

面向多目标的一体化融合网络体系结构

崔 勇^{1,2}, 张 蕾², 马 川¹

(1. 清华大学计算机系, 北京 100084; 2. 中关村实验室, 北京 100194)

摘要: 随着网络空间重要性日益增强,其涵盖范畴也在不断延展. 除了传统互联网支持全球网络空间互联互通之外,还存在不同形式的有限域网络,例如空间卫星网络、工业互联网、数据中心网络等. 这些有限域网络具有多样化的终端类型、接入方式、拓扑结构和业务场景,而传统互联网体系结构所采用的协议、传输格式和转发方式无法满足这些异构网络高效的互联互通发展需求. 因此,实现互联网、空间卫星网络、工业互联网、高性能数据中心网络等异构网络的一体化融合是势在必行的发展趋势. 本文针对一体化融合网络所面临的规模可扩展性和实时性两大挑战,采用演进创新的研究思路,设计了一种分域自治、可扩展的一体化融合网络体系结构,实现了域间协同和域内自治的大规模可扩展的架构,并通过富语义的层间接口支撑差异化业务跨域传输的服务质量需求.

关键词: 一体化融合网络;网络体系结构;富语义的层间接口;域内自治;可扩展;跨域传输

基金项目: 国家自然科学基金(No.62132009)

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)09-2277-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221214

Multiple Objective Oriented Integrated Network Architecture

CUI Yong^{1,2}, ZHANG Lei², MA Chuan¹

(1. Department of Computer and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Zhongguancun Laboratory, Beijing 100194, China)

Abstract: With the increasing importance of cyberspace, its scope is continuously expanding. In addition to supporting global interconnectedness through the traditional internet, it also includes various forms of limited-domain networks such as satellite networks, industrial internet, data center networks, etc. These limited-domain networks have diverse terminal types, access methods, topology structures, and business scenarios. The protocols, transmission formats, and forwarding methods used by the traditional internet architecture cannot meet the efficient interconnection and development requirements of these heterogeneous networks. Therefore, the integration of the internet, space satellite networks, industrial internet, high-performance data center networks, and other heterogeneous networks is an inevitable development trend. This paper focuses on the two major challenges faced by the integrated network: scalability and real-time performance. Using an innovative research approach, a domain-autonomous and scalable integrated network architecture has been designed to achieve large-scale scalable architecture with inter-domain collaboration and intra-domain autonomy. Rich semantic inter-layer interfaces are supported to meet the quality-of-service requirements for differentiated business cross-domain transmission.

Key words: integrated network; network architecture; rich semantic interface; intra-domain autonomy; scalable; cross-domain transmission

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62132009)

1 引言

近年来,以因特网为代表的互联网已经成为人类社会最重要的基础设施,它已经渗透到经济、政治、军事、交通、娱乐、购物等各个行业,成为国家发展和社会进步的重要支柱. 互联网由于具有全球互联互通的特

性,因此也被称为全球域网络. 与此相对应,空间卫星网络、数据中心网络、工业互联网等网络由于在资源、协议、技术等各方面的异构性,同时技术变革亦在有限的范围内,常被称为有限域网络. 目前这些有限域网络呈现出多种异构形态,同时也存在着强烈的互联互通

需求,因此一体化融合网络的概念应运而生。一体化融合网络指以互联网为基础,由地面网络向空间网络延伸,覆盖空中、陆地等自然空间,为工业互联网、数据中心网络等异构网络用户活动提供信息保障的基础设施。实现上述各类有限域网络的一体化融合不仅是网络技术的发展趋势,也是新型网络应用创新发展的根基。一体化融合网络将不同形态网络连接在一起,在满足各个有限域网络多种发展目标的前提下,实现跨越异构网络的互联互通,并对跨越异构网络的数据传输提供更好的用户体验。然而,目前空间卫星网络呈现时空高动态性,工业互联网呈现终端多样化,数据中心网络呈现业务差异化,这些有限域网络在终端类型、接入方式、拓扑结构、业务场景中展现出多元化发展的趋势。本文将上述多元化形态称为多目标形态。传统互联网体系结构固有的协议、传送格式及转发方式均不能满足上述多目标形态的有限域网络一体化融合的需求。

互联网体系结构是整个网络运转的核心,所有网络层次划分、协议设计、接口和流程的定义都围绕着体系结构建立和运行。在网络体系结构中,网络层和传送层起着承上启下的作用,目前面临着在不断满足通信技术发展和应用需求激增的情况下如何保障全网通达的挑战。由于传统的互联网体系结构无法满足越来越复杂的异构网络的业务需求,因此国际上正在不断开展互联网体系结构的新布局,在网络体系结构及其关键核心技术进行一系列的创新研究,以满足不断新增的异构网络互联互通需求。例如美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)于2000年首先资助了NewArch^[1]项目,随后又资助了FIND, GENI, FIA以及SaTC等项目。欧盟从2007年开始也先后支持了FIRE, 4WARD, SAIL等多项互联网体系结构的项目。此后还诞生了许多新型互联网体系结构的研究^[2-6],例如以内容为中心的网络架构(Named Data Networking, NDN)^[7]和Netinf^[8],以移动特性为中心的网络架构MobilityFirst^[9],面向安全的互联网体系结构(Accountable Internet Protocol, AIP)^[10]和(Scalability, Control, and Isolation On Next-generation networks, SCION)^[11]等。这些全新的网络体系结构研究既没有实现大规模开放及研制,又缺乏相应国际标准规范支撑,无法与现有互联网协议标准和大规模互联网实践结合。

在互联网体系结构的研究中,存在着两种不同的技术路线:革命式和改良式。支持革命式路线的研究者认为互联网体系结构应该重新设计,而支持改良式路线的研究者认为应该在现有体系结构的基础上进行修补。然而,推倒重来的革命式路线部署代价高,而改良式技术路线则会破坏互联网体系的沙漏结构,因此两者都无法在实际应用中达到良好效果。结合上述两种

技术路线的优势,国际上有学者提出了一种演进式技术路线^[12]。例如,真实源地址验证体系结构和下一代互联网翻译过渡和隧道过渡等^[13-15],都基于现有互联网体系结构,在关键技术上进行创新,这些技术已经形成了一系列的IETF国际标准,并在全球范围内的互联网中开展了部署使用。

经过多年来的不断发展完善,互联网逐渐形成了如今的互联网体系结构。互联网体系结构研究旨在不断解决网络中的重大技术挑战,其中包括可扩展性、安全性、移动性和实时性等问题。随着一体化融合网络发展,其承载的网络形态、业务类型呈多元化发展,提高可扩展性和实时性是其中的重大挑战。

为了保持互联网的核心要素和设计原则相对稳定,同时借鉴革命式创新的探索成果,兼容现有互联网基础设施,本文采用演进创新的研究思路,以互联网体系结构为基础,设计分域自治的可扩展网络体系结构,构建域间协同、域内自治的大规模可扩展的架构,以满足多目标形态的有限域网络一体化融合的需求。在体系结构纵向层面,依旧遵循分层体系原则,在网络层支持传统编址下的路由技术创新,同时也支持新型IP编址及寻址机制、异构网络地址分配等技术;传输层支持以时敏业务为代表的新型业务需求的传送技术创新;在体系结构横向层面,域间采用统一的编址以及多层次的异构网络的互联互通机制,实现域间统一演进、域内创新自治的异构网络互联互通。此外,在一体化融合网络体系结构中还提供了富语义的层间接口,实现纵向跨层传递、横向跨异构网元的富语义信息传递,支持多种异构网络差异化业务跨域传输服务质量的需求。

