

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240241.

光通信系统与网络技术

杨可歆,黄婷婷,周鹏,等.有限波长转换全光脊叶数据中心网络设计[J].光通信研究,2026(1):240241.

Yang K X, Huang T T, Zhou P, et al. Design of All-Optical Spine-Leaf Data Center Networks with Limited Wavelength Conversion[J]. Study on Optical Communications, 2026(1): 240241.

有限波长转换全光脊叶数据中心网络设计

杨可歆¹,黄婷婷¹,周鹏¹,李鑫²,闫颖²,李泳成¹

(1. 苏州大学电子信息学院,江苏苏州 215006; 2. 苏州鼎芯光电科技有限公司,江苏苏州 215006)

摘要:【目的】全光脊叶(AOSL)数据中心网络(DCN)采用由多级波长选择开关(WSS)级联的架构,波长易在WSS的端口处出现冲突,导致光通道建立失败,从而严重影响了网络的频谱使用效率。为解决这一问题,可以在其脊层WSS的输入端口处放置包含若干个可调谐波长转换器(TWC)的模块,进行任意波长之间的转换,提高网络灵活性。然而,这将导致AOSL DCN的组网成本极大增加。为此,文章希望通过提出有限波长转换AOSL DCN架构在网络性能与组网成本之间找到平衡。【方法】文章提出了两种有限波长转换方案,包括部分端口允许波长转换和部分波长允许转换。其中,部分端口允许波长转换是只在部分脊层WSS前放置TWC模块,且各模块均可实现全波长转换;而部分波长允许转换则在全部脊层WSS前放置TWC模块,且各模块仅允许特定波长转换。此外,文章也针对这两种网络架构的静态光通道业务部署问题,提出了相应的路由、波长和时隙分配(RWTA)算法。【结果】仿真结果表明,文章提出的两种网络架构都能在总业务完成时间(TCT)和总WSS重配次数等方面获得接近具备全波长转换能力的AOSL DCN性能。【结论】文章所提有限波长转换AOSL DCN在降低组网成本的同时有效保障了网络的性能。

关键词:数据中心;波长交换网络;波长转换;路由、波长和时隙分配

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A

Design of All-Optical Spine-Leaf Data Center Networks with Limited Wavelength Conversion

YANG Kexin¹, HUANG Tingting¹, ZHOU Peng¹, LI Xin², YAN Ying², LI Yongcheng¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. Suzhou Etern Laser Optoelectronics Technology Co., Ltd., Suzhou 215006, China)

Abstract: 【Objective】 The wavelength conflict of different optical channels tends to occur in the All-Optical Spine-Leaf (AOSL) Data Center Network (DCN) that adopts a multi-stage Wavelength Selective Switches (WSS) cascading. This will cause a large number of service requests to be blocked, thus significantly influencing the spectral utilization efficiency of the DCN. To address this issue, Tunable Wavelength Conversion (TWC) modules can be used in the AOSL DCN to enable the conversion of each wavelength to any other wavelength whenever wavelength conflict occurs. However, this will also significantly increase the total cost of the AOSL DCN. Therefore, this paper aims to find a balance between network performance and networking cost by developing the AOSL DCNs with limited wavelength conversion. 【Methods】 In this paper, we propose two different architectures for the AOSL DCN with limited wavelength conversion, including wavelength conversion allowed on partial WSS and wavelength conversion allowed on specific wavelengths, respectively. The former one deploys the TWC modules with full wavelength conversion capacity, merely for certain spine WSSs. In contrast, the latter one deploys TWC modules that are configured to permit specific wavelength conversion for all of the Spine WSSs. In addition, this paper also proposes corresponding Routing, Wavelength and Time Slot Allocation (RWTA) algorithms for the static lightpath service deployment problem of these two AOSL DCN architectures. 【Results】 Simulation results show that both network architectures proposed in this paper can achieve performance close to that of the all-optical spine-leaf data center network with full wavelength conversion capabilities in terms of overall Task Completion Time (TCT) and total WSS reconfiguration times. 【Conclusion】 Our AOSL DCN proposed with limited wavelength conversion effectively guarantees network performance while reducing the networking costs.

