

基于RAN-CN融合的无状态轻量级星载网络

曹彩红, 邢梦迟, 陆洁, 宋雅琴, 程志密, 徐晖

(大唐移动通信设备有限公司, 北京 100083)

摘要: 为解决卫星网络面临的能耗与资源严重受限问题, 提出一种基于RAN-CN融合的无状态轻量级星载网络架构。该网络通过基于服务化的RAN-CN功能融合重构实现网元功能的轻量化、借助网络功能无状态设计提升卫星网络的弹性、基于KubeEdge的方式实现卫星网络部署的轻量化3个方面, 降低星载网络的资源占用, 减少卫星网络系统流程的信令开销与处理时延。最后, 通过自研实验平台完成对所提轻量级星载网络的有效性验证。

关键词: RAN-CN融合; 无状态; 服务化架构; 轻量化部署

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025028

Stateless and Lightweight Onboard Satellite Network Based on RAN-CN Convergence

CAO Caihong, XING Mengchi, LU Jie, SONG Yaqin, CHENG Zhimi, XU Hui

Datang Mobile Communication Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China

Abstract: To address the challenges of stringent energy and resource constraints in satellite network, this paper proposes a stateless and lightweight onboard satellite network architecture based on RAN-CN convergence. The satellite network achieves reduced resource utilization, lower signaling overhead, and decreased processing latency in system procedures through three key innovations: lightweight network functions realized by service-based integration and redesign of RAN-CN functions, enhanced elasticity of the satellite network enabled by stateless design of network functions, and lightweight and efficient deployment facilitated by the KubeEdge-based framework. Finally, the effectiveness of the proposed lightweight onboard satellite network is validated through experiments conducted on a self-developed testbed.

Keywords: RAN-CN convergence, stateless, SBA, lightweight deployment

0 引言

国际电信联盟 (international telecommunication union, ITU) 于 2023 年发布的《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》在 5G 三大场景基础上进行了增强和扩展, 提出包括沉浸式通信、超大规模连接、极高可靠低时延、人工智能与通信的融合、感知与通信的融合、泛在连接等典型的六大 6G 场景^[1]。其中空天地一体化是泛在连接的典型场景之一。预计在未来的发展中,

星地融合网络将持续成为 6G 网络的典型应用场景之一, 并在技术创新与应用拓展等方面发挥重要作用。

国际标准化组织第三代合作伙伴计划 (3rd generation partnership project, 3GPP) 在 5G 及 5G Advanced 的标准研究中, 针对非地面网络 (non-terrestrial networks, NTN) 的标准化已取得一定成果。在 Release 17 和 Release 18 的标准研究中以透明转发架构为基础, 即星载基站仅提供信号放大功能^[2], 同时 Release 18 还标准化了卫星回传场景下的用户面功能 (user plane function, UPF)

收稿日期: 2025-06-12; 修回日期: 2025-08-04

通信作者: 曹彩红, caocaihong@cictmobile.com

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2022YFB2902704)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902704)

上星和边缘应用服务器 (edge application server, EAS) 上星的内容^[3]。在 Release 19 的标准研究中, 基于再生转发模式, 针对窄带物联网 (narrow band internet of things, NB IoT) 的存储转发及终端-卫星-终端 (user equipment-satellite-user equipment, UE-sat-UE) 通信业务展开讨论, 其中在存储转发业务场景中, 提出将 4G 演进分组核心网 (evolved packet core, EPC) 的部分或全部功能部署在卫星上^[4]。在 UE-Sat-UE 通信中, 提出将无线接入网 (radio access network, RAN)、用户面功能 UPF、IP 多媒体子系统 (IP multimedia subsystem, IMS) 网络接入网关 (access gateway, AGW) 及 EAS 等组件部署在卫星上。最新的 Release 20 需求讨论中, 针对卫星接入的用例集中在多轨卫星协同、高轨卫星 IMS 语音支持及弹性通知等方面^[5]。

未来, 随着多轨协同接入技术的发展和新兴卫星业务需求的增长, 卫星独立组网 (satellite independent networking, SATIN) 的需求会愈来愈强烈, 在卫星上部署无线接入网和核心网已成为大势所趋^[6]。区别于地面通信网络资源的丰富性, 卫星网络在能耗、计算和存储资源等方面严重受限, 这对卫星网络的实施落地提出了不小的挑战。针对上述问题和挑战, 本文针对卫星网络的轻量化方案进行研究, 提出基于无线接入网-核心网 (radio access network-core network, RAN-CN) 融合的无状态轻量级星载网络, 为 6G 网络的星地融合发展提供理论基础和技术支持。

1 研究现状及挑战

目前, 针对卫星核心网的轻量化研究一般从网元、协议以及部署的轻量化 3 个方面展开。在网元轻量化方面又可分为两个角度: 1) 按需网络功能集: 此种方式中, 仅选择符合卫星通信需求的关键网络功能进行星载部署, 而非所有核心网网络功能, 这一做法既保证了卫星通信的基本功能, 又满足了卫星资源受限的约束; 2) 网络功能按需裁剪: 此种方式中, 根据卫星通信场景和需求, 分析所需网络功能的必需功能, 对网元非必需功能进行裁剪, 以保证网元的轻量化。在接口协议轻量化方面, 通过重新设计网络接口协议, 以提供更高效的处理效率和传输性能, 如对 RAN 与 CN 的接口协议栈融合重构、采用高效轻量级的传输协议等。在核心网轻量化部署方面, 则采用轻量级的容器化平台进行星上网元部署, 降低资源开销^[7-9]。

