



专题：智算光互联

## 面向智算中心光网络的 Ring Allreduce 业务算网协同部署算法研究

黄婷婷, 袁志林, 翟德伟, 李泳成  
(苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006)

**摘要:** 随着人工智能大模型训练与推理业务的快速发展, 智算中心面临算网协同调度的新挑战。为优化分布式智算 Ring Allreduce 业务的部署问题, 首先, 通过扩展传统波平面, 开发了算力波平面技术, 实现了算力与网络资源的一体化虚拟管理。然后, 基于算力波平面, 提出了一种高效路由、波长、算力和时隙分配 (routing, wavelength, computing power and time slot assignment, RWCTA) 算法用于环规约 (Ring Allreduce) 业务部署。仿真结果表明, 与传统基于波平面的部署算法相比, 基于算力波平面的 RWCTA 算法能有效降低 62.4% 的总业务完成时间和 54.5% 的平均业务计算时间。

**关键词:** 智算中心光网络; 算网协同; Ring Allreduce 业务; 路由、波长、算力和时隙分配; 算力波平面

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025115

## Integrated communication and computing deployment algorithms for Ring Allreduce in optical networks of intelligent computing centers

HUANG Tingting, YUAN Zhilin, ZHAI Dewei, LI Yongcheng  
School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China

**Abstract:** The rapid development of artificial intelligence has posed significant challenges to intelligent computing centers, especially in the collaborative scheduling of computational and networking resources. To address the deployment optimization issues of distributed intelligent computing services (Ring Allreduce), a novel technology called the computing power-wavelength plane (CWP) which enhanced the traditional waveplane framework to enable integrated virtual management of computational and network resources was firstly proposed. Based on the CWP, an efficient routing, wavelength, computing power, and time slot assignment (RWCTA) algorithm was proposed for Ring Allre-

收稿日期: 2025-02-21; 修回日期: 2025-03-25

通信作者: 李泳成, ycli@suda.edu.cn

基金项目: 科技部重点研发计划项目 (No.2022YFB2903700); 国家自然科学基金资助项目 (No.62271338);

**Foundation Items:** Ministry of Science and Technology Key Research and Development (No.2022YFB2903700), The National Natural Science Foundation of China (No.62271338)

duce service deployment. Simulation results demonstrate that, compared to conventional waveplane-based algorithms, the RWCTA algorithm based on the CWP effectively reduces the overall task completion time by 62.4% and the average task computation time by 54.5%.

**Key words:** optical network of intelligent computing centers, integrated communication and computing, Ring Allreduce service, RWCTA, computing power-wavelength plane

## 0 引言

智算中心作为人工智能 (artificial intelligence, AI) 大模型训练与推理的关键基础设施, 在提升国家 AI 竞争力和推动数字经济发展的进程中发挥着重要作用。我国先后发布了《“十四五”数字经济发展规划》和《新型数据中心发展三年行动计划 (2021-2023 年)》等政策文件, 以推动智算中心的高质量发展。随着智算中心的建设规模不断扩大, 单体算力规模已从千卡逐步迈向万卡集群。然而, 传统电交换网络受“摩尔定律”制约, 难以满足智算中心大规模、高带宽、低时延的组网需求<sup>[1-2]</sup>。为应对这一挑战, 智算中心正加速向采用光电路交换的光网络演进, 形成智算中心光网络, 以更好地支撑 AI 大模型业务。例如, 谷歌和微软分别开发了面向智算中心的光电路交换网络 Apollo 和 Sirius<sup>[3-4]</sup>。我国也启动了科技部“宽带通信和新型网络”重点专项《面向数据中心的短距离光互连技术》。然而, 当前研究仍依赖于传统光网络的“传输与计算分离”架构, 光层仅作为信息传输的通道, 无法感知上层业务的需求。这种架构导致带宽资源管控难以与算力资源的动态调度实现协同, 严重制约了智算中心光网络对 AI 大模型训练与推理任务的动态灵活支撑能力。因此, 迫切需要针对 AI 业务的实际需求, 提出算网协同的优化部署算法, 以提升智算中心光网络的资源利用效率与 AI 业务支撑能力<sup>[5-6]</sup>。

