

卫星确定性网络关键技术和挑战

纪若愚¹, 张恒升², 刘美慧¹, 李鹤¹, 许方敏¹, 赵成林¹

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876;

2. 中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘 要: 卫星互联网是满足未来无处不在的网络接入的重要手段, 具有覆盖范围广、通信容量大、全球无缝连接等优点, 在灾害预防、海洋作业等方面具有广泛的应用场景。从卫星互联网如何实现确定性传输的愿景出发, 结合现有的确定性网络技术, 提出卫星确定性网络架构, 指出卫星确定性网络中确定性接入、多业务差异化保障、动态资源分配和路径备份方面存在的挑战以及未来的发展方向。

关键词: 卫星互联网; 确定性网络; 网络架构; 确定性接入; 差异化保障

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023035

Key Technologies and Challenges of Satellite Deterministic Network

Ji Ruoyu¹, Zhang Hengsheng², Liu Meihui¹, Li He¹, Xu Fangmin¹, Zhao Chenglin¹

1. School of Communication and Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

Abstract: Satellite internet is an important means to meet the ubiquitous network access in the future. It has a wide range of application scenarios in disaster prevention, marine operation and scientific research broadband on account of its wide coverage, large communication capacity and global seamless connection. Started from the vision of the deterministic transmission of satellite internet, combined with the existing deterministic network technology, the satellite deterministic network architecture was put forward, and the existing challenges and future development in deterministic access, multi-service differentiation guarantee, dynamic resource allocation and path backup of satellite deterministic network were pointed out.

Keywords: satellite internet, deterministic network, network architecture, deterministic access, differentiated guarantee

0 引言

卫星互联网将在下一代全球融合通信网络中发挥至关重要的作用, 是各国研究的技术热点。相比于其他通信网络, 卫星互联网具有通信距离远、传输容量大、覆盖面积广、通信频带宽、可扩展、灵活性高的优势。

确定性网络 (Deterministic Networking, DetNet) 通过对网络数据转发行为的控制, 将时延、抖动和丢包率等网络服务质量控制在有限范围内, 并对不同等级的业务构

建差异化的网络服务。由于空间网络节点的高动态性, 链路时延和丢包率等参数会动态变化。在对通信服务质量要求高的应用中, 如应急通信中, 有必要在卫星互联网中引入确定性网络技术, 提升卫星互联网的通信质量。通过在卫星互联网中引入确定性网络技术, 对卫星互联网的感知、传输、计算、存储、通信协议、频率、任务等网络资源加以协调, 实现确定性地控制卫星通信服务的时延、抖动和丢包率, 对未来卫星互联网的发展有重大意义。卫星互联网中引入确定性网络技术存在着诸多困难, 如分段时

收稿日期: 2022-12-15; 修回日期: 2023-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61971050); 2021 年工业和信息化部工业互联网创新发展工程项目 (No.TC210A02K)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61971050), The Industrial Internet Innovation Development Project of the Ministry of Industry and Information Technology in 2021(No. TC210A02K)

延由于传输路径变化而动态改变,节点的动态变化使得路由路径随时间改变,因此,面向相对静态网络场景设计的传统确定性技术方案需要进行一定的改进以适应卫星互联网的特点。

1 确定性网络技术概述

1.1 确定性网络概念和特征

工业设备控制、车联网、电力保护等新型业务对网络有着很高的要求,如,端到端时延保持在微秒级或毫秒级,抖动保持在微秒级,可靠性在 99.999 9%以上等,传统以太网“尽力而为”的传输方式很难满足这些要求。因此,具有低时延、低抖动、高可靠性的确定性网络技术引起了工业界和产业界的关注。

确定性网络是在以太网的基础上能够为多种业务提供端到端确定性服务质量的网络,具体来说,对确定性服务质量制定上下限的限制包括:上限确定的低时延、上限确定的低抖动、上限确定的低丢包率、上下限确定的高带宽、下限确定的高可靠性,如图 1 所示。

1.2 确定性网络技术

确定性网络的技术关键在于实现时延、抖动、丢包率、带宽和可靠性等的确定性^[1]。其中确定性时延主要通过时钟同步、频率同步、调度整形、资源预留等机制实现;确定性抖动和丢包率通过优先级划分、抖动消减、缓冲吸收等机制实现;确定性带宽通过网络切片和带宽预留等技术实现;确定性可靠性通过多路复用、包复制与消除、冗余备份等技术实现。

