



专题：“IPv6+”网络技术创新体系

“IPv6+”互联网创新体系

田辉¹, 魏征²

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100191;

2. 国家计算机网络应急技术处理协调中心上海分中心, 上海 200010)

摘要: 当前, 数据通信领域专家已经达成共识, 部署 IPv6 不是下一代互联网的全部, 而是下一代互联网创新的起点和平台。通过对 5G 承载和云网融合应用场景的承载需求分析, 梳理了典型应用场景下的新型承载网功能和性能指标。在此基础上, 结合 5G 承载和云网融合的灵活组网、按需服务、差异化保障等功能需求, 综述并展望了“IPv6+”互联网创新体系。

关键词: 云网融合; 5G 承载; IPv6+

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020256

IPv6+ innovation of the NGI

TIAN Hui¹, WEI Zheng²

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

2. Shanghai Branch, Coordination Center of China, National Computer Network Emergency Response Technical Team, Shanghai 200010, China

Abstract: Nowadays, experts in the field of internet have reached a consensus that the deployment of IPv6 is not the whole of the next generation internet, but the starting of the next generation internet innovation. The requirements of cloud convergence and 5G application scenarios were analyzed, the functions and performance requirements of typical application scenarios were combed, and the IPv6+ technology innovation of the next generation internet was summarized.

Key words: cloud network convergence, 5G bearer, IPv6+

1 引言

20 世纪后半叶, 随着以集成电路、计算机、光通信、网络为代表的信息通信技术不断取得突破, 基于 TCP/IP 的互联网技术迅猛发展。今天, 互联网已经渗透到社会的方方面面, 深刻地影响着人类的生产和生活组织方式。与此同时, 越来

越多的新型业务和应用场景对互联网承载能力提出了更高的指标要求, 互联网领域专家不断加大研究范围和研究目标, 试图探索能够满足这些需求的新型网络技术。

2 新型承载需求

目前, 云服务、移动承载、工业互联网、车

收稿日期: 2020-06-18; 修回日期: 2020-08-11

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)



联网、远程医疗以及全息通信等业务和应用场景都在讨论网络承载需求的议题，毫无疑问最为迫切且最为明确的是云网融合和 5G 承载两种场景。

（1）云网融合

随着云计算技术和产业的发展，越来越多的业务和数据被迁移到云端，网络上已经存在大量可以提供计算功能、存储能力的 IT 基础设施资源。如果各个云彼此之间是碎片化的孤岛，不能作为一个整体的 IT 资源池为用户提供服务，便不能成为 ICT 基础设施的组成部分。云计算基础设施的承载网络主要包括云内网络、云间网络 and 用户上云。目前，3 部分网络尚不能构成整体，也无法实现对资源的端到端管控。云要发挥作用，最关键的是用户可以使用“云”，云到用户网络的条件和能力是关键。当前“不可知、不可管、不可控、不能保证安全、提供尽力而为信息传输能力”的互联网基础设施，尚不能按照用户要求提供按需服务的能力。因此，云网融合旨在推进云与网络构成一个整体，实现按需的云资源分配能力，同时，网络能够保障云资源得到充分利用。

（2）5G 承载

5G 是人类将数字化从以个人娱乐为主，推向全连接社会的起点，5G 应用将带来更加丰富的沟通方式和更加真实的体验。与以往移动通信系统相比，5G 多样化的应用场景需要满足更加极致的性能挑战要求，对承载网络提出了全新的挑战，主要体现在低时延、移动性和海量连接等方面。5G 通过将业务部署在靠近用户侧可以在一定程度上缩短传输路径来减少链路时延，然而仅依靠业务的就近部署是不够的，除此之外还需要能够在承载网络提供低时延技术；5G 网关下沉部署可以有效优化时延问题的解决，但同时也引入了终端在移动过程中可能会在网关之间频繁切换的问题，对移动性方面带来更大挑战；此外，5G 网络连接密度可能达到百万/平方千米，此时数量巨大的上下文信息以及信令过程会给承载网络带

