

软件定义多维光网络研究进展与展望

郭磊¹, 张旭^{1,2}, 侯维刚¹, 刘业君¹, 张琦涵^{1,2}, 曹子峥³

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

2. 东北大学计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169; 3. 埃因霍芬理工大学电气工程学院, 埃因霍芬 999025)

摘要: 为了满足多样化的业务需求, 基于架构按需节点和多核光纤的软件定义多维光网络将实现可定制化的网络服务。针对多维网络资源管控问题, 首先, 介绍了软件定义多维光网络的架构; 接着, 评述了软件定义多维光网络的使能技术; 最后, 展望了软件定义智能多维光网络的发展方向。

关键词: 软件定义光网络; 多维光网络; 智能控制与管理; 架构按需节点; 多核光纤

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020010

Research progress and prospect of software-defined multi-dimensional optical network

GUO Lei¹, ZHANG Xu^{1,2}, HOU Weigang¹, LIU Yejun¹, ZHANG Qihan^{1,2}, CAO Zizheng³

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2. School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China

3. Department of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, Eindhoven 999025, the Netherlands

Abstract: To meet diverse business needs, both architecture on demand (AoD) nodes and multi-core fibers (MCF) based software-defined multi-dimensional optical networks will enable customizable network services. Aiming at the problem of management and control for multi-dimensional network resources, the architecture of software-defined multi-dimensional optical networks was introduced firstly. Then, the enabling technologies to support the implementation of software-defined multi-dimensional optical networks were presented. Finally, the development direction of software-defined intelligent multi-dimensional optical networks was proposed and analyzed.

Key words: software-defined optical network, multi-dimensional optical network, intelligent control and management, architecture on demand node, multi-core fiber

1 引言

光纤通信技术由于其传输带宽大、抗干扰性强和信号衰减小等诸多优点, 已成为骨干网中主要的通信传输媒介。基于光纤通信技术的光网络, 必将成为未来信息社会中的主要网络技术之一。然而, 随着 5G^[1-2]、物联网 (IoT, Internet of things)^[3-4]、大数据 (BD, big data)^[5]、云计算 (CC, cloud computing)^[6]等技术的发展, 新兴

的网络业务层出不穷, 人们在网络上进行购物、社交、娱乐以及金融等相关的活动, 这对光网络各方面的能力提出了新的需求, 促使光网络技术同时向深度与广度 2 个方向发展。

在光网络发展历程中, 基于通用多协议标签交换 (GMPLS, generalized multi-protocol label switching)^[7]的自动交换光网络 (ASON, automatic switching optical network) 技术能够以分布式控制的

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-12-12

通信作者: 张旭, zhangxu_neu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61775033, No.61771120, No.61801105)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61775033, No.61771120, No.61801105)

方式动态实现光路的建立与拆除。然而，基于 GMPLS 的传统分布式控制机制面临收敛时间长、协议复杂、控制效率低等问题。为此，路径计算单元（PCE, path computation element）^[7]从分布式控制平面中被剥离出来，促成了光路计算从分布式到集中式的演化。但是，PCE 仍然需要节点上加载的控制平面的配合来维护全局的网络视图，这种分布式与集中式相结合的方式难以高效率地满足日益增长的业务需求。同时，对于光正交频分复用和空分复用等新型的光复用技术，传统光网络管控平面很难快速改变固有的控制逻辑。因此，软件定义光网络（SDON, software-defined optical network）被提出^[8]，其将传统传送平面的转发和控制分离，北向接口对接业务应用，南向接口对接网络连接，利用软件可编程的方式对光网络基础设施进行灵活管理，从而高效利用网络资源以满足多样化的业务需求，实现智能的自动控制与升级维护。

空分复用（SDM, space division multiplexing）技术（例如多核光纤、多模/少模光纤、多核少模光纤等）的出现将光网络资源的维度从时间和频率 2 个维度扩展到了时间、频率和空间多个维度。其中，在基于多核光纤的软件定义多维光网络方面，文献[9]展示了利用 12 核光纤实现 0.52 Pbit/s 级别的跨洋传输系统，其传输距离能够达到 8 830 km。在基于多模/少模光纤的软件定义多维光网络方面，文献[10]使用支持 6 个模式的折射率渐变少模光纤实现了 138 Tbit/s 的传输系统，其传输距离能够达到 590 km；同时，文献[11]利用 10 个模式的弱耦合少模光纤实现了 257 Tbit/s 的传输速率。在基于多核少模光纤的软件定义多维光网络方面，文献[12]利用特殊设计的 19 核 6 模光纤实现了 10.16 Pbit/s 的单纤传输速率，总频谱效率高达 $1\,099.9 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})^{-1}$ 。此外，架构按需（AoD, architecture on demand）技术的出现从节点层面进一步开放了节点的功能灵活度，使网络节点的功能模块化，并动态合成所需功能的光节点。

因此，基于 AoD+SDM 组合的软件定义多维光网络具有以下特性。

1) 节点功能的可定制化。AoD 节点可以根据不同的需求动态地组合成所需的功能架构，进而提供不同维度的网络功能。同时，网络开发者也可以利用节点可编程的特性重新配置节点功能，进而大大地提高了网络节点功能的灵活性。

2) 网络资源维度的多样化。SDM 光纤的引入，

一方面大幅增加了网络容量的承载能力，另一方面也扩展了网络资源的维度，在原有时间和频率资源维度的基础上又增加了空间维度，提高了网络资源的多维性，丰富了多维网络资源池的构建。

3) 控制平面的逻辑集中化。得益于 SDON 集中式架构的优势，AoD+SDM 组合的软件定义多维光网络同样继承了控制与转发分离的网络形式，这样所有的控制功能被集中到了顶端的控制平面，形成了网络集中管控的局面。

但是，现有研究大多只解决了小规模组网和传输的问题，针对未来大规模组网和应用的软件定义多维光网络仍有许多问题，特别是网络的可扩展性问题、网络状态的测量问题以及网络决策的智能问题等尚未解决。

