

面向算网融合的数据处理单元 (DPU)技术探索与实践

Exploration and Practice of Data Processing Unit (DPU) Technology for Computing and Network Convergence

朱威¹,王友祥¹,杨文聪¹,曹畅¹,陈硕²(1. 中国联通研究院,北京 100048;2. 联通数字科技有限公司,北京 100031)
Zhu Wei¹,Wang Youxiang¹,Yang Wencong¹,Cao Chang¹,Chen Shuo²(1. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China;2. China Unicom Digital Technology Co.,Ltd., Beijing 100031, China)

摘要:

DPU是集成算力和网络芯片的一种新型算网基础设施,通过“特定芯片执行特定任务”,对CPU、GPU等现有计算单元处理低效和难以处理的任務进行卸载和加速。首先,介绍了云计算及下一代互联网融合领域面临的问题,并由此引出DPU的软硬一体化能力和潜在关键技术。其次,介绍了DPU在算网融合典型场景中的应用方向及中国联通的研究实践。最后,总结梳理了DPU在国内外标准化组织的相关研究进展,并建议持续推动DPU关键技术的研究和标准化工作。

Abstract:

Data processing unit(DPU) is a new type of computing network infrastructure that integrates computing power and network chips. By enabling “proprietary chips for proprietary tasks”, it offloads and accelerates inefficient or challenging tasks from existing computing units such as CPUs and GPUs. It first introduces the problems faced by the integration of cloud computing and the next-generation Internet, and then introduces DPU's software and hardware integration capabilities, potential key technologies. Next, it introduces DPU's application directions in typical scenarios of computing network integration and China Unicom's research practice. Finally, the relevant research progress of DPU in standardization organizations at home and abroad is summarized, and it is suggested to continue promoting the research and standardization of key technologies of DPU.

Keywords:

Integration of computing and networking; Data processing unit; Cloud computing; Next generation Internet

引用格式:朱威,王友祥,杨文聪,等. 面向算网融合的数据处理单元(DPU)技术探索与实践[J]. 邮电设计技术,2025(10):76-81.

关键词:

算网融合;数据处理单元;云计算;下一代互联网

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.10.014

文章编号:1007-3043(2025)10-0076-06

中图分类号:TN919

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

算网融合是一种算网基础设施技术体系,通过整合算力与网络资源,实现算力资源的高效利用和网络传输的协同优化^[1]。随着云计算、智算业务的迅猛发展,出现了诸如内核态处理网络传输、智算节点间

RDMA传输优化等现有算力难以处理的任務,面向算网融合的数据处理单元(DPU)技术的持续演进成为必然。

DPU是算网融合在算力端的具体体现,它在智能网卡的基础上增强了网内计算能力,并通过计算、存储、网络、管理、安全软硬一体化技术融合,达到算力与网络资源的协同优化^[2]。DPU赋能算网融合在算力端侧的实现,并为算力节点、算力节点之间的网络传

收稿日期:2025-09-22

输提供优化锚点。

1 DPU研究背景

算网融合以通信网络设施与计算设施的深度协同发展为基础,深度融合计算、存储、网络资源,协同优化云、边、端的算网基础设施^[2-3]。算网融合通过基础设施融合、平台层智能调度、服务层应用创新,实现算力与网络的原子级融合,提供弹性敏捷、泛在随需、全域智能的算力服务,实现算网深度协同处理任务,提高计算效率和性能。

随着云计算和智算业务的发展,算力节点逐渐凸显出诸多问题,如虚拟化层对CPU资源的争抢和算力损失、裸金属无法弹性扩展、服务器上算力资源演进难以匹配网卡的发展速度、虚拟化层增加安全暴露面等。同时,伴随着AI训推模型的发展,流水线并行、数据并行及张量并行等对网络带宽的需求将达到100 Gbit/s以上,当网络丢包率增加,GPU有效计算时间占比将下降。上述问题对算力端侧提出了更高的要求,如何实现算力使用率最大化、高效调度、算网协同、数据安全、高效传输成为亟待变革的方向,算力端侧需要具备在现有服务器物理机部署模式下算网协同优化的能力,推动现有服务器物理机向促进节点间算网协同方向转变,算力节点从传统的CPU、GPU负责计算、网卡负责处理网络的模式,向算网融合的方向演进。

