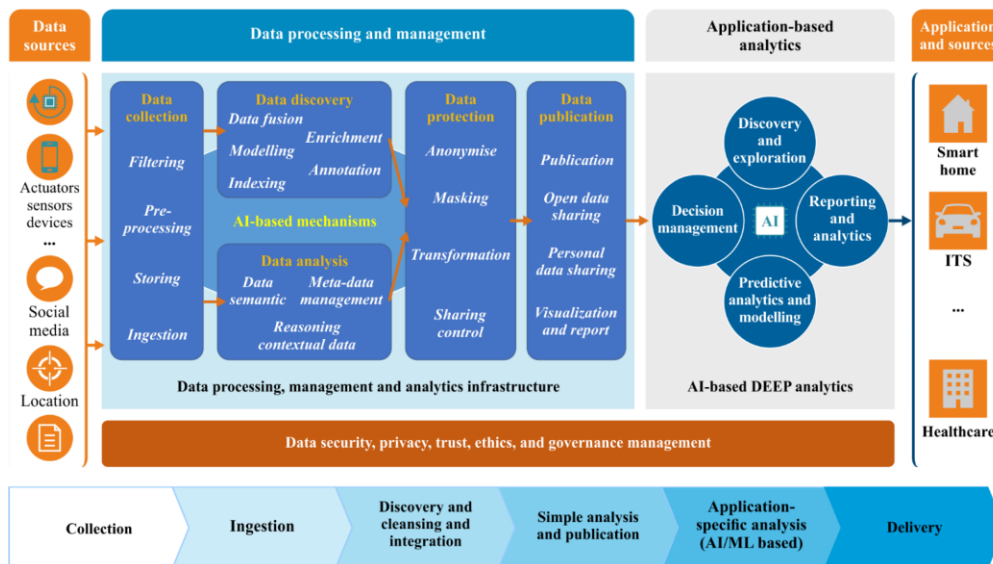


图 4 ITU-T 的 AIoT 模型

4.2 AIoT 的核心能力

(1) 协同架构实现云边端协同

在云、边、端按任务特性动态拆分与迁移，统一编排算力、数据与网络。兼顾时延、可靠性与成本，实现就近实时处理、全局优化与弹性扩缩。

(2) 智能能力升级

模型下沉至边、端，联邦学习在本地协同训练，凭借模型压缩技术降低参数规模与算力开销。在隐私约束下实现低时延、低带宽、低能耗推理，增强现场自适应。

(3) 网络与实时性优化

通过软件定义网络（Software-Defined Network, SDN）集中编排、多接入边缘计算（Multi-access Edge Computing, MEC）就近计算与 5G/6G 端到端切片的资源隔离与优先级控制，提供确定性时延、可靠性与可保障带宽，完成闭环控制，提升服务质量和可靠性。

(4) 数据治理、MLOps 与 AIOps 协同工作

数据治理确保 IoT 产生的海量数据在“采集→存储→共享→使用”全链路上的质量、合规与安全；通过机器学习运维（Machine Learning Operations, MLOps）和智能化 IT 运维（AI for Operations, AIOps）实现对 IoT 平台的观测与自动运维。两者协同把 IoT 从“能连能看”推进到“可信+可控+自愈”的闭环。

(5) 安全与隐私管理

在 AIoT 中，安全与隐私合规构成分层、可验证框架：以零信任为基础，以隐私计算作为支撑，并以端边云的可观测闭环实现合规证明与追溯。

5 天地一体化物联网

5.1 天地一体化

得益于高通量卫星、多波束切换与星间链路等技术，卫星通信的容量与时延特性显著改善；5G 的规模化部署，催生了天地一体化 IoT 管理平台。该平台面向跨境物流、能源监测、远洋航运等场景，提供“卫星 + 蜂窝”的统一开户、策略编排与无缝切换，实现了按需选网与全域可靠回传[41]。

面向 6G，天地一体化 IoT 正由“补盲覆盖”走向云

-边-星一体化的可编程基础设施；ITU-R 发布 IMT-2030 框架为 6G 下的天地一体化 IoT 应用愿景与能力确立了基线[4]。

5.2 多行业赋能

天地融合管理赋能能力主要体现在如下行业。

(1) 油气 IoT

在广域、弱覆盖的油气场景，天地一体化 IoT 采用“蜂窝优先、卫星兜底”的双模接入，并通过统一连接与运营管理平台，实现从井场-管道-站点的连续监测与合规审计。

(2) 低空智能网

地面 5G-A 在高度与地形下的覆盖存在边界，融合卫星链路可为无人机提供超视距控制与全域回传，并在极端情况下提供业务可靠性与连续性。天地一体 IoT 管理平台可以实现设备安全管理，使监管与任务控制在低时延性与高可用性之间取得平衡。