Key words: data center; wavelength switched network; wavelength conversion; RWTA

0 引言

随着以聊天生成式预训练转换器(Chat Gener-

ative Pre-trained Transformer, ChatGPT)为代表的
人工智能业务快速普及,作为主要物理载体的数据
中心受电交换技术限制,在交换容量、时延和能耗方

收稿日期:2024-11-27; 修回日期:2024-12-10; 纸质出版日期:2026-02-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFB2905505);国家自然科学基金资助项目(62271338)

作者简介:杨可歆(1998-),女,江苏南京人。硕士,主要研究方向为数据中心光网络。

通信作者:李泳成,副研究员。E-mail: ycli@suda.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

面面临巨大挑战。为此,工业界和学术界将具有高带宽、低时延和低能耗优势的全光交换技术作为下一代全光数据中心网络(Data Center Networks, DCN)的关键使能技术^[1-2]。谷歌在 Apollo 项目中采用微电机系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)光开关搭建了 DCN^[3-5];微软采用阵列波导光栅路由器(Arrayed Waveguide Grating Router, AWGR)搭建了全光 DCN Sirius^[6];美国工程院院士、电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) Fellow Ford 教授^[7]、日本东京大学教授 Sato 教授^[8]和美国光学学会(The Optical Society of America, OSA) Fellow 苏州大学沈纲祥教授^[9-10]也分别提出了全光交换 DCN 架构。

其中,沈纲祥教授团队采用波长选择开关(Wavelength Selective Switch, WSS)搭建了一个全光脊叶(All-Optical Spine Leaf, AOSL) DCN 架构^[9-10]。该网络架构将 $N \times N$ WSS(N 为 WSS 模块输入端口数和输出端口数)作为基本单元,通过传统脊叶(Spine-Leaf)拓扑进行互联,实现了大容量全光交换。其后,诺基亚也提出了基于光交叉连接器(Optical Cross-Connect, OXC)级联的 Spine-Leaf 全光交换网络^[11]。事实上,包括上海交大胡卫生教授团队^[12]和中科院计算所^[13]都已经针对这种基于多级 WSS 级联的大规模全光交换网络开展了研究。相比于用 MEMS 光开关级联组件大规模全光交换网络,采用 WSS 级联具有以下 3 点优势:① WSS 具有灵活的波长交叉连接能力,交换容量得到极大提升;②基于 WSS 级联的可重构光分插复用器(Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer, ROADM)/OXC 设备已被大规模部署在现网中,其应用效果已经得到了验证;③ WSS 器件相对成熟,国内尤其是华为,在这一领域具有一定的技术领先优势,不存在卡脖子风险。此外,该网络架构在承载可预测的人工智能(Artificial Intelligence, AI)训练业务时,对于光通道切换时延影响并不敏感,具有很好的适配效果。因此,本文认为对该网络架构的研究具有一定的意义,为国家正大力建设的智算中心提供了一个具有现实意义的网络架构。

然而,由于该网络采用多级 WSS 级联的架构,在 WSS 端口处容易发生波长冲突。这将导致即便网络链路中存在空闲波长,光通道连接却仍可能因 WSS 端口处的波长冲突而无法建立,严重影响 DCN 的性能。为解决这一问题,可以在 AOSL

DCN 中脊层(Spine) WSS 的端口处部署可调谐波长转换器(Tunable Wavelength Converter, TWC)模块,实现任意端口处任意波长之间的转换,从而突破波长连续性限制,提高网络的服务能力。这种波长转换只是将承载业务的波长进行了变换,数据的目的地址、路由信息以及流量的发送方向都不会受到影响,不会导致包乱序和目的地错位接收等问题。然而,这种全波长转换 AOSL DCN 虽然具有很强的灵活性,但由于需要部署大量 TWC 模块,将极大地增加组网成本。

为此,本文基于部分端口允许波长转换和部分波长允许转换两种架构,构建了两种不同的有限波长转换 AOSL DCN。同时,针对这两种全光 DCN 的静态光通道业务部署问题展开研究,提出了相应的路由、波长和时隙分配(Routing, Wavelength and Time Slot Allocation, RWTA)算法。仿真结果表明,本文所提两种架构能够实现与具备全波长转换功能的 AOSL DCN 相近的性能。