在轻量化核心网的研究中, 陈希等^[10]针对上述轻量

化思路研究了最小网元集部署、单网元功能裁剪、接口协议轻量化、网元重构与融合等多个轻量化策略, 并对选定的策略进行仿真验证, 证明使用轻量化策略后星载核心网在资源配置和信令流程等方面的优越性。王尚广等^[11]通过采用分布式架构、离线自治、网元智能化等技术, 设计星载 6G 核心网体系架构, 并验证其有效性。核心网轻量化的需求并不仅适用于卫星网络场景, 面向垂直行业, 核心网的轻量化需求也同样强烈, 中国联通发布的《轻量化 5G 白皮书》针对行业用户的个性化需求, 提出了基于服务架构 (service-based architecture, SBA) 的“3+2+X”的轻量级 5G 系统架构, 其中“3”是指“接入和移动性管理功能 (access and mobility management function, AMF) + 会话管理功能 (session management function, SMF) + UPF”, “2”是指“统一数据管理 (unified data management, UDM) + 鉴权服务器功能 (authentication server function, AUSF)”, “X”是指策略控制功能 (policy control function, PCF)、网络切片选择功能 (network slice selection function, NSSF)、计费功能 (charging function, CHF) 等网络功能实体, 该架构支持在不同场景灵活、差异化的按需部署策略^[12]。李沸乐等^[13]面向各行业业务需求并从网元裁剪和合设、网元功能裁剪、网元功能按需定制、专用产品定制化以及网络高度融合等角度提出 5G 轻量化核心网总体方案, 以助力工业互联网、智能交通、现代农业、智慧城市等行业的发展。朱雪田等^[14]对 5G 轻量化核心网的关键技术展开研究, 并提出基于应急通信场景的轻量级核心网解决方案, 从而降低核心网的成本和功耗, 保证应急专网的安全性。Liu 等^[15]提出一种分布式轻量级无状态卫星 CN 架构, 通过将网络功能的上下文与自身解耦, 并利用一个公共存储库进行管理, 以适应低地球轨道卫星的动态性, 实验评估证明, 与地面 CN 相比, 该方案可将切换的时延减少 37%。

在上述研究中采取了各种策略减少卫星资源的使用率, 提升卫星资源的利用率, 但在实际网络及应用中, 仍然存在一些挑战: 1) 由于星载基站仍以烟囱式的方式提供服务, 在星载基站的轻量化部署、功能升级、版本迭代等方面均存在一定的限制; 2) 在考虑星载网络轻量化时, 往往只考虑核心网的轻量化, 但星载网络应是 RAN 和 CN 整体的轻量化, 针对 RAN 侧功能能否轻量化, 以及 RAN 与 CN 能否整体轻量化策略暂缺少相关研究; 3) 由于中轨地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 或低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星的时变性和移动性, 卫星网络的用户周期性批量切换仍是一个不可避免的问题。

2 轻量级星载网络设计

为充分利用星上的存储、计算和网络资源，本文首先基于 RAN-CN 融合的设计思路，提出轻量级 RAN-CN 融合星载网络架构，通过该架构展示融合后网络功能的灵活部署方式；基于该架构，通过设计服务化 RAN 架构，并将 SBA RAN 与轻量级 CN 的功能进行重构，实现基于服务化的 RAN-CN 融合轻量级星载网络；通过定义统一数据管理功能，对轻量级融合网络的数据进行统一存储管理，实现星载网络功能的无状态设计，减少卫星周期性运动对星载轻量级网络的影响；最后，通过设计基于 KubeEdge 的轻量级星载网络部署方式，实现星载轻量级融合网络的按需轻量级编排与调度。

2.1 轻量级 RAN-CN 融合星载网络架构

随着星上处理能力的不断提升，卫星通过星间链路构建自主可控的独立网络体系已成为必然趋势，卫星网络将可独立满足不同卫星接入业务的需求^[16]。目前，3GPP 标准协议定义的 5G 核心网架构中网络功能的数量已超 40 种，若核心网网络功能均部署在卫星上，将对卫星载荷的计算能力、存储能力及功耗等构成不小的挑战。另外，结合卫星通信业务的特性以及卫星网络的高动态性和资源受限等特点，在卫星上部署全部网络功能既非必要也不现实。因此，确定必要的核心网络功能部署在

卫星上既可保障卫星的基本通信能力，也可优化卫星资源的利用策略。

当前的移动通信系统中，无线接入网和核心网被明确划分为不同的网络域，且各自遵循不同的演进路径和技术标准。这种架构设计虽保障了网络功能的独立实现与分域管理，但二者在部分功能层面上存在明显重叠^[17]。以移动性管理功能为例，RAN 侧需处理终端在小区间的切换控制、无线链路重配置等操作，CN 侧则负责 UE 移动性注册更新、切换管理等，二者在移动性管理流程中存在协同需求与功能交叉。在用户面处理方面，RAN 中的集中单元用户面（centralized unit-user plane，CU-UP）与 CN 中的中间用户面功能单元（intermediate UPF，I-UPF）均需执行通用分组无线业务（general packet radio service，GPRS）隧道协议-用户面（GPRS tunnelling protocol-user plane，GTP-UP）数据包的解封封装操作，这种重复的数据包处理流程不仅增加了网络处理开销，也导致数据传输路径冗余，降低了整体网络资源的使用效率^[18]。上述功能重叠问题与卫星网络的资源高效利用需求背道而驰，鉴于卫星本身资源的限制性，星载网络功能应保持高度集中且独立，网络功能之间应尽量减少冗余。基于该思路，本文将对无线接入网和核心网进行进一步的功能重构和融合，以实现卫星网络的极简轻量化。