(3) 直连卫星的车联网

面向“永久在线”的车联网需求，基于 3GPP NTN 的终端与双模模组支持蜂窝、卫星端到端协同，天地一体 IoT 管理平台可实现常态依托 5G，边远地区或信号中断时切换至卫星的全球覆盖接入服务，为汽车的产业化奠定规范基础。

6 卫星物联网和非地面网络物联网

6.1 卫星物联网

卫星 IoT 按是否直接与卫星连接，分为非直连型和直连型。

在非直连型架构中，卫星链路仅承担回传，地面 LPWAN 接入层通过卫星回传接入核心网，终端沿原生空口与网关通信。

非直连型卫星 IoT 适合终端密集且小流量、对功耗/成本敏感的场景，其主要特点是低功耗，网络拓扑结构简单，容易部署，方便网络规模升级等。

图 5 所示为一种利用 LoRaWAN 网络的非直接型卫星 IoT 网络结构[42]。

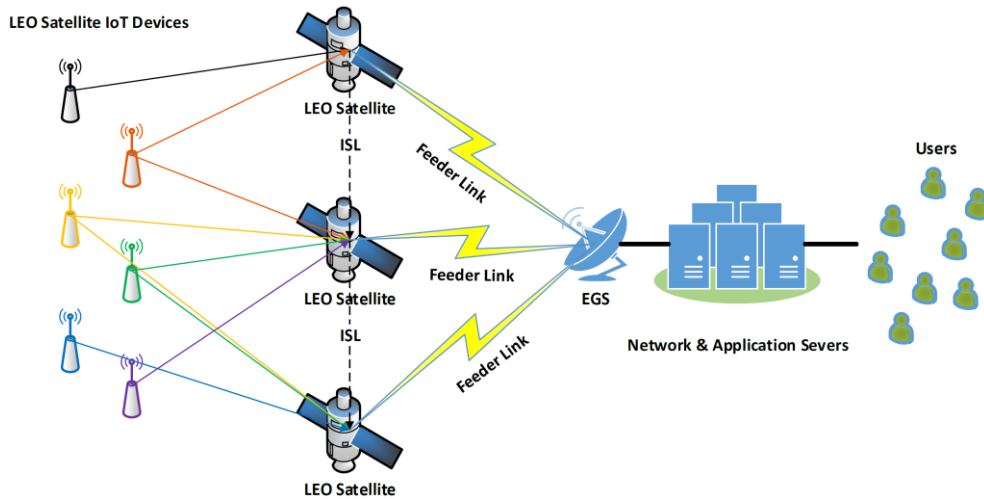


图 5 基于 LoRaWAN 网络的非直接型卫星 IoT 模型

直连型中，卫星直接与 IoT 终端相连，从 IoT 终端获得的数据被传送到地面站附近的服务器，数据在服务器中存储和处理。直连型卫星 IoT 适用于广域分布的传感器网络，具有低成本、低功耗、安全性高等特点。

直连型卫星 IoT 比较适用无地面覆盖或难以部署网关、需全球连续连接的开阔场景，如救灾场合下的快速部署场合，海岛、沙漠等人烟稀少地区的监测点。

图 6 给出了用于航运的直连型卫星 IoT 应用情形[43]。

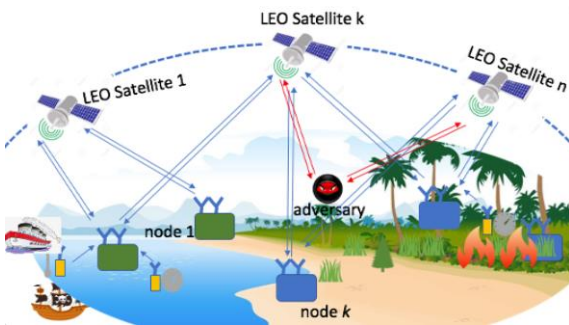


图 6 直连型卫星 IoT 用于航运业务的场景

在卫星轨道类型选择方面，主要取决于 IoT 应用需求，同步轨道（GEO）卫星可以提供较高的覆盖密度和较高的通信速度；中低轨道（LEO/MEO）卫星适用于覆盖面广（比如全球覆盖）和时延要求高的场景。