1 有限波长转换 AOSL DCN 架构

如图 1 所示,本文考虑了两种有限波长转换 AOSL DCN 架构,包括部分端口允许波长转换和部分波长允许转换。其中,图 1(a)所示为基于部分端口允许波长转换的有限波长转换 AOSL DCN 架构。该架构包含两层 WSS,分别是 Spine 层和叶层(Leaf)。需要指出的是,本文用于构建 AOSL DCN 的 WSS 是一种全新的 $N \times N$ WSS,允许任意波长从输入侧任意一个端口交换到输出侧任意一个端口^[14]。在该架构中,部分 Spine WSS 的输入端口处部署了具有全波长转换能力的 TWC 模块。该 TWC 模块包含一个 $1 \times K$ 阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)用于解复用波长,多个 TWC 和一个 $K \times 1$ 耦合器来复用波长^[15]。其中,每个 TWC 都可以独立地进行波长转换。因此,任意一个波长在经过 TWC 模块时都可以转换成其他任意一个波长。图 1(b)所示为基于部分波长允许转换的有限波长转换 AOSL DCN 架构。与之前架构不同之处在于,该网络架构在所有的 Spine WSS 的输入端口处都部署了具有部分波长转换能力的 TWC 模块。该网络只允许特定波长在经过 TWC 模块时转换成其他任意一个波长。

本文用 $G(l, s, f, k, m)$ 来表示有限波长转换 AOSL DCN,其中, l 和 s 为 Leaf WSS 和 Spine WSS 的数量; f 为连接到每个 Leaf WSS 上服务器

的数量; $\lambda_1, \dots, \lambda_w$ 为所有可用波长, w 为可用波长数; $\lambda_a, \dots, \lambda_{a+b}$ 为所有对应波长经 TWC 可转换的波长; Server-1f, \dots , Server- lf 为网

Leaf WSS 所连接的服务器; k 为部署 TWC 模块的 Spine WSS 数量; m 为每个 TWC 模块允许转换波长数占网络中总波长数的比值。

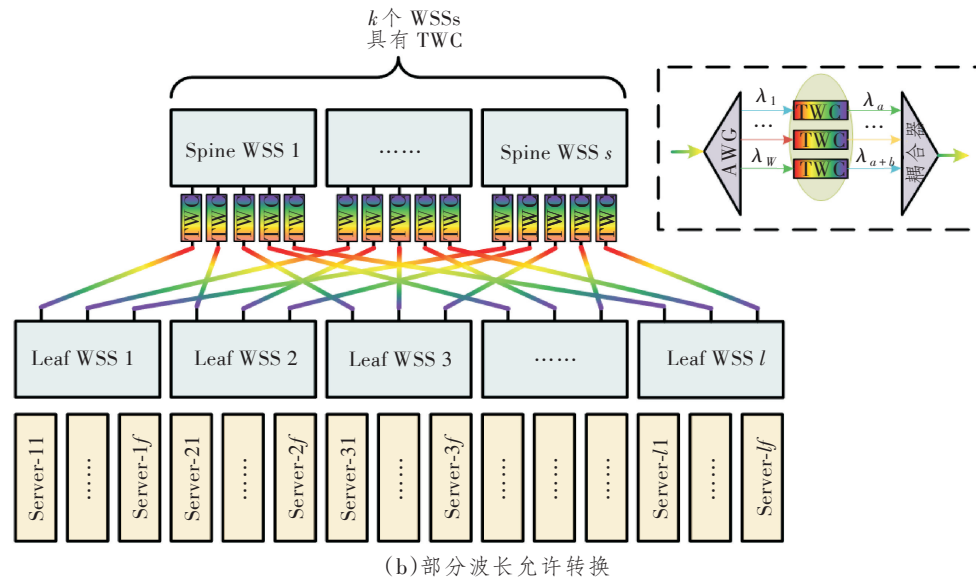
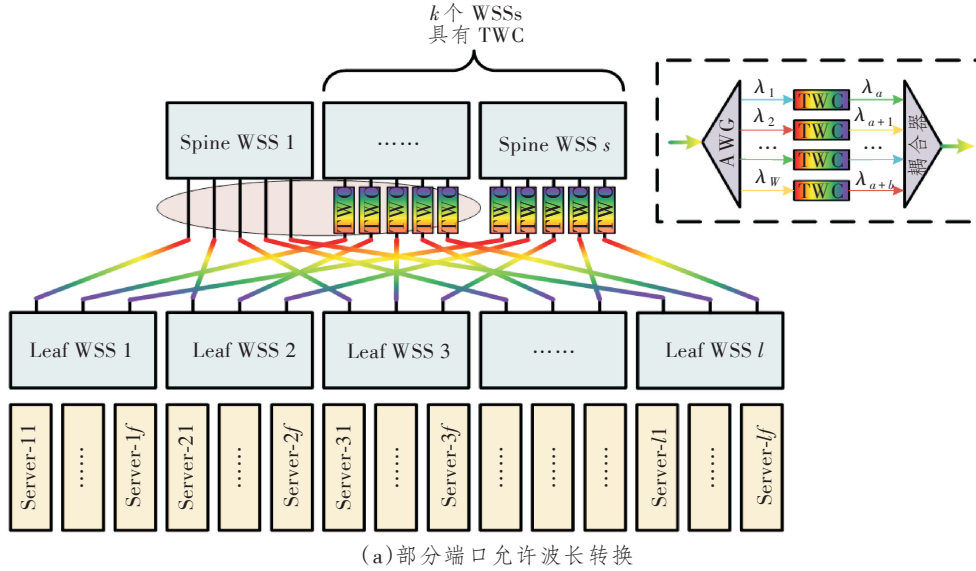


