

高通量数据网演进关键技术



Key Technologies of High-Goodput Data Network Evolution

韩梦瑶/HAN Mengyao^{1,2}, 燕飞/YAN Fei²,
曹畅/CAO Chang¹, 庞冉/PANG Ran¹

(1. 中国联合网络通信有限公司研究院, 中国 北京 100048;
2. 中国联合网络通信集团有限公司, 中国 北京 100033)
(1. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China;
2. China United Network Communications Group Corporation Limited,
Beijing 100033, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202406003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250109.1329.008.html>

网络出版日期: 2025-01-09

收稿日期: 2024-10-12

摘要: 面向智能算力与海量数据复杂交互的高性能传输需求, 提出了高通量数据网架构及关键技术, 通过提高单位带宽下的数据传输体量, 解决传统网络传输中遇到的成本高昂和传输时效性差的问题。采用所提架构中的广域流量调度技术、智能管控运维技术、传输协议优化技术、数据压缩与安全保障等关键技术, 实现广域网络弹性带宽分配, 提升了网络传输通量与效率。在现网环境开展海量数据超3 000 km传输测试, 验证了高通量数据网架构及关键技术的可行性。

关键词: 高通量数据网; 流量调度; 传输协议; 弹性带宽

Abstract: In order to meet the high-performance transmission requirements of a complex interaction between intelligent computing power and massive data, a high throughput data network architecture and key technologies are proposed. By increasing the data transmission volume under unit bandwidth, the problem of high cost and poor transmission timeliness encountered in traditional network transmission is solved. The key technologies in the proposed architecture, such as wide area traffic scheduling technology, intelligent management and control operation and maintenance technology, transmission protocol optimization technology, data compression and security assurance, are used to realize the elastic bandwidth allocation of the wide area network and improve the network transmission flux and efficiency. The massive data transmission test over 3 000 km was carried out in the existing network environment, which verified the feasibility of the high-throughput data network architecture and key technologies.

Keywords: high-goodput data network; flow scheduling; transport protocol; elastic bandwidth

引用格式: 韩梦瑶, 燕飞, 曹畅, 等. 高通量数据网演进关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(6): 10-15. DOI: 10.12142/ZTETJ.202406003

Citation: HAN M Y, YAN F, CAO C, et al. Key technologies of high-goodput data network evolution [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(6): 10-15. DOI: 10.12142/ZTETJ.202406003

1 算力时代海量数据迁移新需求

近年来, 随着大数据、人工智能、移动互联网、云计算等新一代信息技术的应用普及, 数字经济发展速度之快、辐射范围之广、影响程度之深, 正深刻改变着经济社会的发展进程^[1]。算力作为数据处理能力的集中体现, 已成为数字经济时代的核心生产力。数字经济的发展带来海量的数据, 对数据的存力服务、算力服务和运力服务提出更高的要求。只有数据“存得好”、算力“算得快”、网络“传得稳”, 数据才能充分发挥其生产要素价值^[2-3]。为了更好地整合算力资源, 提高算力基础设施的利用率, 算力经济利用云计算、大数据、人工智能等技术, 将算力资源集中配置或者部

署到云端, 从而提高效率和降低成本。因为在此过程中产生了用户侧海量数据的迁移与存储需求, 所以如何将用户侧海量的大数据以合理的成本、合理的时效传输到存力/算力基础设施, 成为算力经济发展的新需求。随着数据量的增长和数据处理速度的需求增多, 越来越多的数据迁移解决方案不断涌现, 如东数西算和超智算承载。

1) 东数西算

东数西算工程将东部地区的非实时算力需求以及大量生产生活数据输送到西部地区的数据中心进行存储、计算并反馈^[4]。按照数据处理对实时性的要求, 可将数据分为热数据、冷数据以及介于二者之间的温数据3种。其中, 热数据主要包括工业互联网、自动驾驶、远程医疗、灾害预警等产生的需要被计算节点频繁访问的数据, 由于热数据对实时性要求较高, 所以不适合进行远距离传输; 冷数据主要是对后

