



研究与开发

面向天地一体化的确定性网络技术研究

张雨曼¹, 朱厦², 梁国鑫¹, 周家恩¹, 赵亚飞¹, 彭木根¹

(1. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876;

2. 国网思极位置服务有限公司, 北京 102209)

摘要: 卫星通信是未来通信领域的关键技术, 低轨互联网星座是 6G 空天地海一体化网络的战略性基础设施, 能够将当前通信网络扩展到全球近地区域。确定性网络技术是天基网络的重要技术之一, 相比传统尽力而为的分组网络, 确定性网络具有低时延、低抖动、低丢包率、高可靠的优势。概述了确定性网络当前的研究背景及现状, 提出面向卫星通信的确定性网络架构, 阐述了其关键技术, 最后讨论了未来研究方向。

关键词: 星地融合; 确定性网络; 时间敏感; 资源管理

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024010

Research on deterministic networking technology for space-ground integrated

ZHANG Yuman¹, ZHU Xia², LIANG Guoxin¹, ZHOU Jiaen¹, ZHAO Yafei¹, PENG Mugen¹

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. State Grid Siji Location based Service Co., Ltd., Beijing 102209, China

Abstract: Satellite communication is a critical technology in the future of the communication field. Low earth orbit Internet constellations is a strategic infrastructure for the 6G integrated space-air-ground-maritime networks, which is capable of expanding the current communication network to the global near-earth region. Deterministic networking technology is a key component of space-based network, compared with the traditional best-effort packet network, it has the advantages of low latency, low jitter, low packet loss rate, and high reliability. Firstly, the current research background and status of deterministic networking were summarized, and then a deterministic networking architecture for satellite communications was proposed and its key technologies were described. Finally, the outlook for future research directions was discussed.

Key words: integration of satellite and terrestrial, deterministic networking, time sensitive, resource management

收稿日期: 2023-09-30; 修回日期: 2024-01-11

基金项目: 北京市科技计划项目 (No.Z221100007722012)

Foundation Item: Beijing Municipal Science and Technology Project (No.Z221100007722012)

0 引言

随着通信网络不断更新换代,网络能力不断增强,相比前代通信网络,无论当前的 5G 还是未来的 6G,通信的深度和广度都将有质的飞跃,更加高效地服务人类社会^[1]。然而,伴随通信能力的提高,各行业新兴业务对服务时延有了更高的要求^[2],当前基于尽力而为的网络在面对诸如智能驾驶、工业控制、远程手术、云游戏等新兴时延敏感业务时,难以提供确定性时延及算力保障^[3]。传统尽力而为的网络仅提供数十毫秒的端到端时延,无法承担毫秒级乃至微秒级的业务需求。确定性网络通过采用多层技术,从而实现网络确定性时延、抖动、丢包率、带宽及可靠性等。

近年来,卫星通信技术迅速发展,低轨卫星数量激增,基于低轨卫星网络的业务类型也随之暴涨。基于低轨互联网技术的 Starlink 星座在侦察、监控、目标定位等各方面展现了巨大优势,这些至关重要的业务都需要更低、更稳定的时延保障。受限于当前低轨卫星透明转发及高移动的特性,低轨卫星网络的服务质量在传统网络模式下难以得到稳定保障,严重影响了天基时延敏感型业务的应用和发展^[4],因此,改进卫星网络的服务模式及数据转发模式,已经成为提高天基网络服务能力的必然趋势^[5]。确定性网络作为未来网络的关键技术之一,能够根据网络基础设施能力提供稳定、确定的网络服务,保障用户服务的下界。确定性网络使能的卫星通信不仅能提供可预测、可定量的网络服务,还能够凭借定量的算力资源,提供可持续的算力服务,提升业务稳定性及可扩展性^[6]。

当前卫星网络架构简单、组网困难,缺乏高可用的网络及算力资源管理方案,要实现卫星通信的确定性网络,需要构建高效的资源管理方案,搭建完备可控可调度的通信及算力基础设施,充分考虑卫星网络的高移动、异构、资源受限等特

性,打造通信计算一体化的确定性资源分配,为不同业务调度确定网络及算力资源,构建一体化资源切片,从物理层、链路层、网络层共同优化,提供可靠的网络及算力服务保障,从而打造高可靠的天基确定性服务网络。面对以上问题,需要全面分析天基网络与确定性网络耦合的必要性及切入点,结合低轨卫星网络高移动性的关键痛点与确定性网络能够在融合异构网络中提供确定性服务的优势,形成耦合,支撑 6G 网络“超大规模连接”“极可靠通信”的愿景。

1 相关技术背景与现状

1.1 确定性网络背景

当前,民用通信领域对卫星通信的依赖性逐渐增加,从卫星电话到华为的“捅破天”技术,卫星通信逐渐扮演更加重要的角色,在面对军事指挥、场景判断、目标侦察、应急救援以及边远信息传输等业务时,低轨星座互联网需要提供更加稳定和可靠的服务,在应对特殊业务时,也需要保障稳定、确定的服务时延及能力。确定性网络凭借其高可靠性、高确定性成为未来网络技术的代表,也是满足低轨互联网业务需求的关键技术,本节介绍确定性网络技术在天地一体化网络中的发展和研究现状。