图 1 有限波长转换 AOSL DCN 架构

Figure 1 AOSL DCN with limited wavelength conversion

2 静态光通道业务部署

本文针对有限波长转换 AOSL DCN 的静态光通道业务部署问题展开研究。与已有 AOSL DCN 的静态光通道业务部署问题不同,其不仅需要考虑路由选择、波长分配以及时隙分配等多个子问题,还需要在端口出现波长冲突时,考虑如何运用波长转换能力与 WSS 重配能力联合进行波长可用性恢复。接下来,本节将给出有限波长转换 AOSL DCN 静态光通道业务部署问题的定义。

2.1 问题定义

在有限波长转换 AOSL DCN 中, WSS 采用非全停模式进行端口重配置,即 WSS 的端口可以进行独立的重新配置,且只影响端口处配置的波长,而不影响该端口上其他业务。在部分端口允许波长转换的架构中,只有部分 Spine WSS 的输入端口部署 TWC 模块。每个 TWC 模块包含的波长转换器数量等于网络中的可用波长数,允许所有波长转换成其他任意波长。在部分波长允许波长转换的架构中,所有 Spine WSS 的输入端口都部署了 TWC 模

块。每个 TWC 模块只包含少量波长转换器,只允许部分波长转换成其他任意波长。给定业务请求 $D(i, j, T)$, 其中, i 为源服务器; j 为目的服务器; T 为业务请求的持续时间(单位:时隙(Time Slot, TS))。每个业务建立一条光通道连接都将单独占用一个波长。WSS 端口重配置的时间为毫秒级^[16], 而波长转换的时间为纳秒级^[17]。因此, 本文假设每个 WSS 端口重配置的时延为 10 TS, 而波长转换时间忽略不计。优化目标为最小化总业务完成时间(Task Completion Time, TCT), 即所有业务完成需要的总时间。

2.2 启发式算法

本文针对部分端口允许波长转换和部分波长允许转换两种 AOSL DCN 的静态光通道业务部署问题分别提出了相应的启发式算法, 即 RWTA 算法。算法具体步骤描述如下。

2.2.1 基于部分端口允许波长转换的 RWTA 算法

针对部分端口允许波长转换 AOSL DCN 架构, 本文设计了相应启发式算法建立光通道业务, 具体步骤如下:

步骤 1: 初始化 $t=0$, 其中 t 为业务的开始时隙, 通过 t 来遍历所有可用时隙, 找到源和目的服务器之间所有路由。

步骤 2: 遍历所有未经过 TWC 模块的路由, 对其中的每一个路由执行如下操作: 遍历所有波长, 检查波长沿着路由在时隙 $[t, t+T-1]$ 内是否空闲, 如果是, 则建立一条持续时间为 $[t, t+T-1]$ 的光通道。如果所有波长均无法成功建立光通道, 则选择下一个路由重复以上步骤。如果所有路由都无法建立光通道, 则进入步骤 3, 反之则记录时间 t , 循环结束。

步骤 3: 遍历所有经过 TWC 模块的路由, 对其中的每一个路由执行如下操作: 遍历所有波长, 检查波长沿着路由在时隙 $[t, t+T-1]$ 内是否空闲, 如果是, 则建立一条持续时间为 $[t, t+T-1]$ 的光通道。反之, 则判断是否可以通过 TWC 进行波长转换且转换后的波长在时隙内空闲, 如果可以则建立一条持续时间为 $[t, t+T-1]$ 的光通道。如果所有波长均无法成功建立光通道, 则选择下一个路由重复以上步骤。如果所有路由都无法建立光通道, 则进入步骤 4, 反之则记录时间 t , 循环结束。

步骤 4: 遍历所有路由, 对每一个路由执行如下操作: 遍历所有波长, 如果波长因为在 WSS 端口处发生冲突无法建立光通道, 则对 WSS 端口进行重

配置, 恢复波长可用性, 并建立一条持续时间为 $[t+T', t+T'+T-1]$ 的光通道, 其中, T' 为 WSS 重配置的时延。如果所有波长都无法成功建立光通道, 则选择下一个路由重复以上步骤。如果所有路由都无法建立光通道, 则进入步骤 5, 反之则记录时间 t , 循环结束。

步骤 5: 令 $t=t+1$ 。

2.2.2 基于部分波长允许转换的 RWTA 算法

针对部分波长允许转换的 AOSL DCN 架构, 本文设计了相应启发式算法建立光通道业务, 具体步骤如下:

步骤 1: 初始化 $t=0$, 找到源和目的服务器之间所有路由。

步骤 2: 遍历所有路由, 对每一个路由执行如下操作: 遍历所有波长, 检查波长沿着路由在时隙 $[t, t+T-1]$ 内是否空闲, 如果是, 则建立一条持续时间为 $[t, t+T-1]$ 的光通道。如果所有波长都无法成功建立光通道, 则选择下一个路由重复以上步骤, 如果所有路由都无法建立光通道, 则进入步骤 3, 反之则记录时间 t , 循环结束。

步骤 3: 遍历所有路由, 对每一个路由执行如下操作: 遍历允许转换的波长, 如果可以通过 TWC 进行波长转换且转换后的波长在时隙内空闲, 则建立一条持续时间为 $[t, t+T-1]$ 的光通道。如果所有波长都无法成功建立光通道, 则选择下一个路由重复以上步骤。如果所有路由都无法建立光通道, 则进入步骤 4, 反之则记录时间 t , 循环结束。

步骤 4: 与 2.2.1 节算法中的步骤 4 相同, 通过重配置 WSS 端口尝试建立光通道, 如果所有路由都无法建立光通道, 则进入步骤 5, 反之则记录时间 t , 循环结束。

步骤 5: 令 $t=t+1$ 。

3 仿真与结果分析

3.1 仿真条件

本文采用了测试网络 $G(3, 3, 10, k, m)$, 即 Leaf 包含 3 个 13×13 WSS, Spine 包含 3 个 3×3 的 WSS。假设网络中可用波长数 $W=21$ 。光通道业务请求的持续时间在 $[1, 200]$ TS 内随机产生。每个 WSS 采用非全停模式进行端口重配置, 配置所需的时间假设为 10 TS, 波长转换所需时间假设为 0 TS。本文所提启发式算法通过 Java 语言编程实施仿真。