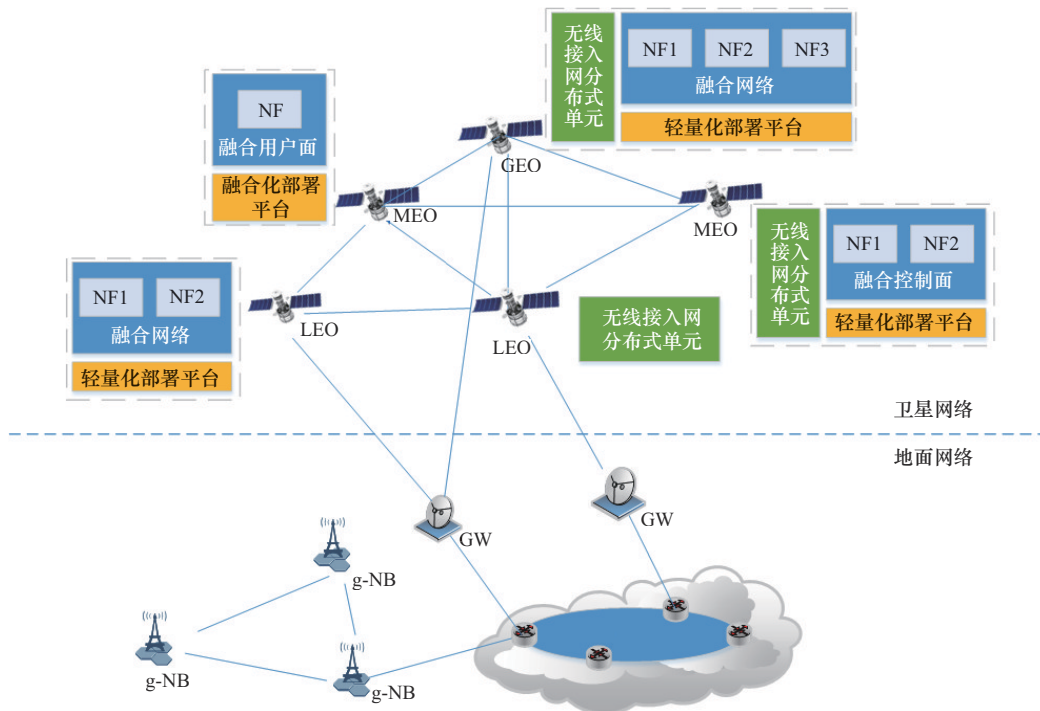


图 1 轻量级 RAN-CN 融合星载网络架构

轻量级RAN-CN融合星载网络架构如图1所示,该架构将RAN与CN的功能进行解耦重构,通过对RAN的集中式单元控制面(centralized unit-control plane, CU-CP)功能和CU-UP功能进行拆分及服务化,并分别与核心网的控制面和用户面功能进行跨域重构,融合形成基于服务化的星载网络统一的控制面和用户面,以避免星载网络功能的重复与资源浪费。同时,分布式单元(distributed unit, DU)作为单独的模块功能,负责完成无线信号的基带处理、射频收发等物理层功能,并通过标准化接口与融合后的控制面、用户面进行交互。该架构适用于不同轨道高度的卫星,如地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星资源相较于非对地静止轨道(non-geostationary orbit, NGSO)卫星较为丰富,可考虑部署一套完整的轻量级星载网络,而MEO卫星和LEO卫星则可根据其业务需求,动态部署其中一个或多个网络功能。

借鉴地面网络在云计算、虚拟化技术等领域的成熟实践经验,卫星网络也将朝着云化方向发展。网络功能采用云原生方式设计,具备可编排、易扩展等特性。同时,本架构使用统一数据存储管理机制,将星载网络的逻辑与数据解耦,为星载网络功能服务增加无状态特性,使任意星载网络功能均可通过该机制无差别地为用户服务,进而提升卫星网络的弹性和可靠性。

在部署方面,可采用轻量级的虚拟化技术,通过容器化技术将各类网络功能封装为独立、可移植的容器镜像,使得网络功能可快速、频繁地构建、发布及部署,实现容器化网络功能的便捷部署、弹性扩展和自我修复。

2.2 基于服务化的轻量级RAN-CN融合星载网络

基于服务化的轻量级RAN-CN融合星载网络的具体设计基于以下3个步骤。

首先确定卫星核心网的功能集合,并对核心网进行轻量化设计。本文以ITU发布的《Y.3201: 固定、移动和卫星通信网络融合的IMT-2020及其演进网络框架》(Y.3201: FMSC Framework for IMT-2020 networks and beyond)^[19]建议书所描述的必要网元为基准,将{AMF, SMF, UPF, UDM}作为卫星核心网的最小网元集合。

其次,为提升RAN的弹性部署能力和灵活性,本文设计了如图2所示的RAN服务化架构^[20],该架构将RAN的控制面与用户面进行解耦重构,转化为多个独立且功能明确的网络功能。每个网络功能遵循高内聚原则,通过精细化的功能封装,实现功能模块内部逻辑的高度集

中与完整性,确保单一功能的高效执行;各网络功能之间则保持低耦合特性,采用标准化接口与松耦合通信机制,显著降低模块间的依赖程度。

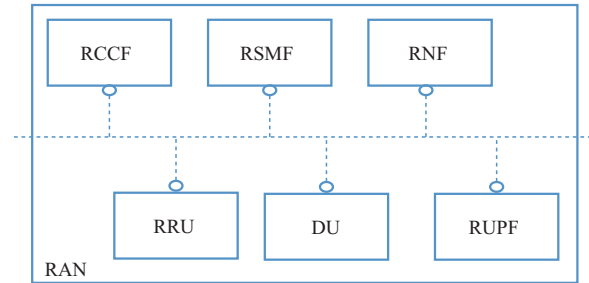


图2 RAN服务化架构

最后,为从整体上提升卫星网络的轻量化级别,降低系统复杂度且减少资源消耗,本文通过将RAN与CN的核心功能进行深度融合与重构,并设计融合的高度集成化网络功能,降低网络接口交互导致的数据传输时延,从而实现卫星资源利用效率最大化。具体的,将无线连接控制功能(radio connection control function, RCCF)与AMF的功能进行融合,形成融合接入和移动性管理功能(converged-access and mobility management function, C-AMF);将无线会话管理功能(radion session management function, RSMF)与SMF深度融合,形成融合会话管理功能(converged-session management function, C-SMF);将无线用户面功能(radion user plane function, RUPF)和UPF融合形成融合用户面功能(converged-user plane function, C-UPF)。其余无线网络功能对目前卫星通信需求而言并非必要,故本轻量级RAN-CN融合星载网络暂不考虑。