本文聚焦于智算中心光网络, 以环规约 (Ring Allreduce) 业务这一典型 AI 业务为研究对

象, 开展算网协同部署算法的研究。具体而言, 本文将 Ring Allreduce 业务的部署问题抽象为路由、波长、算力和时隙分配 (routing, wavelength, computing power and time slot assignment, RWCTA) 的多维资源联合优化问题。为解决该问题, 本文在传统波平面技术基础上, 设计了一种算力与网络资源一体化虚拟管理框架, 即算力波平面 (computing power-wavelength plane, CWP)。进一步, 本文提出了一种基于算力波平面 RWCTA 多维资源联合分配算法, 以实现 Ring Allreduce 业务的高效部署。仿真结果表明, 与传统基于波平面的 Ring Allreduce 业务部署算法相比, 本文提出的算法能够显著降低总业务完成时间 (overall task completion time, overall TCT) 和平均业务计算时间 (average task computation time, ATCT), 有效提升了智算中心光网络的算力与网络资源利用效率。

## 1 面向智算中心光网络的 Ring 业务部署问题

### 1.1 网络架构

本文考虑了一种基于波长选择开关 (wavelength selective switch, WSS) 级联的智算中心光网络架构, 即全光脊叶数据中心网络架构, 如图 1 所示。该架构采用叶脊 (Spine-Leaf) 网络拓扑<sup>[7]</sup>, 第一层为叶 (Leaf) 交换机层, 其中的 WSS 称为 Leaf WSS; 第二层为脊 (Spine) 交换机层, 其中的 WSS 称为 Spine WSS。Leaf WSS 的部分端口通过光纤直接与服务器上的收发器相连, 其余端口通过光纤与 Spine WSS 的端口相连。每个

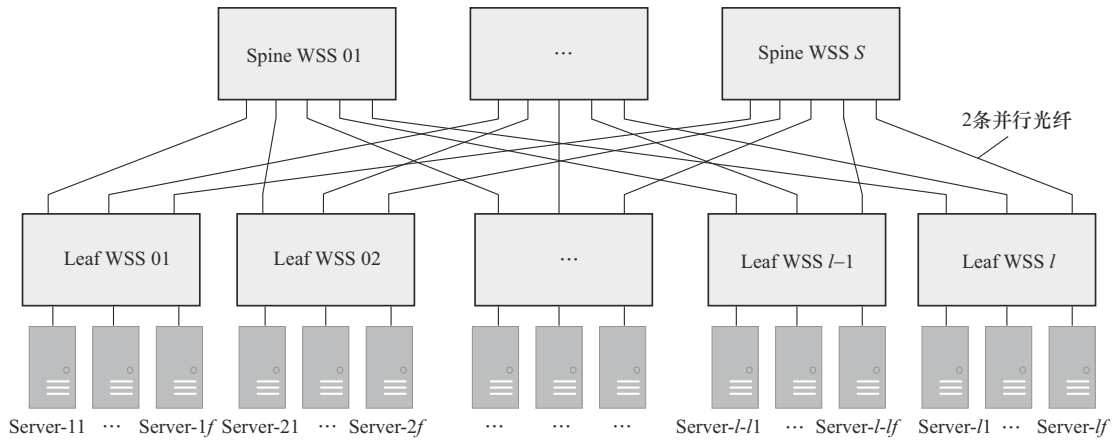


图1 全光脊叶数据中心网络架构

Spine WSS 与所有 Leaf WSS 的至少一个端口互连。需要指出的是，该架构由 Clos 架构折叠而来，通过将传统 Clos 架构<sup>[8-9]</sup>的输入/输出级合并为 Leaf WSS 层，中间级演化为 Spine WSS 层。每个 Leaf WSS 和 Spine WSS 都是双 (Twin) WSS，具有 2 个独立的正反向通道，正向通道负责上行数据传输，反向通道处理下行数据流。为缓解波长冲突引起的网络阻塞问题，在实际架构中，图 1 中每个 WSS 的端口实质上是 2 个并行端口，且架构所展示的光纤实际上代表着 2 条并行光纤。

## 1.2 Ring 业务

在智算中心中，Ring Allreduce 是一种常见的用于大规模 AI 训练与推理的分布式计算架构，下文中基于该架构的业务简称 Ring 业务。Ring 业务的核心特点是通过网络连接将服务器形成环形拓扑结构。Ring 业务每一次迭代共需要进行 Reduce-Scatter 和 Allgather 两个部分，每一次 Reduce-Scatter 过程，服务器接收来自前一个服务器的数据块，进行局部数据累加，然后在下一轮数据传输时将累加的数据块向下传递。直到每个服务器持有完整数据的一部分，该步骤共需完成  $p-1$  次数据交换， $p$  为 Ring 业务需要占用的服务器数量。而 Allgather 每轮传递已聚合的分片数据按环形同步到所有节点来完成对完整结果的获取，该过程需要  $p-1$  次数据交换。因此，一个单