算网融合前期的研究主要关注平台层智能调度、服务层应用创新,随着云计算和面向网络发展需求的演进,算网融合在算力端的产物DPU开始出现。2016年Fungible提出DPU概念,旨在通过专用硬件加速数据中心的存储、安全和虚拟化功能,寻求实现由通用计算服务器、GPU服务器和存储服务器组成的可组合基础设施^[4]。Linux基金会成立OPI项目,推动DPU架构和接口标准化,提升应用程序的可移植性和性能。DPU是算网融合在基础设施算力端侧的具象化体现,以传统网卡及其提供的可编程芯片为基础,在实现服务器节点网络传输的同时,通过卸载CPU的计算、网络、存储、安全、管理等任务,释放算力资源,提升数据中心整体效率,成为算网融合的重要组件。

2 DPU的软硬一体化能力和潜在关键技术

DPU是面向算网融合的云计算及下一代互联网融合领域数据中心算网融合新阶段发展的产物,是算

力与网络的加速单元,可实现硬件级加速、减少数据搬运、安全控制等。DPU从基础网卡、智能网卡逐步演进而来,正以更加底层的数据处理及应用部署方式满足算力互联业务对“算存网管效安”的需求,从而释放数据价值,加速推进云计算及下一代互联网融合发展。DPU的软硬一体化能力发展方向多样,其硬件结构主要为PCIE外设卡形态,受性能规格、功耗散热等的影响,有单宽、双宽等不同的产品方案;从硬件架构角度,常见方案有NP/MP+CPU、FPGA+CPU、ASIC+CPU以及集成度较高的DPU SoC。NP/MP+CPU网络处理及多核并行处理能力出色,适合处理复杂网络协议和数据流;FPGA+CPU灵活性和可重配置性高,用户可依需求定制硬件逻辑,适用于快速迭代和变化的场景;ASIC+CPU专注于特定任务的高性能和高效率,但灵活性有所降低,适合大规模生产及高性能要求的应用。

DPU的软硬一体化能力融合了网卡功能、可编程性、专用算力芯片和轻量化设计等特性,并基于此打造了专属芯片与软件协同的开发部署环境,适用于“特定芯片执行特定任务”的加速场景。相比智能网卡(SmartNIC),DPU卡基于“软件定义、硬件加速”的理念,在硬件加速架构上增加了更加灵活可编程的通用处理单元,将传输、存储等功能从服务器的CPU卸载至网卡上^[5]。DPU协同处理云化管理、计算和安全等任务是实现虚拟机、容器、裸金属服务管理方案统一以及云基础设施统一的关键^[6]。DPU的通用处理芯片负责处理控制平面业务,而专用处理芯片则确保数据平面的处理性能,实现了处理性能与通用性的均衡。在云计算业务中,DPU的专用处理芯片用于应对通用基础设施虚拟化带来的性能瓶颈和下一代互联网赋能云计算新技术程序的部署,而通用处理芯片则确保了DPU的通用性,使其能够广泛应用于云基础设施的各类场景,使虚拟化软件框架能够通过DPU卸载部署。DPU旨在解决的核心问题为:将CPU处理效率低且GPU难以处理的计算任务转移到DPU上,提升整个计算系统的效率,满足业务对算力和网络的需求,并降低系统的总体拥有成本^[7]。

DPU单芯片内集成了网络加速、存储管理、安全加密等模块,形成多异构融合架构,潜在关键技术目前主要集中在基础设施融合、平台层调度融合赋能以及安全能力增强3个方面。基础设施融合表现为服务器端侧的算网融合,通过硬件卸载CPU的网络协议处

