

天空地融合网络架构与传输优化技术

黄思奇¹, 曾德泽¹, 李跃鹏¹, 张梁钰¹, 高丰²

(1. 中国地质大学(武汉) 计算机学院, 湖北 武汉 430074;

2. 之江实验室网络物理社会系统研究中心, 浙江 杭州 311121)

摘要: 随着应用需求的不断扩大, 如何在天空地一体化的异构组网环境下提供高效的组网服务成为新的难题。通过对未来天空地一体化网络的应用场景和技术需求分析, 提出一种基于软件定义网络的天空地融合网络架构, 以满足快速响应、协同处理等要求, 同时简要阐述其主要组成部分和传输优化技术。总结基于软件定义的天空地融合网络架构的发展趋势与挑战, 并进行展望, 为未来天空地一体化网络的发展提供参考。

关键词: 天空地融合网络; 网络架构; 软件定义网络

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023020

Space-Air-Ground Integrated Network Architecture and Transmission Optimization Technology

HUANG Siqu¹, ZENG Deze¹, LI Yuepeng¹, ZHANG Liangyu¹, GAO Feng²

1. School of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Research Center for Cyber-Physical-Social System, Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, China

Abstract: With the continuous expansion of application requirements, how to provide efficient networking services in a heterogeneous networking environment integrating space, space and ground have become a new problem. Through the analysis of the application scenarios and technical requirements of the future space-air-ground integrated network, a space-air-ground integrated network architecture based on a software-defined network was proposed to met the requirements of rapid response and collaborative processing. At the same time, it briefly expounded on its main components and transmission optimization technology. Then, the development trends and challenges of the software-defined space-air-ground integrated network architecture were summarized and prospected, which provided a reference for the future development of an space-air-ground integrated network.

Keywords: space-air-ground integrated network, network architecture, software-defined network

0 引言

为了向海陆空各类用户提供快速响应的高质量信息服务, 基于大规模星座组网、星间链路、空间计算等卫星通信技术的进步, 下一代空间信息网络正朝着大容量通信、全时空互联的方向快速发展^[1-2]。同时, 空间信息网络还将与地面蜂窝网络进行无缝融合, 构成天空地一体化网络^[3-4]来满足未来万物智联、全球广域覆盖的迫切需求。

天空地一体化网络通过组合天基骨干网、天基接入网

和地基节点网, 实现了与地面互联网及移动通信网的互联互通, 进而构建了“全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可信”的天空地一体化网络体系, 成为了全球互联互通的主要信息基础设施, 能够支持海陆空天各类型用户的随遇接入及按需服务。随着航天航空技术的飞速发展以及各国太空探索活动的进一步开展, 卫星通信在各领域的战略地位越来越高, 卫星作为未来天空地一体化网络信息交换的基础设施, 已成为全球信息网络中的一个重要组成部分。早期的网络通信卫星以对地静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)卫星为主, 通过透明弯管转发的方式实现接

入端用户之间的通信,数据交换及路由都需交给指定的地面站进行处理决策^[5]。例如,我国2018年发射的北斗三号^[6-7]。然而,GEO卫星离地面距离较远(一般处于地球赤道上空大约37 000 km处),这将导致其实时性和传输效率很低。幸运的是,低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星因其与地面距离较短,可有效降低它与地面终端间的传输时延。为了充分发挥GEO卫星强算力、广覆盖和LEO卫星近地的优势,目前的研究大多采用GEO卫星网络与LEO卫星网络结合成双层卫星网络的方式进行路由的控制与计算^[8-9],让上层GEO卫星承担路由计算任务,而下层LEO卫星负责转发数据包。这样可有效降低时延,并显著增加网络吞吐量。

尽管卫星通信网络潜力如此巨大,随着卫星应用与服务(例如,气象检测、海洋工程等)愈加复杂,传统卫星通信网络仍难以单纯依赖空间网络进行高效服务交付,进而出现信息分离与服务滞后现象,无法满足灾害预警等要求,因此有必要与地面网络相结合形成综合的天空地融合网络。在这个过程中带来了许多技术难题,主要在于卫星-卫星网络和卫星-地面网络之间存在绝对或相对隔离以及异构的特点,难以对其进行统一管理,导致在流量调度、服务质量(Quality of Service, QoS)保证、数据传输及服务交付等方面面临诸多挑战^[10]。

为了解决上述问题,软件定义网络(Software Defined Network, SDN)应运而生。它利用可编程逻辑器件在时间上对网络层进行划分与重构,使得各业务流可以按需执行,从而达到快速部署、弹性扩展的目的。因此,在天空地融合网络中引入具有控制、转发分离特性的SDN,通过SDN控制器对网络状态进行实时观测,完成对网络信息的采集与管理,可以加强融合网络动态拓扑的适应性,提升融合网络资源管理能力的普适性以及减小开销。