目前对确定性网络技术的研究主要包括:在介质访问控制(Media Access Control, MAC)层和物理层(Physical Layer, PHY)之间 1.5 层工作的灵活以太网(Flexible Ethernet, FlexE),在数据链路层工作的时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)^[2],在传输层工作的确定性网络^[3]、确定性 IP(Deterministic IP, DIP)网络技术、确定性 Wi-Fi(Deterministic-Wi-Fi, Det-Wi-Fi)^[4]以及 5G 确定性网络(5G Deterministic Networking, 5GDN)^[5]。下面将针对时间敏感

网络、确定性网络、5G 确定性网络做主要介绍。

TSN 是国内与国际产业界和学术界积极推动和研究的工业通信技术,定义了以太网进行数据传输的时间敏感机制,有效提高了标准以太网端到端数据传输的实时性、确定性和可靠性,可用于解决二层网络中的确定性保障问题^[6]。TSN 实时通信的功能包括精确的时间同步、流量调度与整形、传输路径的选择和资源预留,主要应用于汽车控制领域、工厂内网、智能电网等场景。在工业以太网中部署 TSN,可以满足业务确定性服务的要求,实现在同一网络中周期性业务和非周期性业务混合传输,促进当前工业场景中信息技术(Information Technology, IT)与运营技术(Operation Technology, OT)的融合,统一网络传输,提高经济性。

DetNet 主要研究在第二层桥接和第三层路由段上实现确定性传输的路径,实现沿多跳路径的转发、确定性时延、低丢包率与高可靠性。DetNet 的总体架构如图 2 所示,DetNet 域由骨干路由与边缘路由组成,DetNet 域间由不同的边缘路由连接。终端应用业务流通过网络用户接口与确定性网络的边缘路由相接,由边缘路由的时延抖动测量,骨干路由的确定路径与资源预留以及端到端显式路由与无缝冗余,实现终端应用业务流的 3 层确定性传输,保障网络低丢包率、有界端到端时延的数据流传输,可以承载实时的单播或多播数据流。

面向工业自动化等应用,Det-Wi-Fi 通过对 Wi-Fi MAC 协议的改进设计来满足非周期关键性数据的信道接入与传输,能有效缩短关键数据的端到端时延;通过设备间的相互协作通信以保障通信低时延、高可靠的传输。

5GDN 是指在现有 5G 网络资源的基础上,实现可规划、可预期、可验证的网络服务能力,使 5G 网络成为具有确定性传输能力的移动专网,能够为不同业务提供差异化的服务^[5]。借助网络切片、边缘计算、业务的感知与协同、跨域协同调度保障、实时精确度量能力、与行业网络对接集成能力等先进技术,为行业客户提供“差异化+确

