

星地异构网络联合 QoS 保障关键技术

林琳¹, 朱斌¹, 王泽林¹, 王光全¹, 姚海鹏², 董涛³, 冯伟莹⁴

(1. 中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 102600;

2. 北京邮电大学, 北京 100876;

3. 航天恒星科技有限公司, 北京 100089;

4. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 针对星地异构网络的拓扑结构高动态、星地链路高差异、网络资源强受限等特征给星地融合业务高效承载带来重大挑战的问题, 深入分析星地异构网络发展现状, 提出星地异构网络联合 QoS 保障系统架构。并在此基础上, 针对跨域资源统一编排管理、星地联合 QoS 指标参考体系构建、联合 QoS 动态策略调控、星地资源按需适配与部署等关键技术进行探讨。

关键词: 星地异构网络; 服务质量; 低轨卫星

中图分类号: TN915

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024004

QoS Assurance Key Technologies in Space-Ground Heterogeneous Network

LIN Lin¹, ZHU Bin¹, WANG Zelin¹, WANG Guangquan¹, YAO Haipeng², DONG Tao³, FENG Weiyong⁴

1. China Unicom Research Institute, Beijing 102600, China

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

3. Aerospace Star Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China

4. Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: The high dynamics of the topology structure, the high variability of the links between space and ground, and the highly limited network resource in the space-ground heterogeneous network pose significant challenges. To address these challenges, a space-ground heterogeneous joint QoS assurance scheme was proposed based on deep analysis of space-ground heterogeneous network development situation. The cross-domain network resource orchestration, construction of a space-ground QoS system, dynamic policy control of heterogeneous joint QoS, and on-demand adaptation and deployment of space-ground network resources technologies were discussed.

Keywords: space-ground heterogeneous network, QoS, LEO

0 引言

为更好地适应未来社会对全球随遇接入和广域万物智联的要求, 保证用户业务的连续性和一致性体验, 各行各业在积极推进地面移动通信网络和卫星通信网络的融合。星地异构网络系统作为一种新型的网络架构, 可以将卫星、地面终端和网络设备相互连接起来, 实现全球范围的高速

数据传输和高可靠通信。其在军事通信、气象监测、海洋勘探、交通运输、物流等领域的应用越来越广泛。

星地异构网络具有卫星覆盖广、不受地域条件限制等特点, 能够在远程地区和恶劣环境下提供可靠的通信服务。近年来, 星地异构网络系统的应用在民用领域不断扩大。由于星地异构网络存在拓扑高动态、星地链路高差异、资源强受限等特征, 难以保障低时延、高可靠、一致性的差

收稿日期: 2023-11-10; 修回日期: 2024-02-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2022YFB2902503)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902503)

异化网络服务, 需要从跨域资源统一编排管理、星地异构网络联合服务质量 (Quality of Service, QoS) 指标参考体系构建、异构联合 QoS 动态策略调控、星地资源按需适配与部署等方面探索星地异构网络联合 QoS 保障系统架构及关键技术, 建立灵活管控、按需适变、高效保障的 QoS 保障方法。

1 发展现状及需求分析

星地异构网络联合 QoS 保障技术是星地融合网络面向网络融合、业务融合探讨的关键议题之一。目前, 相关标准和研究主要围绕星地异构网络结构及特性、面向异构网络的 QoS 保障技术进行探讨。

1.1 星地融合标准化进展

卫星通信在覆盖范围、可靠性、灵活性等方面可以弥补地面移动通信的不足, 5G 与卫星网络融合能够为用户提供更可靠的服务体验。因此, 相关标准化组织加紧开展二者融合的标准化工作。

第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 从 R14 开始开展星地融合的研究工作^[1-5], 目标是制定用于规范地面移动通信网络和卫星通信网络的统一标准, 将卫星网络划入非地面网络 (Non-Terrestrial Networks, NTN) 范畴; 在 R15 中明确将支持卫星接入作为 5G 系统需求; 在 R16 中对新空中接口 (New Radio, NR) 支持 NTN 解决方案, 明确了透明接入、分布单元上星和 NR 上星 3 种卫星接入 5G 系统的架构; 在 R17 中针对卫星接入对核心网的影响问题及解决方案进行研究和评估; 在 R18 中正在对卫星接入多连接、核心网上星和星上边缘计算等卫星与 5G 的融合增强特性进行研究, 深入推动 5G 与卫星网络融合演进。