1 天空地融合网络架构能力需求分析

在天空地融合网络中,具有较高处理能力的中高轨卫星网络(例如,GEO卫星网络)作为天基骨干网络可部署轻量化的天基核心网^[11]。与由航空器(例如,无人机)组成的空基核心网和地面核心网构成天空地三核心网架构。在器件处理能力不断增强的情况下,越来越多的网络设备(低轨卫星、无人平台等)拥有更加强大的计算与决策能力,为了满足天空地异构服务的接入与传输要求,天空地融合网络需具备云边协同、区域协作自治和统一网络管理等能力。

1.1 云边协同

随着边缘计算技术愈发成熟,计算需求将被转移至网络边缘的地面节点,结合低轨卫星的近地优势即可实现天基边缘计算服务的快速响应;同时,处于天基核心网的高轨卫星则利用自身较强算力、广覆盖等优势来提供天基云计算服务。由于低轨卫星具有较短的过顶时间和较低的链路时延,适用于处理局域、时间敏感型和短周期的服务。因此,通过低轨卫星和地面节点网络的云边协同计算,可实现对不同规模、需求(安全、带宽、时延等)的数据进行处理与分析。

1.2 区域协作自治

受单一节点在计算、存储和传输资源等方面的限制,万物互联中区域性爆炸式流量需要相邻多个网络节点协同应对,同时受到网络传输压力不断增加和空间大尺度等因素的影响,卫星网络在做出单一中心式决策时将会产生巨大的流量开销和无法忍受的传输时延。为此,当面对大尺度网络区域性的服务接入和资源配置时,通过节点间区域自治生成协作决策,即可实现服务的快速响应和就近转发,从而减少网络中的大规模流量交互。

1.3 统一网络管理

天空地融合网络中节点数量庞大,拓扑复杂多样,时空尺度较大,并且其传输、计算、存储等资源复杂交错,这将导致在分析、控制及优化的过程中存在一定的困难。随着网络节点计算能力的提升和分散式节点的自由度不断变大,在区域协作自治下的传统网络管控无法满足大尺度网络管控需求。同时,在跨大尺度时空下的大规模节点协同对外提供容器化服务难以跟踪同步服务状态,天空地融合网络仍然需要统一网络管理。

2 基于SDN的天空地融合网络架构

天空地融合网络是指由天基核心网(高轨卫星和低轨卫星)、空基核心网(临空设备)和地面核心网(宏蜂窝、微蜂窝和皮蜂窝)组网构成的一个在跨大尺度时空下的天空地融合网络,如图1所示。

对于由卫星构成的天基网络而言,随着卫星技术的快速发展,其星上处理能力会得到极大提升,即可实现星上复杂信号处理和路由交换等功能。为了满足天空地融合网络云边协同、区域协作自治和统一网络管理的需求,需要在同层/跨层空间网络中,通过在不同卫星之间以星间链路的方式建立全方位的连接^[12]。与此同时,新兴网络(B5G、6G)也会针对多样化应用场景,为用户提供按需快速响应的服务能力。传统网络体系结构是基于固定物理拓扑结构

构建而成的,不能适应未来新业务发展的要求,而天空地融合网络结构因其强灵活性、高可扩展性等优势应能灵活适配业务场景和需求。

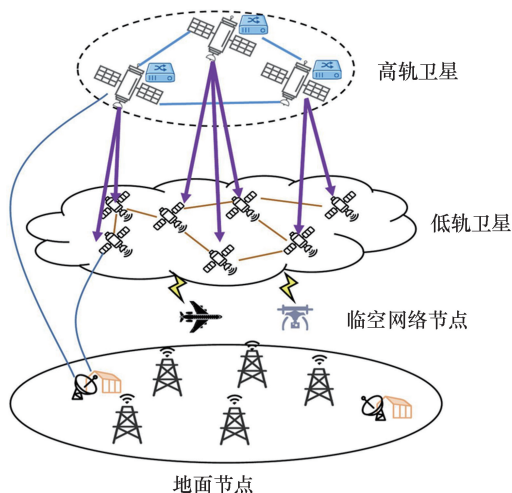


图1 跨大尺度时空下的天空地融合组网示意

随着空间网络高时敏型服务需求不断升级,原先由地面数据中心管控卫星组网的方式由于时延过大等原因很难满足要求。同时,受到任务到达的突发性、网络节点接入的概率性和星地链路的不稳定性等因素限制,星地控制在卫星组网与协同实现途径上缺乏可靠性,并且地面数据中心也不能给予稳定的支撑。因此,为了增强天空地融合网络的集中/区域自治能力,以及能在异构多域网络环境下对资源(存储、带宽、计算等)采取统一管理与动态配置,可以在天空地融合网络中引入SDN技术,以实现天空地