2 一体化融合网络体系结构面临的挑战

目前存在的多种多样的异构网络例如工业互联网、卫星网络、移动网络、无线接入网、广播电视网、数据中心网络以及骨干网等,为用户提供了多样化的通信方式和接入手段。这些异构网络在建立之初是围绕着不同应用场景、目标用户和通信需求而专门设计的,其技术特点、组网方式、服务性能和覆盖范围各不相同,与现有的骨干网技术存在一定差异。如果这些目标异构的网络之间无法有效地互联互通,则对跨域传递数据的应用无法提供端到端服务质量保证,严重削弱了网络的整体效用和用户体验。同时,由于多种异构网络在物理形态、拓扑结构、网络规模、部署方式等方面的存在巨大差异,不同目标网络形态之间以及与骨干网之间无法深入融合。因此,本文针对一体化融合网络中亟需突破的规模可扩展性和实时性两方面挑战进行了分析。

2.1 规模可扩展性挑战

传统IP网络架构主要面向地面有线网络,其网络

拓扑与链路均较为稳定.然而,卫星与地球之间高速相对移动,导致卫星网络基础设施具有高动态时变特性.这会导致星间与星地链路的拓扑频繁变化,计算、存储、带宽等资源分配不均,通信线路的误码率增高.另外,由于地面网络与空间网络时空尺度不同且长期独立发展,两者都采用相对独立且专用的路由协议,网络架构高度异构,难以实现深度的融合.基于IP的异构网络互联机制,如果依赖“打补丁”式的网关转换方式,则在不同协议之间的语法、语义以及时序都难以兼容,在不同的编址和路由空间中,也难以进行精确高效映射,对协议控制域之间的精确高效映射更是难上加难.因此,很难从根本上解决路由寻址、协议翻译等基础问题.

2.2 实时性挑战

随着网络空间的不断拓展,各种异质异构网络业务种类繁多,工业控制、车联网、远程医疗、虚拟现实及视频会议等应用都提出了时延保障的需求.例如,在流媒体业务中,良好的用户体验体现在打开速度、流畅无卡顿、视频图像清晰等方面.然而在网络资源不足的情况下,上述用户体验的良好指标之间存在着一定的矛盾.同时,端到端传输路径上的网络资源的动态变化给数据传送带来极大的挑战,使异构网络环境中传送控制难度加大.传统的互联网采用竞争接入和尽力转发,无法满足应用的传输时延要求.固化的网络协议也仅对网络状态尽力感知,无法为时延敏感业务在异构网络特性下提供有效的性能保障.

自2005年起,以美国为代表的“推倒重来”(clean slate)的发展思路提倡将现有互联网体系结构彻底重建.然而,尽管多年来各种新型互联网体系结构的研究成果在技术上具备一定优势,但全新的架构设计的推广成本高,在网络设备和网络架构的实施过程中受到极大的阻碍,在商业互联网应用方面难以大规模推广.针对面一体化融合网络面临的两大核心挑战,本文旨在解决如何将复杂多样、规模庞大、目标各异的多种异构网络抽象为结构清晰、功能简洁、易于高效实现的统一的网络体系结构,从而使一体化融合网络既能适应通信技术的快速发展与变化,又能支持不断涌现的新型应用.

3 一体化融合网络体系结构总体设计

当前互联网体系结构的研究分为两个方向:一是在现有体系结构的基础上演进创新;二是对体系结构进行彻底重建.鉴于如今互联网大规模应用的前提,采用彻底重建的设计会带来巨大的代价且部署困难,几乎无法实现目标.只有通过体系结构的演进创新,才能尽快实现针对各类异构网络的深度融合,满足一体化

融合网络中多样化业务需求.为了确保与现有互联网的互通性,本文采用演进创新的发展模式,在保持互联网设计原则和核心要素相对稳定的条件下,探索构成核心要素的新思路.

各种形态的有限域网络为满足自身的需求,在域内进行了技术创新.然而,由于终端类型、拓扑结构、链路介质等方面存在巨大差异,在互联互通时需要针对每种场景单独进行设计,从而导致异构网络间互联互通成本高.本文提出的一体化融合网络体系结构采用纵向分层和横向分域自治的思路,设计了纵向富语义层间接口,以及横向跨域互联的多目标互联机制.这一统一的体系结构,解决了异构网络间互联的难题,减低了异构网络间互联互通的成本.

本文提出的体系结构在不影响各个异构网络正常运行的前提下,设计了满足各种约束条件的一体化融合网络体系结构.该体系遵循了David Clark于1988年提出的互联网体系结构设计原则^[16].在纵向层面,通过互联网体系结构的富语义层间接口,实现应用需求和网络状态跨层纵向传递.利用IP地址语义转换、协议语法、语义与时序的精确匹配,解决了一体化融合网络规模可扩展性问题,并实现性能提升.从横向层面来看,充分考虑网络体系结构增量部署需求,采用域间协同和域内自治机制.针对中转网络和末梢网络,采用分域创新与互联互通的有机结合方式,实现互联网、空间卫星网络、工业互联网等异构网络间的互联互通.此外,通过富语义层间接口,将业务需求纵向贯穿协议体系,横向涉及多个网元,从而解决了一体化融合网络面临的实时性问题,并支持应用服务质量的提升.

除此之外,一体化融合网络中,各异构网络计算、存储、带宽等资源呈现异质性、多样性、碎片化的特点.为了保障一体化融合网络互联互通的质量并对各类资源按需调度,本文通过富语义层间接口实现应用需求和网络状态的跨层或跨网传递.各异构网络内部根据跨层传递的应用需求,在域内实施高效的资源调度机制.

3.1 一体化融合网络体系结构纵向分层架构

本文提出的一体化融合网络体系结构充分考虑不同形态网络的异构性,并结合当前互联网的实际运行模式,在互联网体系结构的核心要素即网络层和传输层开展技术创新.在网络层,重点解决传送格式、转发方式和路由控制三方面的问题.在传送格式和转发方式相对稳定的情况下,路由控制需满足应用发展的新需求,实现全网最优.在传输层则重点保障跨域传输中端到端的多目标应用的服务质量.

一体化融合网络体系结构纵向分层架构如图1所示.该体系结构继承了TCP/IP的分层模型,确保与现有互联网技术的互联互通,同时对层内协议功能和层

间接口进行创新设计,以满足业务需求与网络特性的匹配. 面对一体化融合网络中拓扑动态变化、局部区域路由震荡等问题,若采用传统编址方式,则需要提供面向动态空间的分区路由和面向空地震荡的时序路由. 同时,也允许各个异构网络域内进行技术创新. 例如,针对卫星网络高时空动态性的特点,可采用天地统一的新颖编址及寻址方式,增强天地网络的互联互通的

稳定性. 面对一体化融合网络中协议异构的挑战,通过跨异构网络地址分配,允许异构网络边缘设备在地址分配过程中进行端口映射,实现跨异构网络的地址分配. 针对目前大量的跨网络时敏业务传输需求,提出一体化融合网络新型端到端传输机制,通过端到端感知、时敏信息跨层传递设计,实现时敏调度机制、冗余机制等,从而提升时敏业务的用户体验.