国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 下设 ITU-T 及 ITU-R 等工作组。ITU-T 相关星地融合工作主要在 SG13 开展。2020 年 ITU-T SG13 设立“IMT-2020 网络及增强: 固移卫融合”课题, 重点研究空地多接入融合网络的需求、架构、关键能力、使能技术和业务增强, 在研空地业务连续性、能力开放、策略控制、QoS 保障等 10 余项相关标准, 是全球首个空地一体国际标准体系。2023 年 4 月, ITU-T SG13 针对 6G 网络提出“IMT-2030 网络: 固移卫融合”, 启动 6G 空地一体化标准研究。

ITU-R 相关星地融合工作主要在 SG4 开展。ITU-R 于 2019 年 7 月正式发布“Considerations on the Integration of Satellite-Based Solutions into 5G Networks”^[6]。该报告对 5G

卫星网络的应用场景、业务范围和关键技术等内容进行了定义和分析, 提出了星地 5G 融合的 4 种应用场景, 包括中继到站、小区回传、动中通及混合多播场景, 并提出支持这些场景必须考虑的关键因素, 包括多播支持、智能路由支持、动态缓存管理及自适应流支持、时延、一致的服务质量、网络功能虚拟化 (Network Functions Virtualization, NFV) / 软件定义网络 (Software Defined Network, SDN) 兼容、商业模式灵活性等。2022 年 9 月 ITU-R 发布 5G 卫星无线电接口愿景与需求报告: Vision and Requirements for Satellite Radio Interface of IMT-2020^[7], 报告明确了 5G 卫星部分三大应用场景增强移动宽带 (Enhanced Mobile Broadband-Satellite, eMBB-s)、海量机器类通信 (Massive Machine-Type Communications-Satellite, mMTC-s)、高可靠通信 (High Reliability Communications-Satellite, HRC-s), 并为满足多样化应用场景需求针对 5G 卫星部分定义了十三大关键性能指标, 包括速率、频谱效率、时延、流量密度、可靠性、移动性和带宽等。

1.2 星地融合网络架构及 QoS 保障技术研究进展

在网络架构方面, 参考文献[8]提出由“感知平面-数据平面-控制平面-智能平面-应用平面”组成的天地融合网络体系架构。参考文献[9]提出天地一体多业务融合的物联网架构。参考文献[8-9]结合 SDN/NFV 技术、人工智能技术等为星地融合网络资源高效利用、架构设计提供了解决思路。参考文献[10]提出了一种面向 5G 卫星网络的灵活的网络切片技术, 设计了基于卫星网络的边缘计算系统架构和资源管理机制, 用于在不同应用场景和业务需求下, 根据不同的 QoS 需求分配资源。参考文献[11]提出了一种天地融合网络一致性能力开放方案, 将 5G 能力扩展至卫星通信领域应用。参考文献[12]提出了一种面向高速星地协同网络的卫星边缘计算集成架构, 该架构采用 NFV 技术将计算资源整合到低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星的覆盖范围内。此外, 该文还提出了一种任务调度模型, 以确保 QoS 保障并降低用户感知的时延和系统能耗。参考文献[13]介绍了一种无服务器 SDN 架构, 该架构可为不同的 6G 服务级别协议动态协调通信和计算资源, 并且提供了一个多层机器学习框架, 该框架使用一个统一的控制平台来根据空间和地面层的交互优化网络和资源分配。

针对星地异构网络中超远程实时类、密集连接类、高速移动宽带类、大容量传输类、确定性传输类等典型业务场景差异化巨大的现象, 业务驱动的星地异构网络共享 QoS 编排是需要解决的关键问题。参考文献[14]关注如何在地球-卫星混合云网络中有效地部署定制的服务功能链

(Service Function Chain, SFC), 首先提出了一个用于云 SFC 部署的弹性框架, 然后提出了一个有效的 SFC 映射方法来提高系统资源利用率, 最后通过大量用例在概念验证原型上验证了所提出的框架, 并通过基于真实世界拓扑的大量模拟来评估所提出的映射方法。

