



面向 5G/B5G 的智能云化网络架构

周旭¹, 李琢^{1,2}, 覃毅芳¹

(1. 中国科学院计算机网络信息中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 5G/B5G 技术的出现使移动网络的带宽、时延、连接等关键能力得到了极大的提升。面对移动接入侧能力的飞速发展, 现有的集中式互联网云服务架构容易出现瓶颈, 无法充分发挥 5G/B5G 的性能优势。网络 5.0 技术的提出, 旨在通过一套完整的创新协议体系及控制管理架构, 应对未来典型网络应用对数据网络的需求。基于网络 5.0 协议体系, 提出一种新型的智能云化网络, 通过云网深度融合, 弥补互联网服务模型与 5G/B5G 接入能力之间的差距, 推动网络持续演进发展。

关键词: 5G; B5G; 网络 5.0; 云网融合; 智能云化网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019222

5G/B5G oriented intelligent cloud network architecture

ZHOU Xu¹, LI Zhuo^{1,2}, QIN Yifang¹

1. Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The emergence of 5G/B5G technology has greatly improved the key capabilities of mobile networks including bandwidth, latency and connectivity. Faced with the prosperous development of mobile access side capabilities, the existing centralized architecture for internet cloud service was prone to bottlenecks and could not fully exploit the advantage of 5G/B5G. The technology named Network 5.0 was proposed to address the demand for data networks from future typical network applications through a complete set of innovative protocol systems and control management architecture. A new type of intelligent cloud network based on the protocol system of Network 5.0 was proposed, which could bridge the gap between the internet service model and 5G/B5G access capability through the deep integration of cloud network, and promote further the continuous evolution of the network.

Key words: 5G, B5G, Network 5.0, cloud-network integration, intelligent cloud network

1 引言

随着互联网新业务的不断涌现, 现有的互联

网服务将网络流量源源不断地汇集到核心骨干网, 导致核心骨干网络的压力骤增^[1-3], 其粗粒度的保障机制已无法保障复杂应用场景下的网络服

收稿日期: 2019-08-20; 修回日期: 2019-10-10

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)



务质量, 严重影响了互联网的用户体验和互联网的持续健康发展^[4]。

相比于前一代通信技术, 第 5 代移动通信(5G)系统和超 5 代移动通信(B5G)系统在通信能力、端到端时延、网络能效、连接密度和频谱等方面有了可观的提升^[5], 5G/B5G 技术的出现解决了海量终端设备的接入问题, 使得 5G 核心网的接入速率达到 10~100 Gbit/s^[2], 空口时延降低到 1 ms。然而移动回传及广域传输带宽速率成为下一个瓶颈, 海量的物联网设备给云端带来巨大压力的同时, 进入大网后的时延也无法得到保障^[2-3]。

现有的互联网云服务架构显然不能满足大连接、低时延和高带宽的差异化需求^[6], 为了满足众多业务场景对未来网络的需求, 业界人士提出面向 2030 年的下一代数据网络(网络 5.0)^[6-7], 旨在满足海量异构网络的接入和未来网络提出的典型需求。本文提出面向 5G/B5G 的智能云化网络架构, 云网融合的动态服务模式有效满足 5G/B5G 场景中的差异化网络需求, 推动未来网络技术的可持续演进。

2 5G/B5G 发展现状

5G/B5G 技术发展已经得到越来越多的关注, 边缘计算、软件定义网络、毫米波通信、太赫兹通信、大规模天线(massive MIMO)等核心技术蓬勃发展^[8-10]。

2.1 5G/B5G 功能特性

5G/B5G 主要包含三大典型功能特性, 即大连接、高带宽和低时延。

(1) 大连接

海量机器类通信(massive machine type of communication, mMTC)是 5G/B5G 中针对大规模物联网的典型应用场景之一, 5G/B5G 定义的大连接功能有着灵活性和可扩展性的接口, 满足未来网络场景中数以千万计的应用连接需求, 满足新的应用程序以及新的网络节点大规模部署^[9]。

(2) 高带宽

5G 网络所支持的高带宽能力, 下行峰值速率相对 4G 提升 100 倍, 可以达到 10 Gbit/s, 满足不同业务的高带宽需求。相比于 5G, B5G 进一步扩展支持的通信场景, 同时数据速率将达 Tbit/s 级, 提供更高的带宽接入能力。

(3) 低时延

5G/B5G 中的超高可靠超低时延通信(ultra reliable & low latency communication, uRLLC)场景, 主要来自 AR/VR、自动驾驶、工业控制、远程医疗等行业, 这些行业中的部分业务对时延有着非常高的指标要求, 以自动驾驶为例, 端到端时延达到毫秒级才能满足云端辅助决策^[9]。5G/B5G 改变了空口物理层的帧结构来降低空口传输时延, 通过将核心网部分功能下沉到接入网的方式, 减少转发节点、缩短传输距离来降低核心网传输时延。