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2024M763570); 国家重点研发计划项目 (2023YFB2904201)

台存储、批量备份等存储要求高，但对实时性要求不高的数据。冷数据与温数据非常适合“西算”和“西存”，如图1所示。如何将这些“冷数据”或“温数据”以合理的成本、合理的时效传输到西部存储节点，是目前急需解决的问题^[5]。

2) 超智算承载

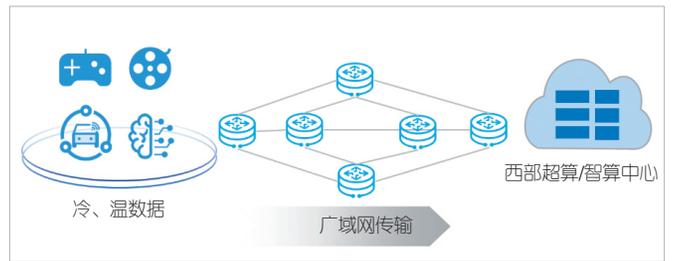
随着网络游戏、影视媒体等业务的快速发展，云游戏、扩展现实(XR)、视频媒体制作等视频渲染需求日益旺盛，需要先通过传输网络数据实时传送到远端算力节点进行演算，再将结果返回到用户侧进行调取使用。此类业务对存力、算力要求高，传输数据量大，如图2所示。为降低算力资源的使用成本，需要将训练数据和训练任务通过网络调度到智算中心进行处理。

海量数据的迁移可以有效整合数据资源和算力资源，但是同时也对传输网络提出新的挑战。目前海量大数据迁移主要有两种方式：通过快递存储介质线下迁移、通过运营商网络线上迁移。但是前者仍然存在着运输成本高、时效性不足、拷入拷出复杂繁琐等问题，同时因为硬盘等存储介质离线搬运，会面临数据损毁、数据泄露等安全风险；后者在应对周期性、临时性大规模数据迁移任务时，存在租用时长无法满足要求、租用大带宽专线成本过高、传输效率受限等问题。不同数据量在不同带宽情况下的理论传输时长如表1所示。

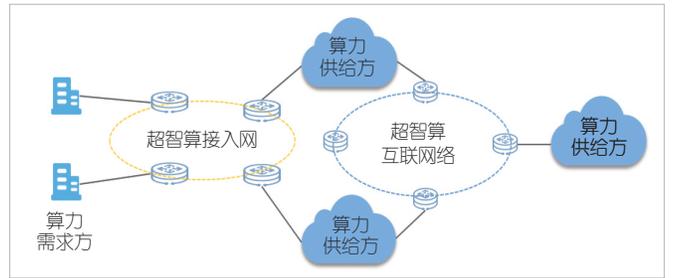
2 高通量数据网架构

高通量数据网通过构建服务运营、高通量管控、高通量协议和基础设施4层架构^[6]，提供高通量大数据传输能力，满足算力时代各种应用场景下的数据迁移、同步、协作等需求，实现传输效率与成本的最佳匹配，如图3所示。

基础设施层提供支撑高通量数据传输所需的端侧、网络侧、云侧等软硬件资源，是运力的物理载体，它包括应用终端、承载网以及算力中心，如图4所示。基础设施层在用户和算力、存力间构建起一张按需互联、弹性敏捷的运力网络，支撑算力/存力的灵活调度，针对不同用户对算力、存力的需求，提供并匹配最佳的资源和