来极大负担。

2.1 承载功能要求

云网融合、5G 应用场景需要承载网络具备更高的吞吐能力和更高效的运行维护能力，对承载网提出了很多功能上的要求，主要包括如下方面。

（1）客户/业务体验保障能力

网络层功能需针对 5G 和云服务场景提供相应的客户/业务体验保证策略，例如网络层切片、业务敏捷开通、优先级保证、带宽预留、可靠性保护等机制。承载网设计需要针对普适场景的可靠/不可靠传输需求，支持上层应用参与应用业务特征和需求表征，确保网络层服务质量保障策略更好地匹配上层业务需求。

（2）时延传输控制能力

对于时间敏感类业务，承载网需要确保业务数据的精准到达，这不仅要求数据流的同步传送，还需要保证数据到达的时延上下限、传输抖动以及数据前后到达的顺序等功能。下一步承载网络需提供支持确定性和低时延两种时延类型服务，从而给网络设计带来巨大挑战。

（3）海量连接管控能力

互联网基础设施不断扩建，更多的人接入互联网，享受互联网带来的便利。随着物联网、工业互联网、车联网等新型通信业务发展，通信连接数量将呈现持续的爆炸式增长，通信网络将进入超大规模的“大连接”时代。承载网络需对海量连接进行接入管理、阻塞控制、查询检索、释放拆除和状态管理等，进一步对网络的可扩展性提出了严峻的挑战。

（4）网络状态感知能力

网络状态感知是实现网络资源管控的前提。实时、精确、完整的网络状态监测感知，包括网络的可用性、利用率、吞吐量、链路拥塞、网元拥塞状态、传输流的真实路径等。传统探针系统主动测量只能获得时延、丢失分组数等简单网络状态参数，尤其是如何针对真实用户流量、逐跳

报文转发以及更多数据面信息开展高效监测,对承载网络设计提出了新的挑战。

(5) 网络人工智能能力

5G 普及将带来数据计算和传输量的急剧上涨,企业业务全云化与传统行业的实质性融合,将带来更加复杂多样的上层业务支撑需求。应对未来巨量流量和业务需求多样化的挑战,承载网络与人工智能的结合成为必然趋势。虽然目前,网络人工智能还处于初期探索阶段,但如何为网络引入更多智能性,通过人工智能手段提高业务调度、流量预测、行为分析的效率,降低人工成本和提升用户体验,成为业界日益关注的热点问题。

2.2 承载性能要求

对承载网网络的性能需求,主要体现在带宽、时延、抖动、分组丢失率等方面。

(1) 带宽需求

工业互联网交互类业务需要保证 Gbit/s 级别的高速传输。车联网中,传统娱乐系统/触屏等需要 1 Gbit/s 的带宽,高级信息娱乐(4K 视频)需要 12 Gbit/s 的带宽,L3 自动驾驶(2018 年,美国汽车工程师学会(Society of Automotive Engineers, SAE)发布了 J3016 标准文件,将自动驾驶分为 L0~L5 共 6 个等级)车辆则需要以 24 Gbit/s 的带宽发送无压缩的传感器数据。全息通信中,单个数据流的动态传输数据量参考需求约为 2 Tbit/s。数据网络需要支持超高通量传输,以满足多种应用对超大带宽的需求。

(2) 时延指标

5G 场景中,eMBB 业务用户面时延需要小于 5 ms,控制面时延需要小于 10 ms;uRLLC 业务用户面需要时延小于 0.5 ms,控制面时延需要小于 10 ms。工业互联网中,控制数据传输时延在 5~10 ms,运动控制时延小于 1 ms。车联网自动驾驶场景中,端到端时延需求小于 5 ms。

(3) 抖动指标

工业互联网中,控制业务要求 μs 级时延抖动。

继电保护要求单向时延的抖动不能超过 50 μs 。专业音/视频同步要求视频数据传输信道与音频数据传输信道的时延之差小于 1 ms,单信道上的抖动小于 250 μs 。数据网络需要保证有界的时延抖动,以满足工业互联网、远程医疗、专业音视频同等时延敏感型业务对端到端确定性时延的需求。