2 软件定义多维光网络架构

软件定义多维光网络架构如图 1 所示，主要包含数据平面、控制平面和应用平面。

数据平面包括负责转发数据流的光转发节点和光代理模块。光转发节点只负责数据的转发，光代理模块通过南向接口与控制平面进行通信，向下可以根据控制器的指令配置光节点的交叉连接，向上可以将数据平面的网络状态上传到控制平面。常见的南向接口协议包括扩展的 OpenFlow、MPLS-TP（multi-protocol label switching-transport profile）、NETCONF（network configuration protocol）、OpenConfig 模型接口以及 OpenROADM MSA（open reconfigurable optical add/drop multiplexer and multi-source agreement）接口。

控制平面包含逻辑集中的光网络控制器。控制器包含连接功能、拓扑资源、信令功能等多个功能模块，负责整个网络的拓扑维护、资源控制以及应用管理等操作，并通过北向接口为应用平面提供网络操作系统层面的支持。

应用平面包括各种类型的网络应用。在应用平面中，各种新兴的网络功能、路由与资源分配方案等都可以实现，例如，路由与波长分配（RWA, routing and wavelength assignment）算法^[13]，路由、波长与时隙分配（RWTA, routing, wavelength and timeslot assignment）算法^[14]，路由与频谱分配（RSA, routing and spectrum assignment）算法^[15-16]以及路由、调制等级与频谱分配（RMLSA, routing, modulation level and spectrum assignment）算法^[17-18]等，从而完

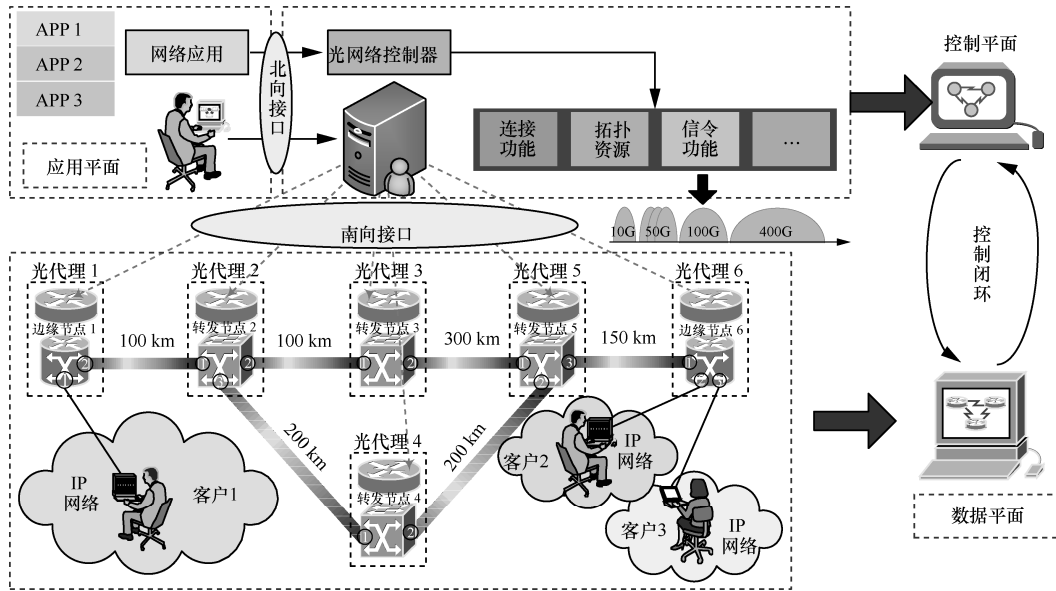


图 1 软件定义多维光网络架构

成编码控制、载波管理和谱宽规划等操作。

软件定义多维光网络从架构上打破了传统网络垂直方向的僵化问题，实现了控制与转发的分离，构建了网络与业务的互动通道，形成了状态上传与动作下发的大规模闭环控制结构。

3 多样化的资源维度

从原理层面看，构成光网络的基本元素是光纤以及用于产生光信号、交换光信号和检测光信

号的光节点。多路光信号通常被复用到一根或多根光纤中进行传输。从光网络资源的复用角度来分类，当前的光网络被分为时分复用（TDM, time division multiplexing）光网络^[19-20]、波分复用（WDM, wavelength division multiplexing）光网络^[21-22]、正交频分复用（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）光网络^[23-24]以及 SDM 光网络^[25-26]。图 2 展示了时间、频率和空间多个维度的光网络资源。