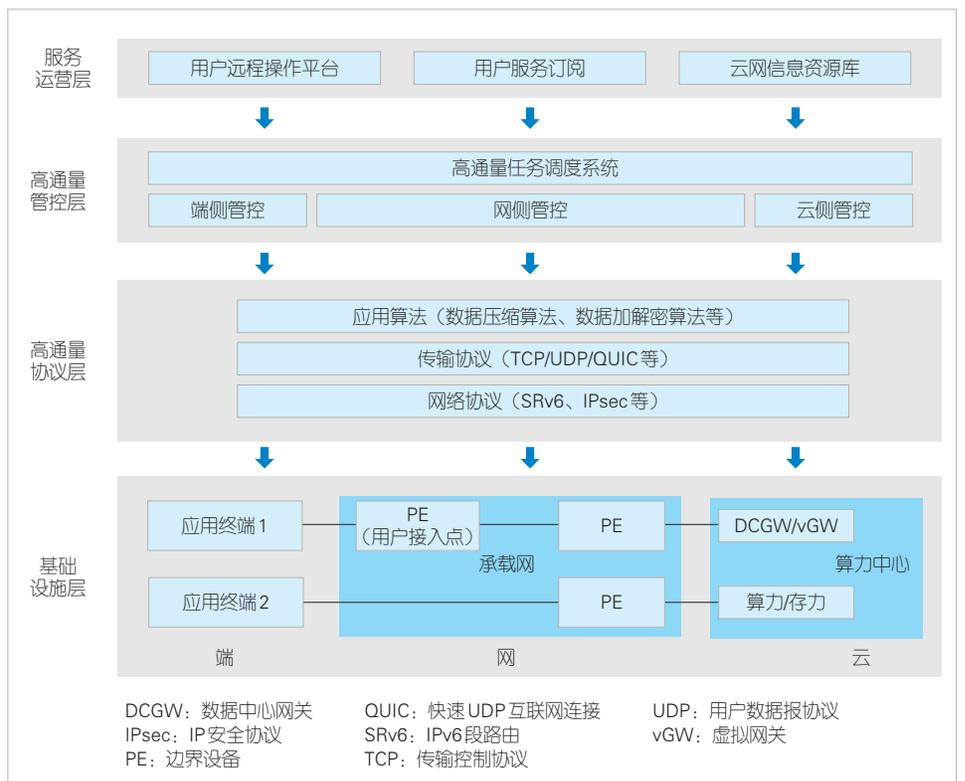
▲图1 东数西算冷温数据传输



▲图2 超算/智算承载场景

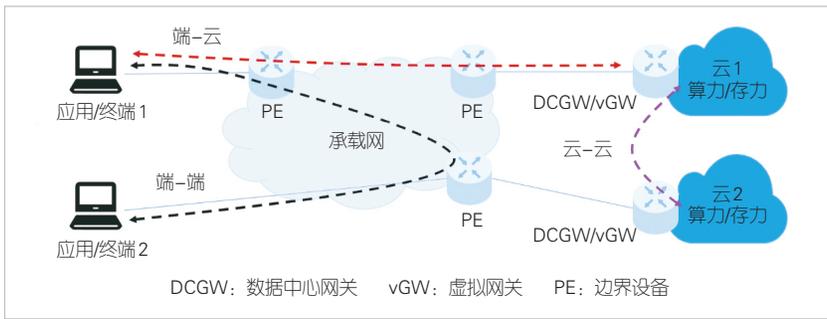
▼表1 不同数据量在不同带宽情况下的理论传输时长

数据量	理论传输时长		
	100 Mbit/s 带宽	1 Gbit/s 带宽	10 Gbit/s 带宽
10 TB	12 d	29 h	3 h
100 TB	121 d	12 d	29 h
1 PB	1 243 d	125 d	12 d



▲图3 高通量数据网架构

DCGW: 数据中心网关
IPsec: IP安全协议
PE: 边界设备
QUIC: 快速UDP互联网连接
SRv6: IPv6段路由
TCP: 传输控制协议
UDP: 用户数据报协议
vGW: 虚拟网关



▲图4 高流量数据网业务流

服务。

高流量协议层包括高流量网络协议、高流量传输协议和高流量应用算法。高流量网络协议需要具备增强网络精准感知能力、流量动态调整能力和基于任务的智能管控调度能力，以实现网络带宽资源充分利用和高吞吐传输；高流量传输协议需要通过多路径并发、精细化控制和智能管控等技术实现数据传输优化，确保高效可靠的数据传输；高流量应用算法关注基于智能化应用算法对数据进行差异化加工，通过存算网协同和高效数据压缩机制最大化降低信息熵，以保证数据归一化和兼容性。