6.2 非地面网络物联网

为应对地面通信在极端情况下的失效情况，保障感知数据与应急语音连续可用，构建了由无人机、高空

平台及不同轨位卫星组成的非地面网络（Non Terrestrial Network, NTN），并将其用于物联网形成 NTN IoT。该体系是卫星物联网的扩展与增强形态[44]。NTN IoT 在环境监测、抢险救灾等多方面都起着重要作用。其网络结构如图 7 所示[45]。

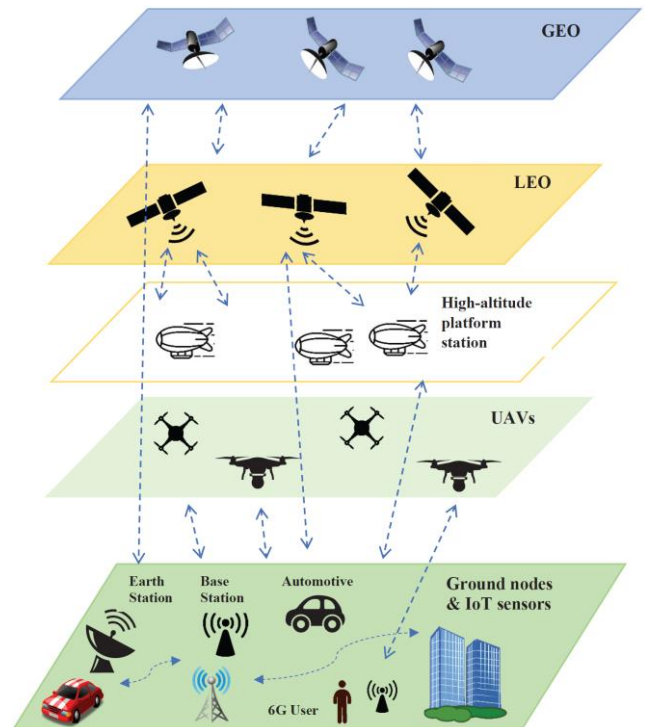


图 7 NTN IoT 网络结构

NTN IoT 有诸多技术特点：覆盖面广，视野广阔；支持高数据流量；可实现应急通信；适用于多种多址接入技术等[45]。

NTN IoT 目前仍受成本、技术兼容、空中许可、频谱资源、安全性等方面约束。同时还面临着长传播时延、高频拓扑、频谱共享复杂、资源分配、不同网络参数之间的复杂关联等挑战，以及任务卸载、网络路由、网络切片在多域能耗方面的联合编排问题等。

主要研究热点如下[45-47]:

- (1) 时变网络表示: 受轨道卫星运动驱动, NTN 的星载算力和链路容量都呈显著时变, 网络拓扑变化频繁, 使得 NTN IoT 的网络建模面临多种问题, 如: 时间窗口粒度的选择, 高频拓扑下的连续数据路由等。
- (2) 时间确定性路由: 在 NTN IoT 网络中, 时变拓扑和资源随轨道时变, 造成端到端传输路径和资源也是时变的, 为支持稳定及时的数据传输和处理, 需发展时间确定性路由, 面临的研究内容有: 如何构建计算感知的路由路径, 在保证端到端时延的同时提供用户指定的功能和

计算资源; 如何构造时延受限的最大容量路径, 使数据能够及时得到处理等。

- (3) 新型多址接入方式: 为了适配 NTN 的时变拓扑与异构速率, 需引入新型多址范式。目前的研究热点在索引调制多址 (Index Modulation Multiple Access, IMMA), 速率分割多址 (Rate-Splitting Multiple Access, RSMA) 等。

7 空间物联网的发展

OneWeb、SpaceX、“鸿雁”、“虹云”等卫星互联网星座系统的出现, 空间物联网 (Internet of Space Things, IoST) 已经成为下一个 IoT 研究和应用的热点。

IoST 的应用场景为太空居住、太空农业、物质分析、医疗应用等[48-51]。设想中的 IoST 部署于太阳系星球之间, 为太阳系中的星际开发与移民做准备和研究, 如图 8 所示[50]。