2.2 5G/B5G 核心关键技术

(1) 边缘计算

ESTI 将移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)扩展到多接入边缘计算(multi-access edge computing, MEC), 旨在将边缘计算的能力延伸到更多的无线接入设备, 在提供低时延、高带宽和无线实时访问的网络边缘服务的同时, 业务的下沉带来了服务质量的提升^[10]。边缘计算的引入使得移动网络与互联网的融合进一步加深, 网络中开始具备计算和存储能力, 为未来云网融合发展奠定了较好的基础^[10-11]。

(2) SDN 与 NFV

软件定义网络(software-defined networking, SDN)作为一种新型的网络创新架构, 实现了控制平面与数据平面的控制转发分离, 从而使网络流量得到控制, 使网络变得更加智能化^[12]。SDN 不仅提供了更灵活的可编程环境, 也为外部的软件定义网络行为提供了更大的自由度。

网络功能虚拟化(network function virtual-

ization, NFV) 通过使用标准的虚拟化技术, 在商用 x86 服务器等现成硬件上运行网络功能, 开创性地将网络功能与其专用硬件设备进行分离, 提供完全独立于硬件的网络组件, 这些组件包括支撑网络基础架构所需的计算、存储和网络功能^[12-13]。SDN 与 NFV 技术的引入, 代表着软件、虚拟化技术与网络技术的交叉, 基础设施走向融合, 网络变得更加灵活。

(3) 其他关键技术

毫米波技术是 5G 移动通信需求的有效解决方案之一, 其最大的特点是拥有巨大的频谱资源开发空间以及极高的无线传输速率^[14]。3GPP 38.101 协议规定 5G 中采用的毫米波频率范围是 24.25~52.6 GHz^[15]。基于毫米波频段, 5G 可以提供超过 10 Gbit/s 的无线接入速率。毫米波通信的传播损耗远高于低频段通信, 存在通信距离受限、遇到障碍物的衍射效果差的缺点。

继毫米波之后, 太赫兹 (0.1~10 THz) 通信是 B5G 乃至 6G 通信技术关注的又一关键领域^[15]。相比毫米波, 太赫兹具有更大的带宽和传输速率, 可以提供超过 100 Gbit/s 的无线接入速率。太赫兹通信系统有着高带宽、高传输速率、高度保密等特点, 利用太赫兹波作为载波进行无线通信成为

发展 5G/B5G 技术的必然选择^[16-17]。

毫米波及太赫兹通信技术的兴起, 使得无线接入侧的接入速率飞速上升, 已远超现有光网卡的速率。未来 5G/B5G 时代大量新型无线设备的高速接入, 将给网络带来巨大的挑战。

3 5G/B5G 场景互联网面临的挑战

现有互联网是典型的“云+网+端”服务模型, 如图 1 所示。在此架构中, 上层应用一般以虚拟化的方式, 集中部署在云计算中心, 终端用户通过各种接入网络, 经由互联网访问云计算中心的服务。

这种模式的优点在于, 云、网、端三者之间的界限划分非常清晰, 易于分界优化管理。但是, 这种模式也存在性能瓶颈集中、访问路径长的潜在问题。在 5G/B5G 时代, 面对无线接入侧能力的飞速增长, 这种模式面临着巨大的挑战。

(1) 超高通量端到端传输的挑战

根据 Cisco Global Cloud Index 报告数据^[18], 图 2 显示了全球云数据中心流量从 2016 年的 6.8 ZB (Zettabytes, 泽字节) 到 2021 年的 20.6 ZB, 预计将达到 3 倍左右的增长。而在此同时, 移动接入的速度从 4G 时代的 100 Mbit/s 到 5G 的 10 Gbit/s,