向环中的服务器会与其相邻服务器进行  $2 \times (p-1)$  次数据交换，其中每次数据交换的持续时间为  $\tau$ 。一个单向 Ring 业务实例如图 2 所示。该业务需要在服务器集合  $\mathcal{S}\{S_A, S_B, S_C, S_D\}$  上形成一个 4 个节点的单向环，即  $p=4$ ，因此，图示 Ring 业务实例共需要进行 6 次数据交换。

基于以上 Ring 业务的通信流量模型可以看到，在智算中心光网络中，为实现 Ring 业务的部署，需要在业务数据交换期间为每个相邻服务器间建立一条持续时间为  $2 \times (p-1) \times \tau$  的光通道连接，并分配算力资源，因此，将涉及路由、波长、算力和时隙多维资源分配。接下来，将给出 Ring 业务在智算中心光网络中部署问题的定义。

## 2 问题定义

给定一个智算中心光网络  $v(l, s, f)$ ，其中， $l$  和  $s$  分别表示 Leaf WSS 和 Spine WSS 的数量， $f$  表示连接到每个 Leaf WSS 上服务器的数量。已知网络中承载的 Ring 业务列表  $D$ ，列表中每个业务为  $R(p, c, t)$ 。其中， $p$  是 Ring 业务需要占用的服务器数量， $c$  是 Ring 业务需要每个服务器承载的算力需求， $t$  是 Ring 业务的持续时间，根据文献[10]，其计算式如下：

