

# 面向全息通信的智算融合网络

陈 佳, 刘 上\*, 郜 帅, 黄 旭, 张宏科

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 随着全息技术的发展,全息通信在教育、娱乐和医疗等多个领域展现出广泛的应用前景。然而,现有的网络资源调度方法难以满足全息通信大带宽、低时延和数据同步的传输需求。智算融合网络具有原生的网内计算(in-network computing)能力,可以在数据包传输中对数据进行计算和优化,从而减少传输时延和网络带宽压力。本文根据前期的智融标识网络技术,研究面向全息通信的智算融合网络,提出基于业务标识、资源链标识、网络功能标识和网络组件标识的标识映射方法,实现全息业务到计算、存储和转发等多样化资源的自适应调度。基于标识映射方法,本文进一步设计了全息通信智算融合网络系统。实验结果表明,与传统边缘计算方法相比,面向全息通信的智算融合网络能够降低全息通信业务60%的网络带宽压力和45%的传输时延,同时提供更灵活的网络资源调度能力。

**关键词:** 智算融合网络;网内计算;全息通信;网络资源调度

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2023YFB2904400);国家自然科学基金(No.62394321, No.62072030, No.92167204);中央高校基本科研业务费(No.2023JBGP003)

**中图分类号:** TN913.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2025)03-0754-11

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20240512

## Smart Computing Integration Network for Holographic Communication

CHEN Jia, LIU Shang\*, GAO Shuai, HUANG Xu, ZHANG Hong-ke

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** With the development of holographic technology, holographic communication shows a wide range of application prospects in many fields such as education, entertainment and medical care. However, the existing network resource scheduling method is difficult to meet the transmission requirements of holographic communication with large bandwidth, low latency and data synchronization. Smart computing integration network has native in-network computing capability. This allows for computation and optimization of data during packet transmission, thereby reducing transmission latency and network bandwidth pressure. Extends the work from the initial Smart Integration Identifier Network technology, exploring a smart computing integration network for holographic communication. It introduces an identifier mapping method based on service identifiers, resource chain identifiers, network function identifiers, and network component identifiers, enabling adaptive scheduling of holographic services to diverse resources such as computing, storage, and forwarding. Based on the identifier mapping method, this paper further designs a holographic communication smart computing integration network system. Experimental results show that, compared to traditional edge computing methods, the smart computing integration network can reduce the network bandwidth pressure by 60% and transmission latency by 45% for holographic communication services, while also offering more flexible network resource scheduling capabilities.

**Key words:** smart computing integration network; in-network computing; holographic communication; network resource scheduling

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB2904400); National Natural and Science Foundation of China (No.62394321, No.62072030, No.92167204); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2023JBGP003)

## 1 引言

全息技术正处于高速发展阶段,特别是在点云视频领域展现出巨大潜力.点云视频以三维无序点的形式呈现全息图像,支持六自由度(six-degrees of freedom)移动,为用户提供了前所未有的互动和沉浸式体验<sup>[1]</sup>.全息通信是一种基于全息技术的通信方式,通过捕捉物体的光学信息并编码成全息图像,实现三维图像的远程传输和重建.全息通信在教育、娱乐和医疗等多个领域展现出广泛的应用前景.通过全息通信,用户可以在不同地点共享和体验立体的视觉信息,从而增强远程通信的真实感和互动性<sup>[2]</sup>.

然而,当前的网络基础设施尚未能满足全息通信对高带宽、低时延和数据同步的三大关键需求<sup>[3]</sup>.全息图像包含物体的深度信息和色彩信息,这使得全息图像的数据量远远超过传统二维图像.以一款微软的Kinect 深度相机为例,该相机每秒以 30 帧的速率生成 2.1 GB 的原始数据,这对传输带宽提出了巨大的要求<sup>[4]</sup>.为保障全息通信中用户体验的流畅性和真实感,网络必须提供低时延的数据传输<sup>[5]</sup>.此外,全息通信通常涉及多个来源或不同角度的传感器,因此准确的数据流同步对保障全息图像显示的一致性至关重要<sup>[6]</sup>.现有的研究通常采用边缘计算技术解决全息通信的各个关键需求<sup>[6-9]</sup>.边缘计算在网络边缘的设备上进行数据处理,可以减少传输延迟以及减轻核心网络的负担<sup>[10]</sup>.但随着全息应用的发展,边缘计算越来越难以满足全息通信对高带宽和低时延方面的需求<sup>[11]</sup>.

针对全息通信传输的关键问题,本文基于前期智融标识网络的研究基础<sup>[12,13]</sup>,提出面向全息通信的智算融合网络.智算融合网络具有原生的网内计算能力,将计算、存储等多样化资源直接集成到网络设备中,提供比边缘计算更低的传输时延,进一步减小网络带宽压力<sup>[14]</sup>.智算融合网络基于标识映射方法对差异化全息业务和多样化网络资源进行统一标识,包括业务标识、资源链标识、网络功能标识和网络组件标识.标识映射方法将智算融合网络分为元全息业务层、资源链适配层和融合源组件层,通过对标识进行逐层的解析映射,保障全息业务到网内资源的准确适配,实现全息数据在高速转发的同时进行高速计算处理.基于标识映射方法,本文进一步设计了全息通信智算融合网络系统.系统包括支持全息通信的映射适配器和智融网络设备.映射适配器实现业务标识到网络组件标识的解析映射.智融网络设备集成转发、计算和存储资源,通过基于标识的数据包首部协调适配设备内的多样化资源.实验结果表明,与传统边缘计算方法相比,面向全息通信的智算融合网络能够降低全息通信业务 60% 的网络带宽压力和 45% 的传输时延,同时提供更灵活

的网络资源调度能力.

本文主要贡献如下:

(1)提出面向全息通信的智算融合网络,针对全息应用的差异化传输特点,考虑网内计算、存储和转发等多样化资源,为全息应用业务提供定制化、多要素和全方位的通信传输保障.

(2)提出了支持全息通信的智算融合网络机理,包括对全息业务和网络资源的统一标识和标识映射方法.统一标识包括业务标识、资源链标识、网络功能标识和网络组件标识.标识映射方法将智算融合网络分为元全息业务层、资源链适配层和融合源组件层,实现差异化全息业务需求到网内多样化资源的准确适配.

(3)提出了全息通信智算融合网络系统,包括支持全息通信的映射适配器和智融网络设备.映射适配器实现标识解析映射,对网络中的多样化资源进行统一调度.智融网络设备支持基于标识的数据包首部处理,实现计算、存储和转发资源的一体化融合.

本文所有符号描述如表 1 所示.

## 2 相关工作

全息图像区别于传统 2D 和 3D 图像的主要特征在于观看者能够与图像进行交互,并且图像会根据观看者的位置而变化.这导致全息通信具有高带宽、低时延和数据同步的三大关键需求.