高流量控制层通过编排调度与高流量协议的配合，提供基于任务的智能管控调度能力，实现 Overlay 层面的业务层选路与 Underlay 层面的快速开通、整网流量均衡、弹性带宽供给，为用户提供高效、优质的高流量数据传输服务。

服务运营层提供面向最终用户的服务订阅和自助操作能力。使用大数据迁移服务的用户，可以通过运营商提供的服务平台自助订阅线上服务。用户操作平台可以对待传输数据，以及待传输数据的时间计划进行管理配置，查看数据传输进度。云网信息资源库可根据企业分支位置、云池资源找到最匹配的网络路径，也可以根据租户的服务水平协议（SLA）要求，推荐最优路径或最优套餐，实现一体化服务订购。

3 高流量数据网关键技术

3.1 广域流量调度技术

3.1.1 SRv6 网络编程技术

SRv6 技术结合了源路由优势和 Native IPv6 简洁易扩展的优点，具备强大的可编程能力和可扩展性，与软件定义网络（SDN）等技

术结合，可很好地满足业务快速开通、路径确定性编排、高流量数据传输的需求^[7]。

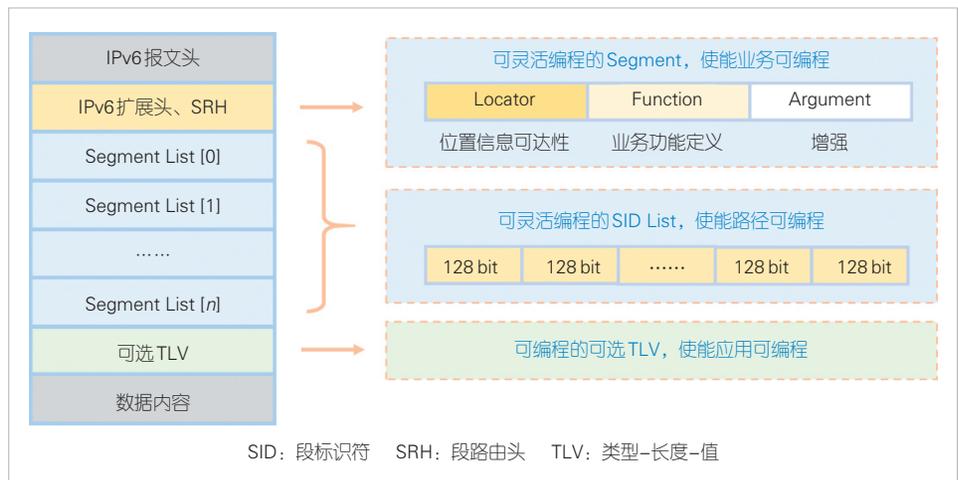
通过结合 SDN 技术，SRv6 可以实现快速灵活的跨域业务开通，简化跨域业务的部署。网络控制器仅需在边界设备（PE）上分别下发 SRv6 隧道和业务虚拟专用网络（VPN）实例，实现业务的快速配置，使业务开通的时间由几天减少到分钟级，实现用户动态、敏捷、按需的业务开通。

SRv6 通过灵活的 Segment 组合、Segment 字段、TLV（指类型、长度和值）组合实现 3 层编程空间，具备强大的可扩展性^[8]，如图 5 所示。通过源路由机制携带指定转发路径和行为，可实现整网流量路径的统一规划，从而建立满足全局视角的最佳转发路径，最大程度释放网络的价值。

在成本可控的前提下增加带宽资源供给，是实现高流量传输的核心问题。充分利用网络闲置资源，理论上可成倍提升数据传输通量。SRv6 的分段路由和源路由特质，使其天然具备流量工程能力。如图 6 所示，利用 SRv6 Policy 多 List 技术，基于整网网络拓扑结构可编排出不重叠的多条路径。基于 SRv6 的流量工程能力，引导流量从多路径并发传输，从而实现闲置资源的最大化利用。

