

引用本文:贾惠彬,王帅康,郑立,等.基于fgOTN的电力通信网多层资源协同调度方法[J].光通信技术,2026,50(4):115-120.

基于fgOTN的电力通信网多层资源协同调度方法

贾惠彬¹,王帅康¹,郑立²,张晨阳¹,陆绍彬²

(1.华北电力大学电子与通信工程系,河北保定 071003;2.国网浙江省电力有限公司温州供电公司,浙江温州 325000)

摘要:为实现对电力业务的高效差异化承载,提出了一种基于细粒度光传送网(fgOTN)的电力通信网多层资源协同调度方法。首先建立基于软件定义网络(SDN)控制下的多层资源协同架构;其次,建立fgOTN层、光通道数据单元k(ODUK)层及光交叉连接(OXC)层的协同优化模型,量化各层资源的时延与成本;最后,设计基于启发式引导的混合贪心粒子群(HG-PSO)算法进行调度。仿真结果表明,高业务负载下,所提方法高优先级业务平均时延稳定在1.50 ms;相比传统逐跳资源分配方法,所提方法的阻塞率下降14.05%,资源利用率提升约20%,平均调度成本也显著降低。

关键词:细粒度光传送网;电力通信网;软件定义网络;差异化承载;协同调度

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)04-0115-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.018

Multi-layer resource collaborative scheduling method for power communication networks based on fgOTN

JIA Huibin¹, WANG Shuaikang¹, ZHENG Li², ZHANG Chenyang¹, LU Shaobin²

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;

2. Wenzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang 325000, China)

Abstract: To achieve efficient differentiated bearer for electric power services, a multi-layer resource collaborative scheduling method for electric power communication networks based on fine-granularity optical transport network (fgOTN) is proposed. First, a multi-layer resource collaborative architecture under software-defined networking (SDN) control is established. Second, a collaborative optimization model encompassing the fgOTN layer, optical channel data unit k (ODUK) layer, and optical cross-connect (OXC) layer is formulated, quantifying the latency and cost of resources at each layer. Finally, a heuristic-guided hybrid greedy particle swarm optimization (HG-PSO) algorithm is designed for scheduling. Simulation results show that under high traffic load, the average latency of high-priority services with the proposed method remains stable at 1.50 ms. Compared with the traditional hop-by-hop resource allocation method, the proposed method reduces the blocking probability by 14.05%, improves resource utilization by approximately 20%, the average scheduling cost is also significantly reduced.

Key words: fine-grained optical transport network, power communication networks, software defined networking, differentiated bearer, collaborative scheduling

0 引言

随着电力通信业务的持续演进,新型电力系统中

收稿日期:2025-12-02。

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目基金(5211WZ240005)资助。

作者简介:贾惠彬(1979—),男,副教授,博士,主要研究领域为智能电网通信与信息技术,参与国家自然科学基金项目3项,省部级自然科学基金项目1项,国家电网公司横向项目12项,申请发明专利20项,共发表论文50篇,被SCI或EI检索20篇。



海量小颗粒业务的灵活接入需求,与基于光传送网(OTN)的电力通信网业务调度能力存在显著不匹配,导致电力通信网业务难以适配10 M~1 G小颗粒业务的承载需求^[1]。同时,传统OTN在资源调度及控制机制上存在局限性,无法实现对各类业务的高效、差异化资源承载^[2]。细粒度光传送网(fgOTN)技术为电力通信网络业务承载机制提供了新的解决思路,作为ITU-T G.709标准体系下面向Sub-1G小颗粒业务的硬管道解决方案,fgOTN创新性地引入了细粒度灵活光通道数据单元(fgODUflex),因此具备高效承载业务的能力^[3-4]。