1.2 确定性网络技术

确定性网络能够在传统以太网的基础上,提供确定性的服务保障,不同于尽力而为的传统网络,确定性网络能够将数据以“无差错”“确定性时延”的模式传输,从而保障工业互联网、远程医疗、自动驾驶等新兴业务的性能需求^[7]。在业界公认的未来网络关键技术中,确定性网络以其低时延、稳定带宽、收敛抖动、低丢包率、高可靠性等技术特征成为关键代表技术^[8]。当前,确定性网络技术已产生许多关键内容,本节主要介绍与卫星通信相关的灵活以太网(flexible Ethernet, FlexE)、时间敏感网络(time-sensitive net-



working, TSN)、确定性网络 (deterministic network, DetNet)。

1.2.1 灵活以太网

灵活以太网基于传统网络技术,通过在介质访问控制 (medium access control, MAC) 层和物理 (physical, PHY) 层之间额外引入逻辑层,基于时隙分配器实现其核心架构,进一步实现了 MAC 层与 PHY 层的解耦,实现通信速率的灵活匹配^[8]。灵活以太网能够支持更加灵活的带宽颗粒度,不依赖于光传输设备能力,支持面向多业务承载的增强服务质量 (quality of service, QoS) 能力。通过采用灵活以太网技术,能够实现业务间的通信流隔离,可以针对业务通信需求对其进行按需扩容,同时能够支持不同业务流的分片承载。灵活以太网技术是支撑新型网络建设、发展及推进的关键技术^[9]。

1.2.2 时间敏感网络

时间敏感网络主要应用于二层网络,在汽车控制、智能电网、工业互联网等领域有较多应用,通过采用相应协议或标准,解决网络确定性保证问题^[10-12]。其技术体系如图 1 所示,其通过极高精确度的时钟同步机制,针对不同优先级的网络流量进行整形,并进行资源预先配置和服务预先配置。

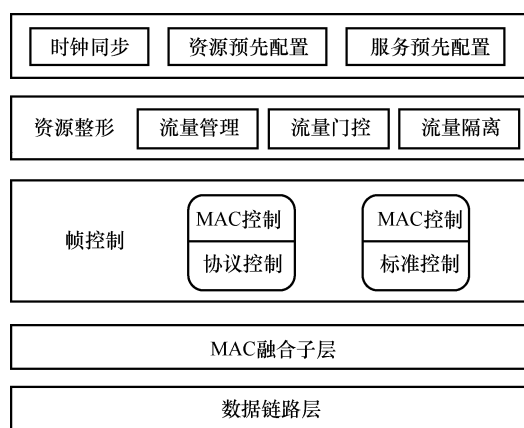


图 1 时间敏感网络技术体系

1.2.3 确定性网络

确定性网络主要关注在集中管理控制或封闭

管控组内的网络实现确定性服务保障,借鉴 TSN 技术,服务第二层和第三层路由段的确定性数据路径,允许流的确定性转发及共网传输^[13],实现方法主要包括资源预留、释放/重用闲置网络资源、集中控制、显性路由、抖动消减、拥塞保护、多径路由等。

1.3 确定性网络技术发展状况

当前,确定性网络技术产业主要包括硬件供应商、确定性技术服务商和各行业用户。其中硬件供应商主要为整个产业提供相应的基础硬件,如支持确定性网络技术的各种 PHY 芯片、中央处理器 (central processing unit, CPU)、图形处理器 (graphics processing unit, GPU)、神经网络处理器或神经处理单元 (neural processing unit, NPU)、现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 等处理芯片,在此基础上,针对不同的确定性网络应用场景,硬件供应商设计制作不同的硬件设备,并针对不同架构的设备提供管理及控制系统,硬件供应商作为行业的源头,其技术发展制约了行业的建设和推进,是确定性网络行业的关键。确定性网络技术需要硬件供应商提供支持网络转发及可编程能力的芯片,以支撑行业平滑演进,为硬件设备提供确定性能力的集成和供给。随着确定性网络技术的不断发展和完善,硬件供应商能够实现低成本硬件方案,支撑确定性网络技术快速发展。

在确定性网络技术不同应用场景中,如通信、电力、交通等领域,各大头部企业都参与了确定性网络技术的推进和建设,包括电信运营商、华为等设备商以及各个领域头部企业,如国家电网、中国高铁等。在不同领域,这些企业都大量推进确定性网络在实际应用中的论证及研究,并广泛开展试点^[14-15]。在卫星通信领域,由于中国卫星互联网建设尚处于初期阶段,未有大规模试点应用,但可以预见,随着卫星互联网应用的日渐丰富及其在军事领域及民用领域的深度切入,卫星互联网构建确定

性网络是未来低轨互联网发展的必由之路。

1.4 卫星通信网络发展现状

为了弥补地面网络的不足,各国相继提出了低轨卫星网络部署计划。美国 SpaceX 公司推出 Starlink 计划,计划总发射卫星数量达 4.2 万颗,预计在 2027 年完成星链卫星的部署^[16]。美国亚马逊公司于 2019 年宣布启动 Project Kuiper 项目,计划部署 3 000 余颗低轨卫星组成太空卫星网络^[17]。英国/印度太空互联网公司 OneWeb 目前拥有世界第二大规模的卫星星座,在轨卫星数量仅次于 SpaceX 公司的 Starlink。加拿大卫星通信公司 Telesat 公司推出 Lightspeed 计划,以构建全球互联网星座,从而提供高带宽、低时延的互联网接入服务。