3.2 部分端口允许波长转换

本节评估了在部分端口允许波长转换架构下,有限波长转换 AOSL DCN 的性能,包括总 TCT、WSS 重配次数和波长转换次数。图 2 所示为 $G(3, 3, 10, k, 1)$ 网络的结果,其中,网络中静态光通道业务请求数量从 100 增加至 2 000。图例中, $k=0$ 、 $k=1$ 、 $k=2$ 和 $k=3$ 分别为未部署 TWC 模块、1 个 Spine WSS 部署 TWC 模块、2 个 Spine WSS 部署 TWC 模块和全部 Spine WSS 部署 TWC 模块。

由图 2(a)和图 2(b)可知,随着部署 TWC 模块的 Spine WSS 数量的增加,TCT 逐渐降低,WSS 重配置次数逐渐减少。这是因为更多的 TWC 模块可以允许更多的光通道打破波长连续性要求,提高

了网络的灵活性,从而降低了 TCT 和减少了 WSS 重配置次数。由图 2(c)可知,随着部署的 TWC 模块数量的增加,波长转换次数也随之增加。这是因为,TWC 模块部署的数量越多,允许进行波长转换的光通道业务数量将增加,从而增加了波长转换的次数。此外,可以发现,当业务数较小时,1 个 Spine WSS 部署 TWC 模块与全部 Spine WSS 部署 TWC 模块的 TCT 和 WSS 重配置次数接近;而当业务数较大时,2 个 Spine WSS 部署 TWC 模块也与全部 Spine WSS 部署的结果接近。这表明,本文所提基于部分端口允许波长转换的有限波长转换 AOSL DCN 能在成本相对较低的情况下接近全波长转换 AOSL DCN 的性能。

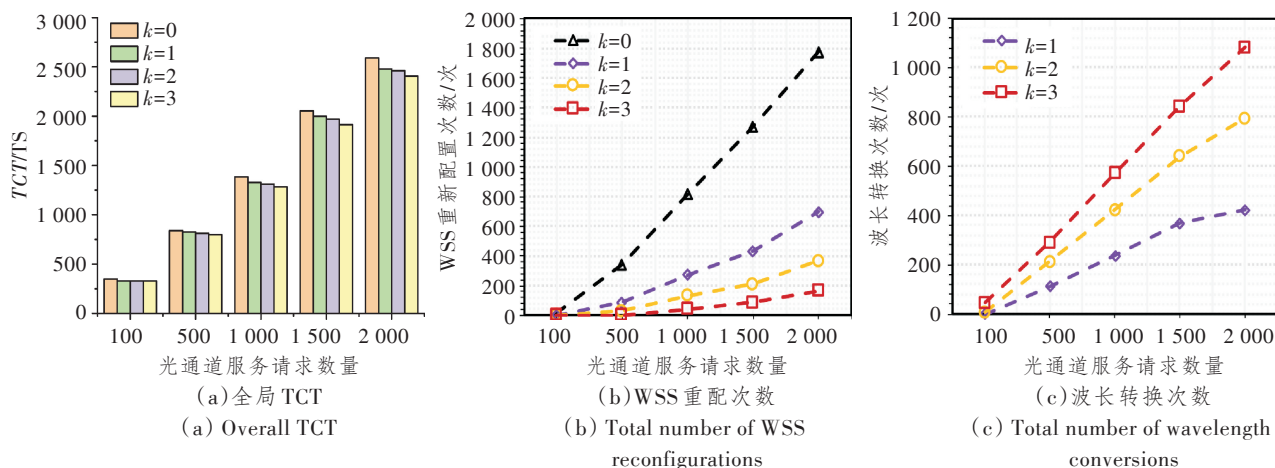


图 2 基于部分 WSS 端口允许波长转换有限波长转换 AOSL DCN 性能评估

Figure 2 Performance evaluation of AOSL DCN with wavelength conversion allowed on partial WSS

3.3 部分波长允许转换

类似地,本文也评估了基于部分波长允许转换的有限波长转换 AOSL DCN 的性能。图 3 所示为 $G(3, 3, 10, 3, m)$ 网络的结果。假设网络中可用的最大波长数 W 为 21。网络中的光通道业务请求数

量从 100 增加至 2 000。图例中的 $m=0$ 、 $m=33\%$ 、 $m=66\%$ 和 $m=1$ 分别为对应无波长转换、TWC 模块支持 7、14 和 21 个波长进行转换。