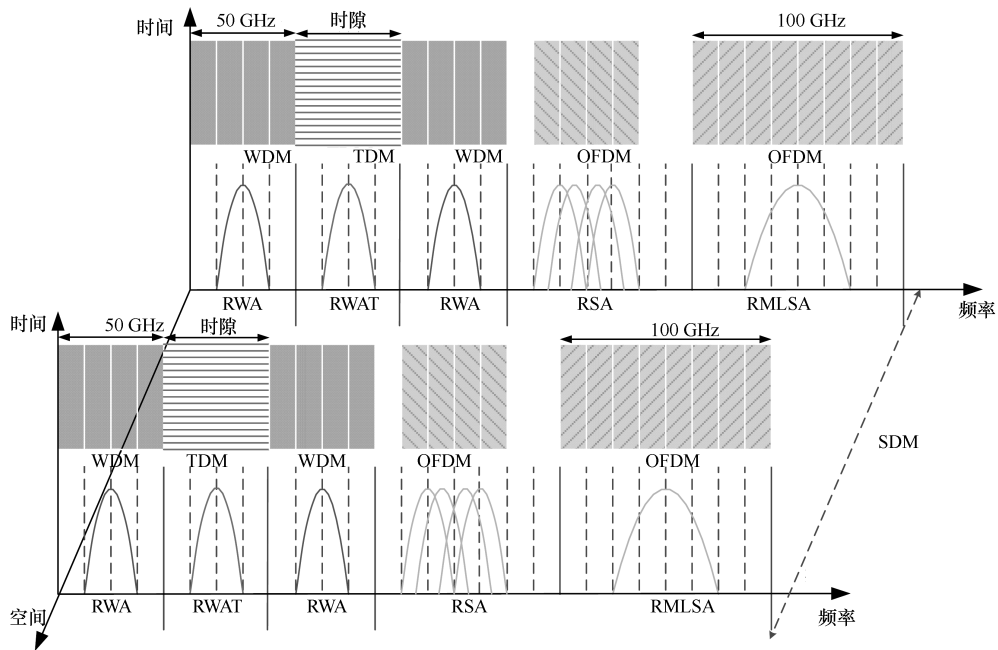


图 2 多维光网络资源

3.1 TDM 光网络

TDM 光网络的网络资源的基本单元是时隙。将波长在时间维度上分成多个时间槽，一个时间槽作为一个时隙。不同的业务请求被分配到同一波长的不同时隙上进行传输，同时，根据业务请求的大小，可以分配一个或多个时隙来满足业务的传输需求^[27]。

3.2 WDM 光网络

WDM 光网络的网络资源的基本单元是波长。在频率维度上，一根光纤中可以同时传输不同频率的波长。不同的业务请求可以被加载到不同的波长上进行传输。值得注意的是，WDM 光网络中一个波长的带宽通常是固定的，例如 50 GHz 或者 100 GHz，因此 WDM 光网络也被称作固定粒度光网络^[28]。基于文献[29]中的仿真参数设置（每个链路中有 40 个波长），本文对比了 3 种 RWA 算法，分别是最大容量优先（MCF, maximize capacity first）算法、最短距离优先（SDF, shortest distance first）算法和最大容量/跳数优先（MCHF, maximize capacity-over-hops first）算法，如图 3 所示。从图 3 中可以明显看出，与 MCF 算法和 SDF 算法相比，MCHF 算法具有更强的业务承载能力。

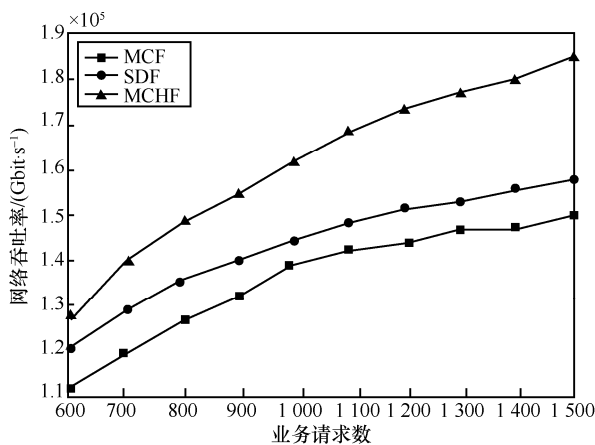


图3 WDM 光网络的网络吞吐量

3.3 OFDM 光网络

OFDM 光网络的网络资源的基本单位是频谱槽。在频率维度上，OFDM 光网络的频谱被分成多个粒度较小、相互正交的频谱槽，一个频谱槽的带宽是 12.5 GHz。根据业务请求的大小，一个业务可以占用一个或者多个连续的频谱槽，而不同的业务请求可以被分配到不同的频谱槽上进行传输。相比于 WDM 光网络的固定波长粒度，OFDM 的正交性

允许多个频谱槽的光谱重叠，并根据业务请求所需要的实际带宽进行拆分与聚合，从而很好地解决了粒度不匹配问题，节约了光谱资源。OFDM 技术通过灵活的带宽适配、动态频域处理技术极大提高了光谱资源利用率，因此，OFDM 光网络也被称作弹性光网络^[30]。基于文献[18]中的仿真参数设置，对比了 2 种 RSA 算法，分别是基于频谱效率和连通度的路由、调制等级和频谱分配（SEC-RMLSA, routing, modulation level and spectrum allocation based on spectral efficiency and connectivity）算法和首次命中的路由和频谱分配（FF-RSA, first-fit routing and spectrum allocation）算法，如图 4 所示。从图 4 中可以明显看出，与 FF-RSA 算法相比，SEC-RMLSA 算法有更高的网络吞吐量。

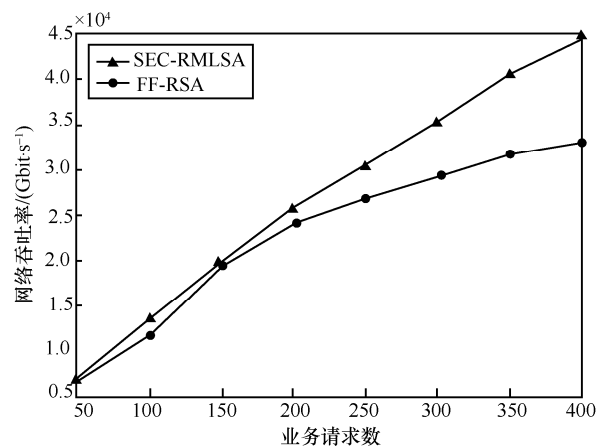


图4 OFDM 光网络的网络吞吐量

3.4 SDM 光网络

SDM 光网络的网络资源的基本单位是光纤核。在空间维度上，一根光纤中包含多个光纤核或者多个模式^[31]。以多核光纤为例，不同的光纤核中可以同时传输相同甚至是不同类型的业务，同时，分配给业务的光网络资源也呈现多样化，如时隙、波长和频谱槽等。因此，SDM 光网络在资源分配上，除了时间和频率维度外，带来了新的维度，即空间维度^[32-34]。