我国也相继提出了一系列低轨星座部署计划。由中国航天科技集团主导的“鸿雁计划”^[18]旨在建设一个全球移动通信卫星星座系统,为边远山区、边疆等偏远地区通信空白地带提供高质量的通信服务。鸿雁星座项目于 2018 年首次发射两颗试验卫星,随后,我国陆续发射更多卫星,逐步推进星座系统建设。中国航天科工集团有限公司提出“虹云工程”^[19],充分利用卫星技术和云计算技术为用户提供高效的数据处理和云服务,融合低轨导航增强和多样化遥感,实现通-导-遥一体化。此外,我国的民营企业也在积极推进卫星通信的研究,例如,银河航天(北京)科技有限公司推出“银河 Galaxy”计划,计划在 2035 年前发射总计 2 800 颗卫星,以实现全球范围的覆盖。

文献[20]研究了在低轨卫星网络中引入移动边缘计算技术的无线资源管理问题,但只考虑了通信和计算资源的高效管理,未考虑提供确定性服务。文献[21]中提出了两种资源调度算法,适用于传统卫星通信的场景,但要适配到确定性卫星通信网络中还面临很大挑战。天基确定性算力网络可以通过算网资源切片、流量整形、资源管理等技术打造“大带宽、低时延、低抖动、高可靠性”的网络,更好地应对网络故障和干扰,确保

数据的可靠传输,从而提高实时通信和互动应用的性能。

2 天地一体化确定性网络架构

2.1 卫星确定性通信网络体系架构

卫星通信网络将传统的地面通信网络扩展到天基网络,利用卫星信号覆盖面积大、不受地形及地理灾害影响等特点,有望实现卫星节点之间、终端设备与卫星节点之间的“准时、准确、快速”的确定性通信^[3]。卫星确定性通信网络体系主要由空间段、地面段、用户段 3 部分组成,其架构如图 2 所示。

(1) 空间段

空间段是卫星通信网络的核心部分,包括卫星平台、有效载荷和星间链路。卫星平台是由地球静止轨道(geosynchronous earth orbit, GEO)卫星、中地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星、低地球轨道(low earth orbit, LEO)卫星的多颗通信卫星组成的卫星星座,工作频段涵盖 L、S、C、Ku、Ka 等,可以提供更丰富的频率资源。有效载荷是卫星平台中的关键组成部分,对地面站发送的信号进行接收、处理与交互,考虑星上计算能力有限,大型管理计算任务一般交付地面段处理。为保障空间段确定性通信能力,不同卫星之间通过星间链路组成空间段网络,进行信号处理和确定性路由转发,部分卫星需要部署星上监督功能,进一步保障通信业务的确定性时延抖动。

空间段在功能上可以分为天基骨干网和天基接入网。天基骨干网由通信链路可靠性高的地球静止轨道卫星组成,负责联络卫星节点,并与地面交换控制信令,获得地面提前计算好的确定路由和调度信息,调配天基网络资源^[22],是天基网络的重要核心。天基接入网由距离地面更近的多颗中低轨卫星组成星座网,数据传输容量大,信号衰减较小,是用户接入网络的接入点^[23]。