针对星地无线接入与空间承载 QoS 在星地异构网络中适配的难题, 需结合分层分域的星地异构资源特性, 研究星地异构网络层域资源 QoS 分解方法。参考文献[15]针对非对地静止卫星 IP 网络提出了一种模糊卫星路由策略 (Fuzzy Satellite Routing Strategy, FRSR), 建立了一组模糊规则来映射拥挤度和语言变量以满足多等级 QoS 需求。

针对星地传输机制的差异性对于 QoS 的影响, 需研究星地异构网络联合 QoS 调度方法。参考文献[17]对 LEO 卫星上行传输调度方案进行了优化, 结合模拟退火算法和蒙特卡罗 (Simulated Annealing and Monte Carlo, SA-MC) 算法, 提出了一种新的传输调度算法来实现动态优化的调度方案, 仿真结果表明了 SA-MC 算法在降低成本和快速收敛方面的有效性。

综上, 星地异构网络联合 QoS 保障技术是业界关注的研究热点之一, 业界从网络架构、QoS 编排、资源映射、调度方法等方面开展了多角度的探讨研究。

2 星地异构网络联合 QoS 保障系统架构及关键技术

星地异构网络旨在通过充分发挥星地信息技术的各自优势, 为各类用户提供实时、可靠、按需的一致性服务。其主要应用场景从广域覆盖、应急通信等典型场景, 进一步扩展至人工智能、智慧城市等新兴业务, 对网络提出了低时延、高可靠、高效能和超高密度连接等多样

化需求。为此, 本文针对星地异构网络时空尺度大、拓扑动态强、链路异构等特性, 通过深度融合软件定义网络、网络功能虚拟化、人工智能等信息网络技术, 探索面向动态拓扑、异构链路与多样化需求的星地异构网络联合 QoS 保障系统架构。

2.1 星地异构网络联合 QoS 保障系统架构

本文研究内容基于的星地异构网络架构及业务场景如图 1 所示, 其异构特性主要体现在卫星网络与地面移动网络融合组网所带来的传输链路、协议、能力等方面的高差异性。用户终端直连卫星实现数据交互, 终端类型包括手持终端、物联网终端、甚小口径天线终端 (Very Small Aperture Terminal, VSAT) (包括车、船、机载等) 等。在天基段, 由于低轨卫星具有在卫星互联网领域数据传输灵活、应用场景丰富等优势, 因此天基段以低轨卫星节点为主, 并结合网络发展趋势考虑基站、核心网功能上星场景。地基段由地面无线接入、承载网、融合核心网、数据网构成。

在星地异构网络架构基础上, 本文所提星地异构网络联合 QoS 保障系统架构如图 2 所示, 以参考文献[8]所提出的天地融合网络系统架构为基础, 针对 QoS 保障进行系统构建。

基于分层分域、数控分离的思想, 将星地异构网络联合 QoS 保障系统划分为应用层、控制层、网络层。

应用层是网络服务需求单元, 包括各类星地融合业务, 例如基于位置服务、基于测距服务、基于遥感成像服务等, 可进一步支持应急通信、海洋通信、航机服务, 以及各类目标检测、识别和监控等通信服务, 通信应用、卫星服务及卫星应用。应用层将网络服务请求发送给控制层, 并在控制层转化为网络资源需求描述。