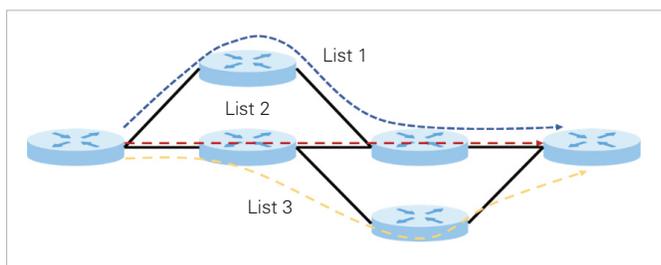
3.1.2 流量识别与引流

依托当前立体泛在的算力基础设施提供高流量数据迁移服务，需要网络根据不同任务的优先级，提供差异化弹性服务。随着应用感知型 IPv6 网络（APN6）等技术的发展，可按照不同的网络带宽、时延等 SLA 需求对任务式高流量数据迁移业务流量进行标识。通过在端侧携带 APN 扩展头到网络侧，网络侧自动完成业务拆分识别、引流，实现数据迁移



SID: 段标识符 SRH: 段路由头 TLV: 类型-长度-值

▲图5 SRv6 三层编程空间



▲图6 基于SRv6 Policy多List的端到端带宽聚合

业务与普通业务的差异化任务拆分。

通过采用动态网络负载均衡技术，可基于五元组识别出大象流或流组，结合可用资源实时感知技术，分析不同分担路径的实时负载利用情况，进行资源匹配，将高负载路径上的特定大象流调整到低负载路径上。这样不仅可以避免传统哈希算法的缺陷，还能避免路径拥塞导致业务时效性等要求不能满足或利用率低导致带宽浪费的情况，实现全网各路径带宽资源的充分利用，提供精准负载调节能力。

3.1.3 广域拥塞感知与控制

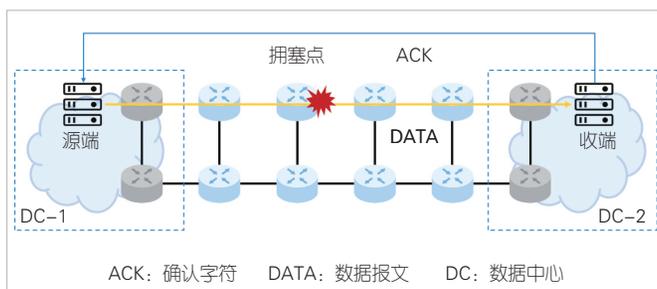
目前网络侧的拥塞状态无法被端侧的传输协议层实时感知，为了保障广域大数据高吞吐传输，需要充分利用网络侧设备的能力，形成新型广域拥塞控制技术，在网络侧直接获取准确的拥塞状态，并根据全局流量信息进行统一速率调控，同时利用反向通告实现亚往返时延（Sub-RTT）控制回路，从而达到及时、准确拥塞控制的效果，如图7所示。

拥塞控制技术的主要实现方式包括网络状态感知和在网流量控制^[9]：前者通过利用包括本地队列缓存使用状态和远端RTT变化等信息，使网络设备对拥塞状态进行在网实时感知，作为精细化准确速率控制的基础；后者通过设备感知全局流量状态，并基于此调节反向确认字符（ACK），进行低开销差异化控速，最终实现公平快速收敛。

3.2 智能管控技术

3.2.1 可用带宽资源实时感知

现网中的网络流量呈现明显的时空特征。从空间上看，西部与东部、城区与乡镇、热点区域与稀疏区域之间，在网络流量峰值和均值上都存在较大的差异性；从时间上看，网络资源利用率呈现明显的波峰波谷特征。此外，网络中的不确定性突发也会加剧网络负载的时空不均衡。通过实时感知技术，系统可实时采集网络中各条路径的带宽变化、流量变化趋势、异常事件及可用资源情况，用以支撑网络资源调度。



▲图7 广域传输拥塞感知与控制

3.2.2 流量智能调度

智能管控系统支持根据历史带宽数据、分时采样数据等，预测未来背景流量峰值和持续时间、潜在拥塞点等信息，计算出最佳流量路径，使所计算出来的路径结果能够应对较长时间范围内的背景流量波动，降低路径优化频率，提升传输的稳定性。该系统同时还支持基于用户需求和算力全局信息的最优路径推荐和最优套餐推荐，通过网络多路径编排、网络动态负载均衡、端网协同高吞吐等技术实现高通量数据传输，满足业务多样化体验要求。