网络资源整合、互联互通、弹性可重构。基于SDN的天空地融合网络架构如图2所示。

在图2中,基于卫星的数据处理能力,天空地融合网络建立了一个分层的区域协作管理体系,并通过高轨、低轨、地面三级控制器的联合工作,实现了对端到端网络和服务的统一管理。其中,一级SDN控制器(高轨卫星网络控制器)部署在高轨卫星网络中,以实现低轨卫星集群的顶层管理和控制;在低轨卫星网络中,采用二级SDN控制器(低轨卫星网络控制器)作为控制终端。一方面,通过接收一级SDN控制器的命令来完成定制的跨区域通信;另一方面,将各个子域所对应的二级SDN控制器组织成二级SDN控制平面,并直接产生区域网络的调度决策,以完成对区域网络的控制与行为的界定。此外,当星地链路可用时,部署在地面蜂窝网络中的三级SDN控制器(地面蜂窝网络控制器)具有优先控制权,可直接接管低轨卫星网络的顶层控制,并负责地面蜂窝网络和星地链路的控制和调度。

高轨卫星作为天基核心网的骨干节点,覆盖范围广、拓扑结构稳定、具有相对固定的辐射面,能够获取并维护管控区域内的星间网络拓扑(例如,低轨卫星网络全局视图)。此类卫星体积庞大,存储、计算、网络资源较为丰富,可以支持更加繁杂的计算和更加稠密的同轨通信。同时,一级SDN控制器被部署在高轨卫星网络上,构成了天基网络的一级控制平面。针对各种卫星应用,该SDN控制器可根据需要而启动。

在进行星地联合作业时,三级SDN控制器将接管低

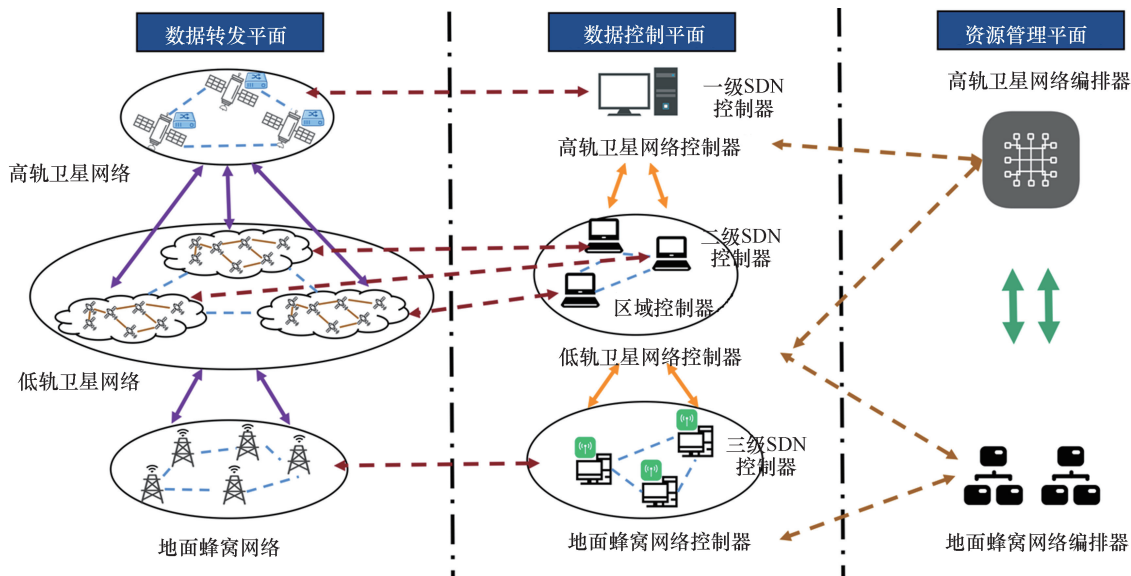


图2 基于SDN的天空地融合网络架构

轨卫星网络的控制权，而高轨 SDN 控制平面无须启动。与此同时，在星地联合运行过程中，与高轨卫星网络和低轨卫星网络之间的链路相比，低轨卫星网络与地面蜂窝网络之间的链路长度更短，通信时延也将更低。再加上低轨卫星网络与地面蜂窝网络之间的链路实时可用，因此为了控制低轨卫星网络的跨区域通信，可将地面蜂窝网络作为一级 SDN 控制平面；当卫星集群在进行单独作业时，一级 SDN 控制器将接管低轨卫星网络的控制权，并使用高轨控制平面作为一级 SDN 控制平面，从而实现对低轨卫星网络跨区域通信的控制。