4 软件定义多维光网络使能技术

软件定义多维光网络的构建与发展，需要光节点、光链路和光管控平面 3 个层面的使能技术支持。光节点需要进一步开放节点的功能灵活以及动态可重配置特性；光链路的容量需要进一步扩充，把网络资源的维度从时间和频率 2 个维度，扩充到时

间、频率和空间 3 个维度；光管控平面需要集中管控灵活的光节点和扩容的光链路，并进一步开放南北向接口，促进网络应用的创新。接下来，针对以上 3 个层面的使能技术，分别介绍配置灵活的 AoD 节点、链路扩容的 SDM 光纤和逻辑集中的管控平面。图 5 为基于 AoD 可重配置节点的软件定义空分复用光网络架构。

4.1 配置灵活的 AoD 节点

AoD 技术从节点层面进一步开放了软件定义多维光网络的节点功能灵活性，促进了光网络向更加多维的方向发展。图 5 展示了 AoD 节点^[35-37]的内部组成。它包含一个多端口的 3D 微电子机械系统 (MEMS, micro-electro-mechanical system)，即 3D MEMS 光背板 (optical backplane)。光背板连接多个信号处理模块，例如频谱选择开关 (SSS, spectrum selective switch)、复用器 (MUX, multiplexer)、解复用器 (DEMUX, demultiplexer)、分路器 (splitter)、耦合器 (coupler)、锆钛酸铅陶瓷 (PLZT, lead lanthanum zirconate titanate) 以及掺铒光纤放大器 (EDFA, erbium-doped optical fiber amplifier) 等功能组件。在光背板中，通过对输入端口、各种功能组件以及输出端口建立合理的交叉连接，能够实现各种不同功能的光节点。AoD 可以根据实际网络场景的需要，动态地调整节点所传输的业务类型，也能够通过增加或者减少组件的方式来提供额外的功能，例如波长转换、碎片重组等。由于可以按照任意自由的方式连接各种光信号处理组件，AoD 架构相较于硬连接线的静态架构，能够

提供更大的灵活性。因此，可以根据需要提供可编程的合成架构，进而提高 AoD 在灵活性与可扩展性方面带来的收益。

4.2 链路扩容的 SDM 光纤

SDM 的出现为光网络提供了更有力的技术支持。当前，SDM 已被证明可以显著提高光链路的传输容量^[38-40]。尽管 SDM 技术的发展仍处在早期阶段，但是 SDM 技术的优势，例如支持空间超级信道 (spatial super channel)^[41-44]和自零差探测 (SHD, self-homodyne detection) 技术^[45-47]，已经被展示在一个 MCF 系统中^[48-49]。SDM 技术的优势不仅仅是带宽容量的直接增加，它还能够带宽配置方面提供额外的灵活性。同时，AoD 与 SDM 的结合可以将网络资源的维度进一步扩展到空间维度，从而实现时间、频率、空间 3 个维度的网络资源，这对具有集中控制特性的控制器进行全局的资源分配操作起到了必要的支撑作用。此外，对于基于 SDM 和 AoD 组合的数据平面，控制平面应支持网络资源的虚拟化，以便创建光基础设施的多个隔离层，并且可以由不同的网络应用程序分配、控制，甚至是编程，从而满足对基础设施高效且动态共享的新需求。

4.3 逻辑集中的管控平面

AoD+SDM 组合的多维光网络在提高网络容量和灵活性的同时，也对网络控制和管理提出了新的挑战。为了充分利用 AoD+SDM 网络，有必要开发网络控制和管理的新方法，这些方法能够支持传输层增加的复杂性，并且促进由附加空间维度产生新型网络功能的创新。如图 5 所示，利用 SDON 控制