由图 3(a)和图 3(b)可知,随着 TWC 模块允许转换的波长数量的增加,TCT 和 WSS 重配置次数

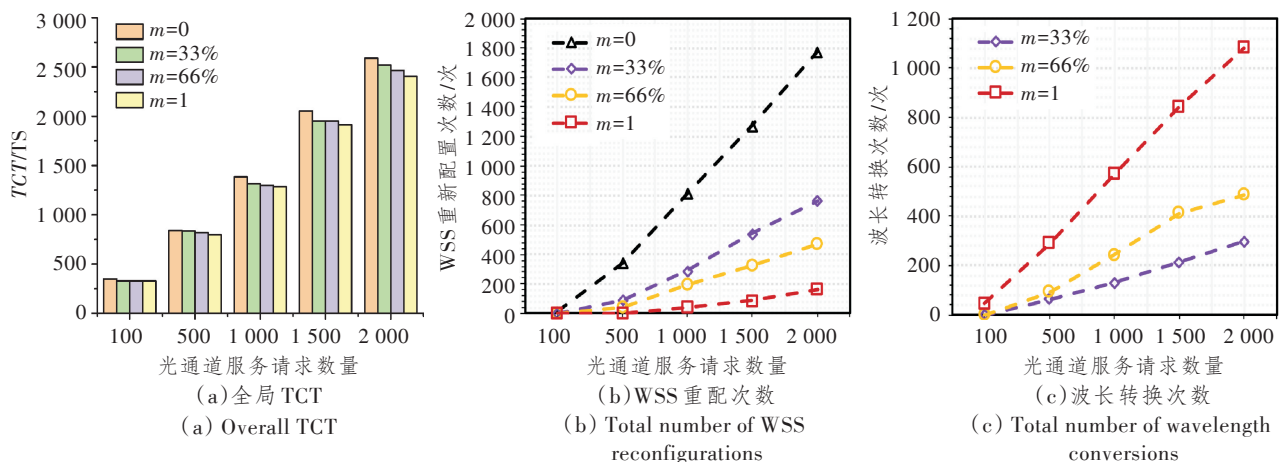


图 3 基于部分波长允许转换有限波长转换 AOSL DCN 性能评估

Figure 3 Performance evaluation of AOSL DCN with wavelength conversion allowed on specific wavelength

均减少。这是因为更多的波长允许转换可以更好地缓解波长冲突的问题,有效地减少了WSS重配置次数,从而降低了TCT。由图3(c)可知,随着TWC允许转换的波长数量的增加,波长转换次数也在增加。这是因为TWC模块允许转换的波长数量越多,更多的光通道业务进行了波长转换,从而增加了波长转换次数。此外,当TWC模块支持66%的波长转换时,其与支持全部波长转换获得的TCT与WSS重配置次数接近。这表明,本文所提部分波长允许转换的有限波长转换AOSL DCN在大量减少所需的TWC的情况下,获得了与全波长转换AOSL DCN接近的性能。

3.4 部分端口允许波长转换及部分波长允许转换性能对比

本文也比较了部分端口允许波长转换和部分波长允许转换两种网络架构的TCT性能差异。如图4所示,两种有限波长转换AOSL DCN的TCT性能非常接近,这是因为两种架构所部署的总的TWC数量相同。这表明无论是部分端口允许波长转换还是部分波长允许转换都可以被应用于有限波长转换AOSL DCN,在保证性能的前提下降低了网络成本。

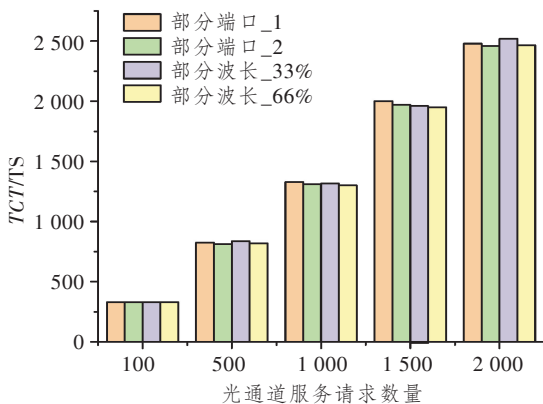


图4 两种网络架构性能对比

Figure 4 Performance comparison between two different data center networks

4 结束语

TWC模块可以帮助AOSL DCN突破波长连续性限制,提高网络服务能力。但是,TWC模块的大量部署将极大地增加AOSL DCN的组网成本。为此,本文分别提出了基于部分端口允许波长转换和基于部分波长允许转换的有限波长转换AOSL DCN架构。为评估这两种网络架构的性能,本文也针对静态光通道业务部署问题展开了研究,提出了

