



专题：数据网络技术与应用

用于万网互联的网络层协议体系

李广鹏, 蒋胜, 王闯

(华为技术有限公司, 北京 100095)

摘要: 通过对现有网络协议技术演进历史的分析, 试图提出适用于未来数据网络统一协议体系的创新指导原则。通过将网络功能本质划分到网元和网元之间的联系, 提出了数据面、控制面、用户面、管理控制类与内生网络安全等协议创新的 5 个领域, 并分析了该协议体系在众多异构场景网络中的体现与应用。最后, 通过分析确定性网络转发技术中的协议创新过程验证了协议体系创新指导原则的合理性。

关键词: 网络协议; 万网互联; 协议体系

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019224

Network layer protocol architecture for many-nets internetworking

LI Guangpeng, JIANG Sheng, WANG Chuang

Huawei Technologies Co., Ltd., Beijing 100095, China

Abstract: Based on the analysis of the evolution history of existing network protocol technologies, the innovative guiding principles applicable to the future data network unified protocol system was proposed. By dividing the nature of network functions into the connections between network elements, five areas of protocol innovation such as data plane, control plane, user plane, management control and intrinsic network security were proposed. The implementation and application of the protocol system in many heterogeneous scenario were analyzed. Finally, the rationality of the protocol innovation guidelines was verified by analyzing the protocol innovation process in deterministic network forwarding technology and intrinsic security network technology.

Key words: network protocol, many-nets internetworking, protocol architecture

1 引言

现代数据通信网络建立在分组交换技术的基础上, 始于 20 世纪 70 年代。早期网络主要用于

连接计算机主机, 通过连通文件系统来传输文件。然而, 随着通信需求的爆发和网络通信技术的发展, 电子邮件、万维网、语音通话、视频通信、电子商务等各类应用陆续出现, 并在短时间内获

收稿日期: 2019-08-25; 修回日期: 2019-10-08

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No. 2018YFB1800100)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB1800100)



得了前所未有的发展。在此过程中，TCP/IP 协议族作为互联网协议的核心被快速完善并嵌入各种网络应用中，成为现代数据通信协议的“瘦腰”。

随着互联网红利的进一步释放，越来越多新型的应用需求不断出现，对数据网络提出了新的挑战。半个世纪以来，连接数和数据流量的激增导致的接入和带宽需求很大程度上掩盖了通信实体对网络其他方面的需求^[1]。本质上，IP 协议依然仅仅用于连通主机，网络设备无法根据通信实体需求精细化地调整网络以获取更好的能力。

另一方面，网络正在向万物感知、万物互联、万物智能的方向快速延伸，卫星网络、车联网、低功耗个人局域网、低功耗广域网、工业互联网等新兴的网络形式越来越受到人们的重视。原生的 TCP/IP 协议不经修改无法适用于这些网络。近来，业界对这些场景进行了定向的协议优化和修改。如参考文献[2]研究了异构空地一体化网络中的架构和挑战，并提出了协议设计建议。参考文献[3]研究了面向车联网场景的协议设计问题。IETF 6LoWPAN^[4]工作组研究并发布了适用于低功耗个人局域网 IPv6 协议压缩方法。IETF 的 LPWAN^[5]工作组则对低功耗广域网中 IPv6 的应用进行了优化研究。但这些方案均存在彼此之间、与既有 IP 协议之间不兼容的问题。

为了进一步承载不断丰富的海量网络应用以及兼容多种底层的异构物理网络。本文旨在提出一种新的综合互联网协议体系框架。通过面向服务的多样化寻址能力、多语义路由能力承载丰富的上层应用。同时通过可变长的编址和路由能力完成多种异构网络的兼容互联。定义灵活的可扩展网络功能接口，支持多种网络功能的定义和内生集成，形成功能丰富的网络协议“新腰”体系。同时，需要定义明确的内生安全能力的协作机制，以支持未来网络层核心协议的强安全能力。

数据通信协议的发展没有明显的代际标识，

然而从各阶段技术的主要特征来看网络技术先后经历了模拟信号技术、同步时分复用技术、面向连接的统计时分复用技术以及目前面向无连接的统计时分复用技术。实践证明，面向无连接的 IP 技术构成了网络 4.0 时代的标准化技术。面向未来新兴的网络需求，网络必然向下一代网络技术演进，形成支撑未来特定时期众多网络需求的网络 5.0 协议体系。