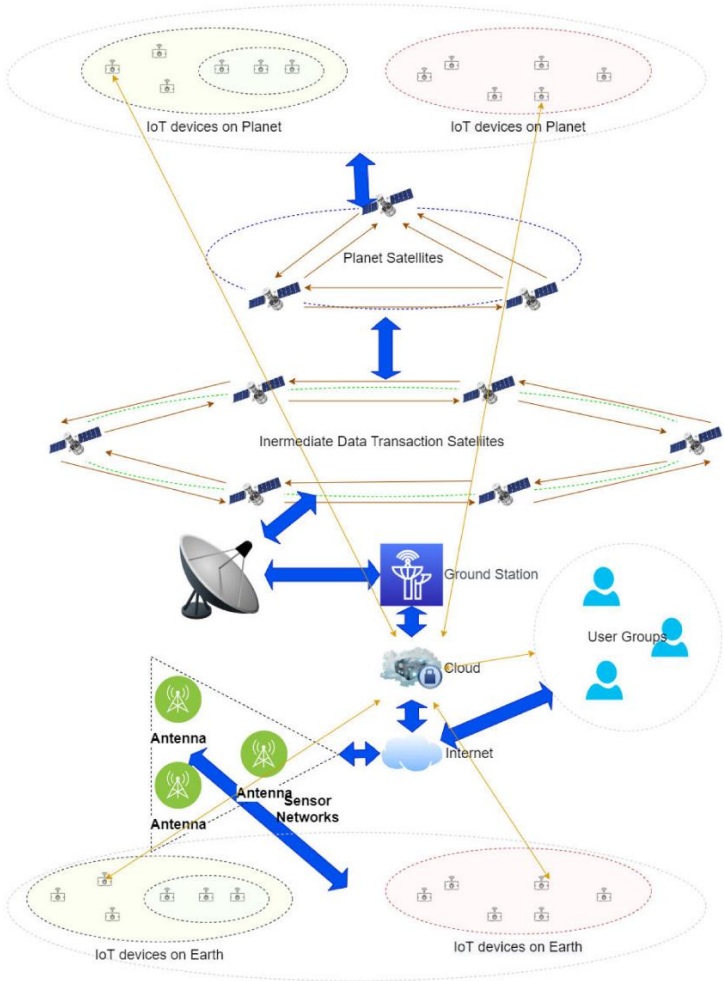


图 8 基于星际通信的空间 IoT 示意图

8 结论与展望

从以上分析可见，通、感、算、AI 一体化融合将是通信网，甚至是各种类型网络的发展趋势，新材料、新概念所产生的新型通信方式正在酝酿生成中。6G 移动通信技术的研究不仅仅推动了通信事业向前发展，对整个信息系统乃至整个经济社会发展都将产生巨大影响，而其中最为重要的是 AI 技术的应用，它正在对各行各业产生深刻影响。