在减小全息数据的传输带宽方面,Huang 等人<sup>[15]</sup>提出一种基于 AI 的全息数据传输方法,将全息图像中的点云特征提取和重建作为一个端到端的神经网络训练过程,实现高于传统方法 50% 的压缩效率.Huang 等人<sup>[16]</sup>提出了一种全息数据语义通信方案,可以在移动设备上实现高质量的点云数据传输,并且与最先进的 AI 传输方法相比减少了 41.7% 的内存使用.Qian 等人<sup>[7]</sup>评估了在 5G 边缘云中不同的图像质量因素和网络因素对全息图像传输的影响,并指出当前的 5G 边缘云仅支持低分辨率的全息图像传输.

在降低全息数据的传输时延方面,El Essaili 等人<sup>[8]</sup>使用 5G 边缘云减少移动设备场景下点云数据的传输时延,与基线方法相比降低了 58% 的时延.Guan 等人<sup>[9]</sup>为保障传输大量全息数据的严格延迟要求,提出了 MetaStream 通信系统.MetaStream 在动态相机校准、边缘辅助对象分割和跨相机冗余点去除等方面对传输时延进行优化,与最先进的系统相比,将端到端延迟减少了 31.7%,同时将视觉质量提高了 12.5%.Ravuri 等人<sup>[17]</sup>通过改进 Quic 协议在满足全息视频时延要求的基础上增加传输可靠性.

在同步全息数据传输方面,Selinis 等人<sup>[18]</sup>通过设计远端网络的客户端和服务端交互信令,进行用户帧

表1 符号描述

符号	含义
SID	业务标识(service identifier),表示具体的全息业务
SBD	业务描述(service behavior description),描述全息业务的差异化传输需求
CID	资源链标识(chain identifier),表示具体的资源链,资源链是有序网络功能的集合
CBD	资源链描述(chain behavior description),描述资源链的多样化传输特征
FID	网络功能标识(function identifier),表示具体的网络功能
FBD	网络功能描述(function behavior description),描述记录网络功能的作用和性能参数
NID	网络组件标识(network identifier),表示具体的网络组件
NBD	网络组件描述(network behavior description),描述记录网络组件承载的网络功能和组件性能参数
DID	设备标识(device identifier),表示具体的智融网络设备
$f_S(\cdot)$	业务描述映射函数,记录SBD到SID的映射关系, $SID_i = f_S(SBD_i)$
$f_C(\cdot)$	资源链描述映射函数,记录CBD到CID的映射关系, $CID_i = f_C(CBD_i)$
$f_F(\cdot)$	网络功能描述映射函数,记录FBD到FID的映射关系, $FID_i = f_F(FBD_i)$
$f_N(\cdot)$	网络组件描述映射函数,记录NBD到NID的映射关系, $NID_i = f_N(NBD_i)$
$\varphi_S(\cdot)$	业务描述解析函数,表示从SBD到CBD的解析方法, $(CBD_1, CBD_2, \dots, CBD_k) = \varphi_S(SBD_i)$
$\varphi_C(\cdot)$	资源链描述解析函数,表示从CBD到FBD的解析方法, $(FBD_1, FBD_2, \dots, FBD_k) = \varphi_C(CBD_i)$
$\varphi_F(\cdot)$	网络功能解析函数,表示从FBD到NBD的解析方法, $(NBD_1, NBD_2, \dots, NBD_k) = \varphi_F(FBD_i)$
$M_S$	业务标识映射矩阵,记录业务标识对资源链标识的映射关系矩阵
$M_C$	资源链标识映射矩阵,记录资源链标识对网络功能标识的映射关系矩阵
$M_F$	网络功能标识映射矩阵,记录网络功能标识对网络组件标识的映射关系矩阵
$M_N$	网络组件标识映射矩阵,记录网络组件和网络设备的映射关系矩阵
$R_S$	业务描述解析矩阵,记录业务描述对资源链描述的解析关系矩阵
$R_C$	资源链描述解析矩阵,记录资源链描述对网络功能描述的解析关系矩阵
$R_F$	网络功能描述解析矩阵,记录网络功能描述对网络组件描述的解析关系矩阵

缓存和同步,保障全息数据的同步传输. Anmulwar 等人<sup>[6]</sup>提出了一种对不同客户端的数据帧进行实时同步和对准的方法,并考察了该方法在不同网络场景下的帧同步性能及其对不同控制参数的敏感性.

当前针对全息数据传输的研究主要集中在使用边缘云或端设备进行全息数据处理,使用网内计算传输处理全息数据的研究正处于起步阶段. Aghaliakbari 等人<sup>[19]</sup>证明了使用网内计算传输全息数据的优势,并使用切片调度网络中的多样化资源. 在全息通信中,不同类型的全息业务对传输网络的需求不同. 例如,全息电影需要高带宽传输,全息通话需要低时延传输,全息游戏需要准确的数据同步. 针对不同全息业务的差异化需求,需要合理分配网络中的计算、存储和转发资源. 例如,对于需要高带宽传输的全息业务可以分配更多的转发资源,减少计算资源的分配. 智算融合网络可以根据全息业务的传输需求,对网络中的资源进行平衡和转化,实现差异化全息业务和网内计算设备中多样化资源的准确适配和高效传输.

### 3 支持全息通信的智算融合网络机理

支持全息通信的智算融合网络机理包括对全息业

务和网络资源的统一标识和标识映射方法. 智算融合网络对全息通信业务和多样化网络资源进行统一的标识、描述和封装,包括业务标识、资源链标识、网络功能标识和网络组件标识. 标识之间的映射关系对应着网络中业务和资源的相互作用关系,映射关系的变化会导致网络业务和资源相互作用关系的变化. 因此,标识映射方法根据全息业务的传输需求对标识之间的映射关系进行约束,实现差异化全息业务和网络中多样化资源的协同适配. 面向全息通信的智算融合网络架构包含三层,分别是元全息业务层、资源链适配层、融合源组件层,如图1所示. 智算融合网络通过标识映射方法协同调度网络中计算、存储和转发等多样化资源,保障全息通信业务大带宽、低时延和数据同步的传输需求.