基于服务化的轻量级RAN-CN融合星载网络如图3所示,其由5个网络功能组成,分别是C-AMF、C-SMF、C-UPF、数据存储功能(data storage function, DSF)以及DU。其中,C-AMF作为统一的接入和移动性管理实体,负责UE无线接入控制、连接管理及移动性管理等核心功能;C-SMF负责无线承载资源和会话资源的管理;C-UPF负责用户数据的高效转发及服务质量(quality of service, QoS)策略执行等功能,以保障不同业务类型的传输需求;DSF对卫星网络的所有数据进行统一存储和管理,以实现数据资源的高效管控与网络性能的全面提升,其具体逻辑架构见2.3节;DU沿用现有RAN DU功能,负责执行物理层信号处理、无线资源调度等对实时性要求极高的操作,确保实时性业务的稳定处理。

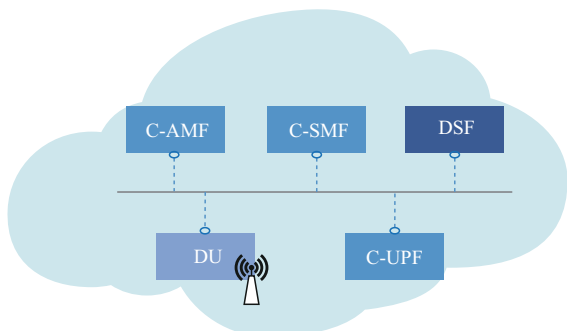


图 3 基于服务化的轻量级 RAN-CN 融合星载网络

基于服务化的轻量级 RAN-CN 融合星载网络通过将传统 RAN 功能拆解为服务化单元，并与轻量级核心网进行功能融合，不仅能够避免资源的过度占用与浪费，还可在任务需求变更时快速完成网络功能的重构与迁移，极大提升星载网络的资源利用效率与任务响应能力，为实现高效、灵活的卫星接入服务奠定了重要基础。

2.3 无状态设计

在 5G 网络架构中，网络功能（network function, NF）既包含业务处理逻辑，也包含与业务相关的上下文数据，在网元升级及演进时存在多处弊端^[21]。而卫星网络对网元的敏捷部署、弹性伸缩等方面具有极高要求，故若星载网元仍采用“逻辑”+“数据”的模式，对星载网元的轻量化及运维管理等方面均存在一定挑战。同时，卫星的周期移动性特性，尤其是低轨卫星的高速移动，导致低轨卫星可服务用户的时间仅有几分钟至十几分钟，需频繁执行周期性批量切换，是卫星网络无法规避的网络开销问题。

在无状态技术中，无状态 NF 将所有状态数据委托给专用的状态存储后端，该后端管理应用程序状态并将存储的数据开放给感兴趣的 NF 进行访问和修改^[22]。该技术可解决卫星周期性切换带来的网络开销大问题，为此，本文在星载网络中定义了一个数据存储功能模拟状态存储后端，用于统一存储并管理星载核心网产生的各类数据及 NF 配置文件，如图 4 所示。其中，DSF 是基于分布式的存储架构，由多个分布式数据存储节点组成，具备海量存储、高并发、低时延的处理性能以及良好的可扩展性。DSF 分布式节点间存在互通机制，以保证存储数据的一致性。此外，DSF 针对结构化数据的存储管理，可将数据对象组织成目录信息树（directory information tree, DIT）；针对非结构化数据的存储管理，可使用 Key-Value 存储模型。DSF 还支持将一些非必要数据（如长时间未访问的旧应用数据）进行删除。星载网络功能（C-

AMF、C-SMF）可通过 NDSF 接口向 DSF 存储数据。DSF 中存储的数据也可通过 NDSF 接口开放给已通过安全机制授权的星载网络功能使用（如增/删/改/查等操作），使用存储数据的网元不局限于存储该数据的网元。

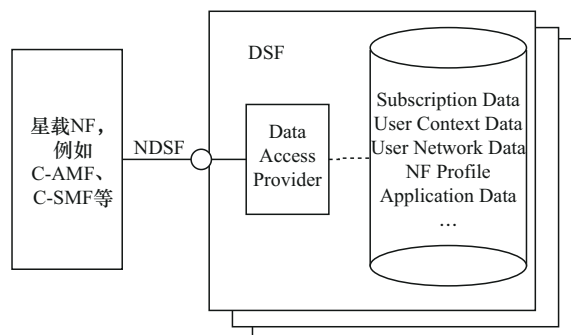


图 4 统一数据存储管理

本文利用 DSF 对 NF 中的各类数据（如用户签约数据、用户网络数据、用户上下文数据、NF 状态数据等）以及 NF 配置文件等进行统一存储管理，实现将 NF 的处理逻辑与状态解耦。NF 在服务 UE 时会从 DSF 处读取 UE 上下文数据，同类型 NF 可无差别为 UE 服务，因此，星载网元可随时服务任意 UE。具体举例描述，当卫星移出当前覆盖区域时，该区域的 UE 通过新的卫星重新接入，C-AMF、C-SMF 通过 Ndpf 接口从 DSF 处读取 UE 上下文，从而及时响应 UE 的请求，而无须为大批量 UE 执行切换流程，大幅节省了卫星资源开销。

2.4 轻量化部署

星载网络功能轻量化部署是实现星地融合网络轻量化的重要途径之一，同时星载网络功能的自动编排、部署及弹性扩展也是卫星网络部署的强烈需求。Kubernetes（简称 k8s）是当前应用最为广泛的容器管理和编排引擎技术，其通过服务发现和负载均衡机制，可实现容器化应用的轻松部署、弹性扩展和自我修复，是星载网络功能编排和管理的有效方式之一^[23]。但有关测试数据表明，k8s 平台运行时需占用约为 2 GB 的内存资源，消耗了较大卫星资源^[24]。而 KubeEdge 作为比 k8s 更轻量级且继承其优势的技术，是卫星轻量化部署的不二选择。

KubeEdge 基于 k8s 部署，通过分别在云端和边缘部署管理面 CloudCore 和边缘 KubeEdge，构成一个完整的 k8s 集群^[25]。这与星地融合网络的资源特性和部署需求高度一致：星地融合网络使用 KubeEdge 平台时，将资源占