理达到算网融合、网络优化,行业内潜在关键解决方案技术为基于DPU的存储拉远;平台层调度融合赋能表现为网络、计算、存储管理面的融合调度,通过硬件卸载Hypervisor与SDN关联模块达到算网融合、算力释放,行业内潜在关键解决方案技术为基于DPU的云基础设施共池管理;安全能力增强主要表现为专有安全芯片加速处理数据加密、安全管控,通过集成加密引擎和访问控制单元来实现数据传输端到端加密,从而达到算网融合、内生安全,行业内潜在关键解决方案技术为基于DPU的安全增强。下面本文对这3种潜在技术进行分析描述。

a) 基于DPU的存储拉远技术主要为通过芯片级架构创新与功能集成,将存储、网络2项原本由服务器CPU承载的关联组件卸载到DPU,并利用软硬件协同设计,实现专用硬件与软件的协同,达到算网融合。存储I/O方面主要包括NVMe、Virtio以及NVMe-oF、iSCSI等协议的卸载,可以通过DPU硬件加速,降低延迟并加快数据处理速度,通过标准的或二次封装的NVMe/Virtio-blk等类型接口供裸金属服务器访问,从而实现裸金属服务器访问远端的存储集群。在数据传输环节,DPU能够通过硬件处理来完成去重、压缩与解压、加密及解密等操作,降低软件开发的负担,同时增强存储的额外功能。此外,DPU支持标准PFC/DCQCN流控调度算法以及自定义RTT算法的集成部署。这使得它在通过RDMA网络直接进行数据传输时,能够实现低延迟和低数据传输波动。对于那些需要高性能和高可靠性的应用场景来说,这一点至关重要。同时,RDMA技术能够充分利用DPU硬件加速功能,从而避免了软件协议栈所带来的开销。

b) 基于DPU的云基础设施共池管理技术能够打造一个统一的云基础设施底座。在这个底座上,虚拟机、容器(Pod)和裸金属实例都能被高效地管理和调度,为用户提供一致的管理体验。无论是虚拟化服务还是裸金属服务器,都可以通过同一套管理模块或流程进行操作,具体包括计算、网络、存储、管理等模块,极大地提升了管理的便捷性和效率。在裸金属管理方面,DPU能够支持裸金属的操作系统镜像部署在外置存储上,实现类比虚拟机的灵活部署能力,裸金属将拥有横向弹性扩容、迁移、重生等云化特性。在多种云资源共池管理方面,DPU打造统一资源池,融合不同资源类型,实现动态调配与共享,使容器、虚拟机和裸机节点灵活转换,增强业务可扩展性和弹性,从容

应对业务波动和流量高峰。共池管理方案按需动态调整资源分配,防止资源冗余,提升利用率,降低运营成本。此外,这种方式还能使整个网络架构变得统一,在组网时无需区分虚拟资源和裸金属节点,从而简化了整体的运维流程。

c) 基于DPU的安全增强技术在硬件层面增强的安全保护,提供了更高效、更灵活的安全解决方案。DPU可以卸载和加速加密操作和安全管理功能,一是将安全组和网络ACL的处理从主机CPU卸载到DPU上运行。例如,在OpenStack裸金属网络解决方案中,通过DPU实现安全组功能,避免了对物理交换机防火墙规则的依赖,降低运维成本。二是通过在DPU上应用安全规则实现微隔离,对网络流量进行细粒度的访问控制和监控。这种能力使数据中心能够对内部流量进行更严格的管理,防止潜在的内部威胁扩散。三是内置加密引擎,可以处理数据传输和存储的加解密操作,在计算节点出入口提供硬件级的数据加解密功能。例如,金融行业数据中心利用DPU进行IPSec和OpenSSL等安全技术的硬件卸载,提高了性能并释放了CPU资源。四是DPU通过隔离存储和网络操作,限制了潜在的攻击向量,即使主机受到威胁,攻击者也难以接触到数据传输和存储操作。五是依靠芯片内置安全功能实现特定目的,比如通过其内置的硬件信任根功能来防止硬件被破解。

3 DPU在算网融合场景中的应用及研究方向

基于上述行业内潜在关键解决方案及技术,本文介绍了DPU在云计算与下一代互联网演进中算网融合场景下的应用及研究方向,包括弹性裸金属、算力网关、智算等场景,展示DPU在不同场景的潜力。

a) 弹性裸金属场景。通过存储拉远、共池管理、安全增强技术,可提供等同于虚拟机的弹性裸金属资源并实现数据出网卡即加密,赋能公有云的裸金属产品的售卖,增强用户对算力资源容量、实例创建速度、数据安全加密的体验。目前行业关注重点聚焦在四大需求点,一是云资源管理中的资源扩展场景,随着业务需求的变化,智算中心可能需要快速扩展或缩减裸金属资源,如何实现资源的动态快速调整将是一大诉求;二是云资源调度中的资源使用最大化场景,如何确保资源隔离,防止云化组件的资源争抢和对业务的干扰,将是一个优化方向;三是在DPU上引入加密模块,确保数据在裸金属上计算处理后被加密传输;