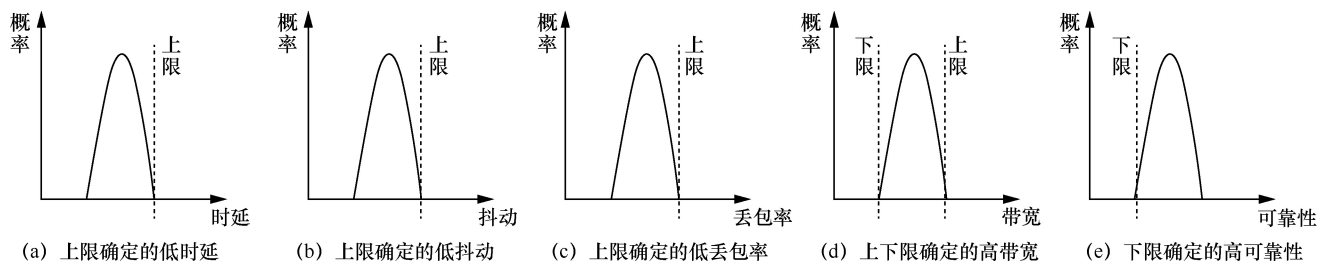


图 1 5 种典型的确定性服务质量

定性”的网络服务能力,全面提升传统垂直行业的运营效率和智能化决策水平。

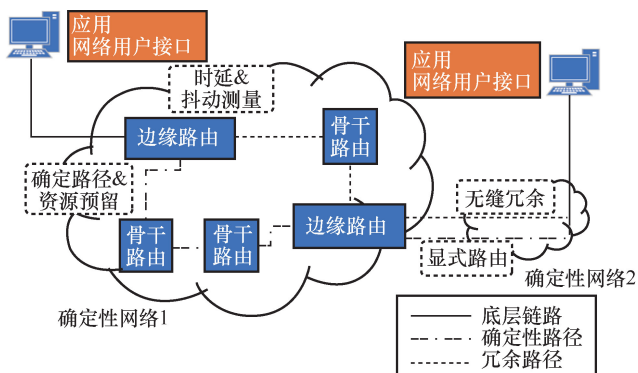


图2 DetNet 总体架构

2 卫星确定性网络的架构和工作流程

2.1 卫星互联网架构

卫星互联网作为卫星系统、空中网络和地面通信的集成,由于其独特的特性,如异构性、自组织性和时间可变性等,面临着诸多前所未有的挑战。

如图3所示,卫星互联网由空间段、地面段、控制和管理段以及用户段4个主体部分构成^[7]。其中,空间段由一系列位于不同高度的轨道上的卫星及其配套的地面基础设施(如地面站,网络操作控制中心)组成,提供路由、访问控制和波束管理功能^[8];地面段由地面通信系统(如蜂窝网络等)、卫星网关组成,可以为地面终端用户提供连接服务;控制和管理段由网络控制中心(Network Control Center, NCC)和网络管理中心(Network manage Center, NMC)组成^[9],作为整个卫星互联网的“大脑”为网络提供实时控制和管理功能;用户段由海量终端用户设备组成,它们直接或间接接入卫星互联网从而获取服务。

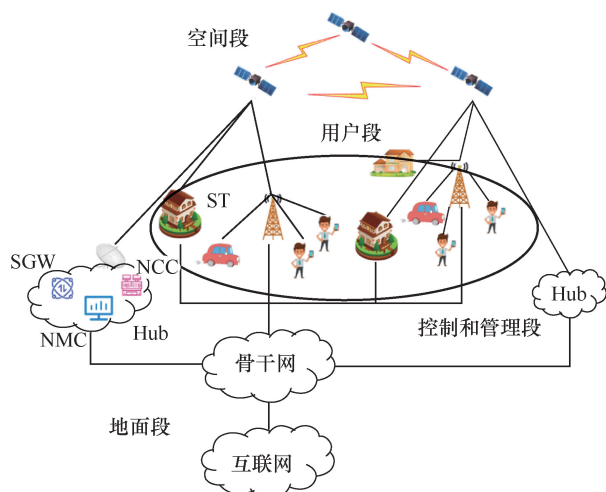


图3 卫星互联网体系结构

卫星互联网的通信主要包括星间通信、星地通信以及回传链路。卫星与卫星之间的数据交互由星间通信链路完成,卫星之间的多点通信必须通过卫星之间建立的通信链路完成^[10]。星地通信主要指的是卫星和地面卫星监测中心等的信息交互,地面卫星监测中心接收到信号之后需要网络控制中心进行一系列决策。卫星监测中心和网络控制中心通过回传链路为地面用户提供服务。

在卫星互联网中,每个网段中的网络资源常常无法处于平衡状态,因此在传输过程中很容易受到瓶颈的限制,最佳的传输性能无法发挥,容易出现拥塞丢包的情况,很难保障卫星互联网的确定性时延和可靠传输。

2.2 卫星确定性网络保障架构

随着确定性传输需求越来越强烈,SDN、网络功能虚拟化(Network Functions Virtualization, NFV)等网络技术受到广泛关注,这些技术推动了网络架构和网元动态部署的发展^[11-12]。SDN具有可编程性,使得网络部署变得更加灵活,能够有效提高网络资源利用率,网络管理更加轻松便捷,也降低了运营成本。本文从卫星互联网如何高效、低时延地服务地面应用的愿景出发,结合SDN和NFV等技术,提出一种基于SDN的卫星确定性网络架构,能够实现空间段和地面段的虚拟化和集中管控、数据的集中转发处理和对异构网络资源的优化利用。

如图4所示,基于SDN的卫星互联网总体结构可以划分为控制平面和数据平面。数据平面包括软件定义的卫星接入网和卫星核心网。接入网包括卫星网关、地面基站、移动终端和在轨卫星。控制平面(位于网络控制器中)包括两个关键部件:网络管理器和定制的卫星互联网应用。在访问网络的各类资源时,网络控制器可以为网络管理器和卫星互联网应用提供统一的可编程接口,方便访问和管理网络资源。