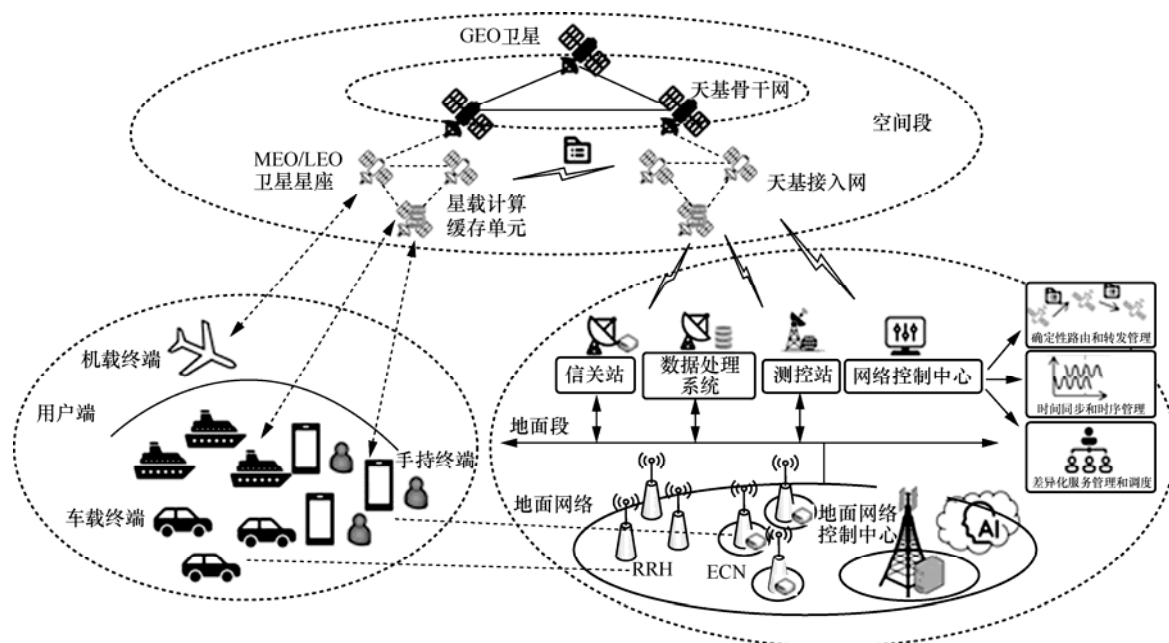


图2 卫星确定性通信网络体系架构

(2) 地面段

地面段是卫星通信网络的地面部分，通常由信关站、数据处理系统、测控站、网络控制中心^[24]及地面网络组成。地面段的主要功能是与卫星建立稳定的通信链接，以支持数据、声音、视频的传输。地面段通过馈电链路和空间段互联，对空间段的数据和状态进行实时的监测、控制和管理。网络控制中心承担主要的确定性管理部分，可以实现确定性路由和转发管理、时间同步和时序管理、差异化服务管理和调度等，为天基网络的确定性提供高质量保障。

(3) 用户段

用户段是卫星通信网络的终端部分，包括各种车载、船载、机载等用户终端（固定或移动终端）、业务支撑系统、信息服务平台等。用户段的主要功能是连接终端用户或设备，可以通过地面网络间接接入天基网络，也可以直接接入天基网络进行通信，后者目前还在研究阶段。面对用户段的差异化服务需求，根据不同场景和业务下的时延、带宽、优先级等要求，地面段的控制中心

进行不同的资源调度，以实现天基网络性能的确定性，提高用户的服务体验。

2.2 一体化确定性网络管理架构

天地一体化网络中，通信卫星执行地面控制中心下达的命令，并受测控站的实时监测，动态调整资源分配，为地面网络提供高质量通信。为了实现网络的确定性，不仅要考虑基本的网络容量和时延保障，还需要考虑资源的预留与调度和高效的路由规划，以实现紧急任务的及时响应，满足差异化服务需求。

本文提出的天基确定性网络采用集中式的架构，以地面网络为核心，卫星网络为扩展，实现高效的资源调度、资源管理、天基网络状态实时监控与管理。确定性网络管理的架构主要包括基础设施层、网络转发层、监测管理层、存储与安全层、业务应用层以及各层之间的接口。天基确定性网络管理架构如图3所示。

(1) 基础设施层

基础设施层包括信关站、地面站、卫星平台、卫星通信有效载荷、信号处理设备和网络运控系

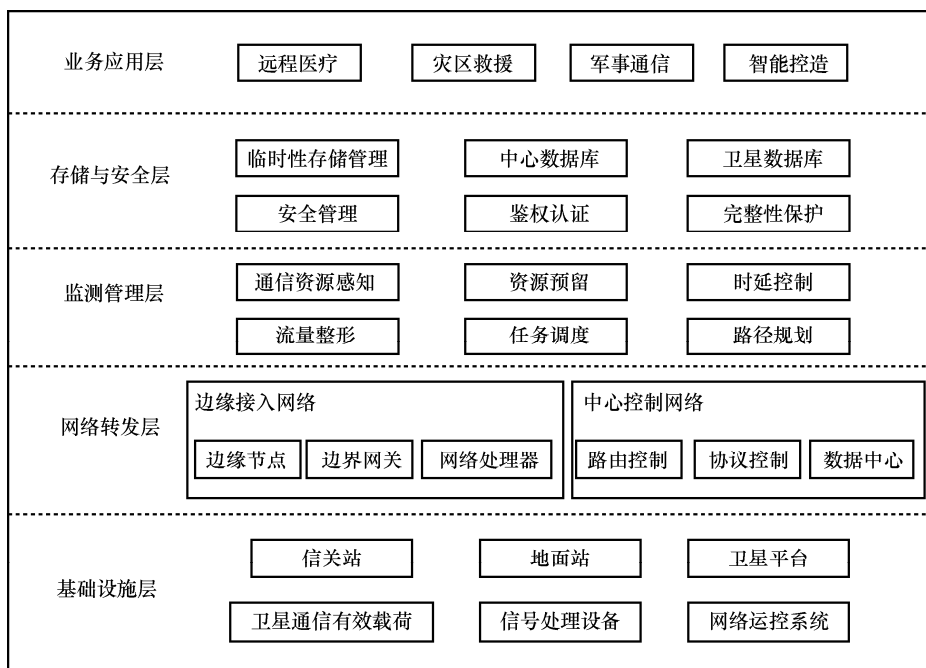


图3 天基确定性网络管理架构

统，是实现地面站与卫星高效通信的重要基础保障，并对整个网络进行统筹管理。

(2) 网络转发层

网络转发层包括边缘接入网络和中心控制网络。其中，边缘接入网络包括边缘节点、边界网关和网络处理器，边缘节点利用中心网络分配的资源执行下发的任务。中心控制网络包括路由控制、协议控制和数据中心，采用软件定义网络（software defined network, SDN）技术将控制层和数据层分离，控制面实现路由规划和资源管理控制，有更强的灵活性。数据中心存储地面段数据和卫星产生的数据，并对数据进行处理转发。