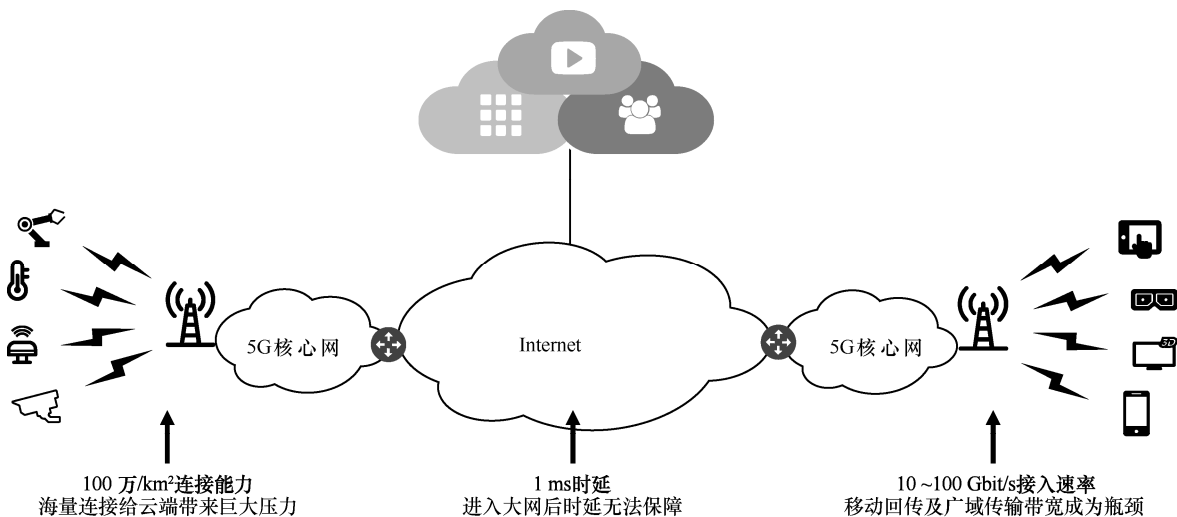


图1 现有的互联网云服务架构

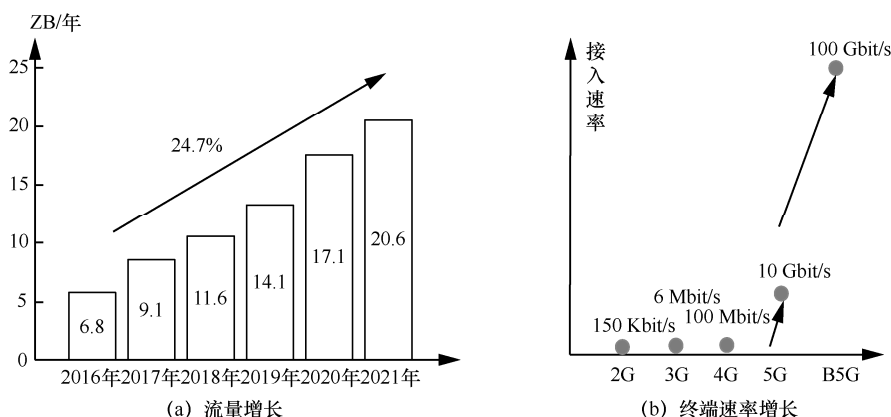


图2 全球云数据中心流量增长及终端速率增长情况

将有 100 倍的增长。

终端接入速率在 5G 时代的突变式增长，加上接入网络的终端数据增加，云计算中心的出口带宽将成为最大的瓶颈^[19-20]。如果考虑 B5G 将会达到的 100 Gbit/s 接入速率，这个瓶颈将更为显著^[16]。

(2) 端到端低时延的挑战

网络时延与传输距离是正相关的^[21]，一般来说，在运营商网络中，网内路由器间的时延：1 000 km 距离之内时延小于或等于 40 ms，2 000 km 之内时延小于或等于 60 ms，3 000 km 之内时延小于或等于 80 ms。

根据 Forrester 发布的物联网应用要求报告^[22]，时延敏感度和带宽要求差异如图 3 所示，在各类应用中，除了 AR/VR 对带宽与时延都有高要求外，在工业互联网、机器控制、自动驾驶等领域中对于时延的要求高于带宽要求。

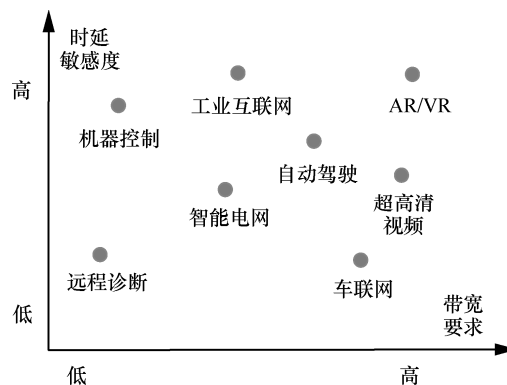


图3 时延敏感度和带宽要求差异

(3) 海量连接管理的挑战

根据爱立信发布的一份物联网预测报告 (Internet of things forecast)，到 2022 年全球将有 290 亿台联网设备，相比于 2016 年的 160 亿台联网设备，其增长率为 10%^[23]，在图 4 中，广域网