元全息业务层负责管理全息业务,维护不同全息业务的差异化传输需求,并根据传输需求将全息业务解析为一个或多个资源链. 不同的全息业务通过业务标识(Service Identifier, SID)来区分,差异化传输需求由业务描述(Service Behavior Description, SBD)来维护. 元全息业务层首先接收上层应用对全息业务的传输需求,并将传输需求转换为业务描述. 然后,通过业务描

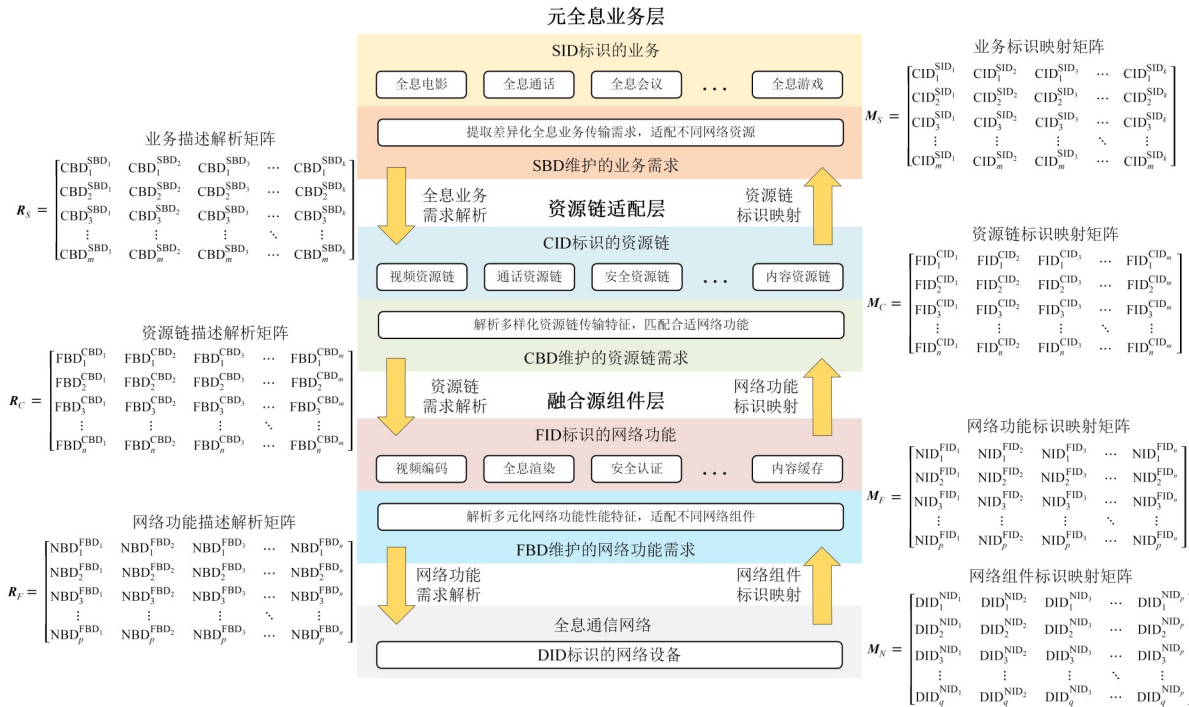


图1 面向全息通信的智算融合网络架构

述解析所需的资源链描述(Chain Behavior Description, CBD),进而得到全息业务标识和资源链标识(Chain Identifier, CID)的映射关系.最后,通过动态维护业务标识映射矩阵和业务描述解析矩阵,保障全息业务始终满足业务传输的需求描述.

资源链适配层负责管理资源链,不同的资源链通过资源链标识来区分.资源链由有序的网络功能集合构成,资源链描述记录了资源链包含的网络功能类别和性能参数.因此,当资源链适配层接收到元全息业务层传递的资源链描述时,将资源链描述解析成一个或多个网络功能描述(Function Behavior Description, FBD),根据资源链描述和网络功能描述的解析关系得到资源链标识和网络功能标识(Function Identifier, FID)的映射关系.最后,通过动态维护资源链标识映射矩阵和资源链描述解析矩阵,保障资源链的功能和性能始终满足资源链描述.

融合源组件层负责管理网络功能,将多样化的网络组件资源融合,不同的网络功能通过网络功能标识来区分.网络组件表示实现网络功能的物理资源载体,例如实现转发功能的网络组件有设备端口和优先级队列等,实现计算功能的网络组件有中央处理器(Central Processing Unit, CPU)和可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)等,实现存储功能的网络组件有动态随机存取存储器(Dynamic Random Access Memory, DRAM)、固态硬盘(Solid State Disk, SSD)和硬盘驱动器(Hard Disk Drive, HDD)等.网络功能描述记

录网络功能的作用和性能参数.融合源组件层接收到资源链适配层传递的网络功能描述时,将网络功能描述解析成一个或多个网络组件描述(Network Behavior Description, NBD),根据网络功能描述和网络组件描述的解析关系得到网络功能标识和网络组件标识(Network Identifier, NID)的映射关系.设备标识(Device Identifier, DID)用于描述每个实体网络设备,使用网络组件映射矩阵记录网络组件和网络设备的映射关系.融合源组件层通过动态维护网络功能标识映射矩阵和网络功能描述解析矩阵,保障网络功能的作用和性能始终满足网络功能描述.

### 3.1 元全息业务层

元全息业务层接收上层应用对网络的业务需求,管理和生成全息业务,包括全息电影、全息通话、全息会议和全息游戏等.不同全息业务对网络传输的需求各不相同,例如全息电影业务需要网络提供大带宽和网络内容缓存等,全息通话业务需要网络提供低时延和网络图像渲染等,多人全息会议业务需要网络提供确定性同步和网络图像渲染等,全息游戏业务需要网络提供高可靠和低时延抖动等.因此,元全息业务层需要根据不同业务的差异化传输需求适配不同的网络资源,差异化业务的传输需求则由SBD维护.全息业务可以包括一个或多个资源链,例如视频资源链、音频资源链、高可靠资源链和低时延资源链等.全息业务由SID标识,资源链由CID标识,资源链的功能和性能由CBD描述.因此,保障全息业务的传输需求要根据SBD解析

出合适的 CBD, 并根据解析关系确定 SID 和 CID 的映射关系, 一个 SID 可以包含多个 CID, 一个 CID 也可以映射到多个 SID. 全息业务解析映射过程如下所示.

首先需要根据业务描述 SBD 解析资源链描述 CBD. 设第  $i$  个业务描述表达为  $SBD_i$ , 则由业务描述解析函数可以得到对应的资源链描述为

$$\varphi_s(SBD_i) = (CBD_1^{SBD_i}, CBD_2^{SBD_i}, CBD_3^{SBD_i}, \dots, CBD_m^{SBD_i})^T \quad (1)$$

其中,  $CBD_m^{SBD_i}$  表示第  $i$  个业务描述解析的第  $m$  个资源链描述. 由业务描述映射函数可以得到  $SBD_i$  对应的业务标识  $SID_i$ :

$$f_s(SBD_i) = SID_i \quad (2)$$

由资源链描述映射函数可以得到  $CBD_m$  对应的业务标识  $CID_m$ :

$$f_c(CBD_m) = CID_m \quad (3)$$

进一步可以得到业务标识  $SID_i$  和相应资源链标识的映射关系:

$$(CID_1^{SID_i}, CID_2^{SID_i}, CID_3^{SID_i}, \dots, CID_m^{SID_i})^T \quad (4)$$

其中,  $CID_m^{SID_i}$  表示第  $i$  个业务标识映射的第  $m$  个资源链标识. 最后, 由元全息业务层的全息业务池

$$(SID_1, SID_2, SID_3, \dots, SID_k) \quad (5)$$

可以得到业务标识映射矩阵  $M_S$  和业务描述解析矩阵  $R_S$ . 元全息业务层通过动态维护业务标识映射矩阵和业务描述解析矩阵, 保障业务描述始终满足业务的传输需求.

