



基于光电转换装置成本感知的 RWA 算法

胡道允, 杨振泰, 陆钱春, 齐进
(中兴通讯股份有限公司, 江苏 南京 210012)

摘要: 近年来, 运营商通过在 ROADM 设备上部署光电转换装置实现了光传输网络中业务的细粒度调度, 从而提升频谱资源的利用率。但是光电转换装置价格昂贵, 导致了网络部署成本的增加。针对光传输网络中业务和光模块的部署问题进行了 ILP 建模, 并证明其为 NP-hard 问题。提出了两种基于光电转换装置成本感知的路由和波长分配算法: OEO-RWA 算法和 SA-RWA 算法, 并通过仿真证明两种算法既能够保证业务的细粒度调度, 又能够减少光电转换装置数量, 降低网络部署成本。

关键词: 光传输网络; ROADM; 光电转换; 路由和波长分配; 成本

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020116

RWA algorithm based on cost of photoelectric conversion device

HU Daoyun, YANG Zhentai, LU Qianchun, QI Jin
ZTE Corporation, Nanjing 210012, China

Abstract: Over the past decade, carrier operator implement fine-grained traffic scheduling in optical transport network(OTN) by deploying optical-electric conversion(OEO) devices on ROADM, which can improve the spectrum utilization. However, OEO device is very expensive, which will increase the CAPEX and OPEX of carrier operator. A problem about traffic scheduling and the deployment of OEO devices in OTN was proposed. Then, the ILP model of this problem was built and it was proved NP-hard. Additionally, two novel algorithms named OEO-RWA and SA-RWA were proposed. At last, these algorithms were demonstrated can not only ensure flexibility of traffic scheduling, but also can reduce the number of OEO device through simulation.

Key words: OTN, ROADM, optical-electric conversion, RWA, cost

1 引言

随着 5G 网络技术的发展和应用, 网络中需要承载的业务和数据流量将会呈现爆炸式的增长, 网络中的带宽资源也将变得日益紧张。近年来, 光传输网络 (optical transport network, OTN) 依

靠其高带宽、低时延的特性, 已经在承载网络中得到广泛的应用。其中, 全光网络 (all-optical network, AON) 能够实现长距离无光电转换的端到端业务传输, 但是 AON 大粒度、低灵活性经常产生频谱的浪费, 导致频谱利用率降低等问题^[1]。虽然通过可重构光分插复用器 (ROADM) 能够在



光层实现自动路径调度,提升 AON 频谱分配的灵活性,但是当前的 ROADM 技术还没有实现全光再生技术,导致业务在传输时必须保证波长一致性。因此,运营商只能通过在 ROADM 设备上部署光/电/光(OEO)转换端口的方式实现业务的细粒度灵活调度,从而提高 OTN 频谱资源的利用率^[2-3]。然而,OEO 装置的价格十分昂贵,导致网络部署成本增加^[4]。

2 相关研究

参考文献[5-6]提出针对 AON 的路由和频谱分配算法,通过先路由再频谱分配的方式提升光网络频谱资源利用率。上述算法通常会先为业务计算 k 条路径,然后根据候选路径集合选择合适的频谱分配算法。常见的频谱分配算法有首次命中(first-fit, FF)算法、最多谱槽数需求优先(most slots first, MSF)以及最大路长谱槽优先(most path-and-slots first, MPSF)等。另外,也存在一些文献使用启发式算法解决 AON 中的路由和频谱分配问题,例如遗传算法等^[7-8]。虽然上述算法能够在一定程度上降低请求的阻塞率,但是它们依然需要满足波长一致性约束,因此无法解决 AON 中资源调度的粒度问题,导致网络中频谱资源的浪费。

参考文献[9-10]提出了允许波长转换的频谱分配算法,它们能够在保证频谱利用率的同时减少网络中所需的波长转换器数量。但是本文通过部署 OEO 端口,不仅能够使业务在传输过程中实现波长转换操作,同时允许业务灵活地汇聚和拆分,从而实现更细粒度的业务和频谱调度。参考文献[11]提出通过业务的灵活汇聚和拆分能够降低网络阻塞率,同时规划端口部署,节约网络能耗,但其主要针对弹性光网络,通过业务拆分解解决频谱连续性约束引发的频谱碎片问题。而本文主要针对带宽固定的 WDM 网络,通过电层业务的灵活汇聚和拆分,降低网络阻塞率。