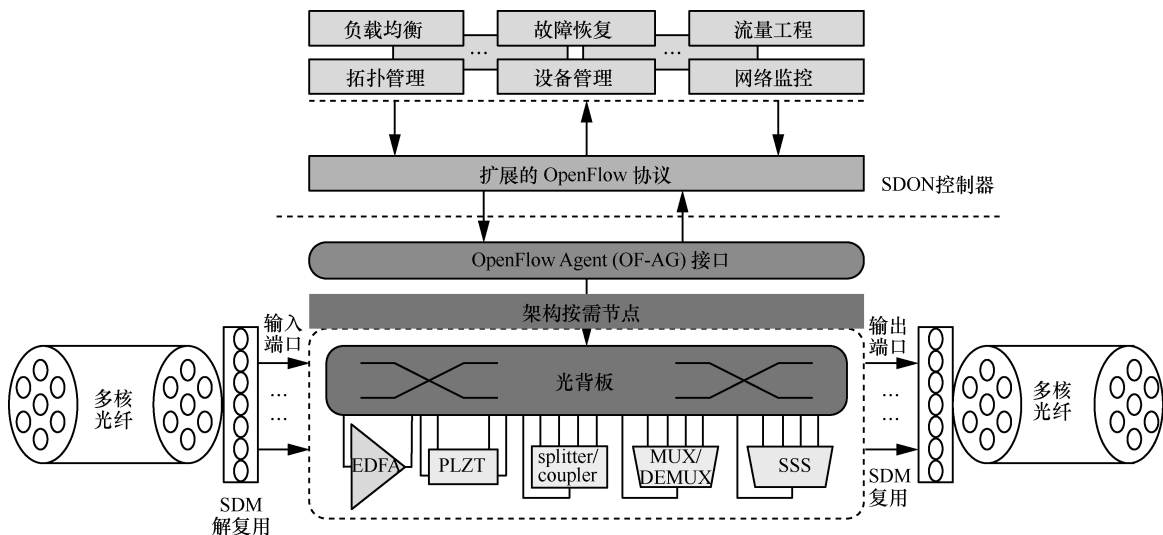


图 5 基于 AoD 可重配置节点的软件定义空分复用光网络架构

管理基于 MCF 链路与 AoD 节点的新型带宽灵活的可编程多维光网络。SDON 控制平面通过抽象 AoD+SDM 基础设施的技术细节,使其可切片、可直接访问和可由网络应用控制,实现网络和传输功能的服务级可编程性。在架构的最顶端,实现的依然是网络的各种控制功能,例如,负载均衡应用、故障恢复应用和流量工程应用等。紧挨着应用的是控制器内部的核心功能组件,如图 5 中展示的拓扑管理组件、设备管理组件和网络监控组件等。本文只列出了针对 AoD 节点和 MCF 光纤链路的关键组件,还有一些控制器通用的核心模块未列出。拓扑管理组件主要负责将 AoD 光节点以及 MCF 光纤链路构建成网络图,并根据节点的到达/离开事件、链路的到达/离开事件实时动态地更新整个网络的拓扑图。设备管理组件负责管理 AoD 光节点以及节点内部的各种功能部件,根据上层应用的需求自定义各种部件的组合方式,进而形成不同功能的光节点。网络监控组件负责动态监控 MCF 光纤链路中不同核上的网络资源状态,并且随着业务的到达实时更新 MCF 光纤链路上的资源占用情况。控制模块通过扩展的南向接口 OpenFlow 协议与底层 AoD 设备顶端的 OpenFlow 代理 (OF-AG, OpenFlow agent) 进行信息交互。OF-AG 的功能包括 2 个方面:一方面,将上层应用发来的 OpenFlow 协议消息翻译、解析成自定义的命令,进而配置 AoD 光节点内部的部件组合方式以及光交叉的连接方式;另一方面,将 AoD 光节点的各种资源状态信息以及流量的请求信息封装成 OpenFlow 消息发送给控制器。

在数据转发平面中,由可重配置的 AoD 转发节点和连接转发节点的 MCF 光纤链路构成整个转发网络。这一层仅仅负责数据的转发,转发动作操作以及节点功能合成所需要的光流表是由控制层生成的。由于 AoD 节点可重配置的特性和 MCF 光纤链路容量扩容的特性,AoD+MCF 组合的软件定义多维光网络进一步开放了数据平面的灵活性。这 2 个特性至关重要,它将固有网络的僵化局面从节点和链路 2 个层面中解脱出来,即 AoD 节点能够根据流量的需求动态地合成节点的架构,增强了节点的功能可重构特性;基于 SDM 技术的多核光纤则将网络资源的粒度引向了多个维度(例如光纤核粒度、波长粒度、频谱槽粒度、时隙粒度等),进一步提高了网络的可扩展性。

5 软件定义多维光网络发展方向

虽然基于 AoD+SDM 的软件定义多维光网络能够增加网络的容量且提高网络的灵活度,但是也对网络的智能控制和高效管理带来了新的挑战。例如,如何针对复杂的多维网络资源池设计有效的路由与资源分配算法,其中涉及光路径选择、光纤核选取、时隙/波长/频隙等资源的分配。同时,要求控制平面能够感知和区分具有多根光纤的链路,这些链路的特性不一定相同,并且多核光纤中的多个核也表现出相似或者相斥的特性。此外,除了资源维度的增加外,网络的规模也逐渐增大。因此,面对当前网络的高度动态、复杂、碎片化和自定义化等问题,如何灵活且高效地管理多维光网络这一问题,受到了学术界与工业界的广泛关注,亟需解决的关键技术包括网络互通与协同、网络状态测量以及 AI 智能决策等。

5.1 网络互通与协同

为了应对未来光网络的大规模及异构等特性,需要形成一个物理上分散但逻辑上集中的控制平面^[50-54]。图 6 展示了一种多域协同的网络控制平面。协同控制器是一个逻辑集中的根控制器,单域控制器是多个和域内交换单元靠近的本地控制器。单域控制器的任务是维护域内网络视图和服务本地域内应用;协同控制器的任务是控制一个或者多个单域控制器,维护全局网络视图,服务非本地域间业务。协同控制器与单域控制器通过统一的北向接口进行交互,进而可以根据自身或者应用程序的需要,向单域控制器获取底层网络信息或者对底层设备进行配置。因此,协同控制器与单域控制器形成了一个逻辑集中的网络控制平台,对底层网络进行管理,为多域网络控制提供架构支持,进而实现端到端的网络服务。

5.2 网络状态测量

全局的网络状态信息是智能路由的关键^[55-56],它是为用户提供高质量服务的必要输入条件。未来的光网络是面向业务的而不再是单纯面向连接的。为了保障用户端到端的服务质量,不仅需要选择合适的光路、分配恰当的资源,还需要关注光物理层的属性,才能保证光信号的传输质量。因此,网络状态的测量也包括光物理层的参数感知(例如光路的物理损伤感知)以及可调谐的光节点属性感知(例如节点支持的调制格式、光源的输入输出功率、