在卫星互联网中,部分广播控制信道为流控制所保留,同时数据流和控制流会共享层内控制信道,网络控制器可以利用上述两种信道来配置和管理软件定义的卫星互联网设备。广播控制信道由地球静止轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)卫星广播实现,以确保网络控制器与低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星之间的一跳连接。层内控制信道由低轨卫星之间的点对点链路实现。

为实现确定性传输,控制器收集网络状态,计算路径,并下发指令,在控制层规划整个网络拓扑的资源预留、冗余路径和调度计划方案,从而能够处理跨域中的大规模确定性网络流。以资源预留保障端到端确定性传输时延为

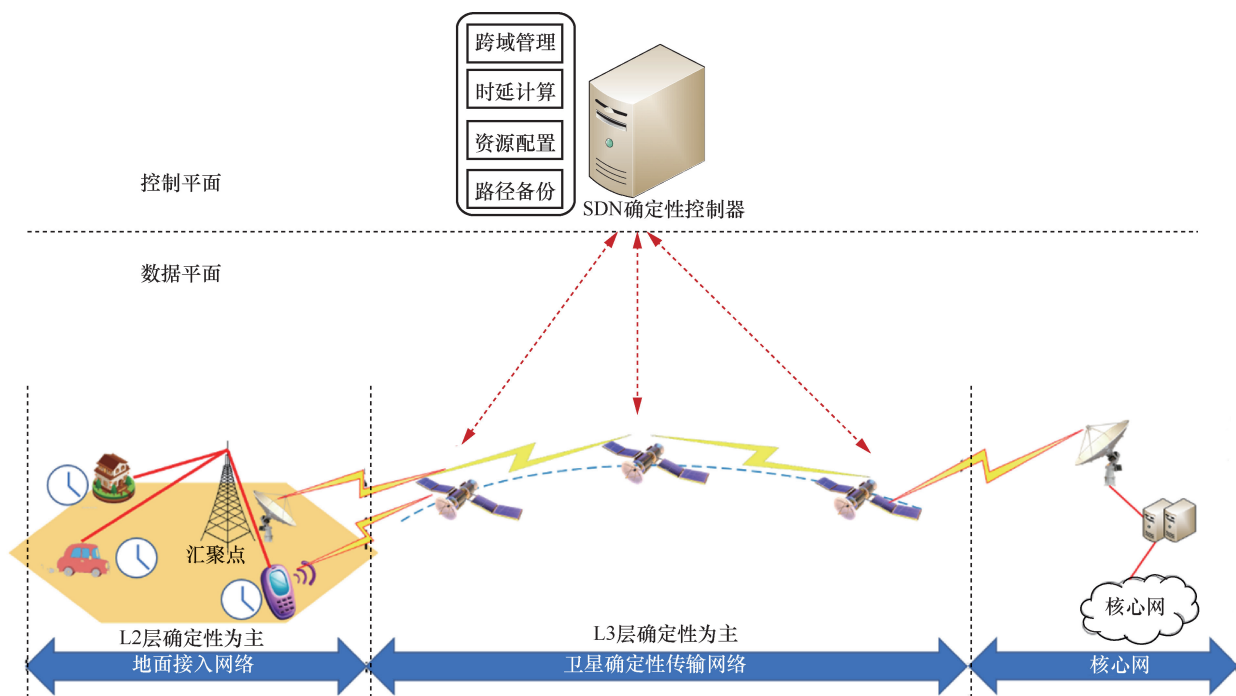


图 4 卫星确定性网络管控架构

例, 首先将给定的目标时延分解, 得出每一跳的时延要求, 便可以据此计算所需的带宽值; 然后确认是否预留成功, 保障目标数据流的传输带宽, 同时提高带宽的利用率^[13]。通过控制器下发更新配置实现动态预留, 在控制器端配置终端设备的流量参数 (包括流量发送周期大小等流量模型参数), 数据包经过怎样的路径转发主要由控制器整体决策后进行调度和规划, 同时结合高精度时钟同步, 计算出高精度周期性分时隙预留带宽的预留值, 再通过控制器下发至交换设备执行。

管理平面为保障确定性网络性能, 支持对不同网域确定性网络流性能的监测, 同时对流流的完整性和连接性也有检测功能。确定性网络数据平面由服务层和转发层构成。服务层提供包的复制、去重和排序功能。转发层可以提供诸如显性路径、流量工程和拥塞控制的转发保证。