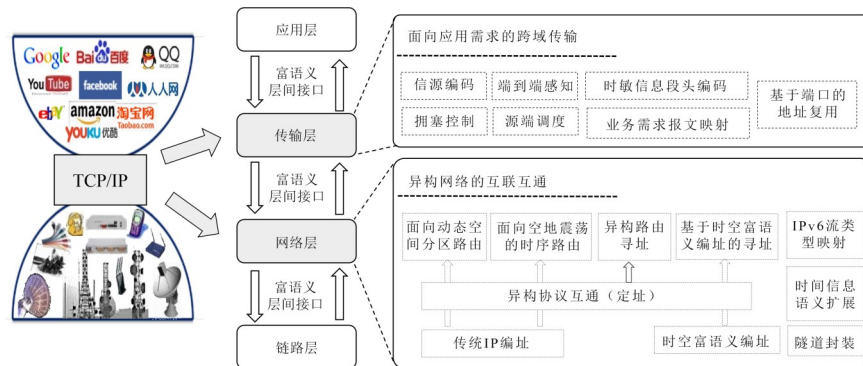


图1 一体化融合网络纵向分层架构

与现有网络互联模型相比,本文提出的纵向分层架构延续了TCP/IP分层模型,保障了现有技术体系的运行. 同时,针对一体化融合网络场景,在互联网体系结构核心网络层和传输层开展创新. 面对互联网体系结构实时性的挑战,通过富语义层间接口的信息传递,实现一体化融合网络中的面向应用需求的跨域传递以及异构网络互联互通功能.

3.2 一体化融合网络横向互联

根据互联网体系结构演进进程,采用分域自治的方式更易实现多种异构网络间的互联互通. 具体而言,本文将各个形态的有限网络划分成各个独立的“域”,例如工业互联网、空间卫星网络、数据中心网络等均视为独立的域. 由上述异构网络构成的一体化融合网络可以看作以域为单位的覆盖网络. 在域内,根据各个异构网络的特点,采用适应本域特性的本地或域内网络协议. 而域间则通过全局网络协议进行互联互通. 域间网络协议负责统一不同网络的异构性,提供一体化融合网络中端到端的可达能力. 这种互联方式支持分域自治和域间协同的演进式体系结构发展思路.

采用分域自治方式进行异构网络互联,可以满足多种网络互联的可扩展性和开放性的要求. 在不改变全局网络协议的前提下,使用统一的协议和地址空间而使下层的网络细节对上透明. 该方法支持未来可能出现的具有新特性的网络形态,并针对不同的异构网络实现特性隔离(例如卫星网络的高动态性可能导致的路由震荡),同时支持域内和域间协议的独立演进. 域边缘节点可根据数据平面和控制平面的功能,为不

同平面功能创建差异化服务.

全局网络协议需要在端系统和域边缘的网络节点(异构网络的边缘节点负责接收并往域内转发来自其他异构网络的数据)上进行部署. 一体化融合网络体系结构横向互联如图2所示,其中工业互联网、空间卫星网络、数据中心网络等边缘节点在功能上近似于运行全局网络协议的虚拟路由器. 根据目标形态网络在整个网络中的功能和位置,将异构网络分为两类:中转网络和末梢网络.

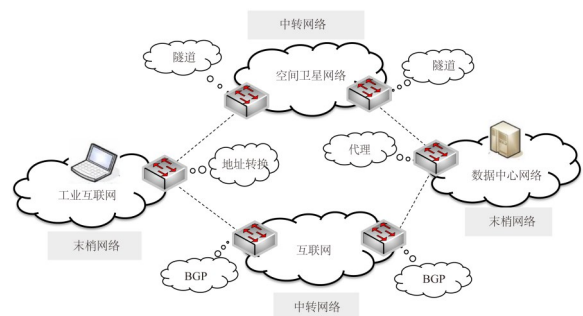


图2 一体化融合网络体系结构横向互联

中转网络和末梢网络在域内执行有限域功能,实行分域自治. 而这两类网络的域边缘节点则执行全球域功能,实现各域之间的互联互通. 域边缘节点根据所连接网络域的类型将提供不同的能力,中转网络的边缘节点负责将其他域内流量进行跨域转发. 其中,互联网作为一种特殊的域,负责与其他所有异构网络的连接.

在一体化融合网络体系结构下,异构网络域间采

用统一的编址方案,同时在异构网络域内实施自治创新技术.不同网络边缘节点能够提供多种服务,如跨域转发、隧道和翻译等功能,以支持不同形态的异构网络之间隔离互通.例如,当工业互联网通过互联网中转访问数据中心网络时,首先将业务性能需求嵌入域间协议的报文头部,接着,在工业互联网的边缘节点提供地址转换,将其转换为一体化融合网络统一域间地址.当流量经过互联网中转时,互联网的边缘节点提供边界网关协议,数据中心网络边缘节点则设置为代理服务器,对跨域流量进行登记与转发.当工业互联网通过空间卫星网络中转访问数据中心网络时,空间卫星网络的边缘节点提供隧道功能,实现数据安全的穿越空间卫星网络到达数据中心网络.

为了支持规模化异构网络间的互联,异构网络间的互联节点应尽量简单,避免复杂状态维护.当新型异构网络接入一体化融合网络时,域边缘节点采用统一编址,提供了的多功能跨域转发机制.通过利用隧道、翻译、代理、地址转换等多种机制,快速实现该新型异构网络与其他网络的互联互通.面对互联网体系结构规模可扩展性的挑战,本文的分域自治、域间协同的横向互联机制,与现有的网络互联模型相比,复杂的网络特性仅在域内起作用,不会跨域传递.因此,在理论上,本文提出的体系结构可以支持具有不同特性的异构网络互联互通,具备良好的可扩展性及易用性.

3.3 横纵协同的富语义数据封装传递

互联网体系结构的分层特性使层与层之间的接口受到广泛关注.当前的研究热点在简化各层功能的同

时致力于提升接口复用效率.但这种分层体系可能导致层间隔离,难以支持层间的协同优化以及跨层信息的传递.面对差异化业务需求和异构网络特性,网络层及传输层协议难以有效扩展.一体化融合网络体系结构采用了富语义的层间接口.富语义层间接口是指在保持体系结构分层特性的前提下,扩展网络体系结构相邻层的层间接口以承载更多语义信息,实现应用需求和网络状态的层间传递.纵向来看,通过层间接口可以在互联网体系结构的不同层之间传递上层业务信息,以满足不同业务需求.横向来看,在异构设备之间利用层间接口实现富语义信息传递,支持网络设备提供差异化服务.例如,在时敏业务的数据传输过程中,应用层将数据传输的时敏需求通过时敏信息段头编码传递给传输层.接着,通过业务需求的报文映射将应用需求映射编码到 IPv6 的流类型中,从而使域内域间的路由转发设备据此进行最优选路.