四是云计算中的存储拉远场景,借助DPU对NVMe的加速能力和NVMe Over TCP/RDMA的可扩展性,并结合下一代互联网领域新兴的跨广域高通量传输技术,实现服务器外挂存储的拉远。基于DPU的裸金属资源存储拉远架构示意如图1所示。

b) 网关场景。目前,随着云计算向智算迭代演进和下一代互联网技术的发展,行业内存在数据快递、跨数据中心大吞吐传输需求,普遍做法是在网络传输两端部署网关,一是对传输通路进行调度优化,做到最优路由、最大吞吐,二是对乱序、丢包等问题部署算法模块,做针对性的处理,但数据一般是从服务器算力节点发出,需要考虑算力节点到传输两端网关“最

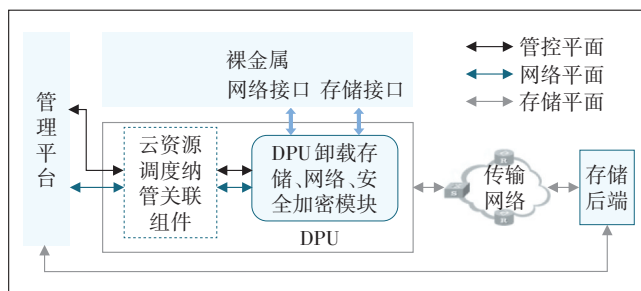


图1 基于DPU的裸金属资源存储拉远架构示意

后一公里问题”。在上述场景下,可以基于共池管理技术,将DPU作为算力、网络开发部署所需的锚点,将网关下沉到算力节点上(见图2)。

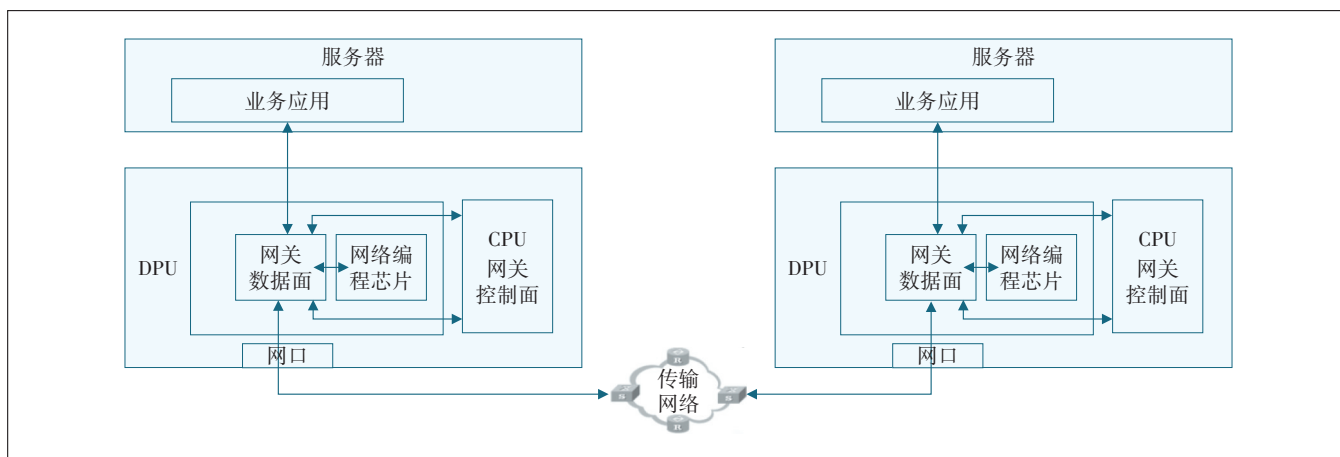


图2 基于DPU的网关卸载部署示意

c) 智算场景。随着大模型等智算技术和业务应用的不断发展,人工智能应用驱动下的下一代互联网需要提升GPU服务器节点间的通信质量。目前服务器节点间普遍使用Infiniband和RDMA,Infiniband采用了基于信用的流控,无需考虑丢包,而RDMA存在丢包等问题,需要在算力节点上部署软件处理RDMA传输带来的这些问题,比如优化拥塞控制的算法、自适应路由程序、选择性重传算法等,从而形成该场景下的软硬一体化能力。基于DPU对网络的可编程能力可实现智算裸金属服务器算力端侧对RDMA的优化(见图3)。

4 DPU在典型场景中的研究实践

中国联通聚焦云计算与下一代互联网的融合演进方向,在裸金属场景持续开展研究,针对资源管理中的资源扩展场景、资源调度中的资源使用最大化场

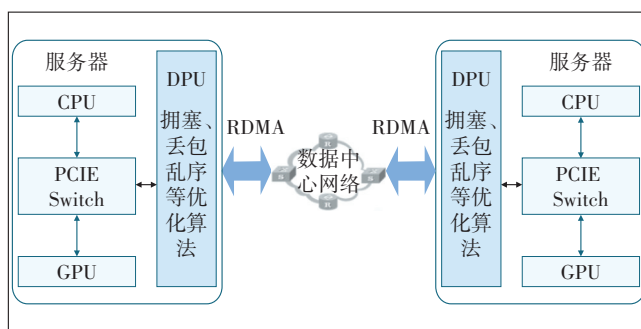


图3 基于DPU的RDMA优化示意

景、存储拉远场景持续开展研发。