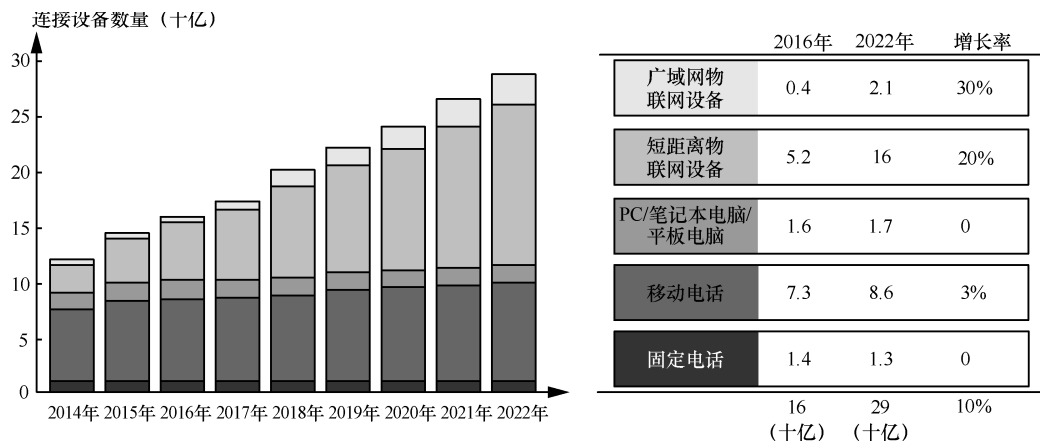


图4 2014—2022 年不同类型连接设备增长速度

物联网设备和短距离物联网设备的增长率分别达到 30%和 20%。基于 5G/B5G 的大连接时代,未来网络需要满足万亿量级的网络连接。

除开海量终端产生的流量汇聚到云端可能带来的带宽瓶颈以外,如此海量终端连接的管理也将是一个巨大的挑战。特别是应用状态维护需要连接保持的信令开销,将给云端服务器带来巨大的压力。如果不能及时处理大规模连接带来的终端信令请求,将引发网络拥塞和瘫痪,甚至发生网络雪崩效应,严重考验互联网的服务能力。

4 面向 2030 年的下一代数据网络

4.1 网络 5.0 网络架构

随着网络向 5G/B5G 时代演进,未来网络中的业务类型将越来越复杂多样,不同的上层业务对服务质量的需求各不相同,甚至可能单一业务的需求也是随着时间地点而灵活变化的^[6]。丰富多变的业务需求无法在网络协议内部表达,只能通过上层接口相互协调、层层翻译,效率极低,准确度差,导致网络无法针对业务需求做出灵活、及时的响应,与未来网络的发展方向极不相称。

网络 5.0 的提出旨在应对未来典型网络应用

对数据网络的需求^[7],作为面向 2030 年演进的未来网络架构,基于新型网络体系架构,协同管理、控制和数据面,使其更加有效地满足万物互联、万物智能、万物感知的需求。网络 5.0 参考架构如图 5 所示,总体目标是连接新网元、探索新协议、构建新管控、支撑新业务^[6-7,24]。

其中,以 NewIP 网络协议体系为代表的新协议体系,将支持多样化寻址、变长地址寻址、网络可编程,通过新数据面协议提供对多种网络和网络资源的灵活寻址能力,这也是网络 5.0 架构最核心的要素^[7]。

4.2 网络 5.0 关键使能技术

(1) 确定性转发

确定性转发是指在现有 IP 转发机制的基础上,提供确定性的时延及抖动保证^[7,25]。确定性转发的主要使能技术为大规模确定性网络(large-scale deterministic network, LDN),通过引入周期调度机制来严格避免微突发的存在,从而保证了确定性时延和无拥塞分组丢失,LDN 技术的异步调度、支持长距链路、核心节点无逐流状态等特点使其适用于大规模网络可部署^[7,24]。