横纵协同的富语义数据封装传递流程如图 3 所示.横纵向协同实现数据封装,满足富语义信息跨层和跨网元传递.通过在不同层之间扩展富语义接口,传递业务需求信息.同时该信息与现有网络中在路由转发设备数据面的区分服务技术相结合,提供网络差异化服务并保障业务的服务质量.例如,一体化融合网络的端到端传输中,针对时敏信息传递,可以利用 QUIC 协议更改其帧格式或定义新的帧格式来传递应用的时敏信息^[17].在 QUIC 提供的 stream 帧中添加截止时间信息,在 ACK 帧中添加时间戳,并添加 BLOCK_INFO 帧和 BCT 帧,将开始和发送时间传递到接收方.上述时敏信息封装后,利用层间接口实现富语义信息的跨层传递.

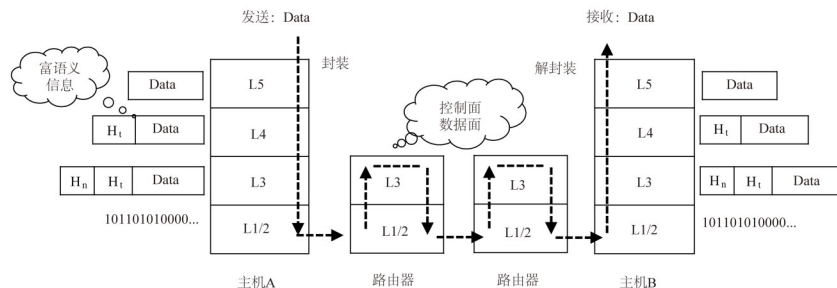


图 3 横纵协同的富语义数据封装传递

富语义的层间接口主要包括以下内容:(1)应用层 L5 与传输层 L4 之间的接口(位于末梢网络的端节点).该接口满足传递数据大小、流 ID 和应用用户体验需求,支持定制带宽、时延、丢包率以及优先级等的富语义接口.传输层需根据从应用层接口获取的信息进行传输控制,并将下层返回的网络信息反馈给应用层,使应用层能够根据网络信息对用户数据的控制和处理.(2)传输层 L4 与网络层 L3 之间的接口(位于中转网络的网

接入端及转发节点).该接口可以主动或被动探测网络状态,如 ECN(Explicit Congestion Notification)或者网络层服务质量等信息,进行 IPv6 流类型映射.网络层根据上层富语义接口信息进行差异化路由转发.(3)网络层 L3 与链路层 L2 之间的接口(位于末梢网络和中转网络的网络接入端).该接口可以实现共享介质访问的局部控制.

传统互联网采用了“尽力而为”的传输机制,然而

该机制仅考虑网络状态,并未充分顾及上层应用的实际业务需求.本文通过富语义层间接口实现跨层传递或者跨域传递业务需求,这使各层或不同域可以采用独立的创新技术提供针对性业务服务质量保障机制,从而尽可能满足各类业务需求.

4 一体化融合网络体系结构核心要素设计

4.1 一体化融合网络的编址和寻址

4.1.1 传统 IP 编址下的一体化融合网络分区路由和时序路由

在复杂的异构融合网络环境中,多维高效的路由体系是实现一体化融合网络互联的关键.空间卫星网络具有拓扑高动态、链路低带宽、传输长延迟的特点.特别是在星间链路建立过程中,受到天线角度和卫星高速运动的影响,容易发生频繁的链路转交.在该网络环境中,需要设计快速收敛、稳定、低开销的路由协议来满足大规模低轨卫星网络.分区路由可以有效地解决上述问题^[18,19].通过划分区域,每个路由由结点仅维护其所处区域的链路状态数据库.这样可以将拓扑动态性的影响范围控制在区域内部,有效降低路由更新的频率、数据库同步的通信开销和路由计算开销,快速响应结点失效和链路拥塞.另外,由于区域间由多条链路相连,区域间连接状态不会因为少量链路的通断而发生变化,因此区域间路由更加稳定.通过将区域间的流量合理地分配到不同的区域间链路上,分区路由在一定程度上实现了负载均衡,缓解了空间卫星网络中因为流量分布不均而可能导致的拥塞问题.

为了解决空地间向地面网络扩散路由震荡的问题,满足一体化融合网络通信对延迟性和可靠性的要求,可以采用适用于空地间高延迟与震荡环境的时序路由机制^[20,21].该机制包括两方面即轻量级路由更新(BGP+)和备份路径快速收敛方法(TDSR),可支持一体化融合网络的快速收敛、备份路径切换与流量调度等.BGP+机制通过打标记来缓存断连前来自不同对等体的路由表,并记录在断连过程中对不同对等体路由更新情况,在重连后,只公告更新的增量信息,实现轻量级路由协议.TDSR则主要针对一体化融合网络频繁的拓扑动荡,提前规划备份路径,采用基于二维路由分段路由机制对高优先级源或业务进行路径切换,通过定义备份路径,提高路由可靠性,以应对空间链路不稳定问题.BGP+和TDSR两种技术相结合,适用于全球域(与全球现有海量设备互联互通),共同提高一体化融合网络的收敛速度与选路效率.

4.1.2 新型 IP 编址及寻址机制

地面网络包含移动互联网、蜂窝网络、数据中心网络等,由于其拓扑结构相对稳定,不会产生频繁变化,

因此其编址和路由技术相对成熟稳定.随着全球互联的推进,空间卫星网络需要与其他异构网络进行互联互通.但是由于卫星与地面、卫星与卫星之间的高速相对运动导致的网络拓扑高度动态变化,以及星地之间链路的频繁切换,使用传统的编址和寻址方式会导致地址和路由不断发生变化,无法保证数据的稳定可靠传送,甚至可能造成路由震荡,极大地影响网络的稳定性和用户体验.因此,空间卫星网络与其他异构的网络互联互通,迫切需要在有限域内进行路由机制创新,推动基于IP的新型编址和寻址技术的发展.

加州大学伯克利分校研究人员提出了一种新型体系结构框架Trotsky^[2],该框架能够抽象出不同网络形态的寻址方式,提出了具有转发功能的3.5层协议,从而实现不同形态的异构网络之间的转发,满足异构网络的互联.支持演进体系结构XIA^[22],采用异构标识对异构网络的描述,实现数据在不同网络之间的传输.为了解决天地一体化高动态特征带来的挑战,可通过空间网络的统一时空基准与定位,在网络地址增加语义,实现编址与寻址与卫星移动相解耦,满足天地互联时IP编址的全网统一,从而解决了异构网络体系结构面临的移动性的难题^[23].为了保证向后兼容性,可以采用以IPv6为域间协同的协议基础,继承其编址方式,提供可变地址体系.在空间卫星网络内,通过对卫星网络拓扑和星间连接关系进行按需递归迭代,利用星下点轨迹将地表划分为层次化的区块,在编址上通过扩展字段将层次化区块编号信息进行编码,增加语义信息.采用该层次化区块编号对IPv6地址进行编址,降低了用户IP地址切换频率,使用户地址分配与拓扑切换无关,实现地表位置与空间卫星路由的统一,支持网络的融合和全网可达^[24].另外,基于富语义编址中位置信息进行地理位置路由,可避免星地拓扑高动态导致的路由重收敛,提升网络可用性^[25].