(4) 分组丢失率指标

工业互联网数据传输分组丢失率要低于 10^{-3} ,风力发电功能组件要求分组丢失率小于 10^{-6} 。工业控制、智能电网继电保护等精细化控制类业务对于网络分组丢失极其敏感,关键指令的丢失可能会产生严重的后果。为保证关键指令无丢失,数据网络需要提供业务无损传输。

3 基于“IPv6+”的下一代互联网创新

纵观互联网技术的发展历程,数据通信网络经历了 IPv4、MPLS 两代协议。IP 网络的代际演进如图 1 所示。IPv4 是第一代 IP 网络的基石,因其开放、轻量和易于扩展等特点,促进了互联网的快速发展和繁荣。随着信息和通信技术不断发展演进,MPLS 等关键技术得以广泛采用,通信网络从接入侧到核心侧全线 IP 化,第二代 MPLS 网络逐步发展成熟并得以广泛部署。

近年来,面向 5G 和云时代的商业场景创新需求,基于 IPv6 的下一代互联网创新成为业界热点。我国互联网产业界持续探索 IP 网络的发展演进,率先提出了“IPv6+”下一代互联网创新体系。“IPv6+”是面向 5G 和云时代的智能 IP 网络,“IPv6+”包括以 IPv6 段路由、网络切片、确定性传输、随流检测、新型多播和应用感知网络等协议为代表的协议创新,包括以网络分析、自动调优、网络自愈等网络智能化为代表的技术创新。“IPv6+”可以满足 5G 承载和云网融合的灵活组网、业务快速开通、可靠性保护、确定性传送、简化网络运维、优化用户体验按需服务、差异化保障等需求。

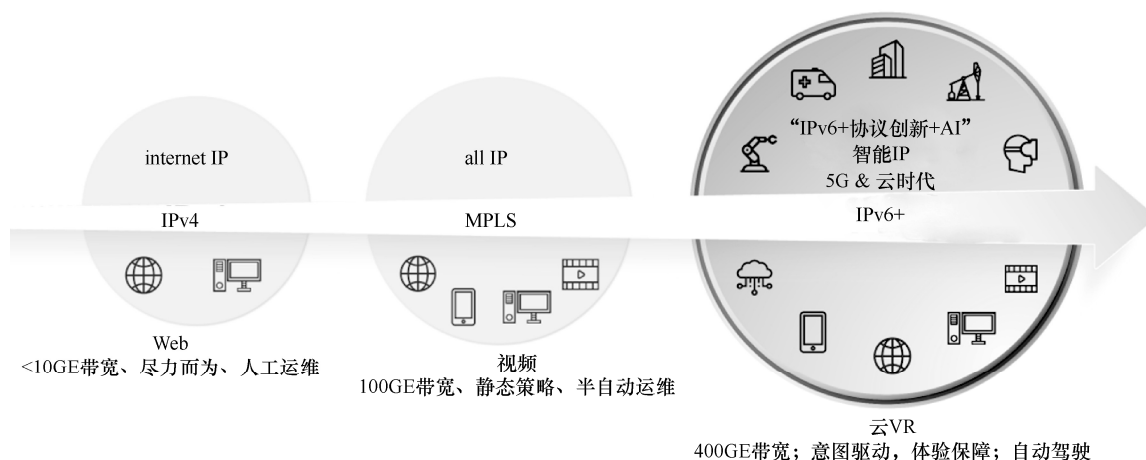


图1 IP网络的代际演进——“IPv6+”

3.1 IPv6 段路由

段路由（segment routing, SR）是一种源路由技术。它为每个节点或链路分配 segment，头节点把这些 segment 组合起来形成 segment 序列，指引报文按照 segment 序列进行转发，从而实现网络的编程能力。SRv6^[1]可以与 IPv6 网络无缝集成，只需在关键节点使能 SRv6，就可以具备网络可编程^[2]、跨域部署、流量工程、快速倒换等能力。综合来看，SRv6 具有如下优势。