3.3 传输协议优化技术

3.3.1 基于TCP的传输协议优化

传输控制协议（TCP）当前的拥塞控制方案影响网络吞吐的主要挑战有：拥塞控制机制相对保守，在高延迟或丢包较多的网络环境中，传输性能可能会受限；一个数据包的丢失或损坏会影响整个数据流的传输速度和效率；拥塞控制回路长，拥塞感知不及时；拥塞感知信息少；端侧拥塞控制动作无差异，端侧局部视角无法感知其他流量状态，无视自身速率，统一速率调整，可能导致不公平、收敛慢。

业界基于以上挑战开展了大量基于TCP的传输协议优化研究，例如：通过多路径TCP实现单流多路径数据传输^[10]，充分利用网络资源，实现更高速率的数据传输；采用瓶颈带宽和往返传播延迟（BBR）拥塞控制算法，实现数据发送速率控制，即使在轻微丢包的传输链路上也能维持较大的发送窗口，以此提高数据传输的稳定性和效率；通过TCP代理解决终端侧TCP协议栈修改困难的问题，通过分段式传输来提升数据穿越广域网的传输效率。

3.3.2 其他传输协议的优化

业界基于用户数据报协议（UDP）的协议提出了多种优化方案^[11]，例如：1）可靠的快速UDP（RBUDP）协议，通

过发送端用TCP发送完成信号表明数据包传送完毕，来实现对所有数据的接收；2) Tsunami协议，通过周期性地对未收到的数据分组发送 Negative ACK，同时通过基于丢包率的拥塞控制机制，保证网络传输性能；3) 基于UDP的数据传输协议(UDT)协议，设计和实现了功能和效率满足需求的传输协议，同时具备可应用于互联网的拥塞控制算法，保证效率、公平性和稳定性。

以谷歌快速UDP互联网连接(gQUIC)/华为快速UDP互联网连接(hQUIC)等为典型代表的新型传输协议，在文件传输场景具备以下独特优势：快速连接机制、多路复用机制、新的序号和确认机制、纠错机制^[12]。快速UDP互联网连接(QUIC)协议可以作为客户端应用程序(APP)与传输优化设备，以及独立传输优化设备之间的通信协议，如图8所示。基于QUIC协议框架和待传输内容的特点，系统可针对性地进行扩展和增强，以满足不同应用场景对传输性能的需求。

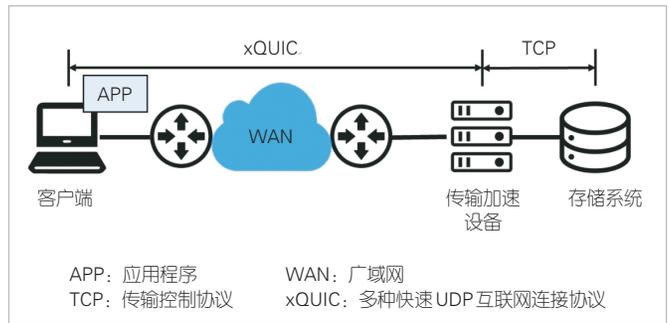
3.4 数据智能压缩技术

数据压缩可以减少网络内的数据传输量，尤其是在需要穿越广域网且出口带宽有限的情况下，数据压缩可以显著提升传输速度，缩短传输时间，以实现低传输成本的目标。数据压缩的原理是通过消除或减少数据中的冗余信息来减小数据的表示大小，根据信息恢复完整度可以分为无损压缩和有损压缩两种类型。常见的无损压缩算法有：字典压缩算法，如LZ77、串表压缩算法(LZW)等；熵编码算法，如霍夫曼编码；预测编码算法，如Delta编码。