$$t = 2 \times (p-1) \times \tau + t_c + t_w \quad (1)$$

其中， $2 \times (p-1) \times \tau$  表示一次 Ring 业务完成数据同步

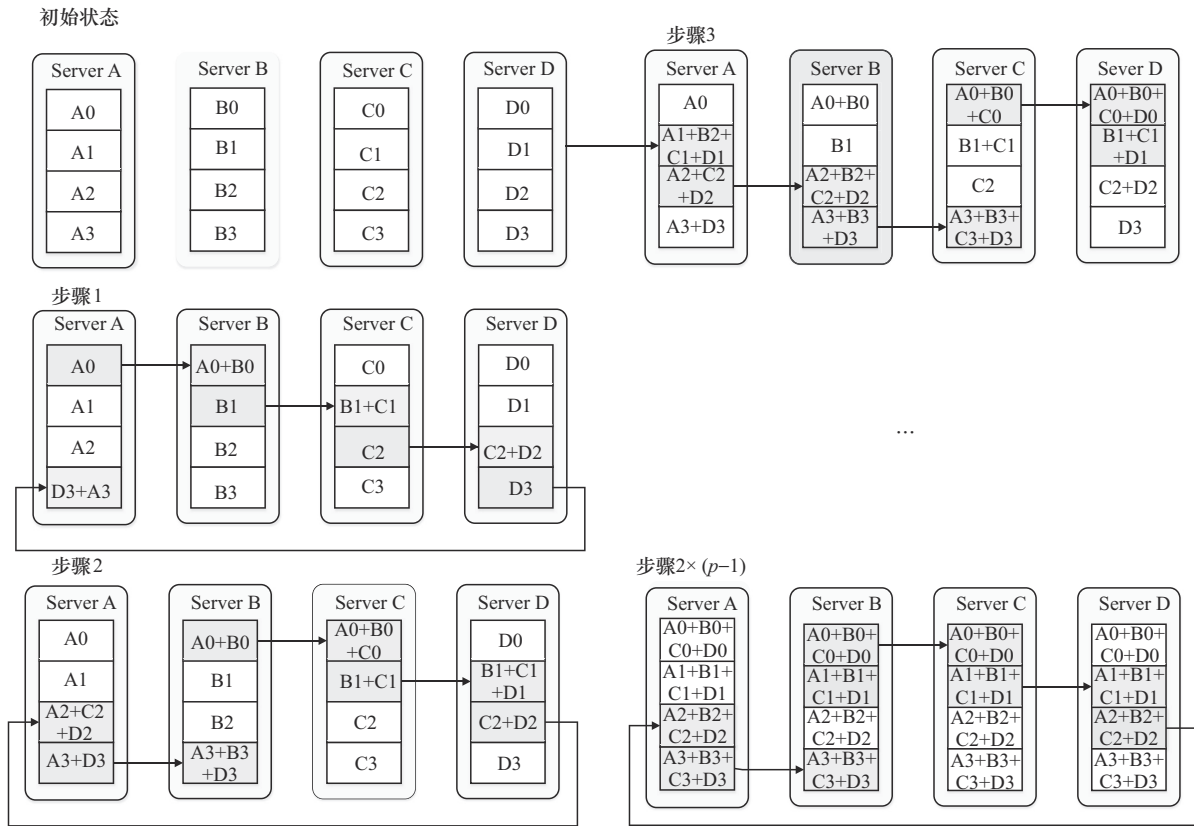


图2 Ring业务实例

的传输时延； $t_c$ 是服务器计算时延，计算式为

$$\max_{s \in S} \left[ \frac{c}{H_s} \right], S \text{ 是部署 Ring 业务使用的服务器集合；}$$

$t_w$ 是等待时间。本文中，Ring业务的计算持续时间和传输持续时间都以时隙（time slot, TS）为基本单位。

该优化问题的目标为：在成功部署所有 Ring 业务后，最小化总业务完成时间（第一优化目标），同时最小化平均业务计算时间（第二优化目标）。

该优化问题的限制条件包括以下内容。

(1) 成功部署所有 Ring 业务。

(2) 服务器数量约束，即每个 Ring 业务都需要分配指定数量的服务器，且得到服务器上的算力用于完成业务的计算需求。

(3) 波长约束连续性，即每条光通道经过的所有光纤链路必须使用相同的波长。

(4) TS 连续性约束，在传输过程和计算过程为每个业务分配的 TS 是连续的，并满足业务所

需的传输及计算的持续时间。

(5) 波长不重叠约束，即在任意 TS 内，每条链路上的任意波长资源都只能被一条光通道所使用。

(6) 波长容量约束，即每个链路所能支持的波长数有限。

(7) 算力不重叠约束，即在任意时刻，每个服务器上的任意算力都只能服务于一个业务。

(8) 算力容量约束，每个服务器上的算力资源有限。

(9) 确保 WSS 重新配置不影响同一 WSS 内其他连接的约束条件。

(10) 收发机容量约束，在任何给定 TS，源自或终止于每个终端的业务数量与可用收发机的容量一致。

### 3 启发式算法

为解决智算中心光网络的 Ring 业务部署问题，



本节通过扩展传统的波平面技术，设计了一种算力与网络资源一体化虚拟管控框架，即算力波平面。然后，提出了一种基于算力波平面的RWCTA算法。接下来，先介绍算力波平面的概念，然后详细介绍基于算力波平面的RWCTA算法。

### 3.1 算力波平面

波平面是一种在传统光网络中被广泛应用于路由和波长分配算法的技术<sup>[11]</sup>。它通过将光网络划分为多个波长平面，每个平面承载特定波长的光信号，从而实现高效的资源管理和灵活的网络配置。通过扩展传统波平面技术，本文提出了一种算力波平面技术。该技术将为每个波长从物理拓扑中复制生成一个包含虚拟链路和虚拟节点的智算中心虚拟光网络，称为算力波平面。具体地，将智算中心光网络中的物理服务器映射为虚拟服务器节点添加到算力波平面中，并将实际传输时间段内每个虚拟服务器的算力资源记录在服务器资源列表中。然后，检查每个虚拟服务器对应的物理服务器上收发器上当前波长在时隙区间

内是否可空闲，如不空闲，则从算力波平面中移除。此外，将智算中心光网络中的物理光器件WSS和光纤链路映射为虚拟WSS和虚拟链路添加到算力波平面中。然后，检查每个WSS端口和链路上当前波长在时隙区间内是否空闲，如不空闲，则从算力波平面中移除。一个算力波平面实例如图3所示，在时间区间 $[T, T+t-1]$ 内，根据当前网络中波长资源 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 的使用情况，形成了 $N$ 个算力波平面。以算力波平面 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 为例，由于光纤链路WSS3~WSS6上的波长 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 已经被占用，因此，算力波平面 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 中未加入虚拟链路WSS3~WSS6。同时，虚拟WSS上记录着该WSS的端口配置信息，而虚拟服务器也同样记录着剩余的算力资源。