$$M_S = \begin{bmatrix} CID_1^{SID_1} & CID_1^{SID_2} & CID_1^{SID_3} & \dots & CID_1^{SID_k} \\ CID_2^{SID_1} & CID_2^{SID_2} & CID_2^{SID_3} & \dots & CID_2^{SID_k} \\ CID_3^{SID_1} & CID_3^{SID_2} & CID_3^{SID_3} & \dots & CID_3^{SID_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CID_m^{SID_1} & CID_m^{SID_2} & CID_m^{SID_3} & \dots & CID_m^{SID_k} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R_S = \begin{bmatrix} CBD_1^{SBD_1} & CBD_1^{SBD_2} & CBD_1^{SBD_3} & \dots & CBD_1^{SBD_k} \\ CBD_2^{SBD_1} & CBD_2^{SBD_2} & CBD_2^{SBD_3} & \dots & CBD_2^{SBD_k} \\ CBD_3^{SBD_1} & CBD_3^{SBD_2} & CBD_3^{SBD_3} & \dots & CBD_3^{SBD_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CBD_m^{SBD_1} & CBD_m^{SBD_2} & CBD_m^{SBD_3} & \dots & CBD_m^{SBD_k} \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3.2 资源链适配层

资源链适配层接收元全息业务层的资源链描述, 管理和生成资源链. 不同资源链根据资源链描述, 具有不同的网络功能. 例如, 视频资源链包含编码网络功能、解码网络功能和内容缓存网络功能等, 实时通话资源链包含渲染网络功能和同步转发网络功能等, 内容分发资源链包含内容压缩网络功能、内容缓存网络功

能和内容分发网络功能等. 安全资源链需要可靠转发网络功能和安全认证网络功能等. 资源链适配层为元全息业务层提供了一个可靠、灵活、高效的资源支持接口, 使得上层业务能够更加专注于业务逻辑的实现, 而无需关注底层资源的详细配置和管理. 资源链包含一个或多个有序网络功能, 因此资源链描述还应包含数据流的路由信息. 资源链由 CID 标识, 网络功能由 FID 标识, 网络功能的类别和性能由 FBD 描述. 因此, 实现资源链描述要根据 CBD 解析出合适的 FBD, 并根据解析关系确定 CID 和 FID 的映射关系, 一个 CID 可以包含多个 FID, 一个 FID 也可以映射到多个 CID. 资源链解析映射过程如下所示.

首先需要根据资源链描述 CBD 解析网络功能描述 FBD. 设第  $i$  个资源链描述表达为  $CBD_i$ , 则由资源链描述解析函数可以得到对应的网络功能描述为

$$\varphi_c(CBD_i) = (FBD_1^{CBD_i}, FBD_2^{CBD_i}, FBD_3^{CBD_i}, \dots, FBD_n^{CBD_i})^T \quad (8)$$

其中,  $FBD_n^{CBD_i}$  表示第  $i$  个资源链描述解析的第  $n$  个网络功能描述. 由资源链描述映射函数可以得到  $CBD_i$  对应的资源链标识  $CID_i$ :

$$f_c(CBD_i) = CID_i \quad (9)$$

由网络功能描述映射函数可以得到  $FBD_n$  对应的网络功能标识  $FID_n$ :

$$f_f(FBD_n) = FID_n \quad (10)$$

进一步可以得到资源链标识  $CID_i$  和相应网络功能标识的映射关系:

$$(FID_1^{CID_i}, FID_2^{CID_i}, FID_3^{CID_i}, \dots, FID_n^{CID_i})^T \quad (11)$$

其中,  $FID_n^{CID_i}$  表示第  $i$  个资源链标识映射的第  $n$  个网络功能标识. 最后, 由资源链适配层的资源链池, 如式(12)所示:

$$(CID_1, CID_2, CID_3, \dots, CID_m) \quad (12)$$

可以得到资源链标识映射矩阵  $M_C$  和资源链描述解析矩阵  $R_C$ , 如式(13)和式(14)所示:

$$M_C = \begin{bmatrix} FID_1^{CID_1} & FID_1^{CID_2} & FID_1^{CID_3} & \dots & FID_1^{CID_m} \\ FID_2^{CID_1} & FID_2^{CID_2} & FID_2^{CID_3} & \dots & FID_2^{CID_m} \\ FID_3^{CID_1} & FID_3^{CID_2} & FID_3^{CID_3} & \dots & FID_3^{CID_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ FID_n^{CID_1} & FID_n^{CID_2} & FID_n^{CID_3} & \dots & FID_n^{CID_m} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R_C = \begin{bmatrix} FBD_1^{CBD_1} & FBD_1^{CBD_2} & FBD_1^{CBD_3} & \dots & FBD_1^{CBD_m} \\ FBD_2^{CBD_1} & FBD_2^{CBD_2} & FBD_2^{CBD_3} & \dots & FBD_2^{CBD_m} \\ FBD_3^{CBD_1} & FBD_3^{CBD_2} & FBD_3^{CBD_3} & \dots & FBD_3^{CBD_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ FBD_n^{CBD_1} & FBD_n^{CBD_2} & FBD_n^{CBD_3} & \dots & FBD_n^{CBD_m} \end{bmatrix} \quad (14)$$

### 3.3 融合源组件层

融合源组件层接收资源链适配层的网络功能描述,管理和生成网络功能.网络功能的实现依赖于网络组件,这些网络组件具有不同的性能特点,适用于不同的计算需求.例如,CPU是通用计算组件,可以提供基本的计算功能,但其处理时延较高,不适合实时性要求较高的任务.FPGA是一种可编程逻辑器件,可以提供高速计算功能,适用于需要快速处理的场景,但其算力有限.因此,在选择网络组件承载网络功能时,需要根据网络功能的性能需求和特点,选择合适的网络组件.这一过程需要考虑网络功能的计算需求、实时性要求、资源消耗等因素,以确保网络功能的高效实现.网络功能由FID标识,网络组件由NID标识,网络组件的类别和性能由NBD描述.网络功能解析映射过程如下所示.