2 网络 5.0 协议体系框架

在很长一段时期，网络层协议运行于网元之间。一般网元都会包括数据面和控制面两个部分，网络协议用于协调数据面与数据面、控制面与数据面之间的动作和策略，以完成报文的有效转发。软件定义网络的发展^[6]将控制面功能集中到控制器来完成，控制面与数据面之间的协议外化为网络协议，极大改变了网络架构。

从既往的协议发展历程来看，新协议的产生主要分为两种形式：一是新的网络功能要求既有网络元素之间交互新的信息、执行新的流程；二是新的网络元素的引入导致网络架构变化，需要定义新的交互信息和流程。由此可见，确立网络架构中元素的集合以及它们之间可能的联系，是指导网络协议演进的有效依据。本文将据此提出潜在的网络元素集合及其潜在的关联关系，以指导网络 5.0 协议体系的顶层设计。

网络 5.0 协议体系将涵盖网元数据面、网元控制面、控制器、AI/ML 引擎和通信实体在内的多种元素，如图 1 所示。这些元素之间都将根据网络功能需要进行信息的交互以及动作的协同，从而产生定义协议的需求。在网络安全方面，每一种元素都通过内生安全协议接口与内生安全基础设施进行交互，以完成验证、授权、加密等内生网络安全功能。

2.1 数据面协议

数据面协议运行在不同网元的数据面之间，

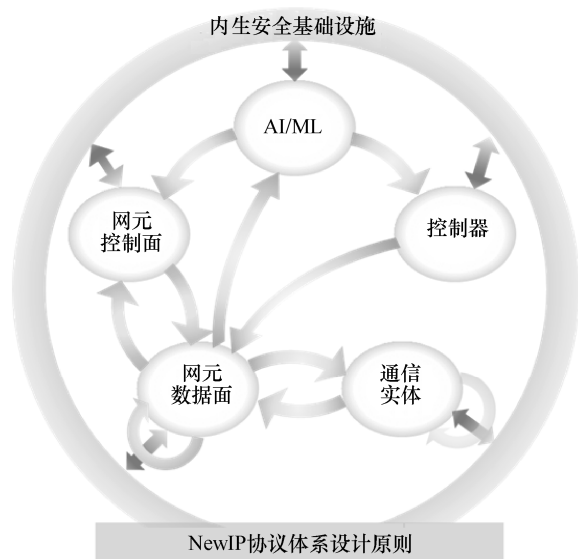


图1 网络 5.0 协议体系设计原则

是负责传输数据的主要协议。早期该类协议的代表是 IPv4^[7]，后续因为地址空间问题和扩展性问题，IPv6^[8]被发明来取代 IPv4。除了 IPv4 和 IPv6 完成网络的基本可达性之外，随着网络业务的丰富和流量的增长，流量工程的需求出现在各种网络中。随之，一系列数据面的流量工程相关的协议被发明和使用，如 MPLS^[9]、EVPN^[10]、SR^[11]等。近来，随着网络虚拟化、软件可定义的架构变革，越来越多的网络功能被开发并体现在数据面协议中。像 NvGRE^[12]、VxLAN^[13]、GTP^[14]等隧道协议解决了虚拟化组

网的问题。BIER 则解决了底层支持多播应用的问题。LISP^[15]和 NSH^[16]则是面向服务化的网络进行的新一步探索。然而，数据通信的需求在加速发展，网络需要承载的业务将更加复杂，除了要增强现有网络能力外，同时需要提供新的能力，如图 2 所示。

面向未来万物互联的智能社会，数据网络将延伸到家庭生活、城市管理、工业制造、交通管理、农业生产、医疗、商业等众多领域。数据面协议除了需要提供超大带宽的能力外，还需要感知丰富的业务类型，理解千差万别的用户需求，对流量进行精细化管理和承载。在时延、抖动方面，数据面需要提供额外的支持，以提供确定性流量的 QoS 保障。对多视点的高清全息通信流量，网络需要智能地感知流量对最终用户体验的不同程度的影响，配合实时的网络拥塞状态进行大通量的传输保障。

从另一维度看，未来网络终端、网络设备的形态将更加多样化。受限于设备的体积、功耗、处理器及存储能力，适用于这些设备的网络制式将非常不同。作为最关键、最大的传输单元参数，不同的参数要求数据面协议能够灵活地进行适配以达到适用性要求或提高转发效率和协议效率。