鉴于以上分析，建议广大研究人员积极关注有关技术进步，适时适当选择课题，开展预先研究。

参考文献

- [1] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi and H. D. Schotten, "The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 334-366, 2021, <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3057679>
- [2] RL-SCAP SigFox: A Reinforcement Learning Based Scalable Communication Protocol for Low-Power Wide-Area IoT Networks, *Technologies*, June 2025, 13(6): 255, https://www.researchgate.net/publication/392787278_RL-SCAP_SigFox_A_Reinforcement_Learning_Based_Scalable_Communication_Protocol_for_Low-Power_Wide-Area_IoT_Networks
- [3] Nguyen D C, et al. Enabling AI in future wireless networks: A data life cycle perspective [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(1): 553-595. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3024783>
- [4] ITU-T. Recommendation ITU-T Y. 2060: Overview of the Internet of Things [EB/OL]. 2012-06 [2025-11-12]. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2060-201206-I!!PDF-E&type=items
- [5] ITU-R. Recommendation ITU-R M.2160-0: Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond [EB/OL]. 2023-11 [2025-11-12]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2160-0-202311-I!!PDF-E.pdf
- [6] Viswanathan H, Mogensen P E. Communications in the 6G era [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 57063-57074--11 <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981745>
- [7] Ntontin K, Lagunas E, et al. A vision, survey, and roadmap toward space communications in the 6G and beyond era [J]. *Proceedings of the IEEE*, vol. 113, no. 9, pp. 987-1023, Sept. 2025, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2024.3512934>
- [8] González-Prelcic N, Keskin M F, Kaltiokallio O, et al. The integrated sensing and communication revolution for 6G: Vision, techniques, and applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, vol. 112, no. 7, pp. 676-723, July 2024, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2024.3397609>
- [9] Kaushik A, Singh R, Li M, et al. Integrated sensing and communications for IoT: Synergies with key 6G technology enablers [J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2024, 5(7), pp. 136-143, <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2400052>
- [10] Cui Q, You X, Wei N, et al. Overview of AI and communication for 6G network: Fundamentals, challenges, and future research opportunities [J]. *Science China Information Sciences*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11432-024-4337-1>
- [11] Hakiri A, Gokhale A, Yahia S B M N. A comprehensive survey on digital twin for future networks and emerging Internet of Things industry [J]. *Computer Networks*, 2024, 244(May): 110350. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110350>
- [12] Zhang H, Zhang Z, Liu X, et al. Integrated sensing and communication for 6G holographic digital twins [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2025. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2400178>
- [13] Duran K, Cakir L V, Ozdem M, et al. Generative AI-enabled digital twins for 6G-enhanced smart cities [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/GCWkshp.64532.2024.11101058>
- [14] Chen S, et al. A survey on terahertz communications [J]. *China Communications*. 2019, 16(2): 1-35
- [15] Rappaport T S, Xing Y, MacCartney G R, et al. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—with a focus on propagation models [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(12): 6213-6230, <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2734243>
- [16] Jiang W, Zhou Q, He J, et al. Terahertz communications and sensing for 6G and beyond: A comprehensive review [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(4): 2326-2381, <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3385908>
- [17] Wu Q, Zhang R, Hong M. Intelligent reflecting surface aided wireless communications: A tutorial [J]. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 5, pp. 3313-3351, May 2021, <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3051897>
- [18] Putranto P, Hamza A A, Mabrouki S, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for 6G and beyond: A comprehensive survey from theory to deployment [EB/OL]. *arXiv preprint*, arXiv: 2506.19526, 2025, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.19526>