首先需要根据网络功能描述FBD解析网络组件描述NBD.设第*i*个网络功能描述表达为 $FBD_i$ ,则由网络功能描述解析函数可以得到对应的网络组件描述为

$$\varphi_F(FBD_i) = (NBD_1^{FBD_i}, NBD_2^{FBD_i}, NBD_3^{FBD_i}, \dots, NBD_p^{FBD_i})^T \quad (15)$$

其中, $NBD_p^{FBD_i}$ 表示第*i*个网络功能描述解析的第*p*个网络组件描述.由网络功能描述映射函数可以得到 $FBD_i$ 对应的网络功能标识FID<sub>*i*</sub>:

$$f_F(FBD_i) = FID_i \quad (16)$$

由网络组件描述映射函数可以得到 $NBD_p$ 对应的网络组件标识NID<sub>*p*</sub>:

$$f_N(NBD_p) = NID_p \quad (17)$$

进一步可以得到网络功能标识FID<sub>*i*</sub>和相应网络组件标识的映射关系:

$$(NID_1^{FID_i}, NID_2^{FID_i}, NID_3^{FID_i}, \dots, NID_p^{FID_i})^T \quad (18)$$

其中, $NID_p^{FID_i}$ 表示第*i*个网络功能标识映射的第*p*个网络组件标识.最后,由融合源组件层的网络功能池,如式(19)所示:

$$(FID_1, FID_2, FID_3, \dots, FID_n) \quad (19)$$

可以得到网络功能标识映射矩阵 $M_F$ 和网络功能描述解析矩阵 $R_F$ .融合源组件层通过动态维护网络功能标识映射矩阵和网络功能描述解析矩阵,保障网络功能始终可以提供网络功能描述对应的功能和性能.网络组件映射矩阵 $M_N$ 用来记录网络组件和网络设备的映射关系.

$$M_F = \begin{pmatrix} NID_1^{FID_1} & NID_1^{FID_2} & NID_1^{FID_3} & \dots & NID_1^{FID_n} \\ NID_2^{FID_1} & NID_2^{FID_2} & NID_2^{FID_3} & \dots & NID_2^{FID_n} \\ NID_3^{FID_1} & NID_3^{FID_2} & NID_3^{FID_3} & \dots & NID_3^{FID_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ NID_p^{FID_1} & NID_p^{FID_2} & NID_p^{FID_3} & \dots & NID_p^{FID_n} \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$R_F = \begin{pmatrix} NBD_1^{FBD_1} & NBD_1^{FBD_2} & NBD_1^{FBD_3} & \dots & NBD_1^{FBD_n} \\ NBD_2^{FBD_1} & NBD_2^{FBD_2} & NBD_2^{FBD_3} & \dots & NBD_2^{FBD_n} \\ NBD_3^{FBD_1} & NBD_3^{FBD_2} & NBD_3^{FBD_3} & \dots & NBD_3^{FBD_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ NBD_p^{FBD_1} & NBD_p^{FBD_2} & NBD_p^{FBD_3} & \dots & NBD_p^{FBD_n} \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$M_N = \begin{pmatrix} DID_1^{NID_1} & DID_1^{NID_2} & DID_1^{NID_3} & \dots & DID_1^{NID_p} \\ DID_2^{NID_1} & DID_2^{NID_2} & DID_2^{NID_3} & \dots & DID_2^{NID_p} \\ DID_3^{NID_1} & DID_3^{NID_2} & DID_3^{NID_3} & \dots & DID_3^{NID_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DID_q^{NID_1} & DID_q^{NID_2} & DID_q^{NID_3} & \dots & DID_q^{NID_p} \end{pmatrix} \quad (22)$$

## 4 全息通信智算融合网络系统

全息通信智算融合网络系统包括支持全息通信的映射适配器和智融网络设备.映射适配器负责接收全息应用的传输需求,根据传输需求对元全息业务层、资源链适配层和融合源组件层中的标识进行解析,将解析结果配置到智融网络设备中,并感知全息业务状态保障全息应用的稳定传输.智融网络设备对应资源链适配层和网络组件层,融合多种网络资源,包括转发模块、计算模块和存储模块.转发模块负责解析资源链标识,并根据网络功能标识匹配转发功能.计算模块根据网络功能标识匹配对应的计算网络组件,执行网内计算功能.存储模块根据网络功能标识匹配对应的存储网络组件,提供网络存储功能.

### 4.1 支持全息通信的映射适配器

支持全息通信的映射适配器如图2所示,包括全息业务接口、标识映射解析、业务状态管理和网络配置接口.

全息业务接口包括REST应用程序接口(Application Programming Interface, API)、远程过程调用(Google Remote Procedure Call, GRPC)和图形用户界面(Graphical User Interface, GUI)等全息用户通信接口.这些接口负责接收网络中用户的全息应用传输需求,记录用户的身份信息并向用户反馈网络和全息业务的状态.标识映射解析模块根据用户的全息应用传输需求生成SBD,将用户的身份信息与SID相关联,并根据SBD解析SID与CID、FID和NID的映射关系.业务状态管理模块记录 $M_S$ 、 $M_C$ 、 $M_F$ 、 $M_N$ 等标识状态信息并感知所有网络设备的状态信息.当网络中有故障发生时,映射适配器识别故障全息业务的SID,调用标识映射解析模块重新适配资源链、网络功能和网络组件,保障全息业务的传输.网络配置接口包括P4运行时(P4Runtime)、网络配置协议(NETwork CONFIguration protocol, NETCONF)

和驱动(Driver)等,对网络中多样化的网络组件进行配置.

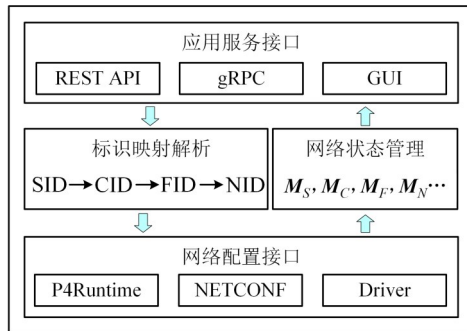


图2 支持全息通信的映射适配器

### 4.2 支持全息通信的智融网络设备

支持全息通信的智融网络设备原型设计如图3所示,具有转发模块、计算模块和存储模块.转发模块负责对数据包进行高速转发,数据包在全息通信智算融合网络系统中仅凭CID进行路由.当数据包进入智融网络设备时,若数据包不含CID,则通过标识映射模块对数据包中的SID进行映射,解析出CID.然后根据CID解析FID,网络功能标识匹配模块根据FID对数据包进行网络功能匹配.如果FID中包含计算功能,则转发模块将数据包传送至计算模块.如果FID中包含存储功能,则转发模块将数据包传送至存储模块.转发模块使用Tofino网络组件承载可编程转发功能,Tofino网络组件将数据包快速转发至CPU和FPGA等网络组件中的计算模块和存储模块,并将CPU和FPGA返回的数据包发送至转发端口进行快速转发.

计算模块根据数据包的FID进行网络功能标识匹配,将数据包分配到FPGA和CPU等计算组件,完成不同的网络功能.CPU网络组件负责执行高性能计算和设备管理.高性能计算代表对算力需求大,但对时延不敏感的计算网络功能,例如全息通信中的点云处理功能.CPU设备管理功能根据映射适配器的网络配置指令对智融网络设备的其他网络组件进行功能配置,并且记录其他网络组件的状态.FPGA网络组件负责执行高速计算和确定性队列.高速计算代表对算力需求小,但对时延敏感的计算网络功能,例如全息编码功能.FPGA确定性队列可以对数据包进行确定性整形,以满足全息网络中的数据同步需求.