### 3.2 基于算力波平面的RWCTA算法

为实现网络与算力资源的联合调度，本文基于算力波平面技术，提出一种高效的Ring业务部署算法，即基于算力波平面的RWCTA算法。

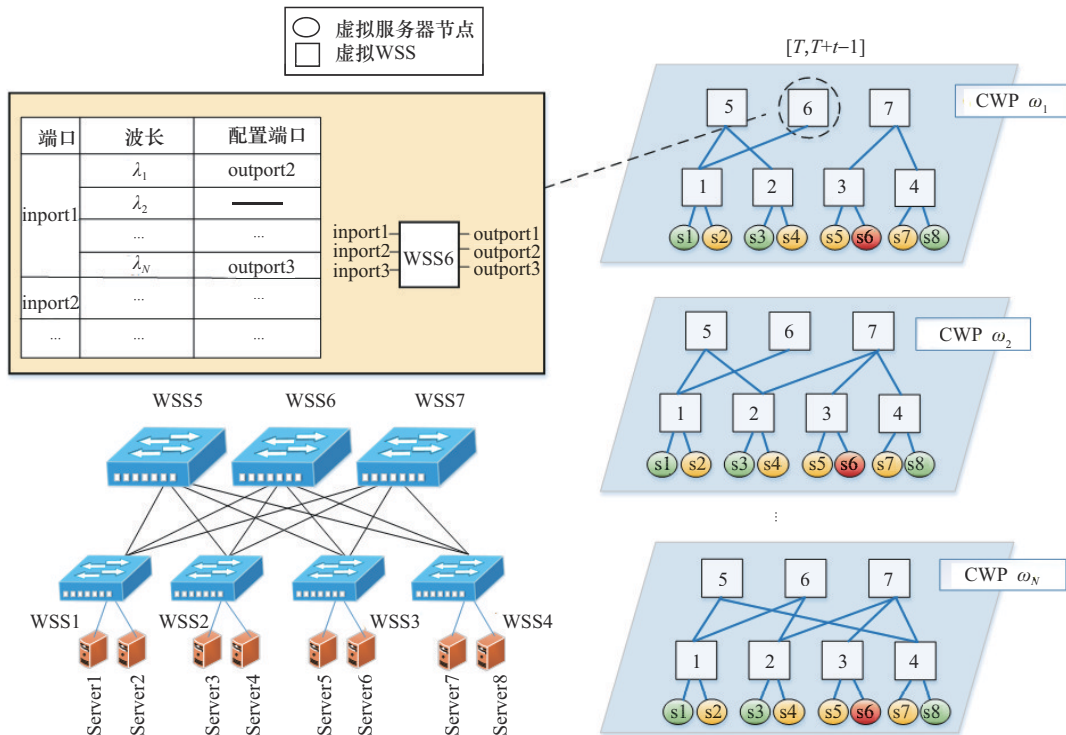


图3 算力波平面示意图

**算法1** 基于算力波平面的RWCTA算法

**输入** 智算中心光网络拓扑  $v(l, s, f)$ , 业务  $R(p, c, t)$

**输出** 分配的服务器组  $F$ 、路由  $R$ 、波长  $\omega$ 、计算持续时间  $t_c$ 、等待时间  $t_w$  和开始时隙  $T$

(1) 令  $T=0$ ; //将业务调度的开始时隙  $T$  设置为0

(2) 依据网络拓扑与服务器算力资源, 创建一个如图3所示的时间区间为  $[T, T+t-1]$  的算力波平面列表  $C$ ;

(3) **For each**  $\omega \in C$  //在当前算力波平面  $\omega$  执行后续操作

(4) 选出  $p$  个用于服务 Ring 业务的服务器 (考虑2种服务器选择策略, 包括尽力而为和负载均衡策略, 具体见第3.2.1节和第3.2.2节)。

如果存在, 则转入 (5); 如果不存在则遍历下一个算力波平面; 如果所有算力波平面都不存在, 则令  $T=T+1$ , 返回 (2)。

(5) 令  $r=0$ ; //  $r$  表示服务器的索引

(6) **While**  $r < p-1$

(7) 判断服务器对  $(f_r, f_{r+1})$  在算力波平面  $\omega$  是否存在一条可用路由。如果存在, 令  $r=r+1$ , 转入 (6); 若不存在, 遍历下一个算力波平面, 返回 (3); 如果所有算力波平面都不存在, 则令  $T=T+1$ , 返回 (2)。

(8) **End While**

(9) 判断服务器对  $(f_{p-1}, f_0)$  在算力波平面  $\omega$  是否存在一条可用路由。如果存在, 转入 (10); 若不存在, 遍历下一个算力波平面, 返回 (3); 如果所有算力波平面都不存在, 则令  $T=T+1$ , 返回 (2)。

(10) **End For**

(11) **End**

本文在为 Ring 业务选择服务器时考虑了2种不同策略, 包括尽力而为策略和负载均衡策略。

**3.2.1 尽力而为策略**

该策略的核心思想是始终为 Ring 业务选择空闲算力资源最多的服务器。具体而言, 在当前算力波平面中, 首先将可用服务器根据空闲算力资源进行排序, 选择最大的  $p$  个服务器作为服务 Ring 业务的服务器组。