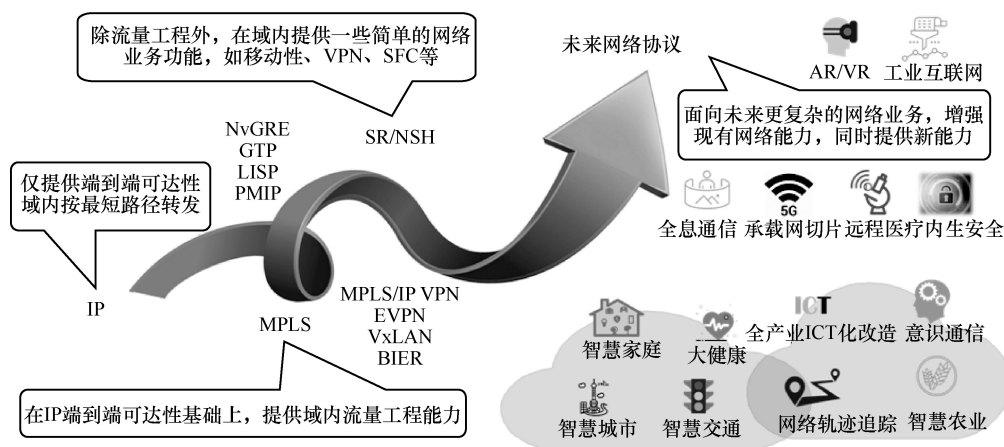


图2 网络协议发展历程与趋势



2.2 控制面协议

路由协议是最典型的控制面协议，主要用来支持 IP 协议的可达性。随着流量工程技术中数据面协议的逐渐丰富，相应的资源预留的控制面协议也被发明出来。分析这些协议的功能不难发现，数据面协议主要的作用是更加有效地传输用户数据，要求协议设计简洁有效。这样网络设备可以方便地对报文进行高速处理，以提高网络转发能力。因此数据面携带的头部信息往往仅包含具有局部意义的上下文信息，用于辅助进行报文处理。控制面协议更加关注于网络级功能的实现，通过在网元之间交互必要的信息，运行网络级的资源分配算法或者路由算法，产生可用于指导数据面转发流程的上下文信息。

在传统的控制面与数据面耦合的设备组成的网络中，控制面和数据面的协议并不是很好区分。SDN 将控制面能力集中化以后，许多控制面协议内化为控制器内部的算法和流程，很难确定控制面协议的范畴。在本协议体系中，无论协议内核运行于什么设备，或者报文封装采取什么格式，只要协议传递的信息是用来指导更好完成用户数据报文转发的，都可以被认为是控制面协议。

需要指出的是，一直以来关于信令的传输都有带内和带外两种方式。尽量将一些控制面协议的信息通过数据面报文携带似乎越来越受到欢迎，像 SR/SRH^[17]、带内 OAM 等。但需要明确，控制面协议需要交互的信息与协议本身并不是完全相等的。控制面协议的内核应该隐藏在信息交互过程背后指导网络运行的算法逻辑当中。

因此本文提出的网络 5.0 协议体系主张将控制面的协议逻辑和交互信息分开看待，携带交互信息的方式和途径不是判定协议性质的根本依据。

2.3 用户面协议

通信实体的本体是早于网络出现的，但其概念随着网络的诞生而成立。长久以来，数据网络的通信实体仅仅指计算机、手机等运行了网络协议栈的主机。这些主机与网络之间的交互界面是网络协议栈的 Socket，也叫网络套接字。产生于 20 世纪 70 年代的网络套接字在几十年网络快速发展的过程中，基本没有大的变化。一方面，这种简洁性保证了数据网络蓬勃的发展，但另一方面阻碍了用户和网络的充分交互，从而降低了整个网络系统的效率。

在网络 5.0 协议体系中，将完整地考虑通信实体作为最重要通信元素的情况，定义标准化的用户面协议族。该类协议旨在为用户提供可理解的网络能力描述以及为网络提供准确的用户通信需求描述。除了传统主机外，未来网络需要连接更多的通信实体，如服务、内容、资源、网络地址、人等。这些通信实体的规模、流量特征、服务等级协议要求均有不同，用户面协议用于将这些信息通告给网络设备请求相应的网络资源。反向地，网络还可以通过用户面协议呈报网络状态，用以协助通信实体更好地调整所发出的流量。

当前通信实体与网络设备间尚未形成有效的沟通协议，仅有极少量的信息传递的动作。后续随着网络业务的深入发展，一定会产生通信实体与网络之间更加深度的交互和协作，届时将产生大量的重要用户面协议。