贾惠彬,王帅康,郑立,等:基于fgOTN的电力通信网多层资源协同调度方法

现有关于小颗粒业务调度的研究多关注路由选取与故障保护,文献[5]提出了基于光业务单元保护(OSU-P)的动态保护机制,通过抢占式服务冲突避免算法提升资源效率,但故障恢复依赖带宽调整,时延难以满足高优先级业务确定性需求;文献[6]提出小颗粒业务的分段共享保护方案,优化资源利用率与恢复成功率,但带宽调整概率高达20%,且预配置策略缺乏实时性。文献[7]聚焦能效优化,采用非支配排序遗传算法II(NSGA-II)处理多维资源调度,但未解决光电层协同问题,计算复杂度高。文献[8]虽提出基于fgOTN的多层资源调度架构与算法,但其跨层协同不足,未充分考虑高优先级业务保障与资源效率的平衡。因此,本文提出一种基于fgOTN的电力通信网多层资源协同调度方法。

1 基于软件定义网络(SDN)的多层资源调控架构

本文方法在SDN集中控制下构建多层资源协同调度架构,支持差异化调度策略下发和路径计算。基于SDN的多层资源协同调度架构如图1所示,该架构由控制平面与数据平面两部分组成,其中控制平面集中维护全网fgOTN/ODUk/光交叉连接(OXC)3层资源状态,构建覆盖全网的多层资源库视图;SDN控制器集成了全局拓扑、统一资源建模、多层PCE路径计算和PCEP信令扩展等功能,以实现对底层网络资源的集中管控与动态调度;基于扩展的路径计算单元通信协议(PCEP)信令完成链路状态同步与调度策略下发,从而实现跨层资源的精准感知与高效协同调度^[9]。

数据平面包括fgOTN层、ODUk电层及OXC光层资源。fgOTN层依托10.4 Mbit/s细粒度时隙技术,精

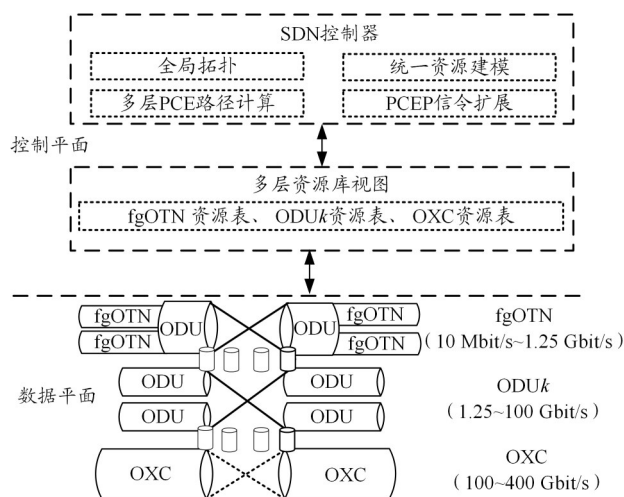


图1 基于SDN的多层资源协同控制总体架构

准匹配10 M~1 G小颗粒业务的带宽需求,通过时分复用机制提供物理隔离的端到端连接,解决传统OTN的带宽浪费问题;ODUk层在OTN中仍发挥重要作用,该层基于电交叉连接技术,为业务提供大带宽连接,并支持流量的拆分与汇聚,实现基于fgOTN的小颗粒业务的复用;OXC光层提供带或不带电再生功能的高速波长连接,负责电层信号的长距离传输。具体差异化封装流程为小颗粒业务直接封装为fgODUflex信号,大颗粒业务直接映射至ODUk通道,随后经控制平面指定复用策略,将多路fgODUflex按复用策略聚合至ODUk通道,再统一映射至OTU完成电层标准化处理,最后由OXC设备通过光交叉连接矩阵调度波长资源,建立端到端光通路传输通道,实现光信号的传输。

2 基于fgOTN的电力通信网多层资源协同调度优化模型

本文通过建立fgOTN、ODUk层及OXC层的协同优化模型,量化了多层资源成本以及传输时延;并基于启发式引导的混合贪心粒子群(HG-PSO)算法进行资源调度,在多种业务负载下均能够实现高优先级业务端到端时延保障与低优先级业务成本控制的协同调度。