低轨卫星相较于高轨卫星，其体积小、覆盖面窄、组网的节点数量众多，但具有高动态性的拓扑结构。因此，建立大规模的低轨卫星网络不仅可以有效提高网络架构处理复杂计算的能力，还将实现在轨计算。在低轨卫星网络中部署二级 SDN 控制器，并将其集合视为天基网络的二级控制平面。由于受到低轨卫星网络拓扑结构的复杂性特征和星载资源紧缺的影响，低轨卫星网络将被划分为若干个自治域，并在每个域中都部署一个 SDN 控制器，即可有效对区域子网的行为进行界定和管控，以更好地对外提供服务。

在进行星地联合作业时，该层将作为星地协同空间网络的中继与地面蜂窝网络中的一级 SDN 控制平面相连，以实现 SDN 跨区域管控。另外，通过与低轨卫星网络对接，可以定义并控制任务群网络；针对卫星集群单独作业的情况，该层可通过任务直接与卫星进行对接，来获得相关应用的计算、网络资源需求，并通过生成数据传输控制决策控制区域子网，以提高流量调度和数据转发的效率。与此同时，在该过程中，高轨 SDN 控制平面也将辅助其进行跨区域的流量调度。

地面蜂窝网络的存在，使得地面数据中心之间实现了互联资源，能提供丰富的带宽、网络和计算等资源，以完成一些繁杂的任务。在该体系架构中，三级 SDN 控制器被部署在地面蜂窝网络中，作为星地网络的基础控制层，与天基网络联合完成作业。

在进行星地联合作业时，基础 SDN 控制平面为低轨卫星网络提供了一级 SDN 管控能力，能够根据已接收的任务需求，对低轨卫星网络的跨区域通信进行界定和管控。同时，针对用户提出的任务要求，该层可以对星地链路资源进行实时调度，以灵活快捷的方式发布任务需求，并与天基网络共同构成一套完整的面向星载应用服务的网络体系；在卫星集群进行独立操作的情况下，星地链路将停止工作，并且基础 SDN 控制平面也不再干涉天基网

络的任务行为。

由于天空地融合网络具有全区域覆盖、随遇接入和拓扑动态变化等特点，因此必须实现对异构网络的资源进行统一管理和编排。为了对天空地融合网络的资源进行有效整合，将在高轨卫星网络和地面蜂窝网络上部署网络编排器。由于高轨卫星资源有限，高轨卫星网络编码器将会利用轻量化的网络编排技术来处理其辖区范围内（高低轨卫星网络）的卫星节点和星间链路异常状况，并根据业务特点、网络拓扑结构和网络负载变化等情况灵活调整网络结构。当出现突发事件时，可以根据地面蜂窝网络编排器的命令，区域内卫星网络节点的可用性、安全性和负载情况再进行网络重构。由于地面蜂窝网络与高轨卫星网络间的链路较长，通信将会产生较大的时延，为此地面蜂窝网络编排器的命令将由低轨卫星转发至高轨卫星，以实现天空地融合网络资源的统一管理和网络的编排管理。

基于上述网络架构，当面对星地联合作业和卫星独立作业这两种情况时，天空地融合网络既可以对星地网络资源进行统一管理和编排，又极大地提高了天基网络的区域自治能力。采用分层分区域的部署方式将有如下优点。首先，将一级 SDN 控制器配备在高轨卫星网络上，形成分布式 SDN 控制平面，既可以有效地降低单个节点的负荷，又能保证多个控制节点的高可用性，防止因单个节点故障而造成集群失效。其次，将二级 SDN 控制器分区域部署到低轨卫星网络中，并让这些 SDN 控制节点的控制范围能完全将低轨卫星网络覆盖。对于每个分区的 SDN 控制器可以根据任务的需要，在任务运行阶段时决定是否控制区域子网。这种将数据控制平面和数据转发平面相结合的形式，可显著提高天空地融合网络的在轨自治能力。最后，地面蜂窝网络和高轨卫星网络的双端控制能力可以为天空地融合网络在各种任务要求和星地链路的条件下提供完善的网络管控编排能力。

3 面向天空地融合网络的传输优化技术

现如今的互联网均基于 TCP/IP，TCP 是一种面向连接、可靠的传输服务，但是天空地融合网络的误码率高、传输时延大、丢包严重等特性，使得 TCP 在天空地融合网络中的应用效果并不理想。因此，提高天空地融合网络的传输能力是一个亟须解决的问题。

提高天空地融合网络的传输能力，目前有 3 种主要的方法。第一种方法是在传统 TCP 的基础上进行优化；TCP 是目前在地面网络中使用最为广泛的一种传输层协议，为

此,卫星网络也必须支持基于 TCP 的服务;第二种方法是推动专门用于卫星网络的传输协议 SCPS-TP^[13-14]的发展;第三种方法是基于 UDP 的优化。例如,基于 UDP 的 QUIC^[15]和 MPQUIC^[16-17]在许多场景下是非常有效果的。下面分别从上述 3 方面介绍提升天空地融合网络卫星通信传输能力的关键技术。