存储模块根据数据包的FID进行网络功能标识匹配,将数据包分配到DRAM、HDD和SDD等存储网络组件,完成不同的存储网络功能.存储网络组件的数据通过直接内存访问(Direct Memory Access, DMA)和计算模块中的网络组件进行快速数据交互,通过远程直接

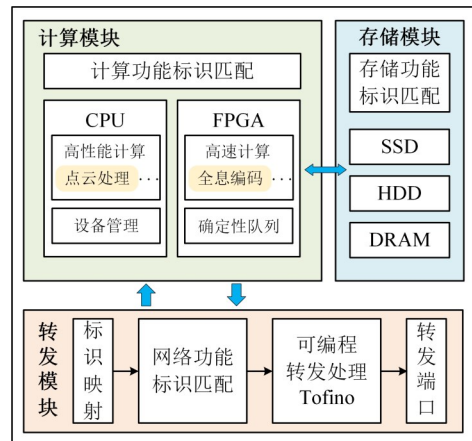


图3 支持全息通信的智融网络设备原型设计

数据存(Remote Direct Memory Access, RDMA)和转发模块中的网络组件进行快速数据交互.

在全息通信智算融合网络系统中,数据包通过标识实现执行网内计算和存储功能的同时进行高速转发.基于标识的数据包首部格式如图4所示,包括4字节的资源链标识、1字节的计算标识、1字节的存储标识、1字节的转发标识和1字节的转发端口,共8字节.



图4 基于标识的数据包首部格式

资源链标识包含数据流的网络功能信息和路由信息,其中网络功能信息包括计算标识、存储标识和转发标识,路由信息包括转发端口.计算标识、存储标识和转发标识作为网络功能的索引在智融网络设备的各个功能模块中匹配对应的网络功能组件,对数据流实现不同的网络功能.当数据包在智融网络设备中完成所有网络功能的处理后,智融网络设备读取转发端口并将数据包转发至对应的端口.资源链标识在数据流路由路径的所有智融网络设备中有效,而计算标识、存储标识、转发标识和转发端口仅在智融网络设备内部有效.资源链标识对应计算标识、存储标识、转发标识和转发端口的解析关系由映射适配器下发.计算标识、存储标识、转发标识和转发端口字段为零时无效.当数据包首次进入智融网络设备时,计算标识、存储标识、转发标识和转发端口字段为零,智融网络设备根据映射表对资源链标识进行解析,填入相应的计算标识、存储标识、转发标识和转发端口.当数据包完成网络功能处理时,功能模块将对应的标识字段置零.当数据包离开智融网络设备时,除资源链标识的其他字段全部置零,表示完成了全部的网络功能处理.

### 4.3 系统工作流程

全息通信智算融合网络系统工作流程,包括映射适配器、智融网络设备和全息用户,如图5所示。

(1)全息用户向映射适配器请求全息业务,发送全

息用户的身份信息和全息业务的需求信息。映射适配器根据用户请求的业务需求信息进行标识解析映射。若解析失败,则向用户返回失败原因。若解析成功,则映射适配器根据解析结果配置智融网络设备。

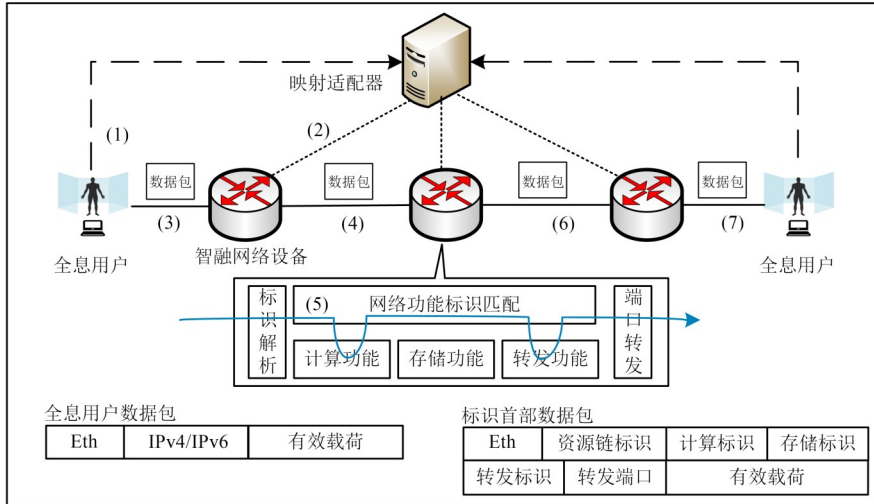


图5 全息通信智算融合网络系统工作流程

(2)映射适配器首先根据业务标识映射矩阵、资源链标识映射矩阵和网络功能标识映射矩阵对相应智融网络设备的标识解析模块进行配置。然后,映射适配器根据网络功能对智融网络设备的计算模块、存储模块和转发模块进行配置。配置成功后,映射适配器通知全息用户发送全息数据。

(3)全息用户发送的数据包如图5所示,通常为传统IP数据包,不含有标识首部。因此,连接全息用户的第一个智融网络设备需要根据全息用户的身份信息匹配对应的资源链标识,并在全息用户数据包的IP首部之前添加标识首部。

(4)添加标识首部后的数据包如图5所示。在数据包传输过程中,通过资源链标识进行网络功能和路由路径的匹配。标识首部中计算标识、存储标识、转发标识和转发端口字段在进入智融网络设备前为零。

(5)当含有标识首部的数据包进入智融网络设备内部后,根据资源链标识解析计算标识、存储标识、转发标识和转发端口。若解析后的计算标识非零,则根据计算标识完成计算功能。完成相应的功能后,计算标识置零。当所有网络功能完成后,标识全部置零。智融网络设备根据转发端口进行转发。

(6)数据包在智融网络设备中可以根据需求进行网络功能的匹配。若计算标识、存储标识、转发标识均为零,则可以直接根据资源链标识进行转发,实现数据包的快速路由,直至完成资源链上的全部网络功

能。完成路由传输和网络功能的数据包在离开智融网络设备时,会根据全息业务映射矩阵剥离数据包中的标识首部。最后,发送给全息用户,完成全息业务的传输。

### 5 实验验证

本文使用通用服务器对智融网络设备和映射适配器进行模拟,以验证面向全息通信的智算融合网络的可行性,并构建实验系统对基于标识的数据包首部进行性能评估。全息通信智算融合网络系统包括映射适配器、智融网络设备、采集设备和显示设备,如图6所示。智融网络设备通过在通用服务器上运行BMV2<sup>[20]</sup>和Docker进行模拟,以实现一体化的计算、存储和转发功能。映射适配器通过在通用服务器上运行REST接口接收全息业务需求并对智融网络设备进行配置。通用服务器具有10核2.50 GHz Intel(R) Xeon(R) Silver 4210R CPU和64 GB内存。采集设备使用Realsense深度摄像机采集点云数据,显示设备将点云数据渲染成全息图像并显示。