3 问题描述和 ILP 建模

3.1 OEO 设备部署场景

目前,商用 ROADM 设备还不具备全光再生技术,因此业务在 ROADM 设备上只能通过部署 OEO 端口的方式来实现发送、接收、跳波、聚合和拆分等操作^[4]。OEO 部署场景如图 1 所示。

(1) 发送和接收

接收和发送操作如图 1 中的业务 1 所示,当该网元为业务 1 的原宿节点时,由于客户侧均为电信号,因此需要为出站光纤的 λ_2 分配一个 OEO 端口,从而将业务 1 由电信号转换成光信号。

(2) 跳波操作

跳波操作如图 1 中的业务 2 所示。业务 2 在入站光纤中由波长 λ_1 传输,在经过站点时,先由光信号转换成电信号,经过电层模块后,再由电信号转换成光信号,并被分配到出站光纤的波长 λ_2 中。因此需要在该网元上为入站光纤的 λ_1 和出站光纤的 λ_2 各分配一个 OEO 端口。

(3) 业务汇聚和拆分

业务汇聚和拆分操作如图 1 中的业务 2 和业务 3 所示。业务 3 在入站光纤上独占波长 λ_2 ,但是经过该站点后,和业务 2 一起汇聚到出站光纤的波长 λ_2 中。因此,需要为入站光纤的 λ_1 和 λ_2 各分配一个 OEO 端口,负责将业务 2 和业务 3 转换成电信号。同时,需要为出站光纤的波长 λ_2 分配一个 OEO 端口,负责将业务 2 和业务 3 汇聚后的电信号转换成光信号。

如果业务在经过站点时只经过光交叉矩阵实现转发,则不需要部署 OEO 端口,如图 1 中的业务 0 所示。

虽然在 ROADM 设备上部署 OEO 端口能够使业务在传输过程中实现跳波、汇聚和拆分等操作,极大程度上提高了 WDM 网络资源调度的灵活性,但是 OEO 设备成本较为昂贵。所以运营商在部署业务和 OEO 端口时,需要均衡

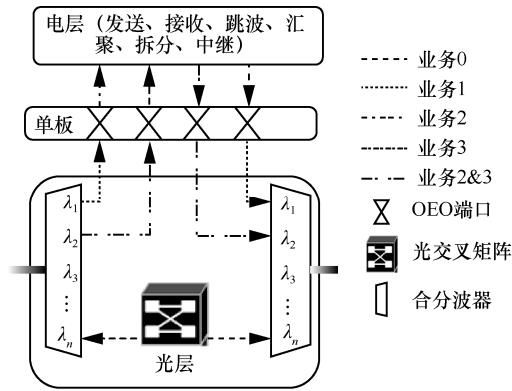


图 1 OEO 部署场景

业务部署带来的收益和 OEO 端口部署付出的成本。

3.2 整数线性规划模型

本文将 OTN 表示为 $G(V, E, \Lambda)$ ，其中， $v \in V$ 表示网络节点； $e=(u, v) \in E$ 表示网络链路； $\Lambda_e=[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] \subseteq \Lambda$ 表示链路 e 上可用的频谱集合。 $q(s_q, d_q, b_q) \in Q$ 表示业务请求，其中， s 表示请求的源地地址， d 表示请求的目的地址， b 表示请求的客户侧带宽，单位为 Gbit/s。

3.2.1 变量

整数线性规划模型中用到的变量如下。

- x_q ：布尔变量，等于 1 表示请求 q 能够部署成功，否则等于 0。
- $f_{q,(u,v),\lambda}$ ：布尔变量，等于 1 表示请求 q 部署在链路 (u,v) 的波长 λ 上，否则等于 0。
- $o_{(u,v),\lambda}$ ：布尔变量，等于 1 表示在网元 u 上需要为链路 (u,v) 的波长 λ 部署 OEO 端口，否则等于 0。