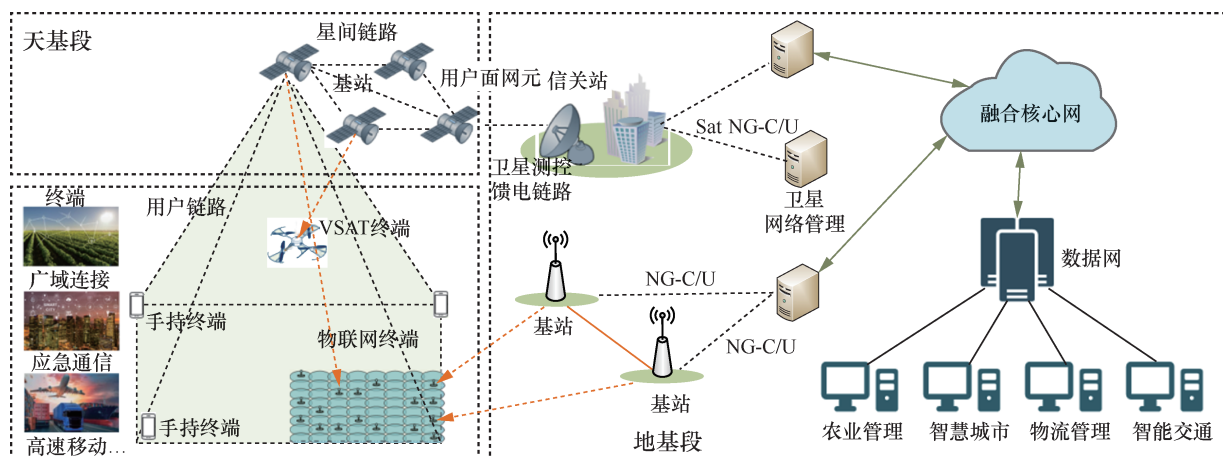


图 1 星地异构网络架构及业务场景

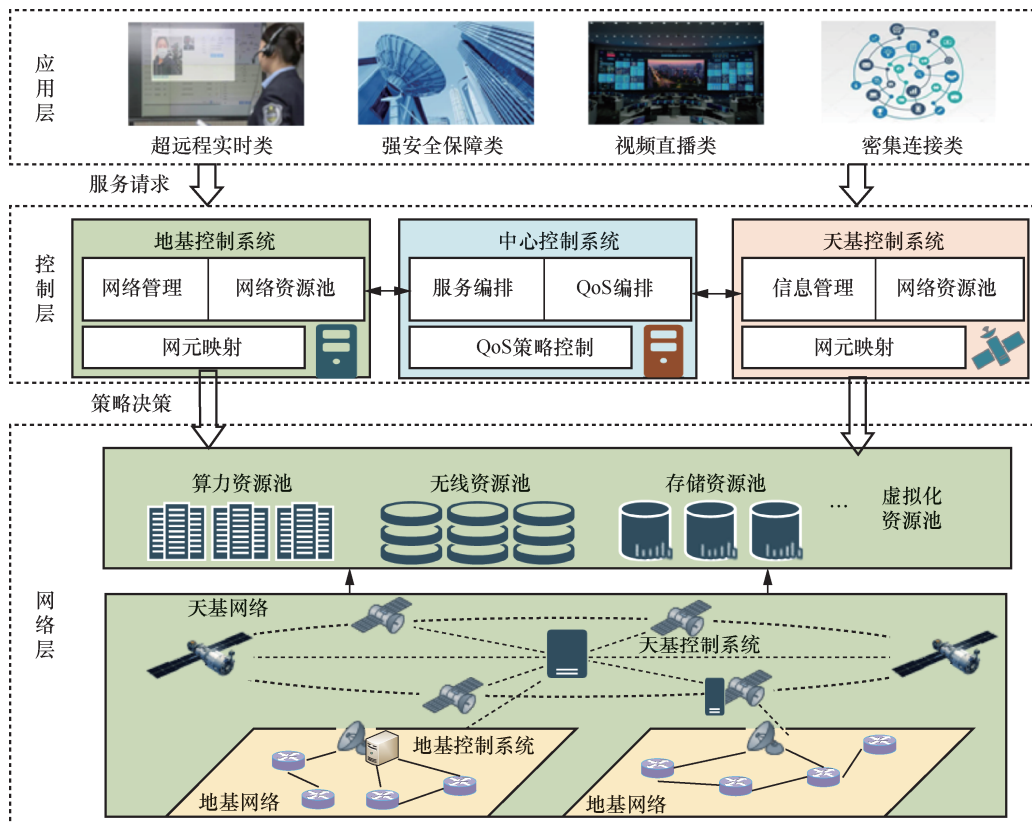


图 2 星地异构网络联合 QoS 保障系统架构

控制层是星地异构网络联合 QoS 保障系统核心控制单元,通过南北向/东西向接口提供系统之间的逻辑互联,实现多级控制和跨域协同管理。控制单元由中心控制系统、天基控制系统和地基控制系统组成。中心控制系统基于星地异构网络全局态势以及相应的业务需求,生成全局资源调度策略。中心控制系统通过南向接口向天基控制系统和地基控制系统下发控制策略和 QoS 需求,实现对星地异构网络的全局控制。天基控制系统和地基控制系统的功能是基于中心控制系统下发的控制策略和 QoS 需求,结合域内网络态势生成域内最优控制策略并通过南向接口下发至域内网元。