在资源扩展场景,构建弹性灵活的资源管理和调度互联通道,通过DPU卸载通道对物理服务器、存储的统一管理调度,配合调度管理平台,采用卸载引擎、并行处理及存算分离技术,实现裸金属资源的高效调用。将OVS-DPDK、SPDK卸载部署到DPU,使其可以

与DPU底层驱动互通,进而链接到外置存储,并与云平台对接,通过上述操作可将裸金属的操作系统镜像挂载到外接存储上。在基于DPU的测试中,12:15:04下发创建裸金属的动作,12:18:08裸金属服务器可以登录到操作系统,共消耗3 min 4 s(见表1)。传统裸金属通过PXE、TFTP模式创建实例的时间远高于基于DPU的弹性裸金属创建时间,因为传统裸金属创建时包含启动、镜像下载、写入本地盘的过程。在传统模式的测试中,11:58:22下发创建动作,12:22:18裸金属服务器可以登录到操作系统,共消耗24 min 4 s(见表1)。

表1 基于DPU的弹性裸金属与传统裸金属创建时长对比

测试内容	统计时长方式	下发创建裸金属指令时间 (hh:mm:ss)	裸金属上的操作系统可登录时间 (hh:mm:ss)	创建时长
基于DPU的弹性裸金属创建时长	从下发创建裸金属指令到裸金属上的操作系统可以登录的时间差	12:15:04	12:18:08	3 min 4 s
传统裸金属创建时长	从下发创建裸金属指令到裸金属上的操作系统可以登录的时间差	11:58:22	12:22:18	24 min 4 s

在资源使用最大化场景,基于“CPU+DPU”2种异构算力一体化架构的服务器,将存储、网络组件卸载部署到DPU,从而减少这些组件对服务器CPU资源的消耗;利用DPU网络加速技术消除业务场景中因基于DPU的裸金属部署架构变化可能带来的I/O性能降低的问题。通用算力中弹性裸金属资源池化后,通过Iperf打流到网络交换机,网络交换机再到插入DPU卡的服务器,服务器操作系统内部署testpmd做流量转发,然后返回给Iperf。在DPU 2个25 Gbit/s端口做绑定的情况下,testpmd的性能结果可以达到41.58 Gbit/s(见图4),满足了业务需求。