3.1 基于 TCP 协议的传输优化

TCP 拥有一系列的拥塞控制机制(慢启动、拥塞控制、快重传、快速恢复),以解决网络拥塞问题和控制发送方的发送速率。为此,在地面网络中,各个流的公平性得到了很好的维护。传统 TCP 可以很好地满足地面网络传输的需求,但是在高时延、高误码率、高丢包率的天空地融合网络中,如何提高卫星网络的传输性能,并与地面网络进行协同工作成为了迫切需要解决的问题。

为了应对现有 TCP 拥塞控制算法在混合网络尤其是在卫星网络中性能表现不理想的情况,参考文献[18]通过仿真实验分析误码率等因素对 TCP 传输性能的影响,并结合现有的各种优化机制,提出一种具有自适应的拥塞控制算法(Adaptive TCP, ATCP)。在 ATCP 拥塞控制的各个阶段,通过对网络状况进行实时检测,对拥塞窗口的增长策略进行自适应的调节,并将窗口增长函数和公平因子相结合,不仅保持了公平性,还能有效地提高网络带宽的利用率。基于 Inmarsat 卫星通信系统^[19],参考文献[20]通过应用快速启动、增大发送窗口、基于拥塞控制的时延、TCP 欺骗技术和 TCP 划分技术等方式实现了 TCP 通信加速,并采用 BGAN 终端进行了大量的跟踪实验。结果表明, TCP 加速算法能极大地改善 Inmarsat 卫星系统的通信性能。

针对卫星网络中长往返路程时间(Round-Trip Time, RTT)对 TCP 在数据量较小的传输流中慢启动时间延长和在大数据量流中拥塞窗口不能维持的问题,参考文献[21]提出 ABS(Accelerate Backoff and Stable)算法,在 ABS 算法中,采用固定加速比降低慢启动时长、立方函数维持拥塞窗口等方案,为解决卫星网络误码率高以及多种加速技术引起网络拥塞等难题,提出一种基于 RTT 偏移的拥塞窗口增长自适应调整机制,且能够分辨误码与拥塞,避免无效信息的反复发送,从而有效地缓解网络拥塞现象,提升吞吐量。与传统 TCP 相比, TCP 加速技术使 TCP 更能适应卫星网络环境。其中, TCP 加速技术主要包括底层处理、分割 TCP 连接、端到端的解决方案、双边 TCP 加速和单边 TCP 加速等方法。

无论是双边 TCP 加速还是单边 TCP 加速,其核心思

想都是利用透明代理来实现的,即在发送端和接收端的一方或双方部署软件或者硬件设备,透明代理通过与其相连的那一端交互来优化数据,使其能在不稳定的链路中传输报文。双边 TCP 加速指的是将软件或者硬件部署在 TCP 连接的两端,发送端和接收端的数据包均被缓存在代理中,而两个透明代理之间的卫星链路则通过其他卫星链路协议来实现。单边 TCP 加速仅需将软件或者硬件设备部署在一端即可;并且在发送 TCP 之前,透明代理会对接收到的 TCP 进行优化。经过优化的 TCP,在卫星网络中的传输速率将会大幅度提升。与双向 TCP 加速相比,单向 TCP 加速具有更广泛的适应性,往往会将单边 TCP 透明代理部署到服务器端,使客户端无须进行软硬件优化。但是单边 TCP 加速受到 TCP 框架的约束,对传输性能的改善还是没有其他几种方式好。

3.2 基于 SCPS-TP 的传输优化

由于在卫星网络上传统 TCP 的性能表现欠佳,因此要提高卫星网络数据传输速率的方向之一是对 TCP 进行优化,使其形成更适合卫星网络使用的协议,而又能维持和地上传统 TCP 之间良好的兼容性。为此,美国航空航天局喷气推进实验室(NASA JPL)和国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)共同研究制定了一套空间通信协议 SCPS(Space Communication Protocol Specification)。这套协议主要包括 SCPS-FP(文件协议)、SCPS-TP(传输协议)、SCPS-SP(安全协议)、SCPS-NP(网络协议)。其与标准的 OSI 模型和广泛使用的 5 层协议的对比如图 3 所示。

SCPS 协议是在 TCP/IP 模型基础上修改而来的。SCPS-TP 是适用于卫星网络传输层的传输层协议。相比于 TCP, SCPS-TP 进行了多方面的改进,使其能更好地适用于深空通信。SCPS-TP 的改进措施见表 1。