**3.2.2 负载均衡策略**

该策略的核心思想是尽可能让所有服务器上的负载均衡。具体来说, 该策略首先定义一个评价指标  $\alpha_f$  来评估每个服务器  $f$  的计算能力冗余度,  $\alpha_f$  可以由计算式  $|c-r_f|$  得到。其中,  $r_f$  是服务器  $f$  在  $[T, T+t-1]$  时间段内的空闲算力资源。接下来, 该策略将当前算力波平面中所有服务器节点按照  $\alpha_f$  由小到大升序排列, 并且选择排序列表内前  $p$  个服务器加入服务器组。

基于算力波平面的 Ring 业务部署算法的时间复杂度为  $O(|W| \cdot |B| \cdot |N| + |W| \cdot (|Q| \cdot \log|Q| + |P| \cdot |S|))$ 。构建算力波平面的时间复杂度为  $O(|W| \cdot |B| \cdot |N|)$ , 其中  $|N|$  表示网络中节点总数,  $|W|$  表示波长数,  $|B|$  为业务所需时隙的数量。为 Ring 业务分配服务器时, 对服务器进行排序选择的时间复杂度为  $O(|W| \cdot |Q| \cdot \log|Q|)$ ,  $|Q|$  为网络中服务器总数。为 Ring 业务分配路由的时间复杂度为  $O(|P| \cdot |S|)$ , 其中  $|P|$  为 Ring 业务需要建立的光通道总数,  $|S|$  为相邻服务器间之间的候选路由数量, 该值等于网络中 Spine WSS 的数量。

**4 仿真与结果分析****4.1 仿真条件**

围绕  $v(4, 5, 5)$  测试网络对基于算力波平面的 RWCTA 算法的性能进行评估。其中, 智算中心光网络每个服务器上的收发机数量为5, 链路上最大可用波长数为8。每个服务器可用算力资源在  $[200, 600] \times 10^{13}$  FLOPS 的区间内随机生成, 其中 FLOPS 表示每秒浮点运算次数<sup>[12]</sup>。Ring 业务



的算力需求及其占比见表1<sup>[13]</sup>。每个Ring业务的持续时间在[10 TS, 50 TS]随机产生，服务器需求数在[4, 8]随机产生。其中，TS为单位时隙。每个WSS采用非全停模式<sup>[14]</sup>进行端口重配置，配置所需的时间假设为10 TS<sup>[15]</sup>。基于算力波平面的RWCTA算法通过Java语言编程实施仿真。

表1 Ring业务的算力需求及其占比

业务类型	算力需求/(FLOPS)	业务数量占比
Ring业务	$[1, 20] \times 10^{13}$	80%
	$[20, 1000] \times 10^{13}$	20%

#### 4.2 Ring业务部署算法性能比较

基于以上仿真条件，为对比基于算力波平面的Ring业务部署算法，还引入了一种只基于波平面的Ring业务部署算法，即算网分离的资源分配策略。该算法不具备算力感知能力，在服务器选择上采用从所有服务器集合里随机选择 $p$ 个服务器作为承载Ring业务的服务器组的策略，同时采用波平面技术为Ring业务分配路由、波长与时隙。

采用2个指标评估所提出的基于算力波平面的Ring业务部署算法的性能，即overall TCT和ATCT。overall TCT为所有Ring业务部署完成时间的最大值。ATCT为所有Ring业务的计算时间的平均值，即 $\frac{\sum_i t_c^i}{I}$ 。其中， $t_c^i$ 为第 $i$ 个Ring业务使用的服务器执行计算业务所占用的时隙数， $I$ 为Ring业务总数。

Ring业务部署算法性能评估如图4所示。其中，网络中的智算业务请求数量从50增加至250，WP和CWP分别对应面向Ring业务的波平面算法和算力波平面算法，BE和LB分别对应尽力而为策略和负载均衡策略的结果。