(3) 监测管理层

监测管理层负责对天基网络和地面网络进行资源调度和管理，包括通信资源感知、资源预留、时延控制、流量整形、任务调度、路径规划等。监测管理层通过接口与基础设施层连接，直接对设备进行管理，并监测设备的运行状况。

(4) 存储与安全层

存储与安全层是对临时数据和系统数据的安

全存储，包括临时性存储管理、中心数据库、卫星数据库、安全管理、鉴权认证及完整性保护。大量用户数据及系统数据存储容量相对较大的中心数据库中，临时性数据及缓存存储在卫星数据库中，提高了数据存取效率。对数据进行加密，使得数据不以明文形式存储，保障数据安全。采用安全管理措施，让数据保留在本地。对用户进行身份鉴权认证，并对数据进行完整性保护，防止恶意用户篡改或窃取数据，提高机密性。

(5) 业务应用层

业务应用层由各类用户业务需求组成，监测管理层通过接口对时间敏感型和非时间敏感型业务给予不同资源分配，对计算密集型业务调用卫星边缘计算节点，分担核心节点的计算负担。

3 关键技术

3.1 时变网络确定性路由

星地融合一体化网络具有网络状态时变性、数据流突发性等动态时变特点，地面确定性网络



技术不能完全适用于星地一体化网络, LEO 卫星网络拓扑可预测、有规律变化的特性让传输路径能够预留和规划, 为确定性要求提供保障, 因此在网络层设计灵活路由策略, 可适应星地融合网络动态变化。

路由策略选择会影响整体网络性能, 传统的最短路径路由算法由根节点出发生成到任意节点的最小生成树, 其中骨干路由的确定路径和预留机制保障了端到端有界时延, 未来网络承载的用户数量和业务量会不断增加, 路由段全局路径的确定性部署会占用大量网络资源, 影响整体网络业务传输确定性需求, 全局路由规划部署在单一节点上会增加节点计算负担, 星上有限的计算资源难以负载, 需要在网络层协议中扩展时变网络确定性路由协议, 动态变化的广域互联网对路由路径的灵活性提出了更高要求。

分布式路由部署更适合高动态的卫星网络拓扑, 时延和抖动测量部署在分布的卫星节点上, 将整体端到端确定性要求分段, 根据经验值或平均值设置段间确定性时延抖动上界, 转发时相邻节点只需要保障段间或几跳内时延抖动确定, 精准的时钟同步让各个节点能够准确把握网络拓扑变化, 依据网络拓扑选择合适的路由路径, 降低卫星节点负担, 提升时变网络拓扑及数据流信息敏感性。分段确定性路由如图 4 所示, 展示了分布式路由保障确定性的方法。但分布式路由缺乏全局性, 分段经验不足可能会导致前期路径选择非最优, 从而带来额外开销, 因此分布节点部署前, 对以往传输中几跳内的时延抖动经验学习十分重要, 这将保障路由路径最优和端到端服务质量。为同时做到确定性和降低开销, 可以考虑采取全局预测分布确定或全局确定分布预测的路由策略, 根据网络实时节点分布情况灵活规划, 保障业务在时变环境下的端到端确定性传输要求。

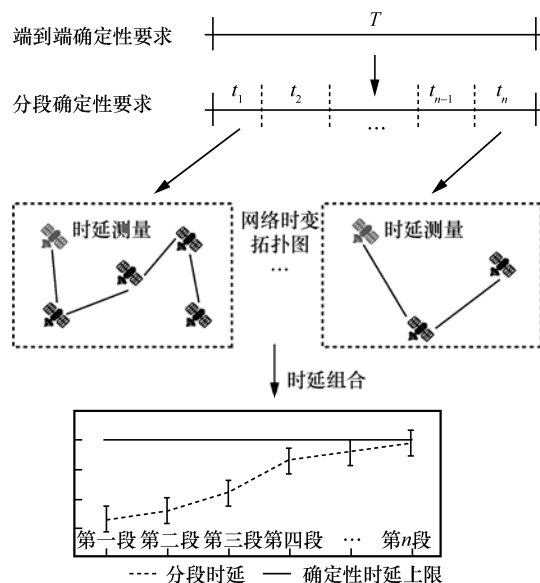


图4 分段确定性路由

3.2 差异化业务带宽保障

带宽资源在不同时隙中复用来承载差异化业务, 在业务趋于多样化、业务量激增的高要求通信现状下, 带宽资源调度无冲突、利用率高、充分满足各业务通信需求是保障确定性传输的重要环节。差异化业务首先体现在优先级设置上, 各类通信业务在发送连接请求时, 用户端需要将业务优先级和是否可以等待的信息打包在数据头部, 接入控制读取优先级信息后, 可使用预留资源降低高优先级业务等待时延。