用和消耗大的 CloudCore 部署在资源丰富的地面，在卫星上部署消耗资源较少的 EdgeCore，地面 CloudCore 和星上 EdgeCore 构成一个集群，从而实现地面和星上业务协同，如图 5 所示。部署在地面的星地融合网络编排管理系统，根据业务需求选择最优的地面和/或卫星网络节点生成调度策略，并通过地面 CloudCore 将调度策略下发给卫星上的轻量级云化平台 EdgeCore，以实现星地资源的按需调度与管理。

基于 KubeEdge 部署的星地融合网络，提供了卫星和地面的协同能力，可部署支持百万级别边缘节点的 KubeEdge 平台，且可在星地链路不稳定的情况下实现卫星节点的离线管理。

3 实验仿真与分析

为证明基于 RAN-CN 融合的无状态轻量级星载网络的有效性优势，本文使用自主研发的移动网络通信系统进行实验验证。本实验采用星地融合组网架构，在卫星上部署轻量级 RAN-CN 融合网络，在地面网络部署 5G 系统（RAN 和核心网）^[26]，将轻量级星载网络的资源占用以及 UE 业务流程执行时延两个指标与地面网络进行对比。

实验拓扑如图 6 所示，本实验使用笔记本电脑模拟卫星节点，并在笔记本中部署轻量级星载网络，包括 C-AMF、C-SMF 和 C-UPF-C，使用高性能服务器部署地面网络，包括 3GPP 标准定义的 5G 核心网控制面、UPF-控