4.1.3 跨域地址分配

随着各类异构网络的出现及快速发展,多样化的网络设备在不同形态的网络中采用IPv4,IPv6协议或其他协议接入不同域中.这些协议编址方式不同且协议之间不兼容,从而造成异构网络中的设备无法在协议异构的情况下直接建立通信^[26-28].在一体化融合网络中,实现跨越网络B给网络A进行地址分配,在域间能够承载异构网络地址是当前面临的主要难题.针对该问题,本文提出了两种解决方案.一种解决方案是地址分配协议扩展方案,例如在高性能HTTP和反向代理Nginx中使用了该方案“https://nginx.org”.该方案通过扩展异构网络B的地址分配协议,承载异构网络A的地址类型.在规划跨域地址分配资源时,可以将传输层端口视为网络B地址资源的一部分,将用于承载网络

A 的地址资源和端口一起下发. 当设备需要跨越网络 B 给网络 A 分配地址时, 将共享地址和端口一起作为地址资源, 实现网络 B 的地址分配协议的扩展. 另一种解决方案是异构协议承载方案^[29,30]. 该方案将网络 A 的地址分配协议直接运行在网络 B 上, 将网络 A 的报文封装于网络 B 的报文中, 使网络 B 能够承载新的协议, 同时并不感知所运行的网络 A 的协议, 从而实现跨域异构网络的设备在协议异构的情况下直接建立通信.

4.2 面向时敏需求的端到端传输

多目标形态的异构网络中, 业务需求及异构网络特性均呈现多样性, 例如工业互联网及其运行的时敏业务, 数据中心网络及高性能传输业务等. 目前固有的网络传输协议仅对网络状态尽力感知, 对于异构网络特性及高度个性化的业务需求无法提供有效的性能保障, 难以适配目标形态各异的异构网络. 为了解决应用时敏需求与尽力而为传输协议之间的矛盾, 根据上层业务差异化的服务质量需求, 本文结合富语义层间接口, 采用跨层协同技术^[31-33]实现多目标业务的跨域实时性传输需求. 在多目标形态的异构网络中, 时延保障是工业互联网、车联网、物联网以及音视频业务中的典型需求. 因此, 本节以时延敏感需求为例, 重点阐述面向时延敏感需求的跨域传输机制.

一体化融合网络中的新型时延敏感的传送控制协议^[17], 利用时延敏感调度和自适应的冗余模块, 确保应用的多个数据块在截止时间前到达接收方. 时延敏感的传送控制协议架构如图 4 所示, 其中实心箭头表示数据流向, 虚线箭头表示控制信息流向. 在发送端, 每个数据块及其元数据首先存储在单独的发送队列中. 时延敏感块调度器确定数据块的发送顺序, 丢弃已经过期的数据块. 发送端调度器负责操纵发送端队列以减少那些重要块的排队延迟, 其目标是在截止时间之前交付尽可能多的数据块, 必要时丢弃优先级较低的块数据. 调度器判定丢失的数据包会被放入相应的发送队列的最前端, 重新调度的时候会被优先发送. 拥塞控制模块监控网络状况, 向调度器和自适应冗余编码模块提供带宽、RTT 和丢失率的估计, 避免发出的块数据未能满足应用时延需求而浪费带宽. 在接收端, 传输层将接收数据并重新组装每个块. 接收端通过富语义层间接口业务接收业务需求, 同时设定块开始时间和块结束时间. 本文选择在传输每个块之前将块开始时间发送给接收端, 并将数据包接收时间与 ACK 一起发送回发送器. 因此, 接收端和发送端都可以知道数据块完成时间. 当网络资源无法满足应用数据的时延需求时, 时延敏感块调度器主动丢弃过期数据或不重要的数据块, 从而保障高优先级数据在截止时间之前到达接收端. 当时延不足以进行重传时, 启用自适应冗余编

码机制, 避免重传造成数据无法满足应用时延需求.

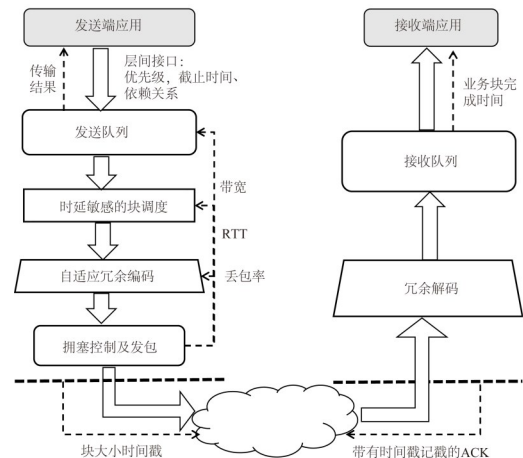


图 4 时延敏感的传送控制协议架构

5 一体化融合网络体系结构的简化应用实例

本文针对一体化融合网络的体系结构进行探讨, 由于篇幅限制, 无法对所有技术进行实例说明. 本节仅从数据面出发, 对跨域互联和端到端传输两方面进行一体化融合网络应用实例开展介绍. 以时延敏感需求为例, 重点介绍时延敏感传输控制代理、时延敏感传输控制隧道的实现, 展示了一体化融合网络跨域互联的横向互联互通. 同时, 对时延敏感业务的跨域传输进行了端系统的实现以及端网协同优化的实现, 展示了利用富语义的层间接口开展的技术创新对业务需求信息的传递及跨域传输的有效性.

5.1 跨域互联的实例

5.1.1 时延敏感传输控制代理的实现

为了实现跨异构网络的互联互通, 例如数据从工业互联网经由互联网传输到数据中心网络中, 同时避免在服务端大量修改上层业务逻辑, 可以通过 HTTP 与 TCP 代理的方式为上层应用提供时延敏感传输控制的接入服务. 以时延敏感传输协议 DTP^[17]实现为例, 上层应用通过设定代理服务器或使用某些软件, 使网络请求可以经过安装有 DTP 代理程序的服务器进行转发. 这使应用使用 TCP, QUIC^[34,35]与 DTP 均可以与服务器正常连接并请求服务, 减少了应用接入 DTP 的难度, 同时不妨碍当前业务的正常运行. 以 HTTP 请求为例, DTP 代理的工作原理如图 5 所示. 该代理主要执行两个功能: 流量识别和数据转发. 在网络请求过程中, 客户端直接向服务器端发送请求, 服务器端向客户端返回数据. 使用 DTP 代理后, 客户端程序在发送数据请求时, 通过一个流量识别程序, 根据预先确定的规则将特定的流量转发到代理服务器上, 传输协议可以使用

TCP. 代理服务器上的代理程序可以监听 TCP 连接并将其转换成 DTP 连接, 此时 TCP 连接中断. 然后将 DTP 连接转发从 TCP 连接中接收到的数据并发向服务器端. 服务器端会通过流量识别程序, 将返回的数据通过接近服务器端的 DTP 代理传输到客户端.