网络层包括地基网络资源、卫星网络资源,围绕网络带宽、存储、计算、频率等资源,以分布感知、集中分析相结合的多维资源监测与聚合机制,分域对天基资源和地基资源进行收集,对物理节点和物理链路进行分类处理。可借助网络功能虚拟化技术构建多维多域网络资源池,实现全域资源抽象及统一描述、管理。

2.2 多维异构资源虚拟化及编排

网络层主要由各类异构的网络基础设施组成,包括 4G/5G 等移动通信网络资源、天基卫星系统及其配套的地面网络资源。异构特性体现在地基网络和天基网络在体

系架构、体制和接口等方面的高度差异性,多维特性体现在网络资源需从功能、算力、存储等多角度进行抽象、映射、描述。

面对星地异构网络资源的多维异构特征,采用虚拟化技术对物理资源进行抽象,形成统一的资源池。在此基础上,对于用户的服务请求控制层基于虚拟资源进行按需资源编排,不再受限于星地物理资源异质、能力差异等异构特性的约束,资源调度更灵活。然而星地异构网络的星座拓扑高动态、卫星节点资源受限、星间链路异构等特征,为资源池构建与动态管理带来了挑战。一方面,在时间尺度上,卫星节点的高速移动,导致相对地面用户的天基资源类别、数量等随时间变化呈现高动态性;另一方面,在空间尺度上,星间、星地链路跨度大,物理资源的动态变化难以在虚拟资源池中实时更新,进而影响控制器资源调度的精确性。

以上问题可通过以下 3 部分内容逐级实现星地异构网络全域资源统一描述与表征。首先,可通过异构资源表征的图结构搭建实现动态大规模天基承载资源的描述与表征。根据天基承载网络的运行环境、实时状态等多维资源信息,采用层域关联表示与特征抽取的天基承载资源描述与表征方案。在此基础上,基于特征向量中心性等图结构

最优解，为星地融合业务提供更准确的性能预测和质量保障，从而实现更好的业务驱动。

第二，通过参考现有标准进展构建星地异构网络下全局 QoS（端到端）参数范围，为形成全局 QoS 指标提供参考。值得指出的是，长期以来卫星系统和地面移动通信系统具有独立的业务质量保障体系及指标，如地面 5G 移动通信系统具有基于 5G QoS 标识符（5G QoS Identifier, 5QI）的 5G QoS 指标体系^[3]，卫星系统由于基于机制不同未形成统一的 QoS 指标体系，在数字视频广播等体制下探讨 QoS 指标^[18]。如何合理描述端到端一致性 QoS 指标存在体系融合难题。基于最新标准研究进展，CCSA SR 410-2-23 给出了基于 5G 的卫星通信系统的性能需求研究，具体见表 2。上述研究可作为全局 QoS 参数范围研究基础，同时可通过端到端构建星地异构网络仿真环境进行参数测量修正。

表 2 基于 5G 的卫星通信系统的性能需求^[19]

性能	性能描述		
服务区域	具备高度 200 km 及以下空间和地面的服务能力		
终端移动性	手持终端：0~250 km/h； VSAT 终端：0~1 200 km/h		
体验速率	手持终端	上行速率	下行速率
		100 kbit/s	1 Mbit/s
	VSAT 终端	25 Mbit/s	50 Mbit/s
数据流数	支持单流传输（单发单收）		
链路质量	往返路程时间 ≤ 20.04 ms（LEO, 600 km）； 往返路程时间 ≤ 34.19 ms（LEO, 1 200 km）		
	端到端时延抖动（语音） ≤ 50 ms		
	端到端丢包率（语音） $\leq 10^{-2}$		
	端到端丢包率（数据） $\leq 10^{-3}$		
入网时间	平均入网时间小于 5 s（与应用场景有关）		
星间切换	星间切换失败概率，一般终端/业务 $\leq 1\%$ 。 切换时延 ≤ 100 ms（只对于 LEO 卫星，未计入终端天线指向所需时间）		
VSAT 终端仰角	LEO 卫星要求终端仰角 $\geq 30^\circ$		

第三，针对星地异构网络多层多域网络特性，设计星地异构网络全局 QoS 面向地面网络层、星上网络层，面向接入域、承载域、核心网域的多层多域 QoS 分解方法。在实现分层分域 QoS 协同智能调整时，考虑不同层域之间相互耦合和影响的关系。以此，构建星地异构网络 QoS 逐级分解与高效耦合模型，使星地异构网络端到端全局 QoS 与层域 QoS 最优适配，为后续域内网络资源映射及业务传输执行提供域内 QoS 任务指标。