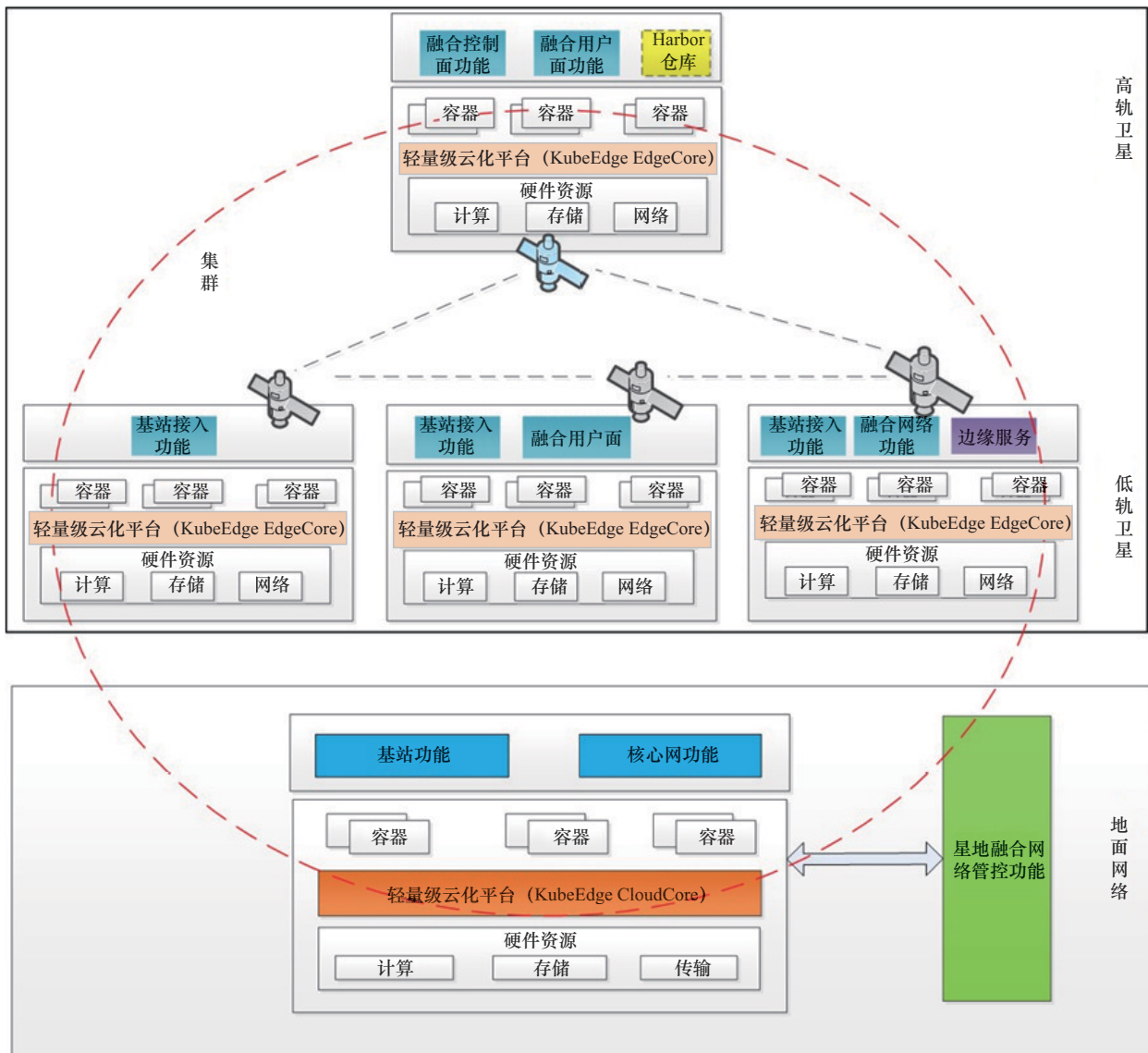


图 5 基于KudeEdge的星地融合网络部署示例

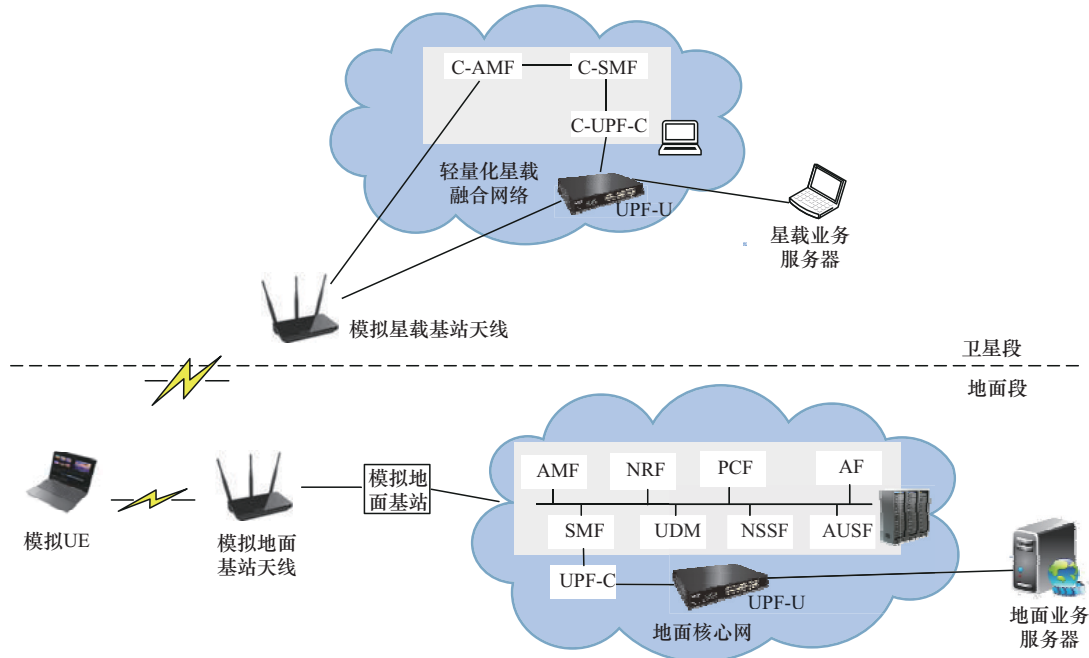


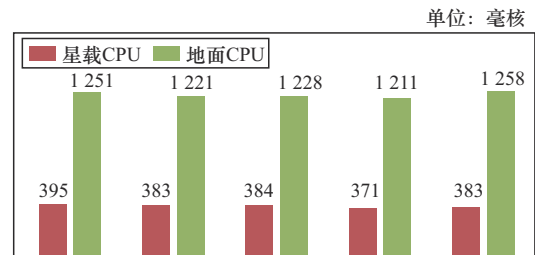
图6 轻量化RAN-CN融合星载网络实验拓扑

制 (UPF-control, UPF-C) 以及模拟地面基站。需注意的是, 本实验仿真系统中UPF采用控制和转发分离的架构, 通过UPF-C/C-UPF-C与SMF/C-SMF交互, 实现UPF/UPF-C的控制功能。UPF-U使用普通的软件定义网络 (software defined network, SDN) 交换机, 负责用户数据的转发。

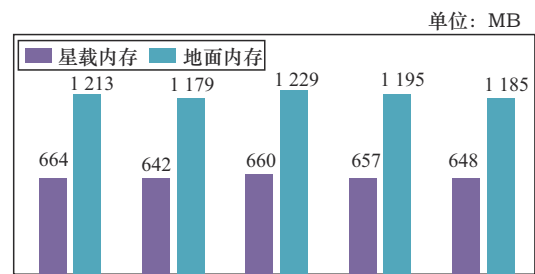
3.1 资源占用

基于图6的实验拓扑, 并对星上网络功能和地面网络功能容器化后, 使用KubeEdge平台及集群设计部署星地融合网络, 将地面网络功能容器部署在CloudCore, 将星上网络功能容器部署在EdgeCore。待系统运行稳定后, 分别对星上网络功能和地面网络功能在中央处理器 (central processing unit, CPU) 及内存方面的资源占用情况进行实验对比。

本文基于将1 000个用户分别接入星载网络和地面网络, 并建立1个PDU会话的场景进行测试, 待系统运行稳定后, 每5 min收集一次星上网络功能控制面C-AMF和C-SMF的CPU和内存占用情况, 以及地面网络功能RAN、AMF和SMF的CPU和内存占用情况。由于本文提出的轻量化RAN-CN融合星载网络对RAN与CN的网络功能进行了融合, 与地面网络功能的对比粒度不一致, 因此本文将C-AMF、C-SMF与C-UPF的资源消耗总和与地面RAN、AMF、SMF与UPF-C的资源消耗总和进行对比, 实验结果如图7所示。



(a) 星地网络功能CPU资源占用对比



(b) 星地网络功能内存资源占用对比

图7 星载网络功能和地面网络功能占用的CPU资源和内存资源对比

根据图7可看出, 本文提出的轻量化星载网络在5次测试中的CPU资源占用均值为383.2毫核, 地面网络5次测试的CPU资源占用均值为1 233.8毫核, 轻量化星载网络的CPU资源占用相较于地面网络降低68.9%。在内存资源占用方面, 轻量化星载网络5次测试的均值为654.2 MB, 地面网络5次测试的均值为1 200.2 MB, 轻量化星载网络的内存占用仅为地面网络的54.5%。由此可

得，轻量级星载网络在 CPU 资源占用和内存资源消耗上均有显著减少和改善。

3.2 信令开销与时延

3.2.1 数值评估

协议数据单元 (protocol data unit, PDU) 会话建立流程是 5G 系统必备的基础流程之一，是终端 UE 与 5GC 之间建立数据传输通道的基础，以确保数据能够在 UE 和网络之间安全、高效、有序地传输。本节将以 PDU 会话建立流程为例，对轻量级 RAN-CN 融合星载网络的优势进行论证，基于本文提出的轻量级 RAN-CN 融合星载网络架构的 PDU 会话建立流程如图 8 所示。

由图 8 可知，C-AMF 接收到来自 UE 的 PDU 会话建立请求后，将基于 PDU 会话建立请求消息选择合适的 C-SMF，并向 C-SMF 请求建立会话上下文，待 C-SMF 建立 PDU 会话上下文响应后，为该 PDU 会话选择满足 UE 需求的 C-UPF，并向 C-UPF 发送会话建立请求，以使 C-UPF 建立 N4 会话上下文和承载上下文等内容。然后 C-

AMF 基于 C-SMF 的 PDU 会话资源建立请求，请求 DU 建立 UE 上下文，同时将 C-UPF 的地址信息发送至 DU，以使 DU 建立 DU 至 C-UPF 之间的上行数据传输通道。最后通过步骤 16 和步骤 17，C-UPF 建立 C-UPF 至 DU 之间的下行数据传输通道，至此 PDU 会话建立完成。