- [19] Strinati E C, et al. 6G: The Next Frontier: Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, (99): 1-1, <https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921162>
- [20] Wang F, Zhang S, Yang H, et al. Non-terrestrial networking for 6G: Evolution, opportunities, and future directions [J]. *Engineering*, Vol. 54, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.05.013>
- [21] Rashid H U, Jeong S H. AI empowered 6G technologies and network layers: Recent trends, opportunities, and challenges [J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 267: 125985. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125985>
- [22] Chen J, Zhang H, Xie Z. Space-air-ground integrated network (SAGIN): A survey [EB/OL]. *arXiv preprint*, arXiv: 2307.14697, 2023, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.14697>
- [23] Jiang W, Han B, Habibi M A, Schotten H D. The road towards 6G: A comprehensive survey [J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 334-366, <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3057679>
- [24] Dang S, Amin O, Shihada B, Alouini M S. What should 6G be? [J]. *Nature Electronics*, 2020, 3: 20-29, <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6>
- [25] Zhang Z, Xiao Y, Ma Z, et al. 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 28-41.
- [26] Wu W, Wang X, Hawbani A, et al. A survey on ambient backscatter communications: Principles, systems, applications, and challenges [J]. *Computer Networks*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109235>
- [27] Zheng K, Xu R, Mei J, et al. Ambient IoT towards 6G: Standardization, potentials, and challenges [J]. *IEEE Access*, 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3474298>
- [28] Butt M M, et al. Ambient IoT: A missing link in 3GPP IoT devices landscape [J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2024, 7(2): 85-92, <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2300198>
- [29] Zhu F, et al. Enabling OFDMA in Wi-Fi backscatter [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2024, 32(1): 427-444, <https://doi.org/10.1109/TNET.2023.3290370>
- [30] ETSI. 5G; NR; Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.291 version 19.1.0 Release 19) [EB/OL]. Jan. 2024 [2025-11-12]. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138291/19.01.00_60/ts_138291v190100p.pdf
- [31] J. M. Parra-Ullauri et al., "Federated Analytics for 6G Networks: Applications, Challenges, and Opportunities [J]," *IEEE Network*, vol. 38, no. 2, pp. 9-17, March 2024, <https://doi.org/10.1109/MNET.2024.3355218>
- [32] Psomas C, Ntougias K, Shanin N, et al. Wireless information and energy transfer in the era of 6G communications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2024, 112(7): 41, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2024.3395178>
- [33] Bi S, et al. Wireless powered communication: Opportunities and challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 4, pp. 117-125, April 2015, <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7081084>
- [34] Vladkov E E. Powering an IoT-driven world: A survey of energy harvesting methods for the ZED concept [J]. *Electrotechnica & Electronica (E E)*, 2024, 59(2), pp. 38-45. <https://epluse.ceec.bg/powering-an-iot-driven-world-a-survey-of-energy-harvesting-methods-for-the-zed-concept/#example>
- [35] Khan W U, Sheemar C K, Lagunas E, et al. Beyond diagonal RIS: A new frontier for 6G Internet of Things networks [J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2025, <https://doi.org/10.1109/MIOT.2026.3674494>
- [36] Gao Z, et al. Compressive-sensing-based grant-free massive access for 6G massive communication [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(5): 7411-7435, <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3334878>
- [37] Singh R, Yerrapragada A K, Ganti R K. Physical layer design for ambient IoT [J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2025, <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2025.3573424>
- [38] Nguyen D C, et al. 6G Internet of Things: A comprehensive survey [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(1): 359-383, --24, 1 Jan. 1, 2022, <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3103320>
- [39] Wu J, Liu J, Liu Y, et al. A survey on cloud-edge-terminal collaborative intelligence in AIoT networks [EB/OL]. *arXiv preprint*, 2025, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.18803>
- [40] ITU-T. Technical Paper YSTP. AIoT: Challenges of and guidelines to standardization on artificial intelligence of things [EB/OL]. 2023-09 [2025-11-12]. https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/tut/T-TUT-TRUST-2023-2-PDF-E.pdf
- [41] 中国移动物联网. 物联洞察 | 双网融合管理引擎: 天地一体物联网平台驱动场景化连接升级 [EB/OL]. 2025-07-07 [2025-11-12].
- [42] Qu Z, Cao H, Cheng Y, Wu S, Zhang G. A LoRaWAN-based network architecture for LEO satellite Internet of Things [C]. *IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)*, Yilan, Taiwan, 2019: 1-2, <https://doi.org/10.1109/ICCE-TW46550.2019.8991826>

- [43] Pokhrel S R, Choi J. Data-driven satellite communication and control for future IoT: Principles and opportunities [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 60, no. 3, pp. 3307-3318, June 2024, <https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3360953>
- [44] Lin X, Rommer S, Euler S, et al. 5G from space: An overview of 3GPP non-terrestrial networks [EB/OL]. 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.09156>
- [45] A. F. M. S. Shah, M. A. Karabulut and K. Rabie, "Multiple Access Schemes for 6G Enabled NTN-Assisted IoT Technologies: Recent Developments, Prospects and Challenges [J]", *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 7, no. 1, pp. 48-54, January 2024. <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2300234>
- [46] Li J, et al. Index modulation multiple access for 6G communications: Principles, applications, and challenges [J]. *IEEE Network*, 2023, 37(1): 52-60, January / February 2023, <https://doi.org/10.1109/MNET.002.2200433>
- [47] Mao Y, Dizdar O, Clerckx B, et al. Rate-splitting multiple access: Fundamentals, survey, and future research trends [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(4): 2073-2126, <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3191937>
- [48] Hu Y, Guo B, Yang C, et al. Time-deterministic networking for satellite-based Internet of Things services: Architecture, key technologies, and future directions [J]. *IEEE Network*, 2024, 38(4): 111-118, <https://doi.org/10.1109/MNET.2024.3380073>
- [49] Wei J, Cao S. Application of edge intelligent computing in satellite Internet of Things [C]. *IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*, Tianjin, China, 2019: 85-91, <https://doi.org/10.1109/SmartIoT.2019.00022>
- [50] Priyadarshini I, Bhola B, Kumar R, So-In C. A novel cloud architecture for Internet of Space Things (IoST) [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 15118-15134, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144137>
- [51] Wazid M, Das A K, Shetty S. An authentication and key management framework for secure and intelligent transportation of Internet of Space Things [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(6): 5242-5257, <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3338274>