SDN 的可编程功能可以轻松实现网络中转发规则的更新, 减少数据传输时延和资源消耗, 从而实现卫星互联网中资源分配的优化, 减少由于网络资源匮乏而引发的拥塞和丢包问题, 提升数据传输的可靠性^[14]。此外, SDN 控制器还可以承担网络的安全监控任务, 保障卫星互联网的安全性。

3 潜在问题和可能解决的方案

相比于地面传统网络, 卫星互联网中的数据流呈现突发性, 具有动态时变的特点, 使得现有的确定性保障

技术不能很好地适应空间信息网络和业务, 表 1 汇总了相关的技术和存在的问题。下面将从时变网络确定性接入、多业务差异化调度保障、动态资源分配、路径备份 4 个主要方面分析卫星确定性网络存在的问题以及可能的解决方案。

表 1 相关的技术和存在的问题

确定性	具体技术	空间应用存在的问题
确定时延	网络演算	到达模型和信道服务模型建模困难
	时变图理论	资源表征无时间属性
确定可靠性	多协议标签交换技术	拓扑时变性
	路径备份	资源有限
确定安全性	接入控制	时延高, 失败率高
	网络切片安全隔离	计算复杂度高

3.1 时变网络确定性接入

在卫星互联网中接入控制机制会对网络性能参数产生影响, 导致业务无法确定性传输, 最终影响到用户的接入体验^[15]。但是随着卫星互联网的逐渐发展, 用户终端数量急剧增加, 导致网络接入时延更长, 接入失败率更高。卫星互联网中的接入设备多种多样并且设备间对性能要求差异性很大, 对设备进行集中接入控制是很有必要的^[16]。因此, 需要针对卫星互联网设计一套高效、轻量的接入控制机制, 设计适当的访问和切换标准, 优化接入时延和成功率。此外, 由于卫星互联网跨度大,

资源分配不均,使得网络中部分区域接入资源过剩而部分区域接入资源不足,在进行资源分配时,必须兼顾到各个区域的特点。

在卫星互联网中,为了更好地描述网络中拓扑随时间的演变关系,可以考虑通过构建时变图模型来描述卫星互联网资源的演变。时变图模型是时变网络协议与算法设计的理论基础,表征了节点资源及其连接关系的时变性,具有精准建模和高效求解的特点^[17]。空间信息网络拓扑时变图如图5所示。

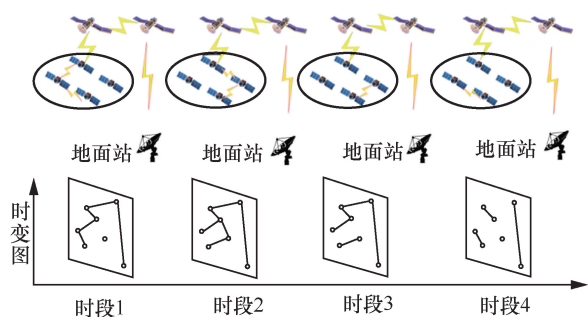


图5 空间信息网络拓扑时变图

在利用时变图理论对卫星互联网的动态拓扑进行建模时,模型的好坏会对后续的分析过程产生影响,进而影响到用户的确定性接入。由此可见,精准高效的建模显得至关重要。一方面,模型要能精准表征节点资源的时变性和资源间的联系;另一方面,模型不能占据过多的存储资源并且可以实现快速准确的分析。通过将卫星时变资源图与地面可用资源结合起来,动态地为接入用户提供服务,以保障接入控制和数据传输的质量。

3.2 多业务差异化调度保障

在卫星互联网中设备通过单跳或多跳链路互联互通,设备采用共享资源模式进行信息传输,这种共享模式有效提升了链路资源的利用率,但是多样化业务在同一链路中传输也导致了链路拥塞概率的提升,使得网络的时间确定性难以保障。

要解决这一问题,可以根据业务的紧急程度事先划分好优先级,网络中通过约定好的调度规则进行传输,从而使得确定性业务达到一个无冲突的状态,减少了业务在交换过程中由于不可控排队而产生拥塞的情况,也有效地减少了设备的缓存成本以及传输时延,从而使得整个卫星互联网的的业务传输达到了确定性的状态。