（1）简化控制协议

SRv6 只采用内部网关协议（interior gateway protocol, IGP），统一了控制协议，不再像 MPLS 那样在 IGP 的基础上还要 LDP、RSVP-TE 等协议，降低了协议运行维护的复杂度。

（2）良好扩展性

现有网络实现流量工程（traffic engineering, TE）时一般采用 RSVP-TE，这是一种软状态协议，网络中的每个节点都要感知到所有路径的状态，协议开销过大限制了 TE 隧道数量，难以部署维护。SRv6 TE^[2]路径编程则是在头节点进行，海量路径依赖于有限链路和节点的 segment 组合，网络中间节点无须感知路径状态，具备很高的扩展性。

（3）可编程性好

SRv6 的 segment 类似于计算机的指令，通过对 segment 的编排可以实现类似于计算机指令的

功能。部署 SRv6 可以使得 IP 网络具备路径可编程能力^[3]，可以灵活建立满足不同需求的转发路径，进一步释放网络的商业价值。

（4）更可靠的保护

SRv6 能够提供全网覆盖的快速重路由保护^[4]（fast re-route, FRR），解决了 IP 网络长期面临的技术难题，能够在满足网络扩展性的前提下，实现完全的 FRR 可靠性保护。

当然，SRv6 技术发展也面临着挑战，其中 SRv6 报文开销降低网络传送效率是一项难题。以 5G 承载为例，流量穿越回传网、城域网以及骨干网，需要经过大量路由节点。为了支持客户的服务质量和高可靠管控要求，运营商网络需要支持指定显示路径，端到端隧道部署可能会有 10 层以上的 SID 标签（单层 SID 128 bit），对于平均长度 256 byte 的应用载荷，SRv6 带来的协议开销会超过 1/3。因此，针对 SRv6 的扩展头压缩技术成为业界的热点研究方向。

3.2 网络切片

为了实现在同一张网络中同时满足各种各样类型业务的差异化需求，网络切片成为 5G 的关键技术之一。承载网切片为 5G 的端到端切片提供定制化的网络拓扑和连接以及为不同网络切片的业务提供差异化且可保证的服务质量（service level agreement, SLA）。基于“VPN+技术”^[5]的承载

网切片的整体架构包含网络基础设施层、网络切片实例层和网络切片管理层。“VPN+网络”切片具有如下优势。

(1) 网络基础设施层

利用 SRv6 编程能力,网络设备为每个网络切片分配专用或共享的网络资源,通过各种底层技术提供网络资源切分和隔离能力,为不同的网络切片提供资源隔离,避免或减少不同网络切片之间的影响。

(2) 网络切片实例层

提供按需定制的虚拟网络拓扑等属性,并实现切片虚拟网络与为切片分配的底层网络资源有机整合。SRv6 的数据面和控制面技术是网络切片实例层的重要组成技术。

(3) 网络切片管理层

得益于 SRv6 对 SDN 的内生支持,网络切片控制器与网络设备分布式控制相互配合,提供网络切片的生命周期管理,包括切片的规划、创建、监控、调整和删除。网络切片管理层还提供开放接口与 5G 的端到端切片管理器交互切片的需求和能力信息。

为了满足大带宽、大规模物联网以及高可靠等不同实例的业务需求,3GPP 设计了 5G 切片功能及相关规范。仅实现空中接口和核心网切片,不足以支撑端到端业务 SLA 保障,还需要承载网的网络切片,也就是端到端网络切片能力的构建。当前,端到端网络切片已经形成了部分产品解决方案和网络实践,但距离规模商用部署还存在一定差距,问题主要体现于:不支持动态化切片,当前网络切片只能提供静态切片能力,如何根据客户/行业需求动态调配编排器、实时管理和优化网络切片需要加强;切片服务商品化进程不足,切片服务的可交付、可测量、可计费,需要建立在服务商品化的基础上才能实现定制服务。

3.3 确定性网络

确定性网络 (deterministic networking, DetNet) 技术^[6]是一种提供可承诺 SLA 保证的网

络技术,它能够综合统计复用网络和时分复用网络的优势,在 IP、Ethernet 等分组网络中提供类似 TDM 转发的服务质量,保证高价值流量在传输过程中低抖动、分组零丢失,具有可预期的端到端时延上限。DetNet 代表一个技术合集,包括了相对独立的单点技术,主要优势如下。

(1) 资源分配

在当前统计复用网络中,拥塞是造成分组网络时延不确定以及分组丢失的重要原因。IEEE 的链路层 TSN、IETF 的网络层 DIP 依靠时间同步、流量整形、时延保障、资源预留和队列管理机制避免高优先级报文之间的冲突,避免网络中出现拥塞,同时提供可保障的端到端时延上限。

(2) 显式路径

为了保证业务的网络质量稳定,不受网络拓扑变化的影响,确定性网络需要提供显式路径,对报文的路由进行约束,以防止路由震动或其他因素对业务产生影响。

(3) 业务保护

业务保护为一份业务在网络中选取两条或多条不重合的路径同时传输,并在汇合节点保留先到达的报文,即在网络中实现“多发选收”;这种机制能够在某一条路径发生断路丢失分组时无损切换到另一条路径,保证业务高可靠传输。

当前,确定性传送网络仅在单点技术上取得突破,标准化工作尚未完成,距离商用实践还存在一定距离。主要问题体现于:DetNet 在技术上主要关注 TSN 相关机制在 3 层网络中的应用,聚焦单管理域以及孤岛互通等规模有限的场景,无法支持跨越大网的端到端确定性传送需求;5G 和云服务承载场景复杂,网络中的数据流数量庞大,如何在路由交换设备上实现确定性转发的时间同步、逐流调度,设备和网络扩展性存在较大的产业挑战。

3.4 随流检测

随流检测 (in-situ flow information telemetry, iFIT) 技术^[7]区别于主动的 OAM 方法,如单向主



动测量协议(one-way active measurement protocol, OWAMP)和双向主动测量协议(two-way active measurement protocol, TWAMP),随路网络测量不会发送主动探测报文,而是将 OAM 指令携带在用户报文中。处理节点根据报文中的 OAM 指令信息,收集数据并处理。相较于主动测量,随路网络测量可以获得诸多的好处,如测量真实的用户流量、可实现逐报文的监控、可以获得更多的数据面信息等。IFIT 提供了一种随路网络测量的架构和方案,通过智能选流、上传数据压缩、动态网络探针等技术,并融合隧道封装的考虑,使随路检测技术可以在实际网络中部署。与所有带内网络遥测系统一样,随路检测技术亟需解决以下几个技术需求。

(1) 性能扩展

IFIT 应根据网络异构和各类服务的遥测需求,快速生成并下发遥测方案,上报网络状态信息。

(2) 协议轻量

有限的网络资源要求网络带内网络遥测系统必须是轻量级协议,以减少资源消耗和通信开销。

(3) 稳健性

网络遥测系统应能够应对节点或链路故障,不依赖于网络节点和遥测服务器部署,并且适应网络状态变化。

(4) 安全性

对用户数据分组遥测可能伴随隐私泄露和安全问题。因此,带内遥测需要研究如何减少对用户数据的影响。

感知网络状态不是终极目标,更大的挑战是如何通过随流检测获得实时、准确、完整的网络状态数据,进一步指导资源管控系统做出全面、精准的管理与控制决策,包括合理调度分配计算、存储及网络资源,制定安全控制策略,提高网络整体利用率,最终提升用户体验。

3.5 新型多播

多播技术设计初衷是实现 IP 网络中点到多点

的高效数据传送,在 IPTV 业务中具有部署,但由于传统多播路由协议需要为每个多播节目逐跳建立多播数,设备压力大且故障恢复慢。索引显式复制^[8](bit indexed explicit replication version6, BIER6)是一种新型多播数据报文转发架构,它提供了一种在多播域中转发多播报文的理想方案,而不需要针对每个多播节目逐跳显式、逐跳建树,也不需要为每个多播节目在各路由器上保存转发状态。BIER6 是基于 IPv6 大地址空间、可扩展、可编程的特点而设计的多播方案。它使用 IPv6 的扩展头机制封装标准的 BIER 头、使用 SRv6 SID 作为目的地址指导数据面进行 BIER 头的处理、使用 IPv6 源地址标识 MVPN,单个封装即可支持逐跳的 BIER 多播复制、跨 non-BIER 节点的多跳多播复制、跨 AS 域的报文发送或复制等场景,是 IPv6 网络下的新一代多播方案。

传统多播业务应用场景相对单一,主要集中于 IPTV 业务分发,而随着互联网视频业务、VR/AR 等大视频业务的广泛开展,数据中心内部及数据中心之间的流量复制/备份,内容分发网络、分布式存储乃至边缘计算的规模部署,未来多播业务需求可能呈现爆炸式增长。因而,新型多播网络架构中多播状态表、多播转发表、多播分发能力的扩展性仍需大规模验证,这也是未来多播网络中最复杂且不可控的部分。此外,BIER 技术与各类虚拟专用网结合的多播 VPN 方案尚未收敛完善,包括 L3VPN、L2VPN 等。

3.6 应用感知网络

应用感知网络(App-aware IPv6 networking, APN6)^[9]是一种面向未来的新型 IPv6 网络架构。APN6 针对现有网络无法感知应用而导致的运营商现网运营痛点,如网络利用率低、无法精细化运营服务等,意在改变网络与应用割裂现状。APN6 利用 IPv6 逐跳扩展头(hop-by-hop options header, HBH)将应用信息(包括用户信息、应用标识、SLA 需求等级信息和网络需求信息等)

由报文携带进入网络,使网络感知用户应用及其对网络的需求,为高优先级应用提供精细化运营服务,从而实现网络可编程能力的充分利用,有效衔接网络与应用。

应用感知网络可以使能网络为特定应用(如游戏、直播或支付等)提供定制化服务,在保障用户网络体验的同时提升承载网络的商业价值。目前应用感知网络仅处于场景和需求讨论阶段,尚未进入架构设计和方案实现阶段。为了实现初衷还有一些关键问题需要加快突破:如何利用好IPv6扩展头部的可编程能力,将应用层需求完整的传递到网络层,使能网络对用户应用进行精细化运营;如何与软件定义网络的控制器高效联动,能够基于SDN进行快速业务部署,满足应用需求的快速动态响应;如何突破应用与网络的边界,实现应用级的业务导流以及差异化服务质量保证;如何实现应用侧云化资源与承载网络之间的信息交互,能够统一调度云网资源以匹配新业务需求,实现真正的云网协同。

3.7 网络人工智能

以人工智能为主的IP网络智能化,可以基于对具体网络使用意图的识别和判断,针对性保障网络体验。这是在带宽不断增大、产品性能不断提升、应用愈加复杂网络环境下最为行之有效的解决方案,人工智能与IP网络的深度融合成为IP网络下一步发展的重点方向。人工智能作为“IPv6+”的关键要素和核心驱动力,可以满足灵活组网、业务快速开通、智能运维、差异化服务保障等商业需求,有望为IP网络创新发展打开一条新的通道。

目前网络与人工智能结合还处于初期探索阶段,随着IPv6规模部署和深入应用,人工智能与IPv6网络的结合是一个必然趋势,可能的应用场景包括:网络资源智能编排、流量预测调度、基于智能的网络和信息安全以及用户行为分析等。当前业界希望通过网络人工智能研究与探索,可

以对全网进行监测,实时发现网络的问题和风险,实现网络异常的智能识别;可以针对发现问题进行故障自动定界定位,实现网络故障的智能分析定位;可以推荐最佳修复方案,客户确认后自动修复,实现网络故障的智能修复。未来随着网络智能化关键能力的提升,可望迎来运营商多年来的梦想,实现真正的“随愿网络”。