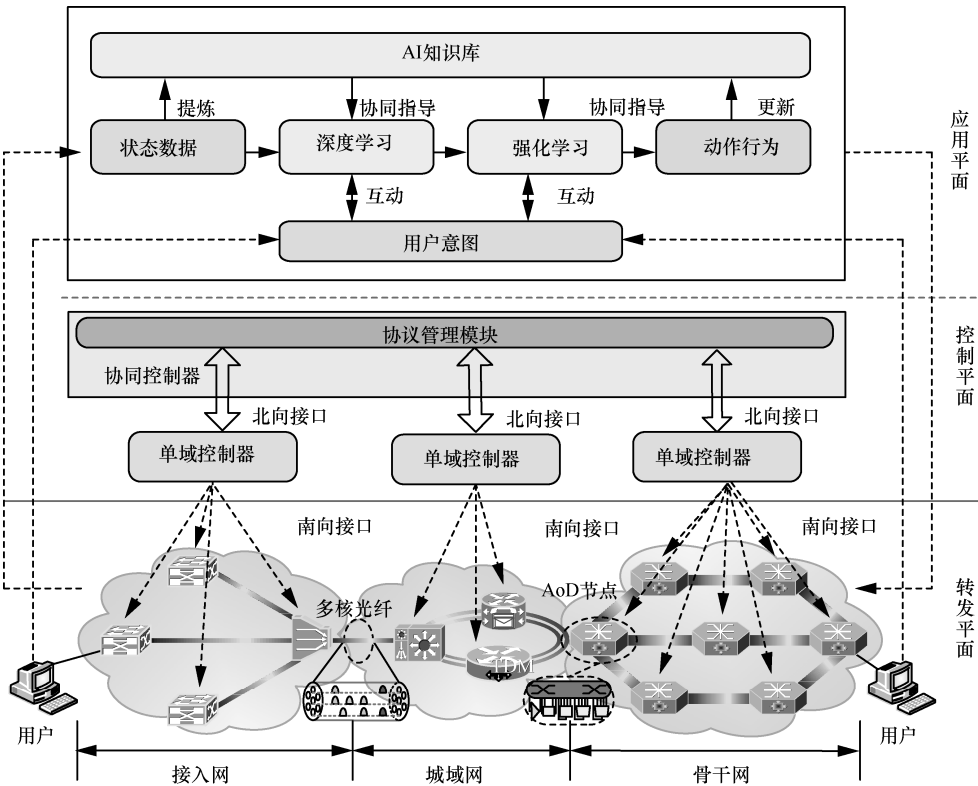


图 6 基于多域控制的多维智能光网络

信号的速率以及不同的带宽交换粒度等)^[57]。只有获取到尽可能多且准确的网络状态信息，才能更加灵活地提供可定制化的网络服务，从而更好地服务于多样化的业务需求。

5.3 AI 智能决策

AI 辅助的应用平面是寻找最优控制策略的网络大脑^[58-63]，它能够解决“白盒优化”方法无法解决的大规模、高动态、多需求网络场景的复杂管控问题。图 6 中，AI 辅助的智能应用平面采用深度学习与强化学习相结合的新型网络控制与管理模式，以解决复杂网络的优化控制问题。它通过网络状态采集上传和优化决策自动下发，实现对网络的闭环控制，并通过与整个网络和用户意图的交互，构建一个集中式智能学习策略的知识库。最终，基于全网域的信息-知识-决策交互框架，使运行在多域网络控制平面中的智能路由模型能够更好地解决复杂网络控制的问题，提升网络的自学习、自适应和自演进等能力。

在路由与资源优化方面，文献[64]提出了路由、调制和频谱分配的深度强化学习框架 DeepRMSA (deep reinforcement learning for routing, modulation and spectrum assignment)，

通过使用可以感知复杂网络状态的深度神经网络参数化策略来学习正确的在线路由与资源分配策略。在异常检测方面，文献[65]利用了混合的无监督/有监督的机器学习方案，提出了一种自学习的光网络异常检测框架，消除了对异常网络行为先验知识的需求，因此可以潜在地检测到不可预见的异常。在服务链的供应方面，由于缺乏对网络基本特征的了解，传统基于规则的策略会带来可伸缩性问题，甚至可能导致资源利用效率低下。文献[66]通过使用深度强化学习代理，从动态网络操作中学习策略，该新框架实现了基于自学习的服务供应功能。这一功能可以显著减少为新兴应用开发有效的服务供应策略而投入的人力，从而促进网络的快速发展。在网络操作维护管理方面，文献[67]提出了一种基于 SDN 的新型光网络架构，该架构也被称为自优化光网络 (SOON, self-optimizing optical network)，并演示了 SOON 中的 4 个典型应用，包括潮汐流量预测、警报预测、异常动作检测以及路由和波长分配。虽然人工智能技术在多维光网络中的研究尚处于初级阶段，但是其在光网络中的探索仍具有重要的参考价值与意义。