2.4 异构网络资源按需调度与 QoS 保障机制

在星地异构网络中，网络资源特征不同、资源状态时变、网络资源需求差异大等，均为星地异构网络资源管理及调度带来挑战，而星地异构网络资源强受限的特性使得传统的网络资源管理及调度方式并不适用。为实现网络资源细粒度及差异化配置，提高网络资源利用率，需依据星地异构网络中的资源状态与业务需求，构建一种按需适配的新型资源按需调度及管理方式。

面向星地异构网络高差异化服务对传输资源动态实时的调度需求，传统的单一控制器架构重度依赖控制器的统筹协调能力，当用户节点数量增多时无法保证服务质量。针对星地异构网络的多层多域性，集中式-分布式的分层分域动态调控架构可以兼顾星地接入和空间承载一体化，具有更高的灵活性和延展性，使得系统可以实现高精度的实时调控，具体架构如图 4 所示。该架构主要由中心控制系统、天基控制系统和地基控制系统组成，分别通过南北向/东西向接口提供系统之间的逻辑互联，实现多级控制和跨域协同管理。中心控制系统的功能是基于星地异构网络全局态势以及相应的业务需求，生成全局最优资源调度策略，实现端到端传输资源按需调度。中心控制系统通过南向接口向天基控制系统和地基控制系统下发控制策略与 QoS 需求，实现对星地异构网络的全局控制。天基控制系统和地基控制系统的功能是基于中心控制系统下发的控制策略和 QoS 需求，结合域内网络态势生成域内最优控制策略并通过南向接口下发至域内网元。

与此同时，引入任务 QoS 和监测 QoS 比对机制，设计多层闭环 QoS 资源按需动态调控方法，是对用户服务质量的重要保证方式，图 5 给出了多层多域闭环 QoS 保障机制框架。首先，主控制器根据输入的差异化业务，基于 2.3 节所提方法进行全局 QoS 分解，提取分层分域任务 QoS 并下发至各分布式控制器，形成业务需求-全局 QoS-任务 QoS 闭环分解；然后，各分布式控制器将其任务 QoS 与其域内池化资源进行按需匹配，生成域内最优资源调度策略，进行任务 QoS-池化资源闭环分配；最后，将资源调度策略与物理网元进行自适应适配，各网络节点执行资源调度策略，实现任务传输。域内监测点将在完成任务传输后向主控制器上报网络状态以及 QoS 实时结果，实时 QoS-全局 QoS 闭环监测。主控制器根据实时 QoS-全局 QoS 比对结果做出 QoS 策略动态调控，下发调控策略至分布式控制器进行网络资源重新分配。通过全局 QoS-任务 QoS-实时 QoS 多层闭环监控，实现网络资源按需动态分配、QoS 控制策略智能调控、端到端业务质量有效保障的多层多域 QoS 保障机制。