近年来,随着网络演算理论不断发展,利用网络演算求解得出卫星互联网传输时延与抖动的上限,可以实现时延和积压的可预测性,更进一步保障了时间确定

性。如图6所示,在卫星互联网中使用网络演算的核心思想是利用到达曲线和服务曲线来描述业务和卫星节点的特性。具体而言,先基于网络演算对卫星业务和节点进行建模,得到到达曲线和服务曲线并利用曲线计算最大水平偏差和垂直距离得到该节点排队时延和队列积压,最终将各个节点的时延和积压累加得出整个卫星互联网的性能。

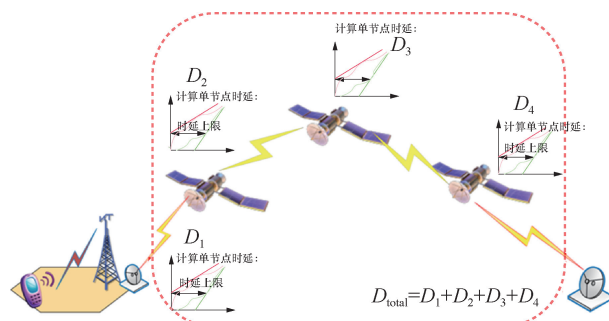


图6 卫星链路性能计算示例

为了得到精确的性能边界,对业务模型和卫星节点服务模型进行准确建模,进而得到相应的到达曲线和服务曲线显得尤为重要。但是在实际的卫星互联网中,受区域和接入协议等因素的影响,业务流和节点服务具有一定的随机性,这些给建模带来了一定的困难^[18],而且通过网络演算所得到的时延和积压上界是在保障卫星互联网服务质量(Quality of Service, QoS)条件下的最差性能边界,实际中如果按照最差性能边界来配置卫星互联网的性能参数,必然会造成资源浪费,针对这一问题还需要进一步研究分析。

此外,网络切片隔离技术可以用于保障卫星互联网的安全接入和多业务共享。通过网络切片中所采用的隔离机制可以有效地提升卫星互联网的安全性,但是,随着网络切片隔离程度的增加,资源消耗量也随之增加。目前一些网络切片隔离算法未能在卫星节点资源利用率与卫星互联网安全性方面做好权衡,这在资源受限的卫星互联网中是不能忍受的。因此,为了在保障卫星互联网服务质量的同时还能满足安全方面的要求,需要设计合理的网络切片算法。

3.3 动态资源分配

资源分配算法可以为不同优先级的业务分配不同的资源,从而有效解决不同业务的QoS需求问题,降低链路时延并且提高资源利用率,可以最大程度利用有限的网络资源^[19]。在卫星互联网中,如何利用资源分配算法确定性地保障不同用户的QoS是亟待解决的问题。

在传统卫星通信系统中,资源分配算法是基于资源请求进行的,资源申请流程烦琐和资源分配的不稳定,使得资源分配具有接入成功率低和利用率低等问题^[20]。随着卫星互联网的不断发展,终端用户和业务类型的持续增加会给卫星互联网负载带来更大的挑战。显然,这种方法已经不能满足新的资源需求,也无法适应卫星互联网的网络状态和业务需求变化。

针对这一问题,本文考虑从简化卫星互联网节点资源的申请流程和研究针对卫星互联网的最优资源分配算法两方面入手解决。前者可以通过基于预案匹配的资源申请流程,通过预案的方式简化了任务申请资源的流程,避免了资源冲突,提升了资源调度的稳定性;后者可以通过机器学习算法依据业务优先级为不同业务划分不同链路并设置相应资源的动态资源算法,在保障高优先级业务在链路资源不足的情况下,可以调用低优先级业务链路中的空闲资源,解决边缘节点的资源利用率低而中心节点资源利用率过高的问题,但是受到卫星算力的影响,输入多维的资源信息会导致算法收敛速度变慢。因此,为了在保证资源调度准确性的同时提高实时性,基于机器学习的动态资源调度算法还有待进一步研究。

3.4 路径备份

相比于地面网络,卫星互联网更加需要考虑设计路径备份和预留机制以保障传输的可靠性,一方面,卫星互联网自身具有特殊性,如拓扑动态性、传输时延大和星上资源受限等;另一方面,卫星互联网的传输路径资源有限,备份和资源预留势必会影响网络对服务的承载能力。

为了解决这一问题,可以借助地面网络中基于多协议标签交换技术和SRv6等机制^[21],逐步引入卫星互联网研究相应算法。根据卫星互联网拓扑特点和全球业务统计数据,建立卫星拓扑和业务结合的分析模型,使其能为关键链路提供可靠性路由,为卫星互联网中的重要业务提供备份路径和动态资源预留调整策略。