2.4 管理控制类协议

SDN 的成熟发展将管理控制类的流程外化为控制器与转发器之间的网络协议。随着 AI/ML 技术的成熟与应用的普及，集中式的网络编排设备和控制器将需要一种标准化的方式和网元数据面进行有效交互，以实现对网络转发行为的影响。

从架构上看，网络的智能管控可以是集中式也可以是分布式的，因此，其可以直接或者间接地发送管理策略、配置信息给网元数据面。反之，

其进行机器学习和人工智能计算的输入信息，可以直接来自于网元，或者来自于网络控制器。可以看到，在未来网络中将必然支持对不同通信主体的通信策略管理。

2.5 内生网络安全协议

数据网络安全领域的技术方案往往外挂于基础的数据面通信协议之外，通过单根信任的基础设施提供可信、可验证、可审计、可用性等网络安全能力。在基础的数据通信协议与网络安全协议之间存在明显的分离界面，随着越来越多的关键数据通过网络进行信息传递，基于数据通信内生机制的网络安全方案将成为必然。通过在基础组网架构模式中内嵌网络安全模块，在报文基础头部信息中携带网络安全元素来实现网络通信的真实性、可审计性与隐私性融合、机密性与完整性保证、可用性保证的能力，如图3所示。

3 网络5.0协议框架适用的典型数据网络

长久以来，众多的网络协议被发明并广泛应用于现有网络的各个网络层面之中。然而这些协议大多是自下而上的补丁式设计，仅仅针对特定的场景和问题提供有限作用域的方案。不同的网络域一旦需要互联互通，将产生大量的适配工作以及网络协议的变种，在很大程度上这些过程又阻碍了数据网络的融合贯通。网络5.0协议框架旨在提供一套综合视角的网络协议设计及评价方法，用于牵引众多网络协议向融合统一的协议框架发展，为万网互联、万物互通破除技术体系上的障碍。

针对当前6种典型的网络形态分析了对主要网络协议的关键性需求，并锁定了这些协议在本领域高效运行所需要的关键能力，并尝试指出如何通过既有协议的改进来实现这些能力。

(1) 固定数据网络

当前固定数据网络几乎全部基于分组交换技术，从20世纪70年代的TCP/IP到后来的MPLS、IPv6、SRv6等，其协议几经演进。纵观其发展历史，历次协议都将更大的网络容量、更加丰富的网络功能作为设计的目标。与此同时，基于分布式的稳健性、全球可达性以及尽力而为作为关键能力特性被延续保留。随着人们对于万物互联所带来的经济效益的发现，远程医疗网络、工业互联网等对网络传输时延提出了更加精准的要求，其对尽力而为的传统网络提出了挑战。此外随着网络规模的扩大以及关键网络数据的增加，对网络安全也提出了越来越迫切的需求。

(2) 移动数据网络

得益于无线通信技术的发展，越来越多的网络终端通过无线方式接入数据网络。在传输领域，微波、毫米波等无线大容量传输技术也获得广泛应用。相对于有线方式，无线连接在安全性、移动性方面提出了全新的需求。高铁的迅速普及以及航空互联网的开放，为传统的移动性管理技术方案提出了前所未有的挑战。基于overlay方式的移动性管理方案不得不面临基站密度与切换频率之间的矛盾。基于外挂方式和单点信任的安全模型，本质上难以抵御伪基站方式的中间人攻击。上述场景均要求在相关网络协议设计上对相关需