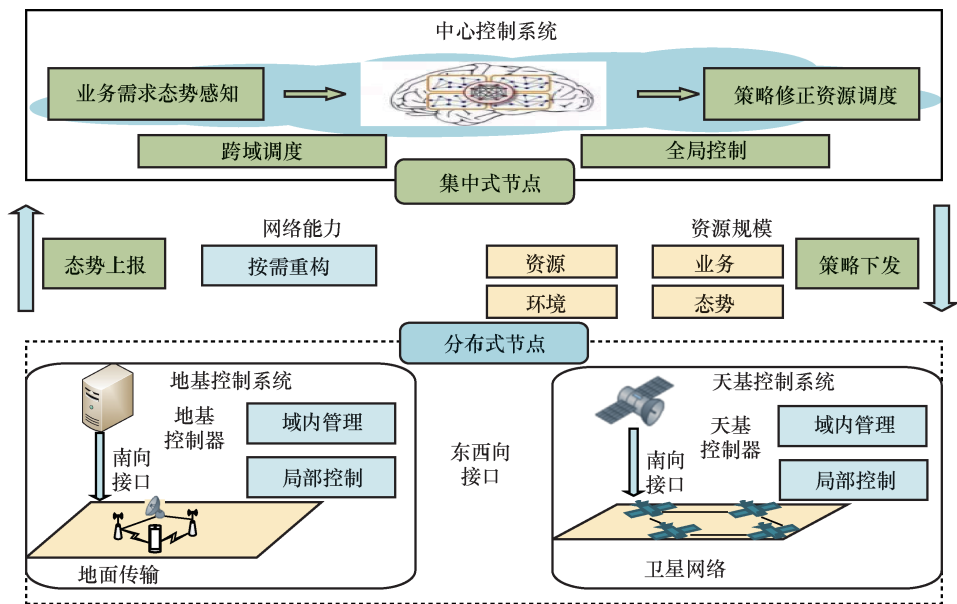


图 4 集中式-分布式的分层分域动态调控架构

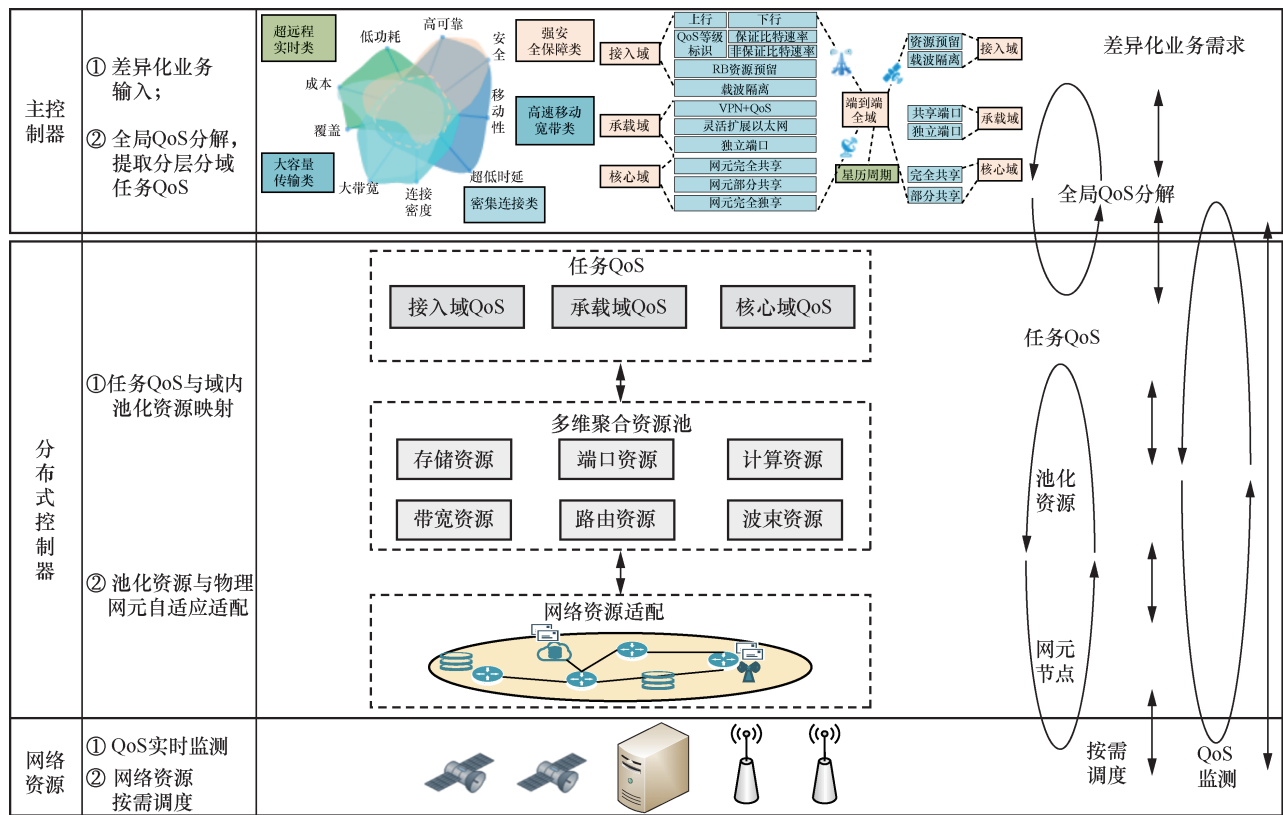


图 5 多层多域闭环 QoS 保障机制框架

3 结束语

本文面向星地异构网络的拓扑结构高动态、星地链路高差异、网络资源强受限等特征给星地融合业务高效承载带来的重大挑战，深入分析星地异构网络发展现

状，提出星地异构网络联合 QoS 保障系统架构。在此基础上针对网络异构、时空尺度大、业务需求差异化等带来的星地异构网络服务质量保障挑战，提出跨域资源统一编排管理、星地联合 QoS 指标体系构建、异构联合 QoS 动态策略调控、星地资源按需适配与部署等，实现