全息通信智算融合网络系统实验拓扑如图7所示。系统实现一个简单的全息通信样例,将采集设备的点云数据传输到显示设备上显示。在样例中,假设深度摄像机采集的点云数据已经被处理和合并,只需要执行编码功能。智融网络设备根据IP及端口号区分是否采用网内计算功能。边缘计算对比实验拓扑如图8所示,与智算融合网络系统不同,使用普通交换设备进

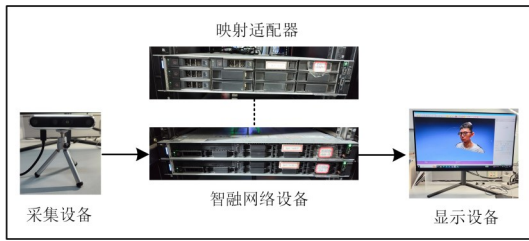


图6 全息通信智算融合网络系统

行数据包转发. 在对比实验拓扑中,使用边缘服务器对全息数据执行编码功能. 根据编码功能位置的不同,实验验证测试以下场景.

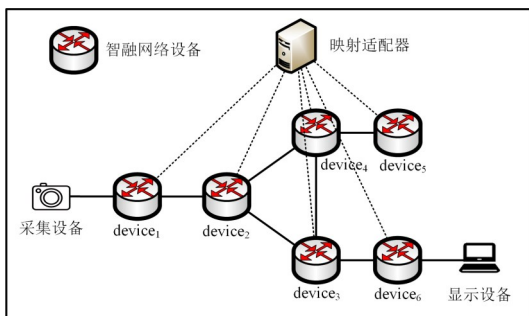


图7 全息通信智算融合网络系统实验拓扑

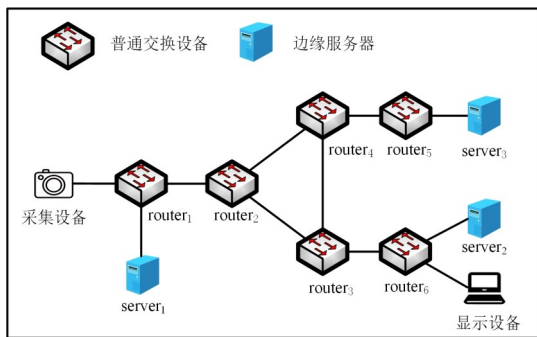


图8 边缘计算对比实验拓扑

场景 1:在边缘计算对比实验拓扑中,编码功能位于边缘服务器  $server_1$ . 全息数据流通过  $router_1$  传输到边缘服务器  $server_1$  进行编码,然后通过路径 ( $router_2$ - $router_3$ - $router_6$ ) 传输到显示设备上.

场景 2:在边缘计算对比实验拓扑中,编码功能位于边缘服务器  $server_2$ . 全息数据流通过路径 ( $router_1$ - $router_2$ - $router_3$ - $router_6$ ) 传输到边缘服务器  $server_2$  进行编码,然后通过  $router_6$  传输到显示设备上.

场景 3:在边缘计算对比实验拓扑中,编码功能位于边缘服务器  $server_3$ . 全息数据流通过路径 ( $router_1$ - $router_2$ - $router_4$ - $router_5$ ) 传输到边缘服务器  $server_3$  进行编码,然后通过路径 ( $router_5$ - $router_4$ - $router_3$ - $router_6$ ) 传输到显示设备上.

场景 4:在全息通信智算融合网络系统实验拓扑

中,编码功能位于智融网络设备  $device_1$ . 全息数据流通过智融网络设备  $device_1$  进行编码,然后通过路径 ( $device_2$ - $device_3$ - $device_6$ ) 传输到显示设备上.

场景 5:在全息通信智算融合网络系统实验拓扑中,编码功能位于智融网络设备  $device_6$ . 全息数据流通过路径 ( $device_1$ - $device_2$ - $device_3$ ) 传输到智融网络设备  $device_6$  进行编码,然后发送到显示设备.

在所有测试场景中,场景 1 和场景 2 是被广泛应用部署的边缘计算场景. 当边缘服务器满载或近用户侧无边服务器时,场景 3 也经常在网络中被部署使用. 场景 4 和场景 5 将编码功能放置于近用户侧的智融网络设备中,用以评估智算融合网络的效果. 在实验中,将对各个场景的平均网络负载、平均端到端延迟和抖动进行测试,测试结果为 100 次测试数据的平均值. 平均网络负载为全息数据传输期间链路的平均使用带宽除以链路的均值带宽. 平均端到端延迟为在全息数据传输期间所有分组的平均延迟. 抖动为每两个连续分组之间的平均延迟变化.

各场景的平均网络负载如图 9(a) 所示. 以原始的点云格式传输全息图像数据会导致严重的网络拥塞,而编码功能可以降低全息图像的数据量. 根据实验结果所示,将编码功能部署在靠近采集设备的位置可以有效减少网络负载. 与边缘场景 3 相比,使用网内计算的场景 4 可以最大限度地提高带宽增益,并将网络流量负载减少 60% 以上.

各场景的平均延迟如图 9(b) 所示. 在所有场景中,场景 3 具有最高的传输延迟,这是因为边缘服务器  $server_3$  距离采集设备和显示设备都相对较远,额外的传输距离导致了较高的传输延迟. 场景 1 和场景 2 中的边缘服务器位于采集设备和显示设备的最短传输路径上,具有更短的传输距离,因此场景 1 和场景 2 的传输延迟小于场景 3. 场景 4 和场景 5 使用网内计算将编码功能放置在设备  $device_1$  和  $device_2$  中. 与边缘计算相比,一方面网内计算功能节省了从转发设备到边缘服务器的传输延迟,另一方面智算融合网络将转发和计算高效结合,保障数据包在进行网内计算的同时实现高速转发. 因此场景 4 和场景 5 具有比其他边缘计算场景更低的传输时延,与场景 3 相比传输时延降低 45% 以上.

图 9(c) 描述了不同场景的抖动,所有场景的抖动值均小于 1 ms,满足全息通信的传输需求. 传输时延的抖动通常与传输路径中的跳数有关,传输跳数越少,抖动越小. 因此场景 3 具有最高的抖动,而场景 4 和场景 5 具有较低的抖动. 场景 4 和场景 5 与边缘计算相比,消除了数据包从转发设备到边缘服务器的传输抖动,因此具有最低的传输抖动.