6 结束语

本文首先回顾了光网络技术的发展历史,介绍了光网络技术从分布式向集中式的演化。其次,介绍了集中式的软件定义多维光网络架构、组成形式及各部分功能模块。然后,引入多样化的网络资源维度,即时间、频率和空间3个维度。为实现软件定义多维光网络,需要在光节点、光链路以及光管控平面3个方面实现理论和技术突破,并分别阐述了配置灵活的AoD节点、链路扩容的SDM光纤和逻辑集中的管控平面3个使能技术。最后,从网络互通与协同、网络状态测量和AI智能决策3个方面展望软件定义多维光网络的未来发展方向。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WANG C, HAIDER F, GAO X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 122-130.
- [3] RAMEZANI P, JAMALIPOUR A. Toward the evolution of wireless powered communication networks for the future Internet of things[J]. IEEE Network, 2017, 31(6): 62-69.
- [4] 邵雯娟, 沈庆国. 软件定义的 D2D 和 V2X 通信研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(4): 179-194.
SHAO W J, SHEN Q G. Survey of software defined D2D and V2X communication[J]. Journal on Communications, 2019, 40(4): 179-194.
- [5] CUI L, YU F, YAN Q. When big data meets software-defined networking SDN for big data and big data for SDN [J]. IEEE Network, 2016, 30(1): 58-65.
- [6] YIN Y, LIU L, PROIETTI R, et al. Software defined elastic optical networks for cloud computing[J]. IEEE Network, 2017, 31(1): 4-10.
- [7] MARTINEZ R, CASELLAS R, VILALTA R, et al. GMPLS/PCE-controlled multi-flow optical transponders in elastic optical networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(11): B71-B80.
- [8] THYAGATURU A, MERCIAN A, MCGARRY M, et al. Software defined optical networks (SDONs): a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2738-2786.
- [9] TURUKHIN A, BATSHON H, MAZURCZYK M, et al. Demonstration of 0.52 Pb/s potential transmission capacity over 8,830 km using multicore fiber[C]// 42nd European Conference on Optical Communication, 2016: 211-213.
- [10] WEERDENBURG J, RYF R, ALVARADO-ZACARIAS J, et al. 138-Tb/s mode-and wavelength-multiplexed transmission over six-mode graded-index fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(6): 1369-1374.
- [11] SOMA D, BEPPU S, WAKAYAMA Y, et al. 257-Tbit/s weakly coupled 10-mode C+ L-band WDM transmission [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(6): 1375-1381.
- [12] SOMA D, WAKAYAMA Y, BEPPU S, et al. 10.16-Peta-B/s dense SDM/WDM transmission over 6-mode 19-core fiber across the C+L band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(6): 1362-1368.
- [13] GE M, YE T, LEE T, et al. Multicast routing and wavelength assignment in AWG-based Clos networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(3): 1892-1909.
- [14] DIAS M, VAN D, VALCARENGHI L, et al. Energy-efficient framework for time and wavelength division multiplexed passive optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(6): 496-504.
- [15] TALEBI S, ROUSKAS G. On distance-adaptive routing and spectrum assignment in mesh elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(5): 456-465.
- [16] 吴菁晶, 张建芳. 基于弹性光网络的多播业务保护算法[J]. 通信学报, 2019, 40(3): 147-156.
WU J J, ZHANG J G. Multicast service protection algorithm based on elastic optical network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(3): 147-156.
- [17] HABIBI M, BEYRANVAND H. Impairment-aware manycast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(5): 179-189.
- [18] ZHANG X, GUO L, HOU W, et al. Experimental demonstration of an intelligent control plane with proactive spectrum defragmentation in SD-EONs [J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24837-24852.
- [19] HARSTEAD E, VEEN D, HOUTSMA V, et al. Technology roadmap for time-division multiplexed passive optical networks (TDM PONs) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 657-664.
- [20] ZHOU S, LIU X, EFFENBERGER F, et al. Low-latency high-efficiency mobile fronthaul with TDM-PON (mobile-PON) [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(1): A20-A26.
- [21] LUO M, LI J, ZENG T, et al. Real-time coherent UDWDM-PON with dual-polarization transceivers in a field trial [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(2): A166-A173.
- [22] CAO Y, ZHAO Y, WAN J G, et al. Cost-efficient quantum key distribution (QKD) over WDM networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(6): 285-298.
- [23] HADI M, PAKRAVAN M. Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(2): 90-103.
- [24] WANG R, BIDKAR S, MENG F, et al. Load-aware nonlinearity estimation for elastic optical network resource optimization and management [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(5): 164-178.
- [25] YUAN H, FURDEK M, MUHAMMAD A, et al. Space-division multiplexing in data center networks: on multi-core fiber solutions and crosstalk-suppressed resource allocation [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(4): 272-288.
- [26] WU J, SUBRAMANIAM S, HASEGAWA H. Efficient dynamic routing and spectrum assignment for multifiber elastic optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(5): 190-201.

- [27] XU B, LIU C, JIN X, et al. Time-division multiplexed vector signal synthesizer based on continuous PTS [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(11): 1020-1023.
- [28] LIU L, TSURITANI T, NISHIOKA I, et al. Experimental demonstration of highly resilient wavelength-switched optical networks with a multivendor interoperable GMPLS control plane [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(5): 704-712.
- [29] ZHANG X, GUO L, HOU W, et al. An efficient data delivery and scheduling scheme for smart and sustainable cities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 497-513.
- [30] ZHU Z, CHEN C, CHE X N, et al. Demonstration of cooperative resource allocation in an OpenFlow-controlled multidomain and multinational SD-EON testbed [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(8): 1508-1514.
- [31] CAO Y, ZHAO Y, YU X, et al. Mode Conversion-based cross-talk-aware routing, spectrum and mode assignment in space-division multiplexing elastic optical networks [C]// *International Conference on Optical Communications and Networks*. 2017: 1-3.
- [32] JINNO M, MORI Y. Unified architecture of an integrated SDM-WSS employing a PLC-based spatial beam transformer array for various types of SDM fibers [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(2): A198-A206.
- [33] SHIBAHARA K, MIZUNO T, LEE D, et al. Advanced MIMO signal processing for dense SDM transmission using multi-core few-mode fibers [C]// *2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)*. 2016: 1-3.
- [34] LE D, VU D, TRAN X, et al. FPGA design and implementation of the detector for the MIMO-SDM system using PNC[C]// *IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics*. 2016: 205-210.
- [35] AMAYA N, ZERVAS G, SIMEONIDOU D. Introducing node architecture flexibility for elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(6): 593-608.
- [36] GARRICH M, AMAYA N, ZERVAS G, et al. Architecture on demand design for high-capacity optical SDM/TDM/FDM switching[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(1): 21-35.
- [37] ROFOEE B, ZERVAS G, YAN Y, et al. All programmable and synthetic optical network: architecture and implementation[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(9): 1096-1110.
- [38] FUJII S, HIROTA Y, TODE H, et al. On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(12): 1059-1071.
- [39] MUHAMMAD A, ZERVAS G, FORCHHEIMER R. Resource allocation for space-division multiplexing: optical white box versus optical black box networking[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23): 4928-4941.
- [40] KHODASHENAP S, RIVAS-MOSCOSO J, SIRACUSA D, et al. Comparison of spectral and spatial super-channel allocation schemes for SDM networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(11): 2710-2716.
- [41] MENDINUETA J, SHINADA S, HIROTA Y, et al. Time-division packet spatial super-channel switching system with 53.3 TB/s/port for converged inter/intradata center optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(3): 677-687.
- [42] MENDINUETA J, SHINADA S, HIROTA Y, et al. Converged inter/intradata center optical network with packet super-channels and 83.33 Tb/s/port[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 571-578.
- [43] MUÑOZ R, YOSHIKANE N, FÀBREGA J M, et al. SDN-enabled scaling up/down of sdm super-channels exploiting spatial modes with adaptive MIMO equalization and modulation format assignment[C]// *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. San Diego, 2019: 1-3.
- [44] MUÑOZ R, YOSHIKANE N, VILALTA R, et al. SDN control of sliceable multidimensional (spectral and spatial) transceivers with YANG/NETCONF [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(2): A123-A133.
- [45] ZHANG H, WEN A, ZHANG W, et al. A spectral-efficient self-homodyne-detected microwave photonic link with an extended fiber-reach[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(19): 1719-1722.
- [46] ZHANG L, UDALCOVS A, LIN R, et al. Digital radio-over-multicore-fiber system with self-homodyne coherent detection and entropy coding for mobile fronthaul[C]// *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. Rome, 2018: 1-3.
- [47] MAZUR M, LORENCES-RIESGO A, SCHRÖDER J, et al. 10 Tb/s PM-64QAM self-homodyne comb-based superchannel transmission with 4% shared pilot tone overhead [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3176-3184.
- [48] AMAYA N, IRFAN M, ZERVAS G, et al. Fully-elastic multi-granular network with space/frequency/time switching using multi-core fibres and programmable optical nodes [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8865-8872.
- [49] AMAYA N, YAN S, CHANNEGOWDA M, et al. Software defined networking (SDN) over space division multiplexing (SDM) optical networks: features, benefits and experimental demonstration [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3638-3647.
- [50] AYDEGER A, SAPUTRO N, AKKAYA K, et al. SDN-enabled recovery for smart grid teleprotection applications in post-disaster scenarios[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2019, 138: 39-50.
- [51] QI C, WU J, HU H, et al. An intensive security architecture with multi-controller for SDN [C]// *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. San Francisco, 2016: 401-402.
- [52] JIA Y, HUA N, LI Y, et al. Applying multi-controller collaboration in fine-grained all-optical intra-datacenter networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(7): 37-48.
- [53] HU T, YI P, GU Z O, et al. Bidirectional matching strategy for multi-controller deployment in distributed software defined networking [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 14946-14953.
- [54] HU T, GUO Z, YI P, et al. Multi-controller based software-defined networking: a survey[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 15980-15996.
- [55] TSAI P, TSAI C, HSU C, et al. Network monitoring in software-defined networking: a review [J]. *IEEE Systems Journal*, 2018, 12(4): 3958-3969.
- [56] YASSINE A, RAHIMI H, SHIRMOHAMMADI S. Software defined network traffic measurement: current trends and challenges[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2015, 18(2): 42-50.
- [57] ROTTONDI C, BOFFI P, MARTELLI P, et al. Baud rate and spectrum