2.1 时延建模

本文针对fgOTN电力通信网多层链路资源调度场景,综合考虑链路传输时延和设备处理时延,构建相应模型,作为后续调度优化模型的重要依据。

传输时延指业务信号在光纤链路中以光速传输所产生的物理传输时延,主要由链路长度及光纤折射率决定,该部分时延为链路物理属性固定值,与调度策略无关,随路径跳数及链路长度线性变化。设备处理时延指业务流经各节点时,由封装、调度、交叉、解封装等操作在设备内产生的处理时延,具体可细分为fgOTN层时延 D_{fgOTN} 、ODUk层时延 D_{ODUk} 以及OXC层时延 D_{OXC} 。设备处理时延具备可调节性,调度策略如优先复用ODUk、跳数优先、多跳复用将直接影响设备处理时延总量,进而对高优先级业务路径选择策略产生显著作用。

基于以上分类,业务 s 在路径 p 上的总端到端时延 $D_{s,p}$ 表达式为

$$D_{s,p} = \sum_{l \in E} (D_{prop}^l x_l^s) + \sum_{v \in V} (D_{proc}^v x_v^s) \quad (1)$$

式中: $x_l^s \in \{0, 1\}$ 表示业务 s 是否经过链路 l ; $x_v^s \in \{0, 1\}$ 表示业务 s 是否经过节点 v 。 V 表示节点集合, E 表示

链路集合; D_{prop}^l 表示为链路 l 的传播时延; D_{proc}^l 表示为链路 l 上设备总处理时延, 包括链路 l 上的 D_{fgOTN}^l 、 D_{ODUk}^l 、 D_{OXC}^l 。当业务为高优先级业务时, 只在源和目的节点存在 D_{fgOTN}^l 、 D_{ODUk}^l 、 D_{proc}^l 的表达式为

$$D_{\text{proc}}^l = D_{\text{fgOTN}}^l + D_{\text{ODUk}}^l + D_{\text{OXC}}^l \quad (2)$$

2.2 成本建模

不同业务对带宽、时延及可靠性需求差异显著, 盲目新建或过度复用均可能导致资源浪费与阻塞率上升。通过构建链路资源成本模型, 可量化不同调度策略下各类资源消耗, 评估多层协同调度对资源效率与业务性能的综合影响, 为调度优化提供决策依据^[10]。因此, 需基于多层协同调度策略, 统筹权衡资源成本。链路资源成本主要由 fgOTN 层、ODUk 层及 OXC 层波长三部分组成。受复用效率、新建通道数量及路径跳数等因素影响, 3 类成本表达式分别如式(3)~式(5)所示。

$$C_{s, \text{fgOTN}} = \sum_{v \in V} \left(\frac{B_s}{10} C_{\text{fgOTN}} x_v^s \right) \quad (3)$$

式中: C_{fgOTN} 表示业务 s 在节点 v 上封装与解封 fgOTN 所产生的单元资源成本, $C_{s, \text{fgOTN}}$ 表示业务 s 在路径 p 上各个节点所产生的开销总成本, B_s 表示业务 s 传输所需带宽大小。

$$C_{s, \text{ODUk}} = \sum_{v \in V} (C_{s, \text{ODUk}} r_{s, v}^{\text{ODUk}} x_v^s) \quad (4)$$

式中: C_{ODUk} 表示业务 s 节点 v 上产生的 ODUk 开销成本, $C_{s, \text{ODUk}}$ 表示业务 s 在路径 p 各个节点所产生的 ODUk 总开销成本, $r_{s, v}^{\text{ODUk}}$ 表示业务 s 在路径 p 的节点 v 设备上是否复用已有 ODUk 连接。

$$C_{s, \text{OXC}} = \sum_{v \in V} (C_{\text{OXC}} r_{s, v}^{\text{OXC}} x_v^s) \quad (5)$$

式中: C_{OXC} 表示业务 s 在路径 p 的节点 v 上产生的 OXC 光交叉端口资源开销成本, $C_{s, \text{OXC}}$ 为业务 s 在路径 p 上所产生的 OXC 通道总开销成本, $r_{s, v}^{\text{OXC}}$ 业务 s 在路径 p 的节点 v 设备上是否复用已有 OXC 连接, 值为 1 或 0。

综上分析, 业务 s 在路径 p 上占用链路资源的总成本表达式为

$$C_{s, p} = C_{s, \text{fgOTN}} + C_{s, \text{ODUk}} + C_{s, \text{OXC}} \quad (6)$$