对于不同的数据传输类型，例如文本、音频和视频，特定的结构化数据可采用不同的策略，也可采用在线学习的方式，根据当前的传输环境和整体的传输要求，动态地选择最适合的压缩算法，以适应不同数据传输类型的需求。在软件定义框架下，压缩算法的定义和编排由管控系统来完成。管控系统根据传输任务的要求和网络环境的实时情况，选择合适的压缩算法，并将其应用于相应的数据传输节点。这种灵活性和自动化的决策过程使得数据传输系统能够根据实际需求和情况进行优化，提升整体数据传输的效率。

3.5 数据传输安全保障技术

为了保障敏感业务的传输安全，可以通过网络切片技术实现专属资源转发。转发面使用FlexE灵活以太技术实现细粒度带宽资源硬



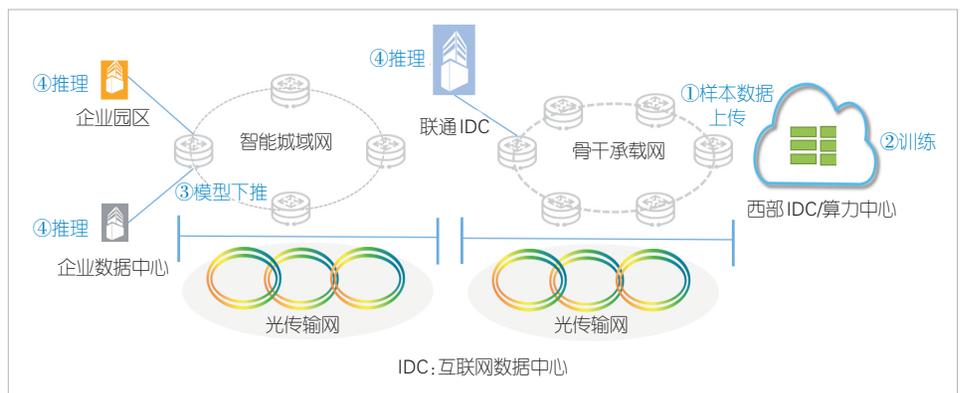
▲图8 客户端和云端传输优化设备部署使用xQUIC通信

隔离。控制面采用分布式网络切片控制协议标识设备硬件预留资源，实现安全隔离，保障传输全程可信安全。但此类隔离能力成本较高，用户可按需选择。

以强化网络内生安全为目标，防止网络传输数据窃取、终端设备仿冒、路由劫持和分布式拒绝服务(DDoS)攻击等安全风险，承载网络路由器目前从以下几个方面加强安全防护：1) 通过管道加密、管理协议强认证和加密算法等措施，保护用户数据和认证数据安全，例如使用基于IP安全协议的通道认证及加密传输等技术；2) 路由器支持路由安全措施，在建立路由协议邻居关系时对身份进行认证，支持HMAC-SHA256高强度认证算法，以及通过keychain动态更改密码链，同时在学习和发布路由时进行校验，确保对等体可信，保障路由路径信息不被篡改；3) 构筑协议秒级防攻击能力，保证网络对短时强DDoS攻击的防护能力。

4 高通量数据网传输能力测试分析

面向海量数据高效传输需求，我们开展了实际传输距离超过3 000 km的海量数据广域高通量传输验证。现网测试验证结构示意图如图9所示。基于中国联通覆盖中国的169骨干互联网，本次测试是将上海智算业务训练数据导入宁夏中卫智算训练集群的典型“东数西算”场景。



▲图9 高通量数据网现网验证示意图

针对高通量数据网部分测试数据的简要分析如下:

1) 网络弹性带宽。测试实验验证了基于IP承载网络的3 000 km海量数据任务式长距传输,通过任务式传输能力调用IP网络闲时带宽,支持用户传输带宽从100 Mbit/s到 $N \times 1$ Gbit/s的智能弹性调整(10~300倍)。

2) 传输协议优化。通过采用传输协议参数优化、数据智能切分/合并、多流并发技术,相同带宽下超大文件传输效率比现有传输能力提升4倍以上。针对数据传输流量与现网业务流量的带宽资源竞争问题,仍需要研究优先级保障的拥塞控制技术,避免影响其他高优先级业务。