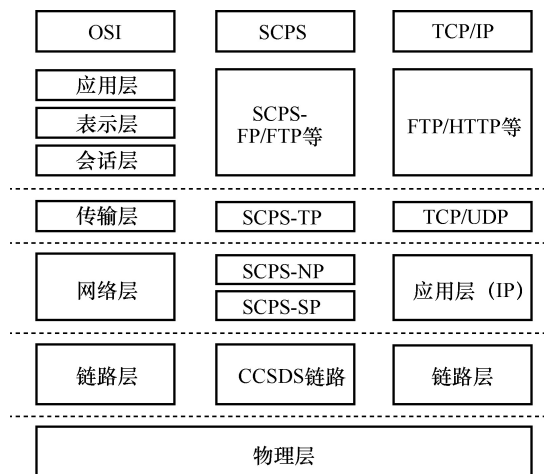


图 3 SCPS 协议与标准的 OSI 模型和广泛使用的 5 层协议的对比

表 1 SCPS-IP 协议的改进措施

约束条件	误码率	通信状态	RTT	上下行链路带宽比	链路丢包原因	通信硬件性能	数据传输性能
近地通信	小于 10^{-10}	无间断	毫秒级	1:1	数据拥塞	高性能	吞吐量高, 高可靠
卫星通信	$10^{-8} \sim 10^{-4}$	间断	时延长	10:1 到 1000:1	多方面	低性能	最大的链路利用率
提升方案	对链路丢包响应; SNACK; 包头压缩	允许数据 间断传输	新窗口调整 方案和定时器	控制速率; 压缩; 减少确认平均率	对不同数据缺失方式 提供 SCMP 信号	提前对数据处理; 设置记录临界值	新的窗口控制算法; 丢包较多时使用 SNACK

从表 1 可以看出, 与 TCP 协议相比, SCPS-TP 最大的变化是引入了选择性否定确认 (Selective Not ACK, SNACK) 机制。卫星通信的高误码率也在一定程度上说明了在数据传输过程中会有较多的丢包存在, 当窗口中出现大量的数据错误时, 采用传统 ACK 的反复应答将会增加上下行链路的负担, 特别是在卫星通信这种链路带极度不对称的情况下。SNACK 就是针对这种需要回发大量重复 ACK 的情况, 这是一种选择性地发送否定确认的确认机制, 在 SNACK 中可以包含多个数据包, 也就是说发送一个 SNACK 相当于发送了多个 ACK。因此, SNACK 的存在, 大大减轻了由于链路带宽不对称而造成的反向拥塞问题。

在 SCPS-TP 中常用的拥塞控制算法为 Vegas 和 VJ (Van Jacobson)。与其他的拥塞控制算法相比, Vegas 拥塞控制算法主要是通过数据包的时延来判定是否发生了拥塞, 但是该算法和其他拥塞控制算法 (Cubic、Reno) 并存时会出现较其他算法先降低发送速率所带来的公平性问题。同时, 在高轨卫星网络中, Vegas 算法会因为发送端数据包数量的突然增加, 使得慢启动阶段将提前结束, 从而造成带宽的浪费。为了应对上述问题, 参考文献[22]基于 Vegas 算法, 通过修正因子来控制拥塞窗口的大小, 可有效解决慢启动过早结束的问题。

3.3 基于 UDP 的传输优化

目前, 基于 UDP 的传输优化技术的研究多以 QUIC 为核心。QUIC 由谷歌于 2012 年推出, 并在 UDP 基础上进行了针对性的优化。由于其在地面网络中拥有良好的性能, 所以不断有人尝试将 QUIC 部署在卫星网络中。

参考文献[23]对高轨卫星链路高时延、高丢包率等特性进行仿真研究, 采用页面加载时间作为衡量高轨卫星链路 QUIC 性能的指标, 结果表明, QUIC 利用 O-RTT 和多路复用技术, 使得 QUIC 有效降低了网络中的冗余连接, 同时传输层依赖 UDP 减小了 TCP 的 3 次握手和头部阻塞的开销; 与 HTTP/2 和 HTTPS 等传统的应用服务器协议比较, 在满足卫星链路传输特性的大部分情况下,

QUIC 具有明显优势。由于卫星独特的物理性质和所产生的通信环境, 一般可以采用 PEP 来解决, 参考文献[24]通过引入 QUIC-proxy 来加强卫星与地面间回程传输性能。实验表明, QUIC-proxy 对链路终端的改变提供了极大的帮助, 允许在不中断的情况下继续数据传输, 从而改善了传输性能。另外一种方案就是采用多路径传输技术, 将卫星网络的带宽资源集中起来, 以提升系统的数据传输效率, 如果能够充分发挥多路径协议的性能, 将会获得比优化后的 TCP 更好的效能。目前已有的多路径传输协议, 例如 MPTCP (Multipath TCP)、MPQUIC (Multipath QUIC) 等, 都存在与 TCP 相同的问题, 它们都是建立在地面网络上的, 若直接应用于卫星网络中, 则很难达到预期的效果。MPQUIC 与 MPTCP 相比, MPQUIC 的性能更优^[25]。