在存储拉远场景研究方面,随着大数据、智算等应用场景的发展,海量计算与海量存储的需求日渐增加,急需一种将计算与存储真正分离的方式,即服务器只负责计算,存储全部部署在远端数据中心。但目前数据中心每台服务器配备系统盘,造成了存储资源浪费及维护不灵活的问题。另一方面,实际业务中存在跨数据中心或存储拉远、存算分离部署的需求,如“存力柜”及“数据不出园区”等场景。本文在部署基于DPU的弹性裸金属后,在DPU与存储之间的传输网

```
testpmd> show port stats all

##### NIC statistics for port 0 #####
RX-packets:6061750638 RX-missed:0      RX-bytes:6797302256512
RX-errors: 0
RX-nombuf:0
TX-packets:6061750634 TX-errors:0      TX-bytes:6797302253360

Throughput(since last show)
Rx-pps:   3483643      Rx-bps:41580753416
Tx-pps:   3483643      Tx-bps :41580748224
#####
```

图4 testpmd性能数据

络中通过时延模拟传输距离,验证在1 ms时延(模拟百公里级别光纤传输距离时延)下,裸机挂载百G云盘IOPS可达到10万级别、带宽可达到GB/s级别,研究了裸金属服务器本地无系统盘和数据盘的可行性,为行业内开展真正意义上的远距离存算分离提供参考。测试中采用10G存储端口DPU部署在服务器上,服务器通过交换机连接到后端SSD存储,服务器与交换机之间采用XproWanSim损伤仪增加时延来模拟光通路时延,使用FIO进行打流测试,测试结果如表2所示。

表2 存储拉远场景裸机挂盘模拟测试数据

测试内容	测试方式	时延0.5 ms	时延1 ms	时延1.5 ms
IOPS	FIO测试100G数据盘4K随机读IOPS	119 093	111 307	94 430
IOPS	FIO测试100G数据盘4K随机写IOPS	105 239	98 342	92 028
带宽	FIO测试100G数据盘1 MB顺序读带宽	1 107.8 MB/s	957.7 MB/s	732.3 MB/s
带宽	FIO测试100G数据盘1 MB顺序写带宽	1 116.2 MB/s	1 111.9 MB/s	1 090.5 MB/s

5 DPU软硬一体能力标准化与研究方向思考

在DPU软硬一体化能力标准化方面,本文梳理总结了国内外各主要标准组织相关的研究报告和技术标准,围绕算力与网络深度融合演进应用中产生的局限性,给出了DPU标准化与研究方向的思考和建议。

在国内标准组织方面,中国电子工业标准化技术协会于2024年发布实施了《数据处理器(DPU)第1部分:参考框架》《数据处理器(DPU)性能测试方法 第1部分:测试框架》《数据处理器(DPU)性能测试方法 第2部分:虚拟交换机加速性能》3项标准,从DPU的参考框架、集成要求、测试方法、虚拟交换机加速等方面给

出了要求和参考^[8-10]。标准组织 CCSA 开启了数据处理单元(DPU)技术要求、DPU 存储虚拟化加速技术要求、数据处理单元(DPU)测试方法等相关方向的项目,并启动了电信云基于数据处理单元(DPU)的裸金属资源池管理研究项目,从数据中心、电信云的角度开展了技术研究。

在国际标准组织方面, Linux 基金会成立了一个新项目 OPI, 旨在培育一个基于社区驱动、标准导向的开放生态系统, 以支持基于 DPU/IPU 类似技术的下一代架构和框架, 将从 DPU 的组件、解决方案、开发平台、使用用例等方面推动 DPU 技术的发展和應用。ETSI 在《NFV: 迈向下一个十年》白皮书中将 DPU 作为一种异构硬件来实现基础流量的卸载, 并建议在制定未来 NFV 标准时, 需要考虑 DPU 这一专业加速设备的建模和管理, 来实现统一优化的加速资源基础, 支持新型用例^[11]。IETF 的网络管理操作工作组也展开了基于 DPU 的裸金属管理和控制相关草案的研究。