灵活管控、按需适变、高效保障的星地异构网络联合 QoS 保障方法。

参考文献：

- [1] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 V15.4.0 [S]. 2020.
- [2] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN):TR 38.821 V16.0.0[S]. 2019.
- [3] 3GPP. Service requirements for the 5G system; Stage 1:TS 22.261 V18.3.0[S]. 2021.
- [4] 3GPP. Study on using Satellite Access in 5G; Stage 1:TR 22.822 V16.0.0[S]. 2018.
- [5] 3GPP. Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 17:TS 22.261[S]. 2019.
- [6] ITU-R. Key elements for integration of satellite systems into next generation access technologies: M.2460[S]. 2022.
- [7] ITU-R.Vision and requirements for the satellite radio interface(s) of IMT-Advanced: M.2176-1[S]. 2012.
- [8] 张婷婷, 武楠, 姚海鹏. 天地融合网络智能组网体系架构研究[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 47-55.
ZHANG T T, WU N, YAO H P. Research on intelligent networking architecture for the integrated space-terrestrial networks[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 47-55.
- [9] 魏肖, 张景, 金子傲, 等. 天地一体多业务融合的物联网架构和关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 3-12.
WEI X, ZHANG J, QUAN Z A, et al. The architecture and key technologies of the Internet of things with integration of heaven and earth and multi services[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 3-12.
- [10] CAO S Z, WEI J Y, HAN H, et al. Space edge cloud enabling network slicing for 5G satellite network[C]//Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 787-792.
- [11] 林琳, 朱斌, 王泽林, 等. 天地融合网络一致性能力开放方案[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 81-86.
LIN L, ZHU B, WANG Z L, et al. Network capability exposure scheme in satellite and ground merged network[J]. Space- Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 81-86.
- [12] ZHANG Z J, ZHANG W Y, TSENG F H. Satellite mobile edge computing: improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 70-76.
- [13] SHIH-CHUN L, CHIA-HUNG L, C C L, et al. Towards resilient access equality for 6G serverless p-LEO satellite networks[EB]. 2022.
- [14] FENG B H, LI G L, LI G W, et al. Enabling efficient service function chains at terrestrial-satellite hybrid cloud networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(6): 94-99.
- [15] JIANG Z Q, LIU C H, HE S B, et al. A QoS routing strategy using fuzzy logic for NGE0 satellite IP networks[J]. Wireless Networks, 2018, 24(1): 295-307.
- [16] WANG F, JIANG D D, WANG Z H, et al. Fuzzy-CNN based multi-task routing for integrated satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71(2): 1913-1926.
- [17] WANG L, LIU S J, WANG W D, et al. Dynamic uplink transmission scheduling for satellite Internet of Things applications[J]. China Communications, 2020, 17(10): 241-248.
- [18] DVB. Specifications, second generation satellite extensions: TR 102 376-2 V1.2.1[S]. 2021.
- [19] CCSA. 基于 5G 的卫星通信系统研究: SR 410-202[S]. 2023.
CCSA. Research on satellite communication system based on 5G: SR 410-202[S]. 2023.

[作者简介]



林琳 (1986—), 女, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为网络技术演进、网络能力开放、星地融合能力应用等。

朱斌 (1980—), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院教授级高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、核心网技术等。

王泽林 (1983—), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为网络技术、数据与接入等。

王光全 (1968—), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院教授级高级工程师, 主要研究方向为网络技术、光通信、量子加密通信等。

姚海鹏 (1984—), 男, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星互联网、人工智能、机器学习、未来网络体系架构等。

董涛 (1975—), 男, 航天恒星科技有限公司研究员、博士生导师, 主要研究方向为空间光通信与空间网络。

冯伟莹 (1986—), 女, 北京航空航天大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为空间环境、数据信号处理等。