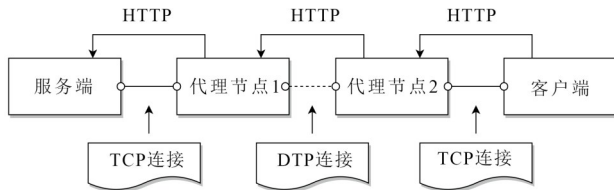


图5 DTP代理工作原理

DTP代理的实现主要由两部分组成: 流量筛选模块和代理模块. 流量筛选模块运行在用户终端上, 由软件系统 Nginx, “https://nginx.org”实现. 通过对软件进行配置, 筛选出需要转发到代理服务器的流量, 可以按照特定业务筛选或特定网段筛选. 利用流量筛选程序, 需要被代理转发的数据流指向代理服务器, 并与代理服务器上的代理程序建立连接. 代理模块根据输入输出的协议分为两种: 将 TCP 连接转换成 DTP 连接和将 DTP 连接转换成 TCP 连接. 两种代理程序均部署在代理服务器上, 监听可能到来的 DTP 与 TCP 连接.

5.1.2 时延敏感传输控制隧道的实现

时延敏感传输控制隧道适用于端侧设备无法修改的场景, 例如从工业互联网跨越卫星网络传输数据至数据中心网络, 其中工业互联网的端侧设备无法修改承载新型传输协议. 本文实现的时延敏感传输控制隧道机制, 能够提供无感知接入的服务与服务质量保障. 时延敏感隧道(DTP隧道)接入机制如图6所示, 需要在端侧接入网的网关上安装 DTP 隧道模块才能发挥作用. 首先, 在用户侧接入 DTP 网关, 替代原先的网关或作为额外的中间设备接入. DTP 隧道模块在两个设备之间建立 DTP 连接, 并监听设备上的指定接口. 当接口中有网络报文到达时, DTP 隧道会将接收到的全部网络报文通过 DTP 连接转发到另一端的中间设备上, 实现报文在两个接入设备两侧的网络上的转发, 但原有协议连接并不中断. 每台设备上均搭载 DTP 隧道模块, DTP 机制会在两个设备之间建立 DTP 隧道, 将两个设备接收到的网络报文全部转发到另一端所在网络中. DTP 隧道可以利用 DTP 的部分传输优化功能, 例如自适应冗余编码、业务流量感知的调度等策略, 以降低在中间网络传输数据时的平均时延和丢包率, 为两端接入的子网保障其服务质量.

5.2 一体化融合网络的端到端传输实例

本节以工业互联网中的时延敏感需求为例, 介绍

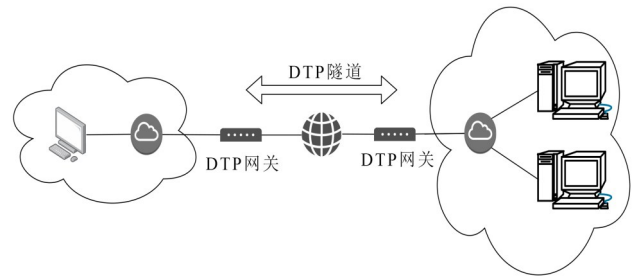


图6 DTP隧道接入

应用需求感知的一体化融合网络端网协同优化方案. 在端侧, 通过感知应用需求调整数据发送策略, 以适应不同的网络场景和需求. 同时, 利用富语义的层间接口将应用需求传递到网络侧. 通过端网协同优化, 在不同的异构资源下提升不同业务需求的服务质量.

在端系统传输机制实现方面, 本文基于 QUIC^[34]协议实现了时敏传送控制协议 DTP, 并将该协议发布于开源仓库“https://github.com/STAR-Tsinghua/DTP”中. DTP 将待传输数据以数据块的形式进行分组, 根据应用需求, 对每个数据块设定对应的截止时间与优先级. 在上述参数的指导下, DTP 在端侧采用了端调度和源端丢弃策略调整数据的发送, 以降低整体数据发送的排队时间, 确保尽可能多的高优先级数据在截止时间前到达接收端. 此外, 本文还通过自适应冗余编码策略, 减少数据重传, 从而降低数据传输的平均时延.

在该应用实例中, 富语义层间接口主要包含两部分: 时敏信息段头编码及映射, 以及端网协同接口. 时敏信息段头编码指从 DTP 协议内部获取上层应用对数据块的需求, 例如截止时间和优先级等信息, 并将这些参数进行段头编码. 接着, 这些编码映射成最终转发设备的接口参数, 并通过端网协同接口传递出去. 时敏信息段头编码及映射接口主要将时延需求和优先级需求从高到低分成若干个等级. 根据这些等级设定相应的网络中间设备的转发需求. 时延需求与等级、优先级映射关系如表1所示.

端网协同接口主要使用 IP 协议中的协议头部预留的区分服务字段实现. 该接口通过修改字段的值, 将应

表1 优先级需求映射关系

时延需求	等级	优先级需求
≤100 ms	5	0
100 ms~200 ms	4	1
200 ms~500 ms	3	2
500 ms~1 s	2	3
1 s~1 min	1	4
>1 min	0	≥5

用需求信息传递到网络侧. 在 IPv4 中, 本接口使用 TOS 字段^[36]; 而在 IPv6 中, 则使用 Traffic Class 字段^[37]. 本文仅采用字段的最高三位进行优先级的划分, 因此不会与现行的区分服务标准发生冲突. 在数据发送的过程中, 系统会根据需求映射函数中得到的结果, 设定对应字段的值, 从而将需求向下传递给网络侧, 请求网络侧根据要求提供对应的服务.

网络侧的优化由网络设备完成差异化转发功能, 根据区分服务字段的数值为不同需求的数据提供不同优先级队列, 使端系统能够向网络侧提供需求参数, 并根据参数提供对应的传输服务. 本文使用 P4 程序“<https://github.com/p4lang/behavioral-model>”模拟网络转发设备, 实现了根据 IP 报文头中区分服务字段实现不同的优先级队列调度进行时延敏感数据传输, 提升业务的用户体验.

本文通过实验模拟了两种不同优先级和截止时间需求的业务传输过程, 其中测试数据模拟了同时传输文件和音频数据的场景. 实验拓扑如图 7 所示, 发送端以 1 ms 的间隔发送大小为 30 KB 的优先级为 1 (高优先级, 音频数据) 和优先级为 2 (低优先级, 文件数据) 的数据块. 发送数据的最大吞吐为 240 Mbps, 网络链路采用网络损伤仪模拟跨洋链路场景.