上述流程通过将 RAN-CN 的功能融合，将网络功能之间的交互转为更高效的内部逻辑处理，将信令条数由 3GPP 标准组织定义的 PDU 会话建立流程^[27]的 24 条减少为 17 条，最终信令开销降低约 29.2%。当应用到移动网络的其他系统流程时，均可不同程度地减少信令开销，所形成的规模效应将在整体上大幅减少移动系统的网络开销，提升网络响应效率，优化用户体验。

3.2.2 实验对比

基于 3.2.1 节会话建立流程的设计思路与原则，5G 系统的其他核心流程（如注册流程、服务请求流程等）均可按照上述原则进行流程优化。对轻量级 RAN-CN 融合星载网络的系统流程时延和地面网络的系统流程时延进

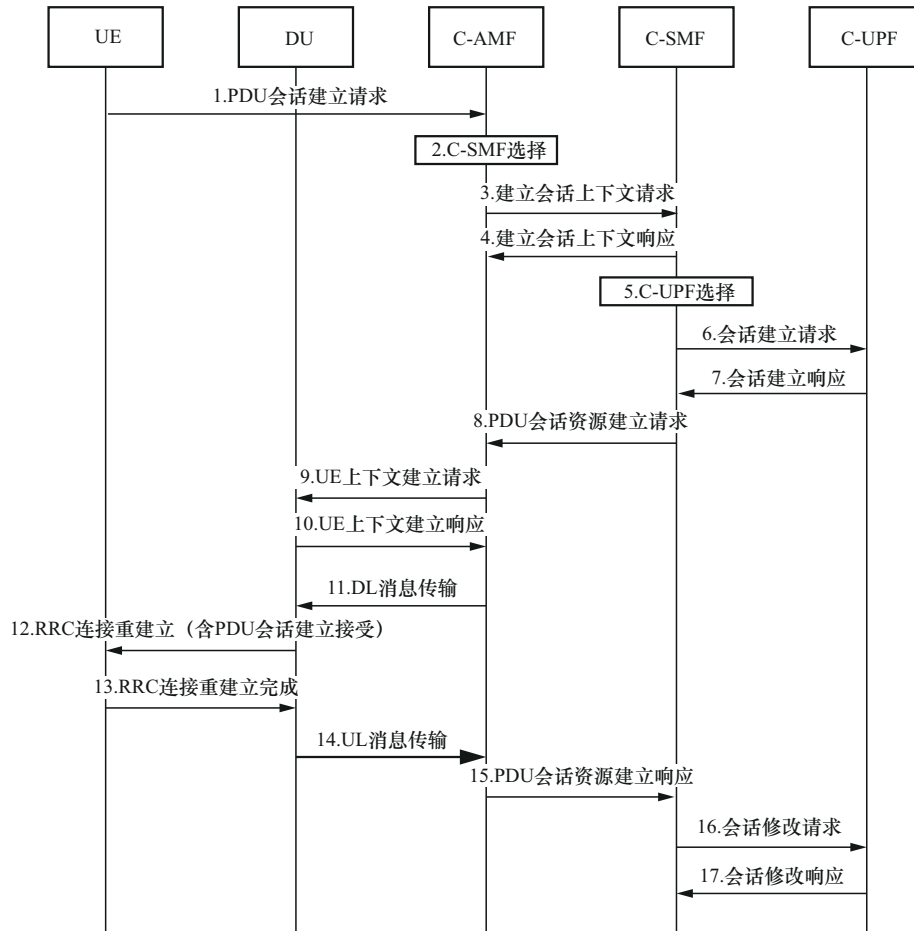


图 8 基于轻量级 RAN-CN 融合星载网络架构的 PDU 会话建立流程

行对比, 结果见表1。

表1 系统流程时延对比

流程	轻量级RAN-CN融合星载网络时延	地面网络时延	对比
注册	36 ms	75 ms	降低52%
会话建立	189 ms	330 ms	降低43%
服务请求	130 ms	200 ms	降低35%

由于RAN与CN网络功能的融合, 网络功能数量相应减少, 因此系统流程的步骤均有不同程度减少, 同时还将在现有不同网络功能间的交互转变为内部处理逻辑, 从两个维度减少系统流程的执行时延。因不同系统流程执行的步骤不同, 故时延优化程度各有差异。

4 结束语

为满足6G新型业务需求, 在卫星上部署无线接入网和核心网已成为通信网络发展的必然趋势。由于卫星资源受限问题, 如何实现星载核心网的轻量化设计成为一大挑战。本文提出一种基于RAN-CN融合的无状态轻量级星载网络, 利用基于服务化的轻量级RAN与CN功能融合以简化网络功能, 通过统一数据存储管理解耦网络功能处理逻辑与状态, 使用基于KubeEdge的容器化编排管理手段实现网络功能轻量化部署。实验结果表明, 所提轻量级星载网络能够有效减少资源占用, 同时降低注册、会话建立、服务请求等流程的信令开销与处理时延。但鉴于当前标准化进程, RAN还未进行服务化, 因此基于RAN-CN融合的无状态轻量级星载网络的商用落地仍需要一定时间。未来, 仍需进一步探索所提轻量级星载网络架构下的安全认证机制, 确保用户数据的安全传输以及存储数据的安全访问; 此外, 随着AI技术的不断成熟, 在轻量化部署过程中, 可进一步结合星载联邦学习等AI技术, 实现更智能高效编排管理, 从而进一步提升轻量级星载网络的弹性和智能化水平。

参考文献

[1] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[R].2023.
 [2] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS);stage 2 (Release 19): TS 23.501[S]. 2024.
 [3] 3GPP. Study on 5G system with satellite backhaul;(Release 18): TR 23.700-27[R]. 2022.
 [4] 3GPP. Study on integration of satellite components in the 5G architecture;Phase 3 (Release 19): TR 23.700-29[R]. 2024.