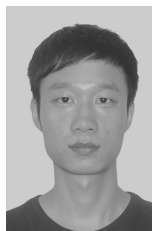
- allocation in optical metro rings with flexible grid and few-mode transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(1): 61-70.
- [58] XU Z, TANG J, YIN C, et al. Experience-driven congestion control: when multi-path tcp meets deep reinforcement learning[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(6): 1325-1336.
- [59] TAO X, DUAN Y, XU M, et al. Learning QoE of mobile video transmission with deep neural network: a data-driven approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(6): 1337-1348.
- [60] CHEN Z, DUAN L, WANG S, et al. Toward knowledge as a service over networks: a deep learning model communication paradigm[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(6): 1349-1363.
- [61] HUANG X, YUAN T, QIAO G, et al. Deep reinforcement learning for multimedia traffic control in software defined networking [J]. IEEE Network, 2018, 32(6): 35-41.
- [62] XIE J, RICHARD Y F, HUANG T, et al. A survey of machine learning techniques applied to software defined networking (SDN): research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 393-430.
- [63] 廖晓闽, 严少虎, 石嘉, 等. 基于深度强化学习的蜂窝网资源分配算法[J]. 通信学报, 2019, 40(2): 11-18.
- LIAO X M, YAN S H, SHI J, et al. Deep reinforcement learning based resource allocation algorithm in cellular networks[J]. Journal on Communications, 2019, 40(2): 11-18.
- [64] CHEN X, LI B, PROIETTI R, et al. DeepRMSA: a deep reinforcement learning framework for routing, modulation and spectrum assignment in elastic optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(16): 4155-4163.
- [65] CHEN X, LI B, PROIETTI R, et al. Self-taught anomaly detection with hybrid unsupervised/supervised machine learning in optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(7): 1742-1749.
- [66] CHEN X, PROIETTI R, BEN Y S J. Building autonomic elastic optical networks with deep reinforcement learning[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(10): 20-26.
- [67] ZHAO Y, YAN B, LIU D, et al. SOON: self-optimizing optical

networks with machine learning[J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28713-28726.

[作者简介]



郭磊 (1980-), 男, 四川眉山人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为光通信网络和无线通信网络。



张旭 (1992-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 重庆邮电大学讲师, 主要研究方向为人工智能、软件定义网络、光网络、恢复力通信、流量工程和网络优化。

侯维刚 (1984-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为网络优化与芯片模块设计。

刘业君 (1986-), 男, 辽宁丹东人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为无线光融合通信。

张琦涵 (1994-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学博士生, 主要研究方向为光网路、光信号处理和安全光传输。

曹子峰 (1985-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 埃因霍芬理工大学助理教授, 主要研究方向为光子集成及光通信。

优青人物介绍

郭磊, 教授, 国家万人计划第一批青年拔尖人才。长期从事通信网研究, 发表论文 300 余篇, 授权发明专利 10 余项。曾任中国科协第 306 次青年科学家论坛执行主席, 现任中国通信学会青年工作委员会副主任委员。获教育部自然科学奖、辽宁省科技进步奖、霍英东青年教师奖、中国通信学会自然科学奖、科技进步奖及青年科技奖各一项。获四川省优秀博士学位论文奖一次、国际会议最佳论文奖 5 次。获教育部新世纪优秀人才、辽宁省百千万人才工程百人层次、重庆市英才计划创新领军人才。