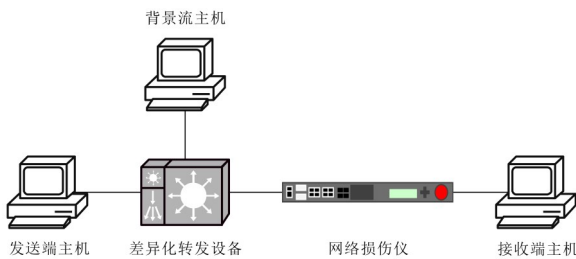
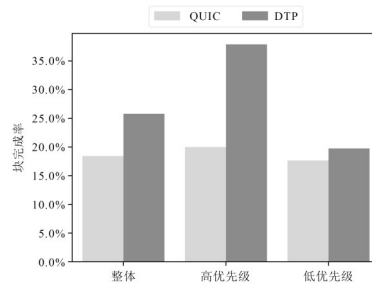


图7 实验拓扑

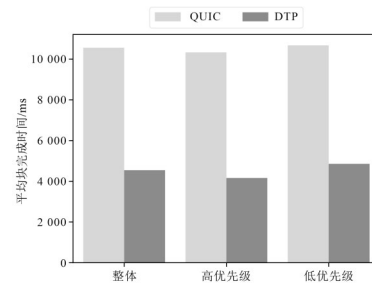
5.2.1 端侧优化效果

本实验仅通过端侧优化验证 DTP 对差异化需求数据传输的优化效果. 本文以传输块完成率和完成时间作为指标, 针对 DTP 与 QUIC 协议的优化的效果进行对比, 实验结果如图 8 所示. 与 QUIC 协议相比, DTP 的数据块平均完成时间明显减少, 同时音频类的高优先级的业务数据完成率更高. 这说明使用端侧的协议优化能够明显降低传输时延, 并对音频业务的高优先级的数据提供更好的服务质量.

针对网络性能的吞吐率、有效吞吐、时延等指标, 本文对 DTP 协议与 QUIC 协议的优化效果进行了对比, 实验结果如表 2 所示. 从统计数据可以看出, DTP 协议虽然整体上吞吐率略有下降, 但有效吞吐却提高了 3



(a) 端侧传输优化对块完成率的影响



(b) 端侧传输优化对块完成时间的影响

图8 仅启用端侧传输优化

倍, 数据传输的平均块完成时间显著降低. 相较于 QUIC 协议, DTP 协议的高优先级数据块的平均完成时间相对于低优先级数据块下降程度更加明显.

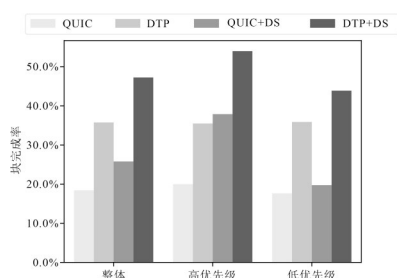
表2 端侧传输协议整体性能对比

指标	QUIC	DTP
吞吐率/Mbps	28.79	24.06
有效吞吐率/Mbps	5.31	16.70
平均块完成时间/ms	10 562	4 545
高优先级块平均完成时间/ms	10 333	4 163
低优先级块平均完成时间/ms	10 676	4 857
块截止时间/ms	5 000	5 000

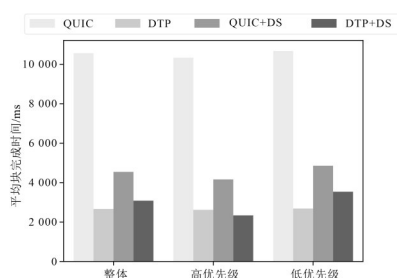
5.2.2 端网协同优化

接下来, 介绍端网协同优化技术验证数据传输的效果, 实验结果如图 9 所示. 与 QUIC 协议仅优化端侧相比, 采用端网协同优化, 数据的按时到达率提升 20%, 同时降低了块完成时间. 通过对比高优先级业务数据与低优先级业务数据的完成率和时延, 端网协同优化的方法能够明显提高高优先级数据的按时完成率与块完成时间. 总体而言, 采用端网协同优化方案相比单一的优化方案, 在吞吐率、有效吞吐、按时到达率及平均完成时间等指标下 (如表 3 所示), 都产生了“1+1>

2”的效果.



(a) 端网协同优化对块完成率的影响



(b) 端网协同传输优化对块完成时间的影响

图9 端网协同传输优化效果

表3 端网协同传输方案性能对比

指标	无优化	端侧优化	网络侧优化	端网协同优化
吞吐量/Mbps	28.79	24.06	41.16	45.27
有效吞吐/Mbps	5.31	16.70	40.60	44.89
高优先级数据按时到达率/%	20	38	36	54
低优先级数据按时到达率/%	18	20	36	44
高优先级块平均完成时间/ms	10 676	4 163	2 620	2 338
低优先级块平均完成时间/ms	10 333	4 857	2 685	3 538

6 结论和展望

本文从一体化融合网络体系结构面临的可扩展性和实时性挑战出发,对异构融合网络的体系结构及关键技术展开前瞻性研究,形成了较为成熟的研究思路.本文提出了面向多目标的一体化融合网络体系结构框架,包括多目标形态网络的互联互通机制、面向业务需求的富语义层间接口以及跨域端到端时敏传送方案.在控制面,通过域间执行全球域的路由机制,保持异构网络的互通,避免单域频繁变化引起震荡;同时,在域内采用有限域自治方式保证了编址路由的灵活性及可扩展性,较好地解决了复杂网络环境和异构的用户需求.在数据面,针对不同业务需求特性,本文提出采用跨域数据面创新技术保障业务数据的服务质量.此外,本文充分利用了异构网络的边缘节点的特性,根据网

络的属性不同采用不同转发功能,从而形成较为完整的纵横隔离互通体系.

参考文献

- [1] Clark David, Sollins Karen R, Wroclawski John, et al. New Arch: Future Generation Internet Architecture[R/OL]. (2003-12-31) [2022-09-26]. <https://www.isi.edu/newarch/iDOCS/final.finalreport.pdf>.
- [2] MCCAULEY J, HARCHOL Y, PANDA A, et al. Enabling a permanent revolution in Internet architecture[C]//Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM, 2019: 1-14.
- [3] 郑秀丽, 蒋胜, 王闯. NewIP: 开拓未来数据网络的新连接和新能力[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 2-11.
ZHENG X L, JIANG S, WANG C. NewIP: New connectivity and capabilities of upgrading future data network[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 2-11. (in Chinese)
- [4] ANDERSON T, BIRMAN K, BROBERG R, et al. The NEBULA Future Internet Architecture[M]//The Future Internet. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 16-26.
- [5] HAN D S, ANAND A, DOGAR F, et al. XIA: Efficient support for evolvable internetworking[C]//Proceedings of the 9th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. New York: ACM, 2012: 23.
- [6] ROUSKAS G N, BALDINE I, CALVERT K, et al. ChoiceNet: Network innovation through choice[C]//2013 17th International Conference on Optical Networking Design and Modeling (ONDM). Piscataway: IEEE, 2013: 1-6.
- [7] ZHANG L X, ESTRIN D, BURKE J, et al. Named data networking (NDN) project[EB/OL]. (2010-10-31) [2022-09-26]. <https://named-data.net/techreport/TR001ndn-proj.pdf>.
- [8] DANNEWITZ C, KUTSCHER D, OHLMAN B, et al. Network of information (NetInf) - An information-centric networking architecture[J]. Computer Communications, 2013, 36(7): 721-735.
- [9] SESKAR I, NAGARAJA K, NELSON S, et al. Mobility-first future Internet architecture project[C]//Proceedings of the 7th Asian Internet Engineering Conference. New York: ACM, 2011: 1-3.
- [10] ANDERSEN D G, BALAKRISHNAN H, FEAMSTER N, et al. Accountable Internet protocol (AIP)[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 Conference on Data Communication. New York: ACM, 2008: 339-350.