[5] 3GPP. Study on satellite access; Phase 4(Release 20) : TR 22.887 [R]. 2024.
 [6] WANG F, ZHANG S Y, YANG H T, et al. Non-terrestrial networking for 6G: evolution, opportunities, and future directions[J]. Engineering, 2025.
 [7] ZHU X T, QU X M. Research on 5G lightweight core network technology for vertical industries[C]//Proceedings of the 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1499-1505.
 [8] 宋雅琴, 徐晖, 刘险峰, 等. 面向星地融合网络的统一编排架构和关键技术[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 19-24.
 SONG Y Q, XU H, LIU X F, et al. Unified orchestration architecture and key technologies for satellite-terrestrial integrated networks[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 19-24.
 [9] 王胡成, 徐晖, 孙韶辉. 星地融合5G网络架构增强技术研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(6): 1-4, 9.
 WANG H C, XU H, SUN S H. Research on architectural enhancements for integrating satellite into 5G networks[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(6): 1-4, 9.
 [10] 陈希, 赵逸群, 张铭喆, 等. 星载核心网轻量化设计策略及其性能优化[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(4): 71-78.
 CHEN X, ZHAO Y Q, ZHANG M H, et al. Lightweight design strategy and performance optimization of spaceborne core network [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(4): 71-78.
 [11] 王尚广, 王超, 马骁, 等. 星载6G核心网架构与网元功能设计及验证[J]. 电信科学, 2024, 40(9): 28-43.
 WANG S G, WANG C, MA X, et al. Design and verification of the onboard 6G core network architecture and network functions[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(9): 28-43.
 [12] 中国联合网络通信有限公司. 中国联通轻量化5G核心网白皮书[R].2020.
 China United Network Communications Group Co., Ltd.. China Unicom lightweight 5G core network white paper[R].2020.
 [13] 李沸乐, 杨文聪. 5G轻量化核心网总体方案研究与设计[J]. 移动通信, 2020, 44(1): 14-18.
 LI F L, YANG W C. Research and design on the overall solutions of 5G lightweight core networks[J]. Mobile Communications, 2020, 44(1): 14-18.
 [14] 朱雪田, 王秋红, 张少伟, 等. 应急通信场景下的5G轻量核心网应用研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(2): 1-4.
 ZHU X T, WANG Q H, ZHANG S W, et al. Research on lightweight 5GC application in emergency communication[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(2): 1-4.
 [15] LIU Y, WANG L H, LU Z M, et al. A stateless design of satellite terrestrial integrated core network and its deployment strategy[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023, 21(1): 953-966.
 [16] 徐晖, 孙韶辉. 面向6G的天地一体化信息网络架构研究[J]. 天地

一体化信息网络, 2021, 2(4): 2-9.

XU H, SUN S H. Research on network architecture for the space-integrated-ground information network in 6G[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 2-9.

- [17] CHOI J, SHARMA N, GANTHA S S, et al. RAN-CN converged control-plane for 6G cellular networks[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1253-1258.
- [18] YANG J Y, GENG Y H, MAO H B, et al. Satellite-terrestrial integrated network architecture towards 6G with user plane function trimming[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2023: 799-804.
- [19] ITU-T. Y.3201: Fixed, mobile and satellite convergence - framework for IMT-2020 networks and beyond[R]. 2023.
- [20] 宗佳颖, 刘洋, 刘海涛, 等. 面向 6G 的微服务化无线网架构研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(12): 1-4.
ZONG J Y, LIU Y, LIU H T, et al. Research on 6G microservice-based wireless network architecture[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(12): 1-4.
- [21] 杨文强, 王友祥, 唐雄燕, 等. 面向云原生的 5G 核心网云化架构和演进策略[J]. 邮电设计技术, 2021(3): 12-15.
YANG W Q, WANG Y X, TANG X Y, et al. 5G core network cloudification architecture and evolution strategy based on cloud-native[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(3): 12-15.
- [22] SZALAY M, NAGY M, GEHBERGER D, et al. Industrial-scale stateless network functions[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 12th International Conference on Cloud Computing (CLOUD). Piscataway: IEEE Press, 2019: 383-390.
- [23] 闫健勇, 龚正, 吴治辉, 等. Kubernetes 权威指南: 企业级容器云实战[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
YAN J Y, GONG Z, WU Z H, et al. Kubernetes: the definitive guide [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018.
- [24] 罗永安, 包梓群, 赵恪振, 等. Kubernetes 的资源动态调度设计研究[J]. 软件导刊, 2022, 21(2): 109-114.
LUO Y A, BAO Z Q, ZHAO K Z, et al. Research on dynamic resource scheduling design based on Kubernetes[J]. Software Guide, 2022, 21(2): 109-114.
- [25] YAKUBOV D, HÄSTBACKA D. Comparative analysis of lightweight Kubernetes distributions for edge computing: performance and resource efficiency[M]//Service-Oriented and Cloud Computing. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025: 81-95.
- [26] 宋雅琴, 徐晖, 刘险峰, 等. 星地融合网络的组网关键技术探讨[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(3): 68-77.
SONG Y Q, XU H, LIU X F, et al. Exploration and discussion on key technologies for satellite-terrestrial integration networking[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(3): 68-77.
- [27] 3GPP. Procedures for the 5G system (5GS); Stage 2 (Release 19) : TS 23.502[S]. 2024.

[作者简介]



曹彩红 (1994-), 女, 大唐移动通信设备有限公司中级工程师, 主要研究方向为星地融合网络、可编程网络、无线接入网服务化等。



邢梦迟 (1994-), 女, 大唐移动通信设备有限公司中级工程师, 主要研究方向为 6G 数据服务、可编程网络、6G 网络架构等。



陆洁 (1982-), 女, 大唐移动通信设备有限公司高级工程师, 主要研究方向为星地融合, 异构网络架构, 高效传输协议等。



宋雅琴 (1993-), 女, 大唐移动通信设备有限公司高级工程师, 主要研究方向为 6G 网络架构、星地融合、数据服务。



程志密 (1980-), 女, 大唐移动通信设备有限公司高级工程师, 主要研究方向为移动通信核心网、星地融合网络技术、确定性网络技术。



徐晖 (1969-), 女, 大唐移动通信设备有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为移动通信核心网、星地融合网络技术和移动通信安全等。