不同算法下的overall TCT如图4(a)所示。随着需要部署的Ring业务数量不断增加，所需的

overall TCT也在不断增加。这是合理的，因为部署更多的Ring业务需要占用更多的时隙。比较2种启发式算法的结果，基于CWP的Ring业务部署算法总能比基于WP的Ring业务部署算法具有更少的overall TCT。具体地，CWP-LB算法比WP算法最多减少近62.4%的overall TCT。这是因为基于CWP的Ring业务部署算法具备服务器算力感知，可以有效选择具有足够算力的目标服务器以满足Ring业务，从而降低了overall TCT。此外，比较BE和LB 2种算力资源分配策略的结果可以发现，CWP-LB算法能够有效减少12.2%的overall TCT。这归因于CWP-LB算法在不同目的节点之间更好地平衡了业务负载的分配，从而保障了不同服务器算力资源的协同，减少了服务器算力分配不均衡导致的等待时间，从而降低了overall TCT。

不同算法下的ATCT如图4(b)所示。CWP

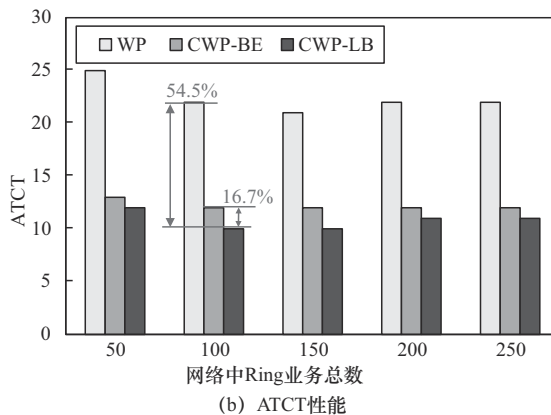
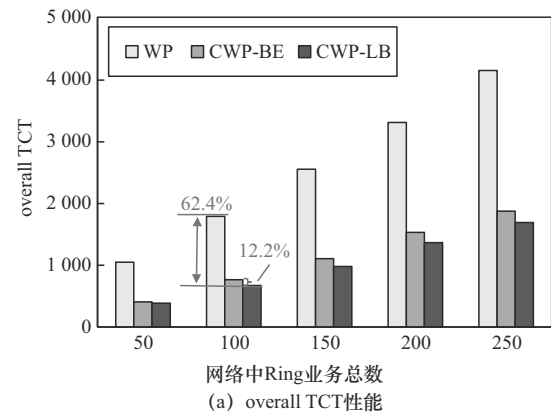


图4 Ring业务部署算法性能评估

算法具有更低的ATCT，与WP算法相比，最大ATCT降低了54.5%。这是因为CWP算法能够更好地均衡不同服务器上的负载，提高了服务器资源的利用率，从而有效缩短了ATCT。此外，与CWP-BE算法相比，CWP-LB算法的性能更优，最大ATCT降低了16.7%。这是因为Ring业务的计算持续时间取决于服务器组中计算持续时间最长的服务器。而CWP-LB策略能够灵活地选择计算能力冗余度更低的服务器群组，使得每个服务器的计算资源得到均衡分配，因而获得更低的ATCT。

仿真实验也评估了链路最大波长数对本文提出的Ring业务部署算法的影响，实验结果如图5所示。其中，需要部署的Ring业务数量为150，链路最大波长数从4增加到9。

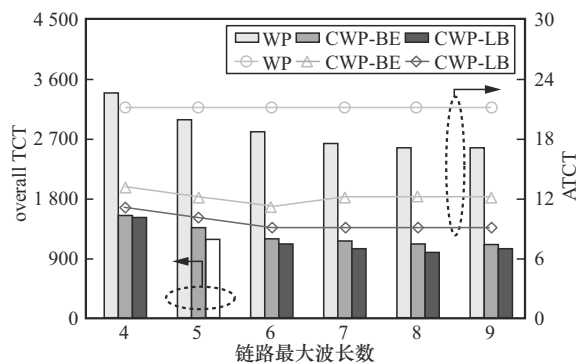


图5 链路最大波长数的影响

从图5可知，随着链路最大波长数的增加，3种算法的总业务完成时间都在减少。这是因为，波长数的增加在单位时隙内为业务提供了更充裕的网络资源，减少了Ring业务部署时链路上波长竞争导致的时延。当波长数增加到一定程度，总业务完成时间趋于稳定，这是因为服务器收发器数量有限，限制了性能的进一步提升。

对比WP和CWP算法，可以看到，即使WP算法的总业务完成时间逐步下降，但CWP的优势仍然十分明显。这说明，在波长资源充足的情况下，基于算力波平面的算网协同部署算法仍然

可以显著提升overall TCT性能。此外，WP算法的ATCT不会随着波长数增加而改变，这是因为其服务器选择策略是由随机数确定的，且链路最大波长数变化并不会影响WP算法的ATCT。