基于前述时延与成本模型, 在满足高优先级业务时延约束及链路资源容量限制的前提下, 最小化多层链路资源成本与业务端到端路径加权时延之和, 实现资源利用效率、业务性能与网络经济性的协同优化, 目标函数如下:

$$\min \sum_{s \in S} [(1 - \alpha) C_s^* + \alpha D_s^*] \quad (7)$$

式中: α 表示时延感知权重, 时延感知权重随业务优先

级增加而增大, 高优先级业务倾向选择低时延路径, 低优先级业务倾向选择资源复用路径; C_s^* 、 D_s^* 表示归一化后的值; S 表示电力通信网中接入的所有业务。

为满足电力通信网业务服务等级协议(SLA)要求, 需确保每个业务 s 的端到端路径时延 D_s 不超过其规定的最大容忍时延 D_s^{max} ; 多层资源耦合调度过程中需保证各设备节点 v 上分配的 fgOTN、ODUk 和 OXC 波长资源占用量不得超过其物理容量上限; 当链路上已有 ODUk 可复用时, 业务优先复用现有资源, 避免重复分配, 降低成本; 若无可复用资源, 则需新建。

3 HG-PSO 算法框架和策略

3.1 算法框架

本文提出的 fgOTN/ODUk/OXC 3 层资源调度架构以 SDN 集中控制为核心, 混合贪心粒子群(PSO)中全局最优对应 SDN 的全网资源最优配置方案, 个体最优对应单业务局部最优路径, 且无需分布式启发式算法的频繁信令交互, 信令开销更低, 满足电力通信网中考虑时延成本的多目标调度需求。同时, 为提高多层资源协同调度算法在电力通信网络中的收敛速度和解的可行性, 本文在粒子群优化算法基础上引入分层贪心启发式机制, 在保持 PSO 全局搜索能力的同时, 利用启发式规则生成高质量初始解, 构造启发式引导(HG)向量 h_i , 使算法在 fgOTN、ODUk 和 OXC 3 层资源间实现更高效的协同调度。

本文在传统 PSO 算法速度更新中引入 HG 向量 h_i , 其表达式为

$$h_i = \lambda_1 \nabla_{\text{delay}}(x_i) - \lambda_2 \nabla \cos t(x_i) + \lambda_3 r_{\text{gain}}(x_i) \quad (8)$$

式中: $\nabla_{\text{delay}}(x_i)$ 表示路径时延梯度, 反映粒子解在端到端时延上的改善趋势, $\nabla \cos t(x_i)$ 表示资源成本上升趋势, $r_{\text{gain}}(x_i)$ 表示路径复用带来的资源节约增益, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为引导权重因子, 仿真中分别取 0.4、0.4、0.2 用于平衡 3 项影响。引入启发式修正后的粒子速度更新公式为

$$v_i^{t+1} = w v_i^t + c_1 r_1 (P_{\text{best}_i} - x_i^t) + c_2 r_2 (G_{\text{best}} - x_i^t) + \eta h_i \quad (9)$$

式中: w 为惯性权重, c_1 、 c_2 分别为个体和群体学习因子, r_1 、 r_2 为随机数, η 为启发式引导系数, P_{best_i} 为第 i 个粒子的个体历史最优位置, 代表该粒子迭代过程中自身搜索得到的最优解; G_{best} 为种群全局最优位置, 代表全部粒子截至当前迭代所搜索到的全局最优解。该公式使粒子搜索方向更偏向低跳数、低时延且高复用

贾惠彬,王帅康,郑立,等:基于fgOTN的电力通信网多层资源协同调度方法

率的可行解区域,从而加快收敛并提升调度质量。

3.2 HG-PSO 算法策略

HG-PSO 算法通过分层贪心规则初始化与启发式引导迭代,实现 fgOTN、ODUK、OXC 3 层资源的高效协同调度,算法流程如图 2 所示,具体步骤如下:

1) 初始资源规划,输入网络拓扑 $G(V, E)$ 、业务集合 S , 候选路径数 K , 粒子数 P , 最大迭代次数 $T_{\max}$, 惯性权重 w , 个体学习因子 c_1 , 群体学习因子 c_2 , HG 系数 η , 权重因子 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 以及资源成本和时延等参数。链路容量为 100 G, 粒子群规模为 200, $T_{\max} = 50$, $w = 0.9 - (0.9 - 0.4) t/50$, t 为当前迭代次数, $c_1 = 1.5$ 、 $c_2 = 2$, $\eta = 0.2$ 。

2) 基于 Yen 算法为业务 s 计算 k 条候选路径 p_s^k , 形

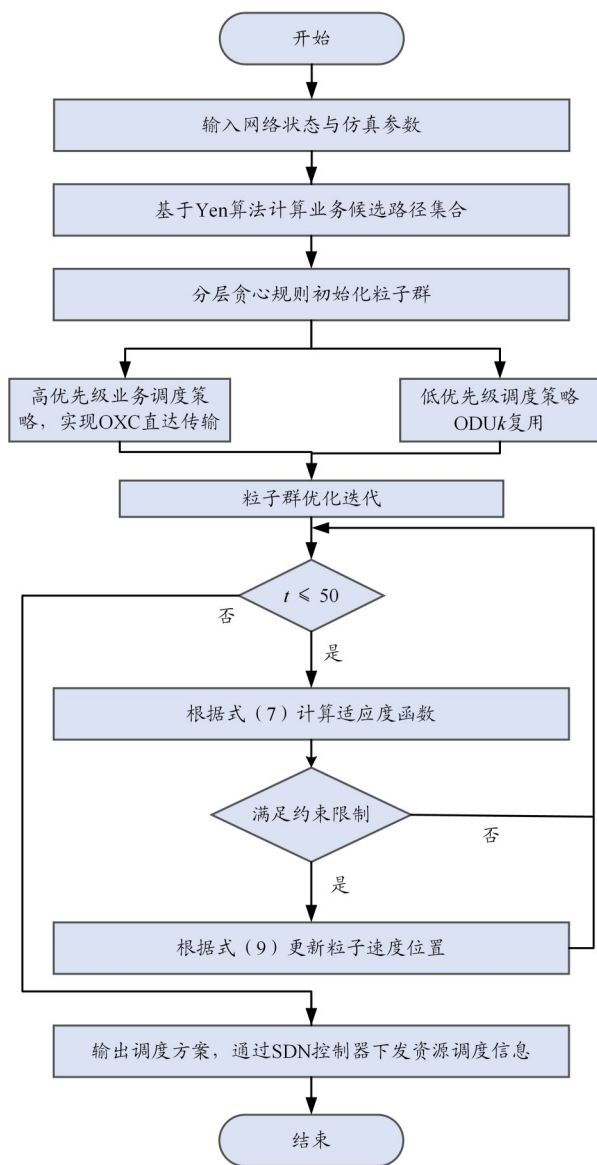


图2 HG-PSO 算法流程

成业务候选路径集合。

3) 基于分层贪心规则下的高低优先级业务调度策略初始化粒子群, 检查粒子 x_i 是否满足约束, 确保初始粒子均为可行解, 避免算法在无效解空间浪费算力。

4) 进行粒子群优化迭代, 以式(7)所构建的目标函数值为适应度, 根据式(8)计算 HG 向量 h_i , 引导粒子朝低时延、低成本的方向搜索, 解决传统 PSO 搜索盲目性问题。

5) 进行约束检查, 确保迭代过程中粒子始终为可行解。

6) 更新个体最优 P_{best} 与全局最优 G_{best} 。若当前粒子适应度值 $F(x_i, t+1) < P_{\text{best}}$, 则更新 P_{best} ; 若 $F(x_i, t+1) < G_{\text{best}}$, 则更新全局最优 G_{best} , 并根据式(9)更新粒子速度与位置, 引导粒子群逐步逼近全局最优。

7) 判断终止条件, t 达到最大迭代次数, 则退出迭代, 不满足则转入步骤 4) 继续迭代。

8) 输出全局最优 G_{best} 下对应资源调度方案, 并基于 SDN 控制器进行调度下发, 实现路由规划及资源调度。

4 仿真实验

4.1 仿真设置与参数设置

本文在 Matlab 平台上搭建仿真环境, 仿真网络拓扑如图 3 所示。每个节点代表一个 fgOTN 设备, 每条光纤支持 12 个光通道, 每个光通道容量为 100 Gbit/s。仿真中业务请求源节点与目的节点随机生成, 带宽需求范围设定为 10~20 000 Mbit/s, 所有业务划分为高优先级业务与低优先级业务 2 类, 其中高优先级业务占比为 50%。