4 结束语

2017年11月,中共中央办公厅、国务院办公厅联合印发《推进互联网协议第六版(IPv6)规模部署行动计划》(简称《计划》)。《计划》发布以来,政府部门、电信运营企业、互联网企业、中央企业、设备提供商等积极响应,纷纷制定具体实施方案和工作计划加快IPv6升级改造,两年间我国IPv6规模部署取得显著成果,为下一代互联网创新奠定了坚实的基础。以往的经验表明,一方面新型应用场景对网络承载提出需求挑战,另一方面网络承载技术创新又是应用创新的基础与使能条件,网络创新和应用创新二者相互推动必将实现螺旋式发展。

2019年,在推进IPv6规模部署专家委员会的指导下,我国数据通信产业界成立了“IPv6+技术创新工作组”,包括中国信息通信研究院、中国电信、中国移动、中国联通、清华大学、中国石油、中国石化、国家电网、中国工商银行、中国银联、华为、天融信等机构。依托工作组合作研究机制,工作组已经在“IPv6+”概念、内涵以及发展阶段等问题上逐步达成共识,确定了技术研究和产业实践“三步走”的发展策略。

第一阶段,构筑“IPv6+”基础能力。重点开展与SRv6相关的技术研究和产业实践,实现对传统MPLS网络基本功能的替代(包括虚拟专用网、流量工程以及快速重路由等)。通过SRv6规模部署简化IPv6网络业务部署,使IPv6网络基础设施具备业务快速发放、灵活路径控制等特性。



第二阶段，提升网络 SLA 体验保障。重点开展 IPv6 网络切片、随流检测、新型多播等技术研发和产业实践，在网络演进中引入 VPN+、iFIT、BIERv6 等特性，发展面向 5G 和云网融合的承载应用，包括面向 5G 行业使能、cloud VR/AR 以及业务链应用等。

第三阶段，发展应用感知型网络。伴随云服务和网络演进的融合进程，需要进一步研究云服务和网络之间的信息交互技术，探讨云服务应用感知、资源及时调用与网络能力开放之间的协调机制。可以预见，云网深度融合必将给未来的下一代互联网产业发展带来深远的影响。

2020 年，“IPv6+”技术创新工作组将依托我国 IPv6 规模部署发展成果，整合 IPv6 相关产业链力量，加强基于“IPv6+”的下一代互联网技术体系创新，从网络路由协议、管理自动化、智能化及安全等方向积极开展技术研究、试验验证、应用示范，持续完善“IPv6+”技术产业体系，有力提升我国在下一代互联网领域的国际竞争力。

参考文献：

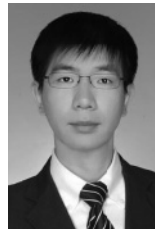
[1] IETF. IPv6 segment routing header: RFC8754[S]. 2020.

- [2] LI Z. BGP request for candidate paths of SR TE policies[Z]. 2020.
- [3] FILSFILS C. SRv6 network programming[R]. 2020.
- [4] CEHN H. SRv6 midpoint protection[Z]. 2020.
- [5] DONG J. A framework for enhanced virtual private networks (VPN+) services[Z]. 2020.
- [6] IETF. Deterministic networking architecture: RFC8655[S]. 2019.
- [7] SONG H. In-situ flow information telemetry[Z]. 2020.
- [8] XIE J. BIER IPv6 requirements[Z]. 2020.
- [9] LI Z. Application-aware networking (APN) framework[Z]. 2020.

[作者简介]



田辉（1975—），男，中国信息通信研究院高级工程师、技术标准研究所互联网中心主任，长期从事数据通信领域标准和测评技术研究工作，先后主持多家基础电信运营企业的互联网、IP 承载网建设工程咨询，负责 20 余项数据通信领域国家/行业标准制定工作。



魏征（1986—），男，国家计算机网络应急技术处理协调中心上海分中心工程师，长期从事信息通信方向的政策标准研究。