为保证传输速率, 网络切片是一种很好的解决方案。联合带宽切片能够构建“专属通道”, 将一条物理通道的带宽划分到不同时间隙上分别使用, 充分利用时分复用的思想, 业务流可在不同时间隙的专属带宽通道上进行传输, 提高物理链路的业务传输效率, 为高优先级、高确定性通信任务提供可靠的带宽支持。为应对该类客户端需求, 实现大流量数据传输, 可开辟多通道带宽联合的网络切片, 将多个物理通道带宽组合并形成更高速率的逻辑通道。确定性网络中定义了 FlexE shim 层, 在物理层与数据链路层之间设计 shim 层, 扩展了切片的结构, 经过编号的码块在逻辑层面单独成组, 占有独立时隙, 拥有独立物理资源, 灵活多

变的网络切片模式为多样化、差异化的业务带宽需求提供了可靠的方案。FlexE shim 层的带宽服务模式如图 5 所示。

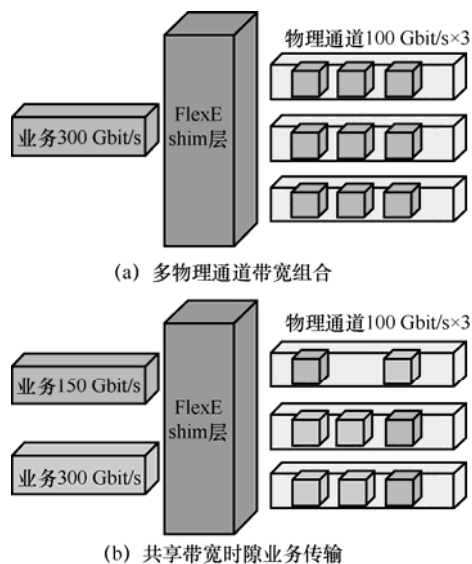


图 5 FlexE shim 层的带宽服务模式

机器学习、强化学习等技术能够智能化带宽业务分配,在关键网络节点上部署智能体,将上限确定的时延,下限确定的可靠性、速率作为优化目标,以期在用户确定性需求的情况下,设计高效的带宽切片。利用多元网络技术,将虚拟化的网络资源打造成可预测、可规划、可设计、可验证、具有确定性能力的专网,在基于网络切片的多业务带宽部署中发挥重要作用。

3.3 确定性资源管理

在天地一体化网络中,资源共享模式是一种提升资源利用率的有效方案,星间链路资源在相邻节点间互相交换,地面网络资源由成熟的数据管理中心共建共享,星地间联通的链路设备相对较少,且多样化业务需求在共享链路下传输会导致拥塞问题加剧,难以保障网络确定性要求。

为了确保端到端确定性服务质量的上下限,实现对资源的确定性管理,网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)和软件定义网络技术得到广泛应用,打破物理层的资源固化,将网络、计算、存储等资源虚拟化,提高资

源扩展性与组网灵活性,将分布式网络中的资源实体转化为统一网络中的逻辑资源,允许共享基础设施上的具体功能,包含端到端通信需要的所有元素,实现资源的快速部署和灵活配置。为确保不同业务需求都能拥有确定性服务体验,资源的适配性及其关键,资源配置过多会降低资源利用率造成浪费,增加配置成本,资源配置过少将极大降低用户满意度,网络性能会大打折扣。为用户打造全域匹配的资源配置,增强面向用户端业务的适应性和适配性,对确定性资源管理有重要意义。

针对资源管理系统制定监控策略与规划方式,实时采集系统的负载情况、通信链路的拥塞情况、资源的利用情况等,收集实时动态指标,为虚拟化资源的管理调度系统提供反馈,以提高整体管理业务的稳定性。监控指标的优劣将影响系统规划以及自动扩展或收缩资源池的业务分配,规划策略的改变不会影响用户业务的服务质量,是系统内部的自我调节,为系统平稳运行提供保障。基于 IP 网络或其他网络信息互相传播把握全局网络资源现状,这需要节点的网络状态共享功能,资源预留策略可根据网络状态动态刷新,实现资源预留延续或转让,目前对于动态网络节点拓扑的资源现状信息如何传递还在进一步研究,这对统一部署调度星地网络资源,综合评估资源池负载,设计高效计算方法,感知高利用率调度策略,如何确保虚拟化资源部署有秩序、高效率、有保障地进行至关重要。

3.4 数据流量与数据包管理

随着天地一体化网络规模逐渐扩大,为提高海量卫星节点的资源利用率和处理效率,引入基于 SDN 的数据面与控制面分离思想,确定性网络中的控制面担任跨域管理、时延计算、资源配置以及路径备份等复杂高计算量工作,数据平面包含应用层、服务层、转发层和其他底层网络,其中服务层与转发层在数据流和数据包管理方