考虑到卫星不同业务对时延、抖动和可用带宽的要求不同,可以将业务划分成不同的优先级,通过事先为高优先级的业务预留网络资源,降低高优先级业务的等待时延,从而满足高优先级业务的确定性传输。同时,当高优先级业务和较低优先级的业务混合传输时,由于事先为高优先级业务预留了网络资源,减小了资源分配的求解空间,所以可以快速地为低优先级业务分配资源。

在卫星互联网中,链路故障是较为普遍的现象,即

便是短暂的故障也会造成大量数据的丢失。为了保障卫星互联网的确定性传输,需要加快故障的恢复速度,最大程度上降低链路故障的负面影响。路径备份是当前链路故障恢复领域的研究热点,通过提供端到端的重路由实现链路的快速恢复,并且可以基于现有协议快速实现,降低了在卫星上的部署难度。

为了验证路径备份对卫星互联网确定性传输的改善效果,本文进行了仿真验证。首先,创建一个由GEO卫星、中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星、LEO卫星组成的卫星互联网。如图7所示,卫星节点的总数为 $M \times N$,其中 N 是卫星的轨道数, M 是每条轨道上的卫星数量。

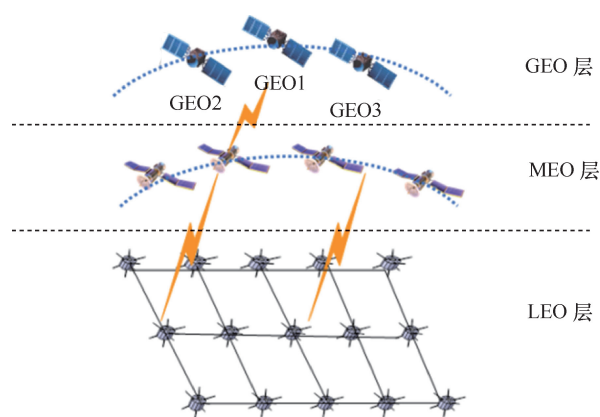


图7 卫星互联网示意

卫星会沿着预定轨道不断运动,由于卫星互联网的相对位置基本固定,卫星能够直接通信的节点包含同轨道相邻的卫星和相邻轨道同一纬度的卫星。基于这种特性,可以构建出卫星互联网的拓扑结构。在创建的网络拓扑中,卫星发送数据包时会基于最短路径(迪杰斯特拉)算法计算星间路由。当采用路径备份后,为了避免链路故障或数据包丢失引起数据传输时延过长,卫星会再计算一条次最短路径并保存在卫星节点中,一旦发生故障可以快速切换到这条路径上,保证了端到端时延要求。如图8所示,本文比较了3种情况下端到端时延随卫星节点运动的变化情况,分别是链路没有故障、链路发生故障(有备份)和链路发生故障(无备份)。可以明显看出链路发生故障时,提前备份路径可以有效减少端到端传输时延,并且和链路没有发生故障时的传输时延没有很大变化,保障了确定性传输的要求。但是,卫星互联网对节点间可备份的路径有严格的数量限制,如何在复杂度与恢复效果间做权衡还需进一步研究。