仿真中各类网络资源单位成本与单位时延参数如表 1 所示。根据 fgOTN 标准的映射机制, fgOTN 承载

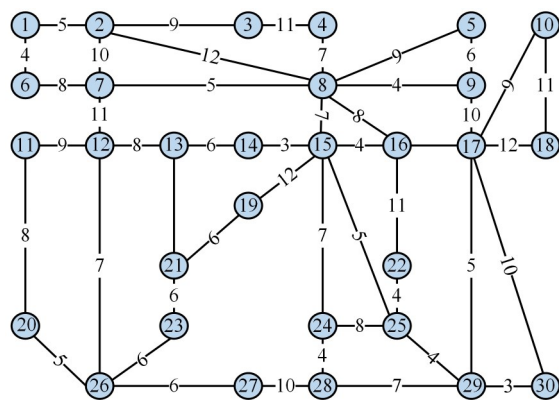


图3 仿真网络拓扑

表1 资源参数配置

资源类型	单位成本	单位时延
fgOTN	0.001	0.02 ms
ODU0/1/2	[3,5,8]	0.05 ms
OXC波长	8	0.05 ms
链路单位跨度	—	0.05 ms/span

小颗粒业务时,信号需经过业务→fgODUflex→ODUk的多级封装过程。因此,fgOTN业务的总处理时延设定为fgOTN层封装时延与ODUk层处理时延之和;而ODUk承载大颗粒业务仅产生0.05 ms的封装处理时延。链路单位跨度span定义为物理链路中2个相邻节点之间的单位距离时延。

4.2 仿真结果与分析

为验证所提调度方法(下文简称HG-PSO)在复杂电力通信网络中的可行性与性能优势,本文对3种调度方法,包括HG-PSO,逐跳建立波长连接和逐跳建立ODUk连接的资源分配(OXCHBH+ODUHBH)方法,不引入集中控制且光层和电层独立调度的多层协同资源调度(MCRS)方法^[8]进行对比仿真实验。在仿真过程中设定感知权重 α ,高优先级业务时 $\alpha = 0.9$,低优先级业务时 $\alpha = 0.1$,以体现差异化调度策略中的性能保障与成本优化协同机制。

不同方法下网络阻塞率性能对比如图4所示,可以看出,OXCHBH+ODUHBH方法在高负载下的阻塞率上升至30.1%,表现出极差的扩展性,在缺乏集中控制与优先级识别情况下,导致资源快速耗尽;MCRS在1 000业务时阻塞率为1%,但在2 000业务时仍上升至24.45%,这是因为该算法只考虑业务低时延导致资源快速耗尽,不能有效进行资源优化;HG-PSO的阻塞率

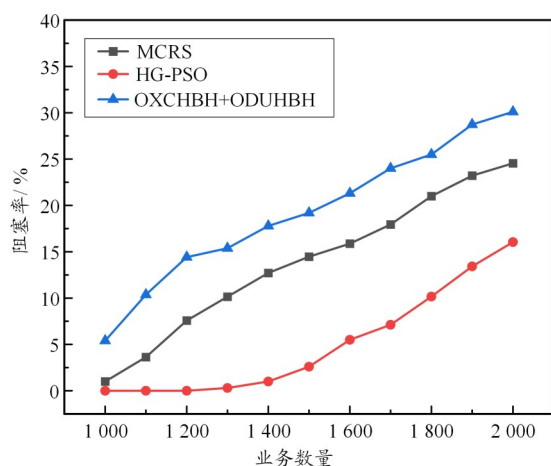


图4 不同方法下网络阻塞率性能对比

整体处于较低水平,业务数量从1 000增长至2 000时,阻塞率上升至16.05%,相比OXCHBH+ODUHBH下降14.04%。说明HG-PSO在面对业务量增长时,能较好地控制业务阻塞风险,兼顾了资源效率与优先级保障,说明其具备良好的调度鲁棒性和扩展性。