面, 为确定性网络的业务需求提供了向上的服务保障。

数据流由应用层源端口向底层逐层传输, 服务层提供数据包排序、流复制和数据包编码功能, 数据平面协议堆栈如图 6 所示。流复制面向业务确定性需求提供保护, 数据流在转发层根据路由路径在不同时隙不同路径上发送, 一个业务流量中的数据包被复制到不同子流量中, 并打上标记, 保障数据包完整性, 让数据包尽可能在更高效的路径和空闲的时隙中发送, 以上过程结合时延敏感和资源分配策略, 将数据包编码后向下传输。在数据包由底层网络向上传输至目的端口过程中, 首先进行数据包解码, 获得原始流数据, 单个业务流量中的数据包会跟随不同路径和时隙内的子流量到达, 流合并需要根据复制过程中的标签, 将属于特定业务的子流量组合起来, 放入该业务的流量堆栈, 为降低数据包重复发送带来的额外存储开销, 基于数据包排序功能为每个包打上的序列号, 服务层需要进行去重即冗余消除工作来实现可靠性传输。

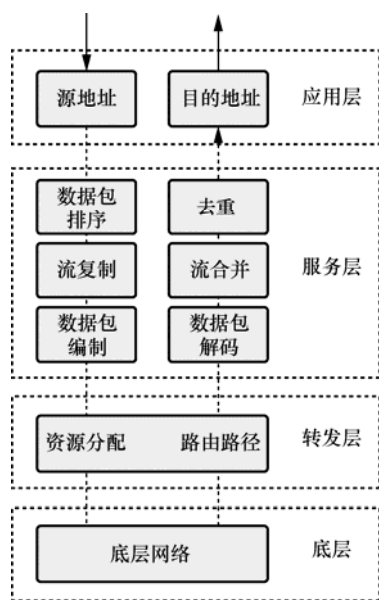


图 6 数据平面协议堆栈

在天地一体化网络中, 卫星网络与地面网络的通信协议均使用传输控制协议/互联网协议

(transmission control protocol/Internet protocol, TCP/IP), 确定性网络支持在不同网络实体之间传递参数并配置, 控制与管理流量平台的引入让业务用户和管理者能够对流量进行测量和管理, 服务质量需求的参数定义了业务的确定性边界, 对流量进行排队整形、调度抢占等规则控制能够实现确定性的边界要求, 如丢包率上节和时延上下界。

3.5 安全可信保障技术

天地一体化确定性网络旨在提供可预测和可靠的广覆盖全局通信架构。尽管确定性网络本身具有较高的可靠性和实时性, 但在实际应用中, 仍然需要安全保障来应对潜在的安全威胁和攻击。

信息的准确性和完整性对于实时应用至关重要。安全保障措施可以确保数据在传输过程中不被篡改、修改或伪造, 从而保障数据的完整性。此外, 对敏感信息的保密性也是必要的, 以避免机密数据泄露。密码学和加密技术是保障通信安全的基础。对通信数据进行加密, 可以防止未经授权的访问者获取敏感信息。安全协议和安全通信通道用于保护通信过程中的数据传输安全。使用安全套接层协议建立安全通信通道, 通过加密和身份验证机制保护数据的机密性和完整性, 对卫星通信系统中的资源和权限进行管理和控制, 以确保只有授权用户可以使用和共享系统资源。

4 结束语

为天地一体化通信网络融入确定性保障, 是满足新兴产业对低时延和高计算能力日益增长的需求的关键一步, 特别是高确定性、时间敏感、大规模计算业务。本文从网络层路由确定性、业务带宽保障、资源和数据流管理方面描述了天地一体化确定性网络架构下的关键技术, 充分考虑确定性网络需求, 面向用户业务端服务保障, 具备资源虚拟化、软件定义、资源带宽切片、网络拓扑获取等核心能力, 能提供确定性端到端时延、

抖动、丢包率、带宽和可靠性,显著提高天地一体化网络的性能和效率。

着眼未来,星地融合确定性网络还需要进一步提升技术能力,结合人工智能技术与内生安全技术,优化一体化资源灵活编排策略,智能感知时变网络,有效规划调度,提供系统的弹性和可恢复性,保障数据的机密性和完整性。打破地面网络与卫星网络架构壁垒,实现层级确定性技术融合,新型架构与特殊应用场景融合,深度融合天地一体资源,将定制化服务遍及生产行业、娱乐行业、民生行业等方面,为实现 6G 海陆空一体化网络铺平道路。

参考文献:

- [1] 赵亚飞, 周家恩, 王鑫洋, 等. 面向卫星通信的 6G 雾计算网络技术与展望[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 834-841.
ZHAO Y F, ZHOU J E, WANG X Y, et al. Research and prospect of 6G fog computing network for satellite communication[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 834-841.
- [2] 谭炜骞, 吴斌伟, 汪硕. 确定性网络跨域传输架构与 DRL 流量调度算法[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(3): 37-42.
TAN W Q, WU B W, WANG S. Cross-domain deterministic networking architecture and DRL flow scheduling[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023, 46(3): 37-42.
- [3] 石涵琛, 杨闯, 彭木根. 6G 太赫兹通信: 架构、技术与挑战[J]. 电波科学学报: 2023, 12(26): 1-20.
SHI H C, YANG C, PENG M G. Terahertz communication for 6G: architectures, technologies and challenges[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 12(26): 1-20.
- [4] ZHOU J E, SUN Z Z, ZHANG R H, et al. A cloud-edge collaboration CNN-based routing method for ISAC in LEO satellite networks[C]//Proceedings of the 2nd Workshop on Integrated Sensing and Communications for Metaverse. New York: ACM Press, 2023: 25-29.
- [5] 景毅, 姜春晓, 詹亚锋. 面向卫星通信的 6G 通感算融合架构、技术与挑战[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(1): 12-20.
JING Y, JIANG C X, ZHAN Y F. 6G communication, sensing and computing integration for satellite communication: architectures, technologies and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(1): 12-20.
- [6] 汪硕, 王佳森, 蔡磊, 等. 面向工业制造的确定性网络技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 22-29.
WANG S, WANG J S, CAI L, et al. Development of deterministic networking techniques for industrial manufacturing[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 22-29.
- [7] 强鹏, 刘冰洋, 于德雷, 等. 大规模确定性网络转发技术[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 12-19.
QIANG L, LIU B Y, YU D L, et al. Large-scale deterministic network forwarding technology[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 12-19.
- [8] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.
HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [9] ZHANG M. Flex Ethernet technology and application in 5G mobile transport network[J]. China Communications, 2021, 18(2): 250-258.
- [10] NASRALLAH A, S. THYAGATURU A, ALHARBI Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 88-145.
- [11] 朱瑾瑜, 张恒升, 陈洁. TSN 与 5G 融合部署的需求和网络架构演进[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(6): 47-52.
ZHU J Y, ZHANG H S, CHEN J. Requirements and network architecture evolution of TSN and 5G integrated deployment[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(6): 47-52.
- [12] JIN X, XIA C Q, GUAN N, et al. Real-time scheduling of massive data in time sensitive networks with a limited number of schedule entries[J]. IEEE Access, 2020(8): 6751-6767.
- [13] PENG G Y, WANG S, HUANG Y D, et al. Traffic shaping at the edge: enabling bounded latency for large-scale deterministic networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [14] 薛兵兵, 许勇刚, 马靖, 等. 确定性网络技术及其在电力行业的应用研究[J]. 网络安全技术与应用, 2023(5): 119-124.
XUE B B, XU Y G, MA J, et al. Research on deterministic network technology and its application in power industry[J]. Network Security Technology & Application, 2023(5): 119-124.
- [15] 魏月华, 喻敬海, 罗鉴. 确定性网络技术及应用场景研究[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(4): 67-72.
WEI Y H, YU J H, LUO J. Deterministic networking technology and scenarios[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(4): 67-72.
- [16] 傅海波. “星链”计划给国际通信运营商带来的挑战和机遇[J]. 通信技术, 2022, 55(10): 1363-1367.
FU H B. Challenges and opportunities to international telecommunication carriers brought by the starlink[J]. Communications Technology, 2022, 55(10): 1363-1367.
- [17] LIN X Q, CIONI S, CHARBIT G, et al. On the path to 6G: embracing the next wave of low earth orbit satellite access[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(12): 36-42.



- [18] 徐菁. “鸿雁”星座闪亮亮相,移动通信或将全球无缝覆盖[J]. 中国航天, 2018(11): 35-36.
XU J. The “Wild Goose” constellation shines, mobile communications or seamless global coverage[J]. Aerospace China, 2018(11): 35-36.
- [19] 陈静. 虹云工程首星[J]. 卫星应用, 2019(3): 77.
CHEN J. The first star of Hongyun Project[J]. Satellite Application, 2019(3): 77.
- [20] 李晓尧. 低轨卫星网络计算与通信资源联合优化技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
LI X Y. Computing and communication resources optimization for low earth orbit satellite network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [21] 张荻. 卫星通信跨层资源管理算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
ZHANG D. Research on cross-layer resource management algorithm in satellite communications[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [22] 冯建元, 李杰, 庞立新, 等. 天地一体化信息网络中天基卫星网络架构设计[J]. 电讯技术, 2019, 59(7): 775-779.
FENG J Y, LI J, PANG L X, et al. Architecture design of satellite networks in integrated terrestrial-satellite network[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(7): 775-779.
- [23] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面 5G 的融合初探(一)[J]. 卫星与网络, 2018(9): 14-21.
WANG C T, LI N, ZHAI L J, et al. Discussion on the integration of satellite communication and ground 5G (I)[J]. Satellite & Network, 2018(9): 14-21.
- [24] 彭会湘, 陈金勇, 杨斌, 等. 6G 通信时代的卫星遥感系统展望[J]. 无线电工程, 2020, 50(7): 523-529.
PENG H X, CHEN J Y, YANG B, et al. Prospect of satellite remote sensing system in 6G communication[J]. Radio Engineering, 2020, 50(7): 523-529.

[作者简介]



张雨曼(2002-), 女, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为天地一体化网络切片技术。



朱厦(1984-), 女, 博士, 国网思极位置服务有限公司首席卫星专家、数字空间事业部总经理、高级工程师, 主要研究方向为卫星遥感、低轨卫星通信、通导遥一体化。



梁国鑫(2001-), 女, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为基于高精度时空预测的信号捕获与跟踪。



周家恩(2001-), 男, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为卫星通感算一体化技术。



赵亚飞(1987-), 男, 博士, 北京邮电大学特聘副研究员、博士生导师, 主要研究方向为空天地海信息通信和通感算融合。



彭木根(1978-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室教授, 主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化、雾无线接入网络等。