相应的RWTA算法。仿真结果表明,本文所提两种有限波长转换AOSL DCN架构能在有效减少成本的同时,获得与全波长转换AOSL DCN接近的性能。

参考文献:

- [1] Chen J, Gong Y, Fiorani M, et al. Optical Interconnects at the Top of the Rack for Energy-Efficient Data Centers [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(8): 140-148.
- [2] Pointurier Y, Ušćumlić B, Mestre M A, et al. Green Optical Slot Switching Torus for Mega-Datacenters [C]//2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). Valencia, Spain: IEEE, 2015: 7341959.
- [3] Urata R, Liu H, Yasumura K, et al. Apollo: Large-Scale Deployment of Optical Circuit Switching for Data-center Networking [C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: M2G.1.
- [4] Poutievski L, Mashayekhi O, Ong J, et al. Jupiter Evolving: Transforming Google's Datacenter Network via Optical Circuit Switches and Software-Defined Networking [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. Amsterdam, Netherlands: ACM, 2022: 66-85.
- [5] Jouppi N, Kurian G, Li S, et al. TPU V4: an Optimally Reconfigurable Supercomputer for Machine Learning with Hardware Support for Embeddings [C]//Proceedings of the 50th Annual International Symposium on Computer Architecture. Orlando, FL, USA: ACM, 2023: 3589350.
- [6] Ballani H, Costa P, Behrendt R, et al. Sirius: a Flat Datacenter Network with Nanosecond Optical Switching [C]//Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. Virtual Event, USA: ACM, 2020: 782-797.
- [7] Farrington N, Forencich A, Porter G, et al. A Multiport Microsecond Optical Circuit Switch for Data Center Networking [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(16): 1589-1592.
- [8] Mori Y, Ganbold M E, Sato K I. Design and Evaluation of Optical Circuit Switches for Intra-Datacenter Networking [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 330-337.
- [9] Lin J, Zhai Z, Li Y, et al. Performance Evaluation of WSS-based All-Optical Spine-Leaf Data Center Net-

- work [C]//2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Shenzhen, China: IEEE, 2023: 10088985.
- [10] Lin J, Chang T, Zhai Z, et al. Wavelength Selective Switch-based Clos Network: Blocking Theory and Performance Analyses[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(17): 5842–5853.
- [11] Zami T. Contention under Heavy Traffic Load in a 224×224 Wavelength - Routing OXC Made of Smaller Clustered Sub -OXCs[C]//2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Shenzhen, China: IEEE, 2023: 10088973.
- [12] Cheng Z, Ye T, Zhu Y, et al. A Three - Phase Modularization Approach of OXC for Large - Scale ROADM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(24): 7318–7327.
- [13] Li W, Yuan G, Wang Z, et al. Fast and Scalable All-Optical Network Architecture for Distributed Deep Learning [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2024, 16(3): 342–357.
- [14] Zong L, Zhao H, Feng Z, et al. 8×8 Flexible Wavelength Cross -Connect for CDC ROADM Application [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(24): 2603–2606.
- [15] Ye T, Lee T T, Hu W. AWG -based Non -Blocking Clos Networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2015, 23(2): 491–504.
- [16] Foerster K T, Schmid S. Survey of Reconfigurable Data Center Networks: Enablers, Algorithms, Complexity[J]. *ACM SIGACT News*, 2019, 50(2): 62–79.
- [17] Zhao P, He Z, Shekhawat V, et al. 100 - Gbps per - Channel All - Optical Wavelength Conversion without Pre - Amplifiers based on an Integrated Nanophotonic Platform [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(17): 3427–3434.