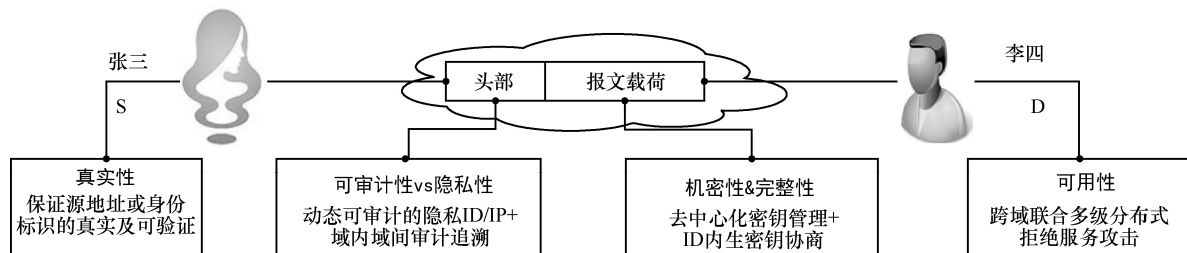


图3 内生性网络安全需求



求进行充分考虑,提出新的协议设计方案。

(3) 低功耗个人局域网

传统的数据网络基本是面向高带宽进行设计的,网络设备运行于有源环境,甚至专用的机房内。因此低功耗并不是首要追求的目标。然而,处于数字世界末端的传感器、执行器等设备,大多数被安装在普通的物理环境中。它们多数在器件体积、功耗、器件能力方面都有极为苛刻的限制。其物理层、链路层协议均是针对相关场景定制开发的,无法承载面向传统网络设备设计的网络协议。然而其连接互联网进行通信的需求是真实存在的。这就要求网络协议具有一定的弹性能力,能够根据运行环境进行自适应的调整。当前众多的协议头压缩方案的热烈讨论,体现了该需求的迫切性。然而,单纯的报文格式压缩势必损害逐跳转发场景中数据转发的时延以及转发速度。因此,进行协议实质性的弹性设计,尤其是网络地址长度的弹性设计将是解决该矛盾的一种可行思路。

(4) 低功耗广域网

低功耗广域网相对于个人局域网拥有更大的信号覆盖范围。但其一般部署于不可维护的环境当中。因此对于功耗的要求更加苛刻。此外,在新旧批量设备重新组网能力方面也提出了新的要求。当前的低功耗路由技术,如 RPL 等,依赖于生成树算法,实现单根通信,这样更容易出现单点过度消耗导致的网络通信环境不稳定。随着环境的变化,其网络节点可能发生位移,导致网络拓扑发生变化。如何更好地适应这种环境,成为新的网络协议设计的重要考虑之一。

(5) 空间卫星网络

卫星网络是对陆地网络的有益补充和必要增强,在海事、航空、无人区通信等领域拥有重大的价值。然而由于卫星绕地球周期性地运转,由卫星节点组成的卫星网络具有拓扑规律性时变的特点。在作为独立网络域进行联网时,对路由器散播提出了前所未有的挑战。且空间飞行器高速

运行的特点,导致星间链路质量不是特别稳定。传统的数据传输协议将受到严重的影响。因此充分考虑上述网络特点进行新的网络协议设计将具有非常广阔的研究空间。

(6) 工业互联网

工业是人类社会自动化程度最高的领域,但工业信息技术发展始终是烟囱式的。工业互联网概念的提出,有利于打破工业信息技术与网络信息技术的隔离,使用统一的技术栈实现更深层次的互联互通。网络 5.0 协议体系支持弹性网络特性加载和卸载,有利于在众多工业场景中实现统一的互联互通协议,且尽可能多地应用先进的网络技术特性。此外,拥有海量计算和存储能力的工业数据网络,可以承载众多的工业领域数字孪生系统,通过统一的数据面协议实现物理空间和数字空间的即时连通。

4 新协议技术案例分析

新的协议体系的实现并不是一蹴而就的,需要结合现有网络场景、方案进行渐进式的演进。这里面以确定性 IP 协议创新为例,阐述如何在网络 5.0 协议体系框架基础上进行增量式创新。传统的 IP 网络基于统计复用技术,难以保证精确的网络时延。然而许多新兴的关键应用案例需要网络能够以确定性的时延传送数据。因此确定性 IP 协议能力将是网络 5.0 协议体系的重要特征。

4.1 确定性 IP 协议

传统的 IP 协议是基于统计复用特征的分组转发技术,能够以较低的成本实现稳健、高效的数据转发网络。其原生的存储转发模型和技术发展惯性决定它无法提供数据的确定性时延转发能力。为了解决这个弊端,需要研究基于 IP 技术的确定性转发技术。基于门控队列能力的周期转发调度技术的出现,为实现确定性转发网络提供了可能性。

首先对网元数据面实施确定性转发调度技术的前提约束进行研究。不难发现原生的门控调度

技术,对于不同节点间的时钟同步有着严格的要求。然后可以针对性地研究如何通过网元之间的交互信息来实现对约束条件的放松。最终将会发现,在数据面中携带报文从上游设备被发出的周期值能够帮助下游设备确定性地决定该报文在本设备的发送周期。围绕这个核心的问题,可以衍生出众多的协议创新,例如节点间周期映射自学习协议、确定性能力资源预留协议等。因此,体现确定性 IP 技术的协议创新,将包括可携带周期标签的数据面网络协议、用于周期映射自学习的网络协议、用于路径资源预留的控制面协议和相关的确定性业务管理部署协议等。