不同方法下网络资源利用率随业务数量增高的变化趋势如图5所示。可以看出,OXCHBH+ODUHBH资源利用率最差;MCRS因资源独占导致ODUk利用率较低,而HG-PSO在保障高优先级业务直达路径的同时,低优先级业务通过ODUk复用,在业务数量为2 000时,资源利用率可以达到72%,比OXCHBH+ODUHBH提升了将近20%,兼顾了资源效率与业务性能保障。以上结果进一步验证了HG-PSO在光层、电层调度上的资源协同优势,能够同时较好利用光层和电层资源。

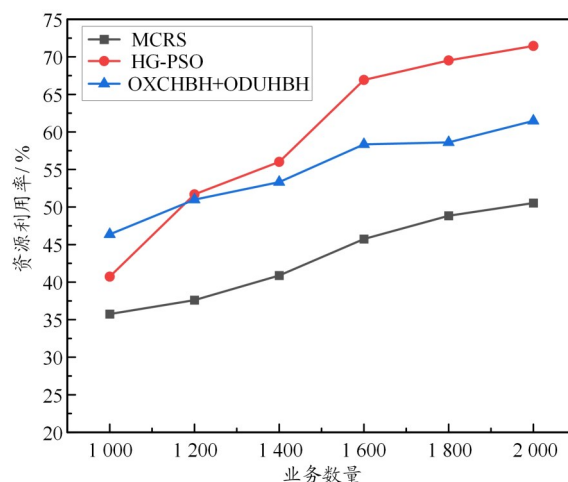


图5 不同方法下网络资源利用率性能对比

不同方法下高低优先级业务的平均时延如图6所示,图中H和L分别表示高、低优先级。可以看出,在不同业务负载下,本文所提调度方法在2类业务间均实现了良好的时延保障。对于高优先级业务,平均时延控制在1.50 ms较低范围内,明显优于OXCHBH+ODUHBH方法的业务平均时延。对于低优先级业务,该方法平均时延控制在2.40 ms左右。同时,通过计算可知,在不同负载下,HG-PSO的高优先级平均业务的时延标准差仅为0.02 ms,低优先级平均业务的时延标准差约为0.05 ms,表明平均时延并未随业务负载的显著增加而产生大幅波动。这充分验证了fgOTN硬管道物理时隙隔离下确定性时延的优势,即不受网络拥塞影响。高低优先级业务之间的平均时延差异主要源于差异化的路径选择策略而非资源竞争,高优先级业

贾惠彬,王帅康,郑立,等:基于fgOTN的电力通信网多层资源协同调度方法

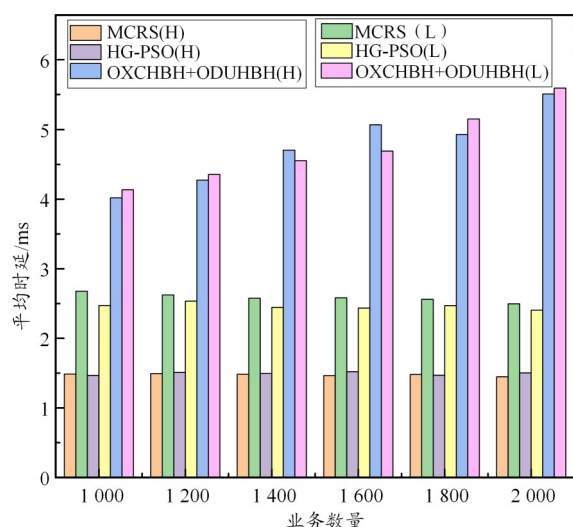


图6 不同方法下平均时延性能对比

务由SDN控制器优选最短路径和低跳数直达,以降低传输时延,而低优先级业务为提升全网资源利用率,倾向于选择多跳复用途径。这种设计既满足高优先级业务SLA要求,又实现低优先级业务资源高效利用,符合电力通信网多业务承载需求。