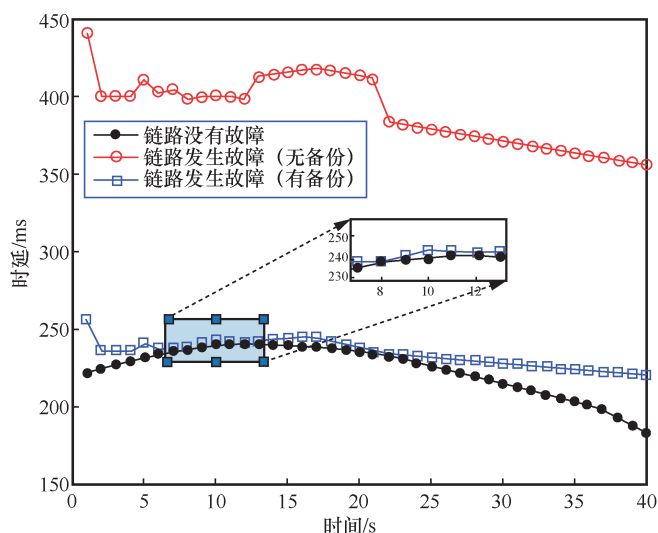


图8 传输时延比较

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 曹志鹏, 刘勤让, 刘冬培, 等. 时间敏感网络研究进展[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(3): 647-655.
CAO Z P, LIU Q R, LIU D P, et al. Survey of time-sensitive networking[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(3): 647-655.
- [3] GENG X, RYOO Y, FEDYK D, et al. Deterministic networking (DetNet) YANG model[J]. Internet Engineering Task Force, 2021.
- [4] CHENG Y J, YANG D, ZHOU H C. Det-WiFi: a multihop TDMA MAC implementation for industrial deterministic applications based on commodity 802.11 hardware[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2017: 1-10.
- [5] 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.
- [6] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, 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.
- [7] ALAGOZ F, GUR G. Energy efficiency and satellite networking: a holistic overview[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1954-1979.
- [8] VASAVADA Y, GOPAL R, RAVISHANKAR C, et al. Architectures for next generation high throughput satellite systems[J]. International Journal of satellite communications and networking, 2016, 34(4): 523-546.
- [9] HU Y R, LI V O K. Satellite-based Internet: a tutorial[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(3): 154-162.
- [10] 张羽, 叶芝慧. 星间通信中带宽和功率联合分配算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 181-185.
ZHANG Y, YE Z H. Joint bandwidth and power allocation algorithm in inter-satellite communication[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(8): 181-185.
- [11] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERÍSSIMO P E, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14-76.
- [12] KIM H, FEAMSTER N. Improving network management with software defined networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2): 114-119.
- [13] 苏建忠, 张华宇, 朱海龙. 结合 SDN 控制器的 TSN 周期性带宽预留值计算方法[J]. 通信学报, 2021, 42(10): 23-31.
SU J Z, ZHANG H Y, ZHU H L. Computing method for periodic stream reservation in TSN combined with SDN controller[J]. Journal on Communications, 2021, 42(10): 23-31.
- [14] 王奎宇, 宋晓勤, 缪娟娟, 等. 基于 SDN 的高性能 QoS 保障低轨道卫星星间路由算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(5): 185-190.
WANG K Y, SONG X Q, MIAO J J, et al. SDN-based high-performance and QoS guaranteed inter-satellite routing algorithm for low-earth orbit satellites[J]. Computer Engineering, 2022, 48(5): 185-190.
- [15] 张浩然. 异构无线网络联合资源管理中接入控制策略的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
ZHANG H R. Radio access control in radio resource management of heterogeneous wireless networks[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [16] CHEN Q, MENG W X, LI S X, et al. Civil aircrafts augmented space-air-ground-integrated vehicular networks: motivation, breakthrough, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 5670-5683.
- [17] ZHANG T, LI J D, LI H Y, et al. Application of time-varying graph theory over the space information networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(2): 179-185.
- [18] 刘坤. 低轨卫星互联网的随机网络演算分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
LIU K. Analysis of LEO satellite network with stochastic network calculus[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [19] 罗倩, 鲁勇, 刘魁, 等. 面向 SDN 的基于节点重要性的动态带宽预留算法[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(6):

53-62.

LUO Q, LU Y, LIU K, et al. SDN oriented dynamic bandwidth reservation algorithm based on node importance[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2020, 56(6): 53-62.

- [20] CAO J X. Towards tenant demand-aware bandwidth allocation strategy in cloud datacenter[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 105: 904-915.

- [21] 李硕朋, 方娟, 陈肯. 基于 SRv6 的确定性网络服务共享保护方案[J]. 通信学报, 2021, 42(10): 32-42.

LI S P, FANG J, CHEN K. DetNet service share protection scheme based on SRv6[J]. Journal on Communications, 2021, 42(10): 32-42.

[作者简介]



纪若愚 (1996-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院博士生, 主要研究方向为确定性网络、网络演算、时间敏感网络。



刘美慧 (1999-), 女, 北京邮电大学信息与通信工程学院博士生, 主要研究方向为确定性网络、时间敏感网络。



李鹤 (1999-), 女, 北京邮电大学信息与通信工程学院博士生, 主要研究方向为 5G、时间敏感网络和未来网络。



许方敏 (1982-), 男, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为物联网、未来网络技术。



张恒升 (1981-), 男, 硕士, 中国信息通信研究院高级工程师, 主要研究方向为数据通信技术、IP 网络技术、工业互联网等。



赵成林 (1964-), 男, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为短距无线传输技术、认知无线电技术、毫米波技术、工业互联网。