BBR 是基于 TCP 的一种拥塞控制算法, 但越来越多的研究者将 QUIC 与 BBR 相结合, 并在不同的地面网络环境中对其进行研究^[26]。参考文献[27]将 QUIC 和 BBR 应用到卫星网络中, 并进行大量的仿真实验, 结果表明, 当丢包率较高、时延较长时, 与 Cubic 相比, 采用 BBR 的 QUIC 可大大缩短时延。

4 展望与挑战

SDN 为天空地融合网络的发展提供了新的动力, 以 SDN 为基础的数控分离和软件可编程思想, 减少了对天空地融合网络的数据平面设备的需求, 从而可以把更多的资源用于数据转发平面。与此同时, 以 SDN 为核心的软件化集中控制, 可大大减少网络的管理和控制成本。要实现天空地融合网络架构的实际应用与部署, 仍有许多亟待解决的具体问题。

(1) 网络架构的充实与完善

本文讨论了一种以 SDN 为基础的天空地融合网络体系架构, 并介绍和分析了网络架构的构成要素及其之间的关系, 但在基于 SDN 天空地融合网络架构中所包含的具体问题还没有进一步讨论。例如, 在一个复杂的网络

体系中, 如何实现各平台(高轨卫星网络平台、低轨卫星网络平台和地面蜂窝网络平台)间智能协作能力不断涌现, 无人机-无人机/无人机-有人机间互联互通、协议和服务设计问题等, 上述问题都需通过对未来天空地融合网络应用需求的深入探讨、研究和实验后, 方能得出确切的结论。

(2) 服务-资源匹配机制探索

星地集群快速对外服务能力的形成, 其关键是突破对卫星/地面管控平台的限制, 以松散耦合的方式进行跨域组合和动态的资源聚合。服务功能和资源间的匹配程度将直接影响其效能的发挥, 然而融合网络中, 不同的应用资源在功能和属性上存在明显的异构性, 并且各资源间也存在关联性。同时, 资源的汇聚既密切耦合服务需求, 又受用户要求及平台功能属性等方面的制约。这些都使得现有办法无法有效解决复杂环境下的资源高效聚合问题。此外, 目前对资源聚合过程中各要素间交互影响机理认识不足也严重阻碍了相关理论及应用的发展。因此, 如何准确地描述服务需求和各类制约因素、深入挖掘融合网络中服务和资源聚合之间的显性及隐性关系, 并构建准确的服务和资源匹配机制是今后的一个重要课题。

(3) 天空地融合网络可靠性研究

基于 SDN 的天空地融合网络可靠性研究包含数据平面和控制平面的可靠性。其中, 数据平面的可靠性问题主要涉及链路失效和节点故障, SDN 的集中式管控模式提供了一个全局视图以方便对失效位置和影响范围进行定位, 并在此基础上通知相应的平台。但是如何减少 SDN 控制器(例如, 高轨卫星网络 SDN 控制器)和平台之间的通信开销是一个亟待解决的问题, 与此同时, 为了减少链路备份所造成的额外资源消耗, 有必要对低时延网络修复机制进行研究。其次, 控制平面的可靠性问题主要是指控制器的高效准确的部署和故障及时修复问题, 也就是如何部署控制器使得网络传输可靠性最大化以及各控制器的数据备份问题。

参考文献:

- [1] DAI C Q, LIAO G Y, CHEN Q B. Service-oriented routing with Markov space-time graph in low earth orbit satellite networks[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2020, 32(7): e4072.
- [2] JIANG F, ZHANG Q Y, YANG Z H, et al. A space-time graph based multipath routing in disruption-tolerant earth-observing satellite networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(5): 2592-2603.
- [3] 李贺武, 吴茜, 徐恪, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 95-106.
LI H W, WU (Q/X), XU K, et al. Progress and tendency of space and earth integrated network[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 95-106.
- [4] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [5] GOPAL R, BENAMMAR N. Framework for unifying 5G and next generation satellite communications[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 16-24.
- [6] 杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 北斗三号系统进展及性能预测: 试验验证数据分析[J]. 中国科学(地球科学), 2018, 48(5): 584-594.
YANG Y X, XU Y Y, LI J L, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: data analysis based on BDS-3 demonstration system[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(5): 584-594.
- [7] 尹志豪, 王广兴, 胡志刚, 等. 北斗三号观测数据质量分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(6): 37-45.
YIN Z H, WANG G X, HU Z G, et al. Data quality analysis of BDS-3 observables[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(6): 37-45.
- [8] 齐小刚, 马久龙, 刘立芳. 基于拓扑控制的卫星网络路由优化[J]. 通信学报, 2018, 39(2): 11-20.
QI X G, MA J L, LIU L F. Routing optimization based on topology control in satellite network[J]. Journal on Communications, 2018, 39(2): 11-20.
- [9] 孙伟超, 梁俊, 肖楠, 等. 具有高效确认机制的双层卫星网络多径路由协议[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(4): 1183-1187.
SUN W C, LIANG J, XIAO N, et al. Multipath routing protocol for two-layered satellite networks with efficient acknowledgement mechanism[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(4): 1183-1187.
- [10] LI T X, ZHOU H C, LUO H B, et al. SERvICE: a software defined framework for integrated space-terrestrial satellite communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(3): 1183-1187.