(2) 灵活寻址机制

未来数据网络技术采用全新的灵活寻址机

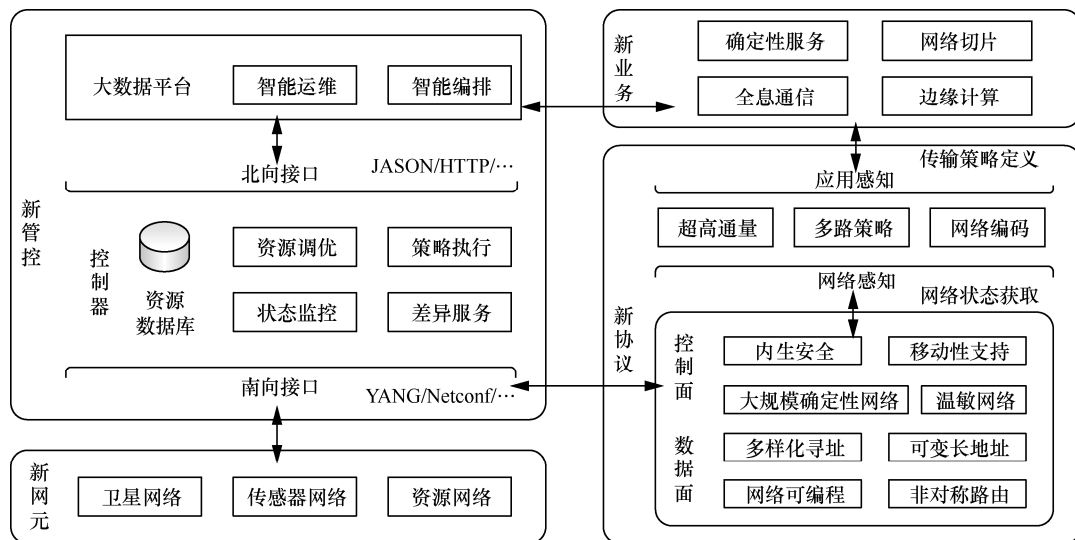


图 5 网络 5.0 参考架构



制,包括可变长的网络地址和多样化的寻址方式和支持网络可编程,从而更好地支撑未来网络业务^[7]。新型的、支持地址长度可变的网络协议将采用变长的、结构化的地址设计,对路由表中的变长地址进行查找,得到报文的下一跳转发地址。在多样化的寻址方式中,网络地址不仅标识主机,还可标识各种虚拟实体及异构节点,如计算资源、存储资源等。路由器既可支持传统的拓扑寻址,又可支持主机 ID 寻址、内容名字寻址、计算名称和参数寻址等^[7]。

(3) 新传输层

下一代数据网络中的新传输层,其目标是支撑未来新型媒体通信模式和潜在高吞吐业务的需求,包括超大吞吐量、并发多路高带宽和传输可定义 3 种关键技术。基于已有的协议基础与技术能力,新传输层技术结合上层业务特征进行对传输策略的表达、感知下层网络性能进行对传输参数的调整和内生地结合其他技术(如编码技术)增强信息本身的抗损和传输能力^[7]。

(4) 面向服务路由

针对现有路由协议中采用基于网络拓扑的单一路由寻址机制,面向服务路由根据服务的类型或标识,减少获取服务的时延^[7]。根据用户获取方和服务提供方的差异化需求实施路由策略,设置双方的标识生成规则,按照特定的生成算法为服务名生成标识,获取服务的路由过程中将不再需要域名解析,达到减少时延的效果。

(5) 其他关键技术

由于不同的业务对网络服务能力的要求不同,未来数据网络将具备灵活定制差异化服务的能力,一方面允许终端用户表达对网络服务的多样化需求,定制网络行为;另一方面,允许用户感知网络状态,并基于网络状态更好地优化业务。根据不同业务应用的协议字段分配不同的虚拟或物理资源,实现根据不同业务需求的灵活部署,支撑网络服务差异化的应用场景和需求。基于意

图的网络可根据人类业务意图,借助人工智能技术进行搭建和操作的闭环网络架构。温敏网络,可根据网络的实时质量迅速给出反应动作,从而优化用户体验和提升网络吞吐。未来网络业务中安全可信的需求主要体现在端到端通信业务安全可信和网络基础设施的安全可信两个方面^[7]。

5 面向 5G/B5G 的智能云化网络架构

5.1 智能云化网络架构

现有互联网服务架构存在集中性能瓶颈和访问距离过长的本质问题,难以适应 5G/B5G 网络出现后的能力飞速提升,容易形成瓶颈,从而阻碍了进一步的发展。网络 5.0 创新协议架构的提出,从底层改变了网络资源的组织管理模式,为网络基础架构的演变注入了新的活力。基于网络 5.0 协议架构及其核心能力,提出一种云网深度融合的新型智能云化网络架构,弥补互联网与 5G/B5G 接入能力之间差距,推动互联网持续演进发展。

图 6 为智能云化网络架构图,智能云化网络的核心思想是利用 ICT 融合发展的趋势,构建计算、存储、网络融合的新型云化信息网络架构,并通过云端服务的微服务化与动态下沉以及访问请求的多元寻址与智能路由,实现云网深度融合,充分发挥 5G/B5G 的潜在能力,最终实现更加高效的新型互联网服务。

智能云化网络的关键核心要素有以下几点。

(1) 网络能力云化

网络能力云化是实现智能云化网络的前提条件。目前的 CT 基础设施主要完成信息的传输,并不参与数据的处理,服务只能在云端的 IT 环境中完成。在智能云化网络架构中,基于虚拟化技术,IT 与 CT 将充分融合,以边缘计算、雾计算等不同的组织形式,让计算和存储能力遍布网络各位置,为泛在化的服务承载奠定基础。