3.2.2 优化目标

在本文中，定义成功部署一个请求的收益等于该请求所占用的带宽资源乘以收益系数 α 。网络部署的开销主要来自 OEO 端口的部署， β 表示单个 OEO 端口成本。因此，网络整体收益 R 等于网络中部署成功的请求收益之和减掉所有 OEO 端口的部署成本，如式 (1) 所示，本文的优化目标即最大化网络总收益：

$$\max R = \alpha \cdot \sum_{q \in Q} x_q \cdot b_q - \beta \cdot \sum_{u \in V} \sum_{v \in V} \sum_{\lambda \in \Lambda_e} o_{(u,v),\lambda} \quad (1)$$

3.2.3 约束条件

(1) 流量守恒约束

对于任意业务请求 $q \in Q$ ，请求在源节点 s_q 上只有流出流量，在目的节点 d_q 上只有流入流量，而在其他节点上，流出流量等于流入流量，如式 (2) 所示：

$$\sum_u \sum_{\lambda \in \Lambda_{(u,v)}} f_{q,(u,v),\lambda} - \sum_v \sum_{\lambda \in \Lambda_{(v,u)}} f_{q,(v,u),\lambda} = \begin{cases} x_q, v = d_q \\ -x_q, v = s_q, \forall q \in Q, \forall v \in V \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

(2) 波长分配约束

一个请求在一根光纤上，最多只能占用一个波长的光通道，如式 (3) 所示：

$$\sum_{\lambda \in \Lambda_{(u,v)}} f_{q,(u,v),\lambda} \leq 1, \forall q \in Q, \forall (u,v) \in E \quad (3)$$

(3) 带宽约束

对于任意光纤上的任意光通道，其承载的业务带宽之和不能超过光通道的总带宽，如式 (4) 所示。在本文中，默认光通道均采用 QPSK 的调制方式，通道可容纳的带宽均为 100 Gbit/s，即 $\text{bw}=100 \text{ Gbit/s}$ 。

$$\sum_q (f_{q,(u,v),\lambda} \cdot b_q) \leq \text{bw}, \forall (u,v) \in E, \forall \lambda \in \Lambda_{(u,v)} \quad (4)$$

(4) 跳波端口约束

跳波端口指存在请求通过该端口发生波长转换操作。如式 (5) 所示，当存在任意请求 $q \in Q$ 部署在链路 (u,v) 的 λ 波长上，即 $f_{q,(u,v),\lambda}=1$ ，并且在其他相邻链路上的 λ 通道上，不存在该请求，则认为该请求在网元 u 上发生了波长变换操作。此时，需要在网元 u 上为链路 (u,v) 的 λ 波长部署 OEO 端口，即 $o_{(u,v),\lambda}=1$ 。

$$o_{(u,v),\lambda} \geq f_{q,(u,v),\lambda} - \sum_{m \in V'} f_{q,(m,u),\lambda}, \quad \forall (u,v) \in E, \forall \lambda \in \Lambda_{(u,v)}, \forall q \in Q \quad (5)$$

(5) 业务汇聚端口约束

业务汇聚端口是指存在多个请求利用该端口



实现业务的汇聚操作。具体约束如式 (6) 所示。当存在请求 $q_1, q_2 \in Q$ 都部署在链路 (u, v) 的 λ 波长上, 即 $f_{q_1, (u, v), \lambda} = f_{q_2, (u, v), \lambda} = 1$, 并且存在其相邻链路 (m, u) 的 λ 波长上仅存在请求 q_1 , 即 $f_{q_1, (m, u), \lambda} = 1$, $f_{q_2, (m, u), \lambda} = 0$ 。此时, 请求 q_1 在经过网元 u 时发生了汇聚操作, 则需要在网元 u 上为链路 (u, v) 的 λ 波长部署 OEO 端口, 即 $o_{(u, v), \lambda} = 1$ 。

$$o_{(u, v), \lambda} \geq f_{q_1, (u, v), \lambda} + f_{q_2, (u, v), \lambda} + f_{q_1, (m, u), \lambda} - f_{q_2, (m, u), \lambda} - 2, \\ \forall u, v, m \in V, \forall q_1, q_2 \in Q \quad (6)$$