- 703-716.
- [11] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔. 6G 中的卫星通信高效天基计算技术[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 50-53.
- WU X W, JIAO Z F, LING X. High-efficiency space-based computing for satellite communications in 6G[J]. Mobile Communications, 2021, 45(4): 50-53.
- [12] 吕智勇. 6G 网络中的卫星通信[J]. 数字通信世界, 2020(1): 27-28.
- LYU Z Y. Satellite communication in 6G network[J]. Digital Communication World, 2020(1): 27-28.
- [13] WANG R H, HORAN S. Protocol testing of SCPS-TP over NASA's ACTS asymmetric links[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 790-798.
- [14] SCOTT K, TORGERSON L. SCPS-TP: a satellite-enhanced TCP[J]. 2004.
- [15] LANGLEY A, RIDDOCH A, WILK A, et al. The QUIC transport protocol: design and Internet-scale deployment[C]//Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM, 2017: 183-196.
- [16] VIERNICKEL T, FROEMMGEN A, RIZK A, et al. Multipath QUIC: a deployable multipath transport protocol[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [17] VU V A, WALKER B. On the latency of multipath-QUIC in real-time applications[C]//Proceedings of 2020 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [18] 殷齐鹏. 面向异构混合网络的自适应拥塞控制算法研究与实现[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- YIN Q P. Research and implementation of adaptive congestion control algorithm for heterogeneous mixed networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [19] SPIRIDONOV V V. Inmarsat systems and services[C]//Proceedings of International Conference on Satellite Communications. ICSC'94. Piscataway: IEEE Press, 2002: 45-52.
- [20] 谢永锋, 赵吉英, 胡俊. TCP 加速技术在 Inmarsat 卫星通信系统的应用研究[J]. 通信技术, 2020, 53(12): 2922-2926.
- XIE Y F, ZHAO J Y, HU J. Application of TCP acceleration technology in inmarsat system[J]. Communications Technology, 2020, 53(12): 2922-2926.
- [21] 陈庭平. 卫星—地面混合网络 TCP 拥塞控制机制优化研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- CHEN T P. Research on optimization of TCP congestion control mechanism in satellite-ground hybrid network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [22] 宋振健, 王春梅, 张明. 卫星通信网络中 SCPS-TP 分析与研究[J]. 电子设计工程, 2018, 26(4): 56-59.
- SONG Z J, WANG C M, ZHANG M. Analysis and research of SCPS-TP in satellite communication network[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(4): 56-59.
- [23] ZHANG H, WANG T Q, TU Y, et al. How Quick Is QUIC in Satellite Networks[C]//International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems. Singapore: Springer, 2019: 387-394.
- [24] ABDELSALAM A, LUGLIO M, QUADRINI M, et al. QUIC-proxy based architecture for satellite communication to enhance a 5G scenario[C]//Proceedings of 2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [25] DE CONINCK Q, BONAVENTURE O. Multipath QUIC: design and evaluation[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies. New York: ACM, 2017: 160-166.
- [26] 谢琳. 面向集群架构 QUIC 协议的优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- XIE L. Research on optimization of QUIC protocol for cluster architecture[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [27] WANG Y, ZHAO K L, LI W F, et al. Performance evaluation of QUIC with BBR in satellite Internet[C]//Proceedings of 2018 6th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE). Piscataway: IEEE Press, 2019: 195-199.

[作者简介]



黄思奇 (1999—), 男, 中国地质大学 (武汉) 硕士生, 主要研究方向为边缘计算、云原生技术等。



曾德泽（1984—），男，中国地质大学（武汉）教授、博士生导师，主要研究方向为边缘计算、未来网络技术、物联网等。



张梁钰（1999—），男，中国地质大学（武汉）硕士生，主要研究方向为边缘计算、云原生技术等。



李跃鹏（1994—），男，中国地质大学（武汉）博士生，主要研究方向为边缘计算、任务调度、可信执行环境等。



高丰（1974—），男，之江实验室研究员，主要研究方法为边缘计算、云计算、泛在操作系统等。