(2) 云服务原子化

对现有集中部署的云服务进行原子化拆分,

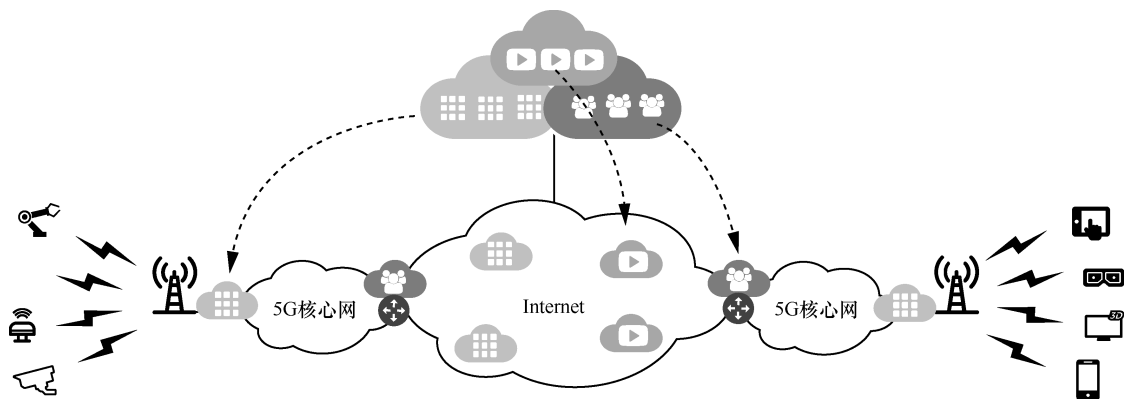


图6 面向 5G/B5G 的智能云化网络架构

形成可以动态组合、调度的微服务单元，并基于 VM、Docker、Unikernel、FaaS 等不同等级、不同颗粒度的虚拟化技术进行封装，使得这些微服务可以在不同的云化智能网络设备上部署、运行。

（3）服务动态下沉

根据终端发出的应用服务请求，相应的微服务单元可以从云端动态下沉至智能云化网络中具备服务能力的智能节点。微服务单元独立或通过相互协同的方式，以尽量贴近终端的方式提供应用服务，使得网络具备泛在的应用服务能力。

（4）资源智能调度

智能云化网络中存在大量具备服务能力的智能节点设备，这些节点的能力远远弱于传统云计算中心，其负载也是动态变化的。智能云化网络需要对这些节点进行智能的管理，根据不同终端用户不同类型的访问请求，调度合适的智能节点来提供相应的服务，并通过微服务的动态加载与取消，提高资源利用效率。

（5）面向服务路由

在智能云化网络中，网络中提供服务的智能节点是动态变化的，传统面向主机地址的寻址和路由方式不再适用。智能云化网络采用面向服务的寻址与路由模式，帮助终端发现网络中的最佳服务节点，并按照应用 QoS 的需求，规划一条到此智能节点的最佳路由完成后续的服务访问。

（6）并行数据传输

根据特定的可以并发服务的应用（如内容服务），智能云化网络可以在网络中为终端定位多个服务提供点，以并发的方式为用户提供服务。或者同时规划多条传输路径，在服务点和终端间并行传输数据，从而大大提升用户体验，提高服务的可靠性与稳定性。

5.2 基于网络 5.0 协议架构实现智能云化网络

网络 5.0 协议架构具备诸多创新特性，十分适合智能云化网络的实现。

（1）利用 NewIP 扩展协议报文，充分表达应用 QoS 需求

不同的应用对于网络能力的需求不同，有的需要带宽高，有的需要时延低，有的需要抖动小（时延确定），有的需要稳定性好（分组丢失率低）。NewIP 在网络层提供了可灵活定义的扩展报文空间，上层应用可以利用这个特性，在网络层协议报文中，充分表达应用对网络能力的需求，便于智能云化网络更好地理解应用需求并通过网络 5.0 的多种技术手段提供差异化 QoS 保证。

（2）利用 NewIP 多元寻址技术，实现面向服务寻址

在智能云化网络中，传统面向主机的 IP 地址寻址不再是唯一的方式。在服务能力遍布网络并动态变化时，面向服务寻址是最佳的寻址方式。利用网络 5.0 的多元寻址及控制技术，可以使用服



务 ID 为微服务进行命名, 并采用服务宣告的方式, 标示微服务所在的位置。NewIP 数据分组通过“Function+Metadata”的扁平化定义框架, 按照服务 ID 在网络中查找可以提供微服务的节点。

(3) 利用面向服务路由技术, 实现智能路由

网络 5.0 提供了面向服务的路由技术, 可以根据微服务在网络中的位置以及携带在 NewIP 报文中的应用需求, 为数据报文找到一条通往智能节点的最佳路由, 并依照应用需求进行静态保障或动态优化。基于 NewIP 协议框架, 甚至可以将微服务程序本身与待处理的数据一起打包传输, 只需在 Metadata 中表明载荷中的哪些报文是程序、哪些报文是数据即可。这样, 微服务不仅可以从云端下沉到网络中, 也可以从终端侧注入网络中, 一旦找到合适的随路节点, 即可连同程序及数据一起卸载下来进行计算, 以最大化地提升服务的效率。

(4) 利用新传输层技术, 实现多路并行传输

网络 5.0 的新传输层中提供了多路传输机制, 可以在服务访问点和服务提供点之间聚合多条传输路径的带宽, 并行传输数据, 提升端到端的数据传输效率。在服务支持并发模式并有多智能节点可以同时提供服务时, 配合网络 5.0 的面向服务路由机制, 可以实现多源的服务并行访问, 如并行内容下载等, 提升服务效率。