不同方法下平均成本性能对比如图7所示。可以看出,HG-PSO的高优先级业务调度成本显著低于OXCHBH+ODUHBH的调度成本,且与MCRS的调度成本范围持平,而低优先级业务平均成本显著低于MCRS。其中,随着业务数量由1000增加至2000,HG-PSO的高优先级业务平均成本由14.37降至13.19;低优先级业务平均成本由12.64降至11.60,始终保持较低水平。以上结果说明HG-PSO在保障关键业务性能

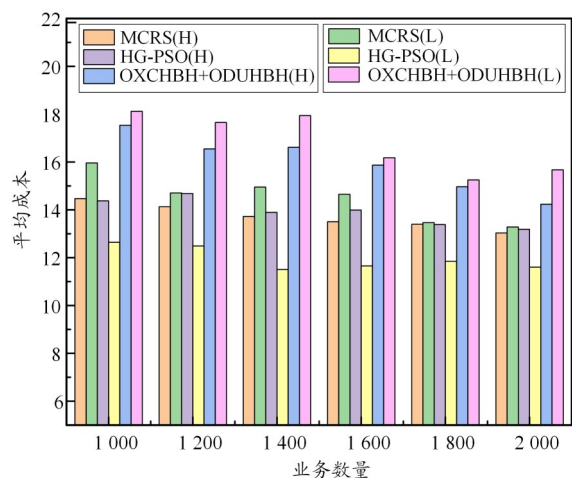


图7 不同方法下平均成本性能对比

的同时,能够有效控制资源开销,在不同业务负载下均展现出良好的成本控制能力。

5 结束语

针对传统OTN电力通信网无法兼顾业务时延与网络资源高效利用的问题,本文提出了一种基于fgOTN的电力通信网多层资源协同调度方法,通过SDN实现资源协同下发,并基于HG-PSO算法进行了资源调度,能够有效降低低优先级业务的平均时延与阻塞率,并实现资源的优化,满足电力业务的差异化承载需求。但目前研究在算法收敛速度上仍有提升空间,未来将改进自适应算法优化,增强动态场景响应能力。

参考文献:

- [1] 何玲,郭庆瑞,辛亚楠,等. 基于OSU的OTN多颗粒度业务承载效果评估[J/OL]. 光通信技术. [2025-11-27]. <https://link.cnki.net/urlid/45.1160.TN.20251017.1422.002>.
- [2] 李洁,陈震,周岐华,等. 一种新型的OTN技术[J]. 光通信技术, 2020,44(11):56-58.
- [3] Zhao Junfeng, Tang Rui, Guang Zhejiang, et al. Research on key technologies and applications of fine grain optical transport network (fgOTN) for electric power communication network[C]//IEEE. 2025 IEEE 7th International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE). New York: IEEE, 2025: 1-5.
- [4] 陈孙胜,汪毅,林洛其,等. 新型电力系统下fgOTN的应用研究[J]. 电信科学, 2025,41(1): 54-64.
- [5] Li Zhuotong, Zhao Yongli, Wang Wei, et al. Resource-efficient protection scheme for optical service units in fifth-generation fixed networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(7): 466-479.
- [6] Liu Wenhong, Zhao Yongli, Li Yajie, et al. Segmented protection scheme based on maximum bandwidth sharing in F5G[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2024, 16(11): 1145-1158.
- [7] Yu Tiankuo, Yang Hui, Yao Qiuyan, et al. Intelligent service-oriented graph representation-assisted high-efficiency fine grain grooming for OSU-based OTN[C]//IEEE. 2024 22nd International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). New York: IEEE, 2024: 1-3.
- [8] Zhao Yang, Lin Yi, Li Yunbo, et al. Multi-layer resource scheduling architecture and algorithm for a service-oriented optical network based on a fine grain OTN[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2024, 16(10): F13-F25.
- [9] Casellas R, Martínez R, Muñoz R, et al. Control and management of flexi-grid optical networks with an integrated stateful path computation element and OpenFlow controller [invited][J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(10): A57-A65.
- [10] Yang Zeyuan, Gu Rentao, Ji Yuefeng. Energy efficient service provisioning in computing power network over OSU-Based OTN[C]//IEEE. 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). New York: IEEE, 2022: 1306-1311.