- [11] ZHANG X, HSIAO H C, HASKER G, et al. SCION: scalability, control, and isolation on next-generation networks[C]//2011 IEEE Symposium on Security and Privacy. Piscataway: IEEE, 2011: 212-227.
- [12] 吴建平, 林嵩, 徐恪, 等. 可演进的新一代互联网体系结构研究进展[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1094-1108.
WU J P, LIN S, XU K, et al. Advances in evolvable new generation Internet architecture[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6): 1094-1108. (in Chinese)
- [13] CUI Y, WU P, XU M W, et al. 4over6: Network layer virtualization for IPv4-IPv6 coexistence[J]. IEEE Network, 2012, 26(5): 44-48.
- [14] CUI Y, DONG J, WU P, et al. Tunnel-based IPv6 transition[J]. IEEE Internet Computing, 2013, 17(2): 62-68.
- [15] Aijun Wang, Joel M. Halper datatracker IETF, Source address validation in intra-domain and inter-domain networks (SAVNET) [EB/OL]. (2022-02-10) [2022-09-26]. <https://datatracker.ietf.org/wg/savnet/documents/>.
- [16] CLARK D. The design philosophy of the DARPA Internet protocols[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1988, 18(4): 106-114.
- [17] ZHANG J, SHI H, CUI Y, et al. To punctuality and beyond: Meeting application deadlines with DTP[C]//2022 IEEE 30th International Conference on Network Protocols (ICNP). Piscataway: IEEE, 2022: 1-11.
- [18] XIAO A L, HUANG X F, WU S, et al. Traffic-aware rate adaptation for improving time-varying QoE factors in mobile video streaming[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(4): 2392-2405.
- [19] XIAO A L, HUANG X F, WU S, et al. User preference aware resource management for wireless communication networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 78-85.
- [20] ZHANG X, YANG Y, XU M W. SARACA: demand-driven satellite network resource allocation for civil aviation[C]//2021 International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Piscataway: IEEE, 2021: 1-9.
- [21] ZHANG X, YANG Y, XU M W, et al. ASER: Scalable distributed routing protocol for LEO satellite networks [C]//2021 IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN). Piscataway: IEEE, 2021: 65-72.
- [22] NAYLOR D, MUKERJEE M K, AGYAPONG P, et al. XIA: Architecting a more trustworthy and evolvable Internet[C]//Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM). New York: ACM, 2014: 50-57.
- [23] LI Y J, LI H W, LIU L X, et al. Internet in space for terrestrial users via cyber-physical convergence[C]//Proceedings of the Twentieth ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM, 2021: 163-170.
- [24] LIU L X, LI H W, LI Y J, et al. Geographic low-earth-orbit networking without QoS bottlenecks from infrastructure mobility[C]//2022 IEEE/ACM 30th International Symposium on Quality of Service (IWQoS). Piscataway: IEEE, 2022: 1-10.
- [25] 李贺武, 刘李鑫, 刘君, 等. 基于位置的天地一体化网络路由寻址机制研究[J]. 通信学报, 2020, 41(8): 120-129.
LI H W, LIU L X, LIU J, et al. Location based routing addressing mechanism of integrated satellite and terrestrial network[J]. Journal on Communications, 2020, 41(8): 120-129.
- [26] SUN Q, CUI Y. DHCPv4 over DHCPv6 Transport: RFC 7341[S/OL]. (2014-08) [2022-09-26]. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7341>.
- [27] CUI Y, SUN Q, FARRER I, et al. Dynamic allocation of Shared IPv4 address: RFC 7618[S/OL]. (2015-08) [2022-09-26]. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7618>.
- [28] CUI Y, SUN Q, LEMON T. Handling Unknown DHCPv6 Messages: RFC 7283[S/OL]. (2014-07) [2022-09-26]. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7283>.
- [29] CUI Y, WANG W D, SUN Q, et al. IPv4 address sharing and allocation for IPv6 transition[J]. IEEE Internet Computing, 2015, 19(5): 66-71.
- [30] CUI Y, SUN Q, XU K, et al. Configuring IPv4 over IPv6 networks: Transitioning with DHCP[J]. IEEE Internet Computing, 2014, 18(3): 84-88.
- [31] LAI Z Q, HU Y C, CUI Y, et al. Furion: engineering high-quality immersive virtual reality on today's mobile devices[C]//IEEE Transactions on Mobile Computing. Piscataway: IEEE, 2019: 1586-1602.
- [32] FOULADI S, EMMONS J, ORBAY E, et al. Salsify: Low-latency network video through tighter integration between a video codec and a transport protocol[C]//15th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI' 18). Berkeley: USENIX, 2018: 267-282.
- [33] ZHANG L, CUI Y, WANG M W, et al. DeepCC: Bridging the gap between congestion control and applications via multiobjective optimization[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2022, 30(5): 2274-2288.

- [34] IYENGAR J, THOMSON M. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport: RFC 9000[S/OL]. (2021-05) [2022-09-26]. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9000>.
- [35] 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.
- [36] R Braden. Requirements for Internet Hosts - Communication Layers[S/OL]. (1989-10) [2022-09-26]. <https://data-tracker.ietf.org/doc/rfc1122/>.
- [37] AMANTE S, CARPENTER B, JIANG S, Rajahalme J. IPv6 Flow Label Specification: RFC 6437[S/OL]. (2011-11) [2022-09-26]. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6437>.

作者简介



崔 勇 男, 1976 年 8 月生于新疆乌鲁木齐. 清华大学长聘教授, 清华大学网络技术研究所所长, 教育部长江学者特聘教授, 曾获首届青年长江学者. 获国家优秀青年科学基金和教育部分新世纪人才等项目持续支持. 获国家科技进步二等奖 1 次、国家技术发明二等奖 1 次, 多次获得国家信息产业重大技术发明. 在 Mobicom, NSDI, ToN 等互联网领域顶级会议和期刊上发表了

大量学术论文, 担任中国互联网协会学术工作委员会秘书长, 完成了 RFC 国际标准 10 余项, 并曾长期担任国际标准工作组主席. 主要研究方向为网络体系结构、数据驱动网络、低时延网络及应用等. 中国电子学会会员编号: E190005916S.

E-mail: cuiyong@tsinghua.edu.cn



张 蕾 女, 1979 年 9 月生于山东泰安. 博士, 毕业于清华大学计算机系. 现为中关村实验室副研究员. 主要研究方向为网络体系结构、网络安全.

E-mail: zhanglei@zgclab.edu.cn



马 川 男, 1999 年 2 月生于北京. 现为清华大学计算机系硕士研究生. 主要研究方向为网络传输优化.

E-mail: machuan0228@sina.com