4.2 基于内生安全的数据面协议

传统的网络安全协议都是以外挂形式依附于数据面协议之上的,缺乏架构级的安全考虑,无法实现全网的无缝安全通信保障。用于网络 5.0 协议体系的数据面协议将提供基于数据面协议属性认证和鉴权的安全体系。在主机、接入网关、边缘网关等节点实施针对数据面的安全认证和流量检查。通过标准化的攻击流量阻断协议,未来网络可以在源头阻断攻击流量,从而节省网络资源。

同时通过加密 IP 地址、加密 ID 等措施,实现隐私保护和可审计性之间的平衡,真正实现安全、高效、可管、可控的内生安全网络基础设施。

5 结束语

网络协议体系是基于应用场景和技术创新双轮驱动进行动态演进的技术体系,很难整理出一套唯一的、清晰的脉络可以涵盖既有网络协议集合,并用于指导未来网络协议创新。本文希望通过对网络技术发展历史的研究,提出能够适用于未来协议技术创新的一般性指导原则,在解决新场景问题时,能够指导协议体系向统一、高效的

方向演进。

由于研究者视野等原因,很难对既有优秀工作一一进行详解。同时,在协议设计原则、创新协议演进性研究上还需要进一步进行归纳并通过实际创新进行验证。然而,网络 5.0 协议体系框架概念的提出将有助于协议创新提出者在指导原则下进行技术思考,从而对网络向简化、高效方向演进提供有益影响。

参考文献:

- [1] 郑秀丽, 谭佳瑶, 蒋胜, 等. 未来数据网络需求分析[J]. 电信科学, 2019(8):16-25.
ZHENG X L, TAN J Y, JIANG S, et al. Analysis on the requirements of future data network[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(8): 16-25.
- [2] CHIEN W C, LAI C F, HOSSAIN M S, et al. Heterogeneous space and terrestrial integrated networks for IoT: architecture and challenges[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 15-21.
- [3] CAO W, ZHANG T, JIA Y. Integrated technology of vehicle network based on CAN[C]//World Congress on Intelligent Control & Automation, June 21-23, 2006, Dalian, China. Piscataway: IEEE Press, 2006.
- [4] CARASTEN B, GEOFFREY M. IPv6 over low power WPAN[EB]. 2004.
- [5] ALEXANDE P, PASCAL T. IPv6 over low power wide-area networks[EB]. 2016.
- [6] 张朝昆, 崔勇, 唐嵩祎, 等. 软件定义网络(SDN)研究进展[J]. 软件学报, 2015, 26(1): 62-81.
ZHANG C K, CUI Y, TANG H Y, et al. State-of-the-art survey on software-defined networking (SDN)[J]. Journal of Software, 2015, 26(1):62-81.
- [7] IETF. Internet protocol darpa internet program protocol specification: RFC791[S]. 1981.
- [8] IETF. Internet protocol, version 6 (IPv6) specification: RFC2460[S]. 1998.
- [9] IETF. Multiprotocol label switching architecture: RFC3031[S]. 2001.
- [10] IETF. BGP MPLS-based ethernet VPN: RFC7432[S]. 2015.
- [11] IETF. Segment routing architecture: RFC8402[S]. 2018.
- [12] IETF. NVGRE: network virtualization using generic routing encapsulation: RFC7637[S]. 2015.
- [13] IETF. NVGRE: virtual eXtensible local area network (VxLAN): a framework for overlaying virtualized layer 2 networks over layer 3 networks: RFC7348[S]. 2014.



- [14] 3GPP. General packet radio system (GPRS) tunnelling protocol user plane (GTPv1-U): TS29.281[S]. 2015.
- [15] JOEL H, LUIGI I. Locator/ID separation protocol[EB]. 2009.
- [16] IETF. Network service header (NSH): RFC8300[S]. 2018.
- [17] IETF. Segment routing architecture: draft-ietf-spring-segment-routing-13[S]. 2017.



蒋胜（1978- ），男，博士，华为技术有限公司主任工程师，主要研究方向为网络架构设计、IPv6 等。

[作者简介]



李广鹏（1985- ），男，华为技术有限公司高级工程师，主要研究方向为未来网络架构和协议、多样化灵活网络编址、多语义路由等。



王闯（1975- ），男，华为技术有限公司高级技术专家，主要研究方向为未来网络探索、网络架构设计等。