DPU 正在从通用使用方案向基于场景的使用方向演进, 多为从业务到功能的定制化开发, 因此诞生了多种个性化能力。但因个性化带来了 DPU 能力的不通用, 也造成了应用的局限性。一方面是应用场景单一造成局限性, 例如行业内部分 DPU 生产商专注于安全的应用场景, 未做云化能力的支持, 造成 DPU 在云化场景的能力欠缺。另一方面是在某一场景未形成成熟能力而造成的 DPU 应用能力的局限性, 例如 DPU 与服务器兼容性不足, 导致 DPU 的 BMC 信息无法同步到服务器的 BMC, 从而无法统一通过服务器的 BMC 获取到 DPU 的状态信息。

针对上述局限性, 建议未来加强 DPU 在多种需求场景中能力增强及基础能力通用方向的研究和标准化工作。一是面向云计算、下一代互联网、AI 等新领域的发展, 满足大流量、多算力的融合需求。二是在面向算网融合的场景中开展 DPU 硬件、服务器适配、软件、开发接口、开发平台、场景用例等相关基础类通用技术的研究及标准化工作, 共同推动 DPU 产业发展, 助力 DPU 的算网融合能力在云计算与下一代互联网融合演进场景中“易用”“好用”。

6 结束语

随着云计算和下一代互联网的融合发展, 尤其是以智算为代表的业务演进, 算网融合的需求越来越强烈, 激发着算力节点架构的变革。本文介绍了云计算

及下一代互联网融合领域面临的问题, 并由此引出 DPU 的软硬一体化能力和潜在关键技术, 然后介绍了 DPU 在算网融合典型场景中的应用方向及中国联通的研究实践, 为 DPU 的发展带来运营商的观点。最后, 总结梳理了 DPU 在国内外标准化组织的相关研究进展, 并围绕 DPU 发展中的局限性, 建议持续推动 DPU 关键技术研究 and 标准化工作, 呼吁业界构建 DPU 的标准体系, 推动面向云计算及下一代互联网融合领域算网融合技术的深入研究和探索。

参考文献:

- [1] 吴双. “东数西算”一周年: 持续夯实算网根基[N]. 人民邮电, 2023-02-23(6).
- [2] 高超. “东数西算”下的算网融合发展趋势[N]. 通信产业报, 2023-01-02(16).
- [3] 黄敏, 黄晶. 算网融合中的网络安全问题浅析[J]. 工业信息安全, 2023(1): 35-41.
- [4] WHEELER B. FUNGIBLE UPS DATA-CENTER EFFICIENCY: startup's DPU can serve in host-processor and adapter roles[J]. Microprocessor report, 2020(8): 34.
- [5] 曹原铭, 郑云帆, 陈婉新, 等. 数据处理单元技术应用研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2024, 37(1): 57-62.
- [6] 中国移动. 中国移动 DPU 技术白皮书[R/OL]. [2025-01-10]. <https://13115299.s21i.faiusr.com/61/1/ABUIABA9GAAGieyyIwY-owJedDA.pdf>.
- [7] 赵广立. 计算芯片“新贵”DPU, 前路几何[J]. 中国科学报, 2021-11-04(3).
- [8] 中国电子技术标准化研究院. 数据处理器(DPU)第1部分: 参考框架: T/CESA 1305.1-2024[S]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2024.
- [9] 中国电子技术标准化研究院. 数据处理器(DPU)性能测试方法第1部分: 测试框架: T/CESA 1306.1-2024[S]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2024.
- [10] 中国电子技术标准化研究院. 数据处理器(DPU)性能测试方法第2部分: 虚拟交换机加速性能: T/CESA 1306.2-2024[S]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2024.
- [11] 蔡旭辉, 邓辉, 邓灵莉, 等. NFV: 迈向下一个十年[R/OL]. [2025-01-10]. https://pmo32e887-pic2.ysjianzhan.cn/upload/Evolving_NFV_towards_the_next_decade_CN_m6jp_9p2e.pdf.

作者简介:

朱威, 工程师, 硕士, 主要从事算网基础设施、云计算(NFV)等方向的技术研究工作; 王友祥, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为5G/6G、工业算网等; 杨文聪, 高级工程师, 硕士, 主要从事移动通信新技术的研究工作; 曹畅, 高级工程师, 博士, 主要从事未来网络架构、算力网络等前沿技术研究工作; 陈硕, 工程师, 硕士, 主要从事云计算虚拟化、云平台设计、研发工作。