3) 多地协同传输。本次测试验证了基于SRv6协议的IP骨干网路径可编程能力,实现了上海-广州-宁夏三地协同、4条并发路径的高通量数据传输,为未来多地协同、超高通量传输奠定了技术基础。

4) 存运协同。实验分析了不同硬盘配置对海量数据传输性能的影响。结果表明,网络能力应该与存储能力匹配,同时应充分利用网络的带宽。然而,存运协同相关问题仍需要解决,以进一步提升海量数据的传输能力。

5 结束语

高通量数据网是面向算力时代的运力增强需求。本文中我们提出了网络承载、智能管控、端侧优化协同演进方向,通过3 000 km的海量数据广域传输试验验证了高通量数据网架构的合理性。实验结果表明,广域流量调度、智能管控、传输协议优化等关键技术具有可行性,能够实现网络有效带宽最大化、传输效率最大化、网络丢包最小化、现网影响最小化。面向未来,高通量数据网需要以现有网络为基础,以支撑算网产品化创新为目标,充分挖掘网络潜力,提升网络资源利用率,增强网络的传输能力,助力“东数西算”国家战略的实施落地,以高品质智算互联网赋能人工智能产业,加快形成以数字化、网络化、智能化为特征的新质生产力。

参考文献

- [1] 汪玉凯. “数据要素×”与“东数西算”: 全国一体化算力网建设的关键[J]. 人民论坛, 2024(8): 52-56
- [2] 2023中国算力大会. 中国存力白皮书(2023年)[R]. 2023
- [3] 华为. 数据存力: 高质量数据发展的数字基石[R]. 2022
- [4] 中国智能计算产业联盟. 东数西算下新型算力基础设施发展白皮书[R]. 2022
- [5] 中国联通研究院. 面向“东数西算”的算力网络关键技术白皮书[R]. 2022
- [6] 中国联通研究院. 高通量数据网架构及关键技术白皮书[R]. 2023
- [7] 华为. SRv6 [EB/OL]. (2024-08-12)[2024-10-25]. <https://support.huawei.com/enterprise/zh/doc/EDOC1100193023>
- [8] SHIMATANI S, KASHIWAZAKI H, NOBUKAZU I. SRv6 network

- debugging support system assigning identifiers to SRH [C]// Proceedings of IEEE 47th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC). IEEE, 2023: 518-525. DOI: 10.1109/COMPSAC57700.2023.00075
- [9] PENG F, LU B C, SONG L, et al. PACC: perception aware congestion control for real-time communication [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). IEEE, 2023: 978-983. DOI: 10.1109/ICME55011.2023.00172
- [10] TRAN V H, SADRE R, BONAVENTURE O. Measuring and modeling multipath TCP [M]// Intelligent mechanisms for network configuration and security. Cham: Springer International Publishing, 2015: 66-70. DOI: 10.1007/978-3-319-20034-7_8
- [11] CHOUDHARY G K, KANAGARATHINAM M R, NATARAJAN H, et al. Novel MultiPipe QUIC protocols to enhance the wireless network performance [C]// Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2020: 1-7. DOI: 10.1109/wcnc45663.2020.9120821
- [12] 王继昌, 吕高锋, 刘忠沛, 等. QUIC传输机制与应用综述[J]. 计算机工程, 2023, 49(6): 1-12 DOI: 10.19678/j. issn. 1000-3428.0065493

作者简介



韩梦瑶, 中国联合网络通信有限公司研究院博士后; 主要研究领域为下一代互联网架构演进与关键技术研究。



燕飞, 中国联合网络通信集团有限公司网络运营事业部工程师; 主要研究领域为IP网络技术, 负责IP骨干网网络运维等工作。



曹畅, 中国联合网络通信有限公司研究院下一代互联网研究部总监, 正高级工程师; 主要研究领域为算力网络、IPv6+网络新技术、未来网络体系架构等研究工作。



庞冉, 中国联合网络通信有限公司研究院数据通信首席研究员; 主要研究领域为下一代互联网架构演进与关键技术研究。