对比CWP-BE算法和CWP-LB算法，随着链路最大波长数的增加，二者的overall TCT与ATCT性能差异逐渐增大。这是因为在选择服务器时，更多的波长资源可以允许LB策略选择更多负载更均衡的服务器，从而进一步降低ATCT与overall TCT。

## 5 结束语

本文围绕智算中心光网络，以突破网络资源难以保障动态算力调度需求的瓶颈为目标，以算网协同为核心，针对智算中心中典型的Ring业务的部署展开了深入研究。通过扩展传统的波平面算法实现了算力波平面的构建，并提出了基于算力波平面的RWCTA算法，实现了Ring业务算力需求与网络资源的联合分配。仿真结果表明，该算法能够显著降低总业务完成时间和平均业务计算时间，有效提升了智算中心光网络的资源利用效率。

## 参考文献:

- [1] 唐雄燕, 魏步征, 沈世奎, 等. 智算数据中心光电交换技术综述(特邀)[J]. 光通信研究, 2024(5): 1-13.  
TANG XY, WEI B Z, SHEN S K, et al. Overview of optoelectronic switching technology in artificial intelligent data centers[J]. Study on Optical Communications, 2024(5): 1-13.
- [2] 刘璐, 吴冰冰, 赵文玉. 智算中心光互联技术呈高速率、低能耗、高可靠三大发展态势[J]. 通信世界, 2025(3): 36-37.  
LIU L, WU B B, ZHAO W Y. Intelligent computing center optical interconnection technology exhibits three major development trends: high-speed, low-power consumption, and high-reliability[J]. Communications World, 2025(3): 36-37.
- [3] URATA R, LIU H, YASUMURA K, et al. Apollo: large-scale deployment of optical circuit switching for datacenter networking[C]//Proceedings of the 2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-3.



- [4] 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. New York: ACM Press, 2020: 782-797.
- [5] 中国移动通信研究院. 面向AI大模型的智算中心网络演进白皮书(2023年)[R]. 2023.  
China Mobile Research Institute. Towards network evolution for AI large models: white paper on intelligent computing centers [R]. 2023.
- [6] 中国通信工业协会. 中国智算中心产业发展白皮书(2024年)[R]. 2024.  
China Communications Industry Association. White paper on the development of smart computing center industry in China [R]. 2024.
- [7] LIN J M, ZHAI Z W, LI Y C, et al. Performance evaluation of WSS-based all-optical spine-leaf data center network[C]//Proceedings of the 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1185-1190.
- [8] CLOS C. A study of non-blocking switching networks[J]. Bell System Technical Journal, 1953, 32(2): 406-424.
- [9] LIN J M, CHANG T H, ZHAI Z W, et al. Wavelength selective switch-based clos network: blocking theory and performance analyses[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(17): 5842-5853.
- [10] DONG J B, CAO Z, ZHANG T, et al. EFLOPS: algorithm and system co-design for a high performance distributed training platform[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA). Piscataway: IEEE Press, 2020: 610-622.
- [11] SHEN G, BOSE S K, CHENG T H, et al. Efficient heuristic algorithms for light-path routing and wavelength assignment in WDM networks under dynamically varying loads[J]. Computer Communications, 2001, 24(3/4): 364-373.
- [12] 中国信息通信研究院. 中国算力发展指数白皮书(2023年)[R]. 2023.  
China Information and Communication Research Institute. White paper on China's computing power development index (2023) [R]. 2023.
- [13] 李建飞, 曹畅, 李奥, 等. 算力网络中面向业务体验的算力建模[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(5): 34-38, 52.  
LI J F, CAO C, LI A, et al. Computing power modeling for business experience in computing power network[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(5): 34-38, 52.
- [14] TANG YA, YUAN T T, LIU B, et al. Effective \*-flow schedule for optical circuit switching based data center networks: a comprehensive survey[J]. Computer Networks, 2021(197): 108321.
- [15] BENJAMIN J L, GERARD T, LAVERY D, et al. PULSE: optical circuit switched data center architecture operating at nanosecond timescales[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(18): 4906-4921.

#### [作者简介]



黄婷婷 (2000-), 女, 苏州大学电子信息学院硕士生, 主要研究方向为智算中心光网络。



袁志林 (2000-), 男, 苏州大学电子信息学院硕士生, 主要研究方向为智算中心光网络。



翟德伟 (1999-), 男, 苏州大学电子信息学院硕士生, 主要研究方向为智算中心光网络。



李泳成 (1989-), 男, 博士, 苏州大学电子信息学院副研究员, 主要研究方向为骨干光网络和智算中心光网络。