5.3 智能云化网络支撑互联网发展新需求

智能云化网络从架构上实现了云网深度融合, 充分拉近了服务与终端之间的距离, 并可以协同网络中的多个服务节点及云端同时为终端应用提供服务, 可以充分发挥 5G/B5G 的性能, 弥补移动接入网与互联网骨干之间的能力差距, 支持互联网持续演进发展。

(1) 满足超高带宽数据传输的需求

基于网络 5.0 的多元寻址、面向服务路由及新传输层技术, 智能云化网络可以聚合网络中多个智能节点的服务能力, 或聚合网络中多条传输路

径的带宽, 为应用终端提供超高带宽的数据传输, 以充分利用无线接入侧 5G/B5G 的超高带宽能力。

(2) 满足低时延服务响应的需求

基于网络 5.0 的多元寻址、面向服务路由及确定性转发技术, 智能云化网络可以将服务下沉到距离终端尽量近的位置, 并根据应用的需求提供确定性时延的保障, 在减少访问距离的同时提供确定性保障, 将无线接入侧 5G/B5G 的低时延特性在互联网中继续保留。

(3) 满足海量终端接入管理的需求

基于网络 5.0 的多元寻址技术, 应用可以将负责信令连接管理的微服务能力下沉到边缘智能节点上。智能节点可以在网络边缘对区域内海量终端的应用连接进行聚合, 只与云端保持少量连接即可维持海量应用信令的传递。同时可以通过将负责数据处理的微服务下沉到边缘, 对海量终端产生的数据进行本地化的清洗、提炼、压缩等操作, 大大降低回传到云数据中心的数据量, 进一步降低云端负载, 支撑 5G/B5G 网络的万物互联。

6 未来挑战与展望

基于文中上述关键技术, 面向 5G/B5G 的智能云化网络能够较好地应对 5G/B5G 发展对互联网带来的挑战。但是, 一种新的架构发展, 也将引入新的挑战。智能云化网络要成为真正的下一代互联网基础架构, 还有以下方面的问题值得关注与研究。

(1) 应用需求与网络能力的准确映射

在智能云化网络中, 可以调度的资源不限于网络资源, 还包括大量智能节点的计算、存储资源以及各种微服务的能力。未来多样化的上层业务对网络能力的需求各不相同, 对 QoS 的要求也会越来越高、越来越精细。智能云化网络要想为每一次的应用访问匹配合适的底层资源及服务能力, 就需要建立起业务需求与网络能力之间的准确映射。

(2) 网络资源的去中心化智能管理

智能云化网络的特点是应用与网络的深度融合,涉及不同的应用提供方、网络建设方、智能节点提供方等多主体之间的资源管理、调度和协同问题。网络 5.0 具备去中心化的网络资源管理机制,可以实现去中心化的资源分配、访问鉴权、费用结算,更加有利于多方的对等协作,实现更加安全、高效的互联网服务模式。

(3) 泛在移动性支持

智能云化网络中,服务被下沉并分布到了网络中,特别是边缘节点处。如果终端快速移动,就会面临在不同的智能服务节点间切换的问题,需要研究如何在高频动态切换下保证正在进行的通信不中断。如根据智能学习,预测终端可能的移动速度和方向,从而选择不同层级的智能节点部署微服务,以降低切换的概率。或者采用新的编程模型,尽量实现无状态或状态分离的服务模型,尽量减少切换带来的中断和时延影响。

(4) 应用服务编程模型

智能云化网络不仅对网络本身带来挑战,对上层应用的编程模型也带来新的挑战。现有编程模型中,数据与计算倾向于以应用为中心,紧密关联,在一台机器或者一个数据中心内完成,不论数据存储模型还是计算调度模型,都以此为前提。在智能云化网络中,微服务模块只服务于少量甚至单个通信实体,且需要根据情况动态部署或随时迁移。在这种情况下,以通信实体为中心的微存储和微计算模型可能更为适合,这可能将带来新一轮编程模型的变革。

7 结束语

本文从未来 5B/B5G 网络场景中的典型需求出发,提出智能云化网络架构,面向高带宽、低时延和大连接等功能特性提出相应的云网融合解决方案并进行了初步探讨。同时对智能云化网络这种架构面临的挑战进行了展望,期待业界更加

广泛地关注,以推动智能云化网络架构在下一代数据网络中不断向前发展。

参考文献:

- [1] IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G concept white paper [S]. 2015.
- [2] 王胡成, 徐晖, 程志密, 等. 5G 网络技术研究现状和发展趋势[J]. 电信科学, 2015, 31(9): 149-155.
WANG H C, XU H, CHENG Z M, et al. Current research and development trend of 5G network technologies[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(9): 149-155.
- [3] SEKANDER S, TABASSUM H, HOSSAIN E. Multi-Tier drone architecture for 5G/B5G cellular networks: challenges, trends, and prospects[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(3): 96-103.
- [4] NASIRIAN S, FAGHANI F. Crystal: a scalable and fault-tolerant Archimedean-based server-centric cloud data center network architecture[J]. Computer Communications, 2019.
- [5] 刘韵洁, 张娇, 黄韬, 等. 面向服务定制的未来网络架构[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2018, 30(1): 1-8.
LIU Y J, ZHANG J, HUANG T, et al. Future network architecture for service-oriented customization[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2018, 30(1): 1-8.
- [6] 蒋林涛. 下一代网络技术研究[J]. 电信网技术, 2015(10): 19-23.
JIANG L T. Research on next generation network technology[J]. Telecommunications Network Technology, 2015(10): 19-23.
- [7] 网络 5.0 产业和技术创新联盟. 网络 5.0 技术白皮书[R]. 2019.
Network 5.0 Industry and Technology Innovation Alliance. Network 5.0 technology white paper[R]. 2019.
- [8] 邹琳琳. 5G 低功耗大连接场景下的能效优化研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
ZOU L L. Energy efficiency optimization in 5G low-power large connection scenario [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [9] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.
- [10] NASER O P, HALEH J B, YASIR I A, et al. Multi-band MIMO antenna design with user-impact investigation for 4G and 5G mobile terminals[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(3).
- [11] 李子姝, 谢人超, 孙礼, 等. 移动边缘计算综述[J]. 电信科学, 2018, 34(1): 87-101.
LI Z S, XIE R C, SUN L, et al. A survey of mobile edge com-



- puting[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(1): 87-101.
- [12] 齐彦丽, 周一青, 刘玲, 等. 融合移动边缘计算的未来 5G 移动通信网络[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(3): 478-486.
- QI Y L, ZHOU Y Q, LIU L, et al. MEC coordinated future 5G mobile wireless networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(3): 478-486.
- [13] XIA W F, WEN Y G, CHUAN H F, et al. A survey on software-defined networking[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 27-51.
- [14] 蒋林涛. SDN/NFV 与网络技术的发展方向[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(6): 2-6.
- JIANG L T. Development directions of SDN/NFV and network technologies[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(6): 2-6.
- [15] CHEN Z, MA X Y, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications[J]. China Communications, 2019, 16(2): 1-35.
- [16] 彭琳, 段亚娟, 别业楠. B5G 毫米波和太赫兹技术的背景、应用和挑战[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(3): 82-86.
- PENG L, DUAN Y J, BIE Y N. Background, applications and challenges of B5G millimeter wave and terahertz technology[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(3): 82-86.
- [17] 张平. B5G: 泛在融合信息网络[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 55-62.
- ZHANG P. B5G: ubiquitous fusion information networks[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(1): 55-62.
- [18] TAO M, WEI Y, WEI T, et al. Communications, caching, and computing for content-centric mobile networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(8): 14-15.
- [19] BILEN T, CANBERK B. Deliver the content over multiple surrogates: a request routing model for high bandwidth requests[J]. Computer Communications, 2019(146).
- [20] LIU G Y, ZHENG Y, WANG F, et al. Latest progress on 5G NR trial of enhanced mobile broad band [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 44-51.
- [21] SCHULZ P, MATTHE M, KLESSIG H, et al. Latency critical IoT applications in 5G: perspective on the design of radio interface and network architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 70-78.
- [22] AMANDA S. Where next for the internet of things[J]. Engineering & Technology, 2015, 10(1): 72-75.
- [23] MOHSEN M, FARIZA N, ABDULLAH G, et al. Big IoT data analytics: architecture, opportunities, and open research challenges[J]. IEEE Access, 2017(5): 5247-5261.
- [24] 郑秀丽, 蒋胜, 王闯, 等. 对网络技术跨代发展的思考—网络 5.0[J]. 信息通信技术, 2017, 11(6): 39-46.
- ZHENG X L, JIANG S, WANG C, et al. A potential direction of next generation data communication network-network 5.0[J]. Information and Communications Technologies, 2017, 11(6): 39-46.
- [25] 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.

[作者简介]



周旭 (1976—), 男, 博士, 中国科学院计算机网络信息中心先进网络技术与应用发展部主任、研究员, 全国信息技术标准化技术委员会委员, 四川大学计算机学院客座教授, 主要研究方向为未来网络、5G 移动网络、大数据技术等。

李琢 (1994—), 男, 中国科学院大学博士生, 主要研究方向为未来网络技术、移动边缘计算和软件定义网络等。

覃毅芳 (1984—), 男, 博士, 中国科学院计算机网络信息中心先进网络技术与应用发展部网络体系结构与系统实验室副主任、高级工程师, 主要研究方向为软件定义网络、移动边缘计算技术、内容中心网络等。