(6) 业务拆分端口约束

业务拆分端口是指存在多个请求利用该端口实现了业务的拆分操作, 其约束和汇聚端口约束类似, 如式 (7) 所示。

$$o_{(u, v), \lambda} \geq f_{q_1, (m, u), \lambda} + f_{q_2, (m, u), \lambda} + f_{q_1, (u, v), \lambda} - f_{q_2, (u, v), \lambda} - 2, \\ \forall u, v, m \in V, \forall q_1, q_2 \in Q \quad (7)$$

(7) 复杂度分析和证明

从上述 ILP 模型可知, 该问题的变量和约束条件数量都比较多、求解难度大。当忽略掉该问题的约束条件 (式 (5) ~ 式 (7)) 时, 即将 OEO 端口约束松弛。此时, 该模型能够被归约成多商品流问题, 而多商品流问题已经被证明为 NP-hard 问题^[12]。基于此, 可以证明本文提出的基于 OEO 端口成本感知的 RWA 问题同样为 NP-hard 问题。由于 NP-hard 问题不存在多项式时间内的最优解算法, 因此本文提出了两种启发式算法对该问题进行求解。

4 OEO-RWA 算法和 SA-RWA 算法

4.1 OEO-RWA 算法

目前, 很多研究会将 RWA 问题分成路由 (R) 和波长分配 (WA) 两个子问题, 并分别求解。本文提出的 OEO-RWA 算法同样使用了上述策略, 但不同的是, OEO-RWA 算法具备以下两点优势: 一方面通过负载均衡路由算法保证了 OTN 的资源

利用; 另一方面, 通过辅助图算法实现波长分配, 保证了业务部署时新增的 OEO 端口尽量少。

4.1.1 负载均衡路由算法

针对 OTN $G(V, E, A)$, 其中 $A_e \subseteq A$ 表示链路 e 上的波长占用情况, $|A_e|$ 表示链路 e 上的剩余波长数, $|A_{e, \text{total}}|$ 表示链路 e 上的初始波长数。另外, $c_{e, \lambda}$ 表示链路 e 上波长为 λ 的光通道的剩余带宽, $c_{e, \lambda}$ 表示链路 e 上波长为 λ 的光通道的初始总带宽。如果波长 λ 未被占用, 则 $C_{e, \lambda} = 0$ 。基于上述信息, 定义链路 $e \in E$ 上权值设置为 m_e , 如式 (8) 所示, 并通过 Dijkstra 算法计算权值最短的可行路径。如果链路上剩余的波长或者带宽资源较多时, 则链路的权值 m_e 将越小, 因此在使用 Dijkstra 算法路由时, 将更倾向经过该链路, 从而保证 OTN 的资源部署相对均衡。

$$m_e = \chi \cdot |A_{\text{total}}| / |A_e| + (1 - \chi) \cdot \sum_{\lambda} C_{\lambda} / \sum_{\lambda} c_{\lambda} \quad (8)$$

4.1.2 辅助图 WA 算法

在本文中, 定义在一条链路上单个波长所建立的信号传输通道为光通道; 光通路是由一个或多个相邻链路上波长相同且无 OEO 端口部署的光通道组成的。如图 2 所示, 链路 (a, b) 和链路 (b, c) 上的光通道 1, 由于前后两个通道的波长一致并且承载的业务也一致, 则业务在通过这两个光通道传输时, 不需要跳波、汇聚或拆分, 所以可以将这两个光通道拼接成光通路 1: $p_{(a, c, 1)} = \{(a, b), (b, c)\}_1$ 。链路 (a, b) 和链路 (b, c) 上的光通道 2, 由于两个通道中承载的业务发生了变化, 所以无法拼接成一条连续的光通路。因此链路 (a, b) 和链路 (b, c) 上光通道只能被表示成两个独立的光通路, 分别为 $p_{(a, b, 2)} = \{(a, b)\}_2$ 和 $p_{(b, c, 2)} = \{(b, c)\}_2$ 。