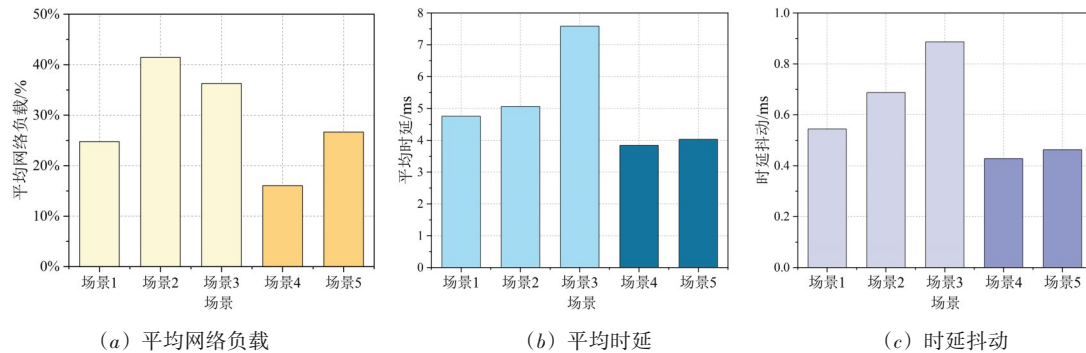


图9 全息通信智算融合网络系统实验测试结果

## 6 结语

本文研究面向全息通信的智算融合网络,对全息业务和网络资源进行统一标识,通过标识映射将差异化全息业务和多样化网络资源相适配,以解决全息通信中高带宽、低时延和数据同步的三大关键需求。基于智算融合网络进一步设计全息通信智算融合网络系统,包括支持全息通信的映射适配器和智融网络设备。对系统的实验结果表明,与边缘计算相比,智算融合网络能够降低全息通信业务60%的网络带宽和45%的传输时延。在未来的研究中,将进一步研究智融网络设备的功能放置问题,以高带宽、低时延和数据同步为目标设计复杂应用场景下的多个功能的编排部署方法。

### 参考文献

- [1] CAI Y G, GAO X S, CHEN W Q, et al. Towards 6DoF live video streaming system for immersive media[J]. *Multi-media Tools and Applications*, 2022, 81(25): 35875-35898.
- [2] AKYILDIZ I F, GUO H Z. Holographic-type communication: A new challenge for the next decade[J]. *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, 2022, 3(2): 421-442.
- [3] CLEMM A, VEGA M T, RAVURI H K, et al. Toward truly immersive holographic-type communication: Challenges and solutions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 93-99.
- [4] 袁晓志, 彭莉, 张琳峰. 全息通信对未来网络的需求与挑战[J]. *电信科学*, 2020, 36(12): 59-64.  
YUAN X Z, PENG L, ZHANG L F. Requirement and challenge of holographic-type communication to the future network[J]. *Telecommunications Science*, 2020, 36(12): 59-64. (in Chinese)
- [5] 王凌豪, 王森, 张亚文, 等. 未来网络应用场景与网络能力需求[J]. *电信科学*, 2019, 35(10): 2-12.  
WANG L H, WANG M, ZHANG Y W, et al. Future network application scenarios and network capability requirements[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(10): 2-12. (in Chinese)
- [6] ANMULWAR S, WANG N, HUYNH V S H, et al. Holo-sync: Frame synchronisation for multi-source holographic teleportation applications[J]. *IEEE Transactions on Multi-media*, 2022, 25: 6245-6257.
- [7] QIAN P, HUYNH V S H, WANG N, et al. Remote production for live holographic teleportation applications in 5G networks[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2022, 68(2): 451-463.
- [8] EL ESSAILI A, THORSON S, JUDE A, et al. Holographic communication in 5G networks[J]. *Ericsson Technology Review*, 2022, 2022(5): 2-11.
- [9] GUAN Y J, HOU X Y, WU N, et al. MetaStream: Live volumetric content capture, creation, delivery, and rendering in real time[C]//*Proceedings of the 29th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM, 2023: 1-15.
- [10] LUO Q Y, HU S H, LI C L, et al. Resource scheduling in edge computing: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(4): 2131-2165.
- [11] KIANPISHEH S, TALEB T. A survey on in-network computing: Programmable data plane and technology specific applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(1): 701-761.
- [12] 杨冬, 程宗荣, 田伟康, 等. 广义确定性标识网络[J]. *电子学报*, 2024, 52(1): 1-18.  
YANG D, CHENG Z R, TIAN W K, et al. Generalized deterministic identification networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(1): 1-18. (in Chinese)
- [13] 张宏科, 冯博昊, 权伟. 智融标识网络基础研究[J]. *电子学报*, 2019, 47(5): 977-982.  
ZHANG H K, FENG B H, QUAN W. Fundamental research on smart integration identifier networking[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(5): 977-982. (in Chinese)
- [14] PORTS D R K, NELSON J, PORTS D R K, et al. When should the network be the computer?[C]//*Proceedings of the Workshop on Hot Topics in Operating Systems*. New York: ACM, 2019: 209-215.

- [15] HUANG Y K, ZHU Y W, QIAO X Q, et al. Toward holographic video communications: A promising AI-driven solution[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(11): 82-88.
- [16] HUANG Y K, BAI B Y, ZHU Y W, et al. ISCom: Interest-aware semantic communication scheme for point cloud video streaming on metaverse XR devices[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(4): 1003-1021.
- [17] RAVURI H K, TORRES VEGA M, VAN DER HOOFT J, et al. Partially reliable transport layer for quicker interactive immersive media delivery[C]//Proceedings of the 1st Workshop on Interactive Extended Reality. New York: ACM, 2022: 41-49.
- [18] SELINIS I, WANG N, DA B, et al. On the Internet-scale streaming of holographic-type content with assured user quality of experiences[C]//2020 IFIP Networking Conference. (Networking). Piscataway: IEEE, 2020: 136-144.
- [19] AGHAALIAKBARI F, HMITTI Z A, RAYANI M, et al. An architecture for provisioning in-network computing-enabled slices for holographic applications in next-generation networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(3): 52-58.
- [20] BEHAVIORAL MODEL (bmv2) [EB/OL]. (2022-02-11)[2024-06-03]. <https://github.com/p4lang/behavioral-model>.

### 作者简介



**陈 佳 女**, 1983年出生. 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为未来信息网络体系架构及关键技术、面向全息通信的资源适配研究、在网计算技术等.  
E-mail: chenjia@bjtu.edu.cn



**刘 上 男**, 1999年3月出生. 北京交通大学博士研究生. 主要研究方向为全息通信网络架构及在网计算技术.  
E-mail: 22115009@bjtu.edu.cn



**邵 帅 男**, 1980年8月出生. 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师. 目前主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术. 主持和参与多项国家973、863、国家自然科学基金项目. 中国电子学会会员编号: E190091752M.  
E-mail: shgao@bjtu.edu.cn



**黄 旭 男**, 1999年3月出生. 北京交通大学博士研究生. 主要研究方向为确定性网络与全息通信网络.  
E-mail: 21111024@bjtu.edu.cn



**张宏科 男**, 1957年9月出生. 中国工程院院士. 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师. 移动专用网络国家工程研究中心主任. 主要研究方向为新一代信息网络理论与关键技术. 中国电子学会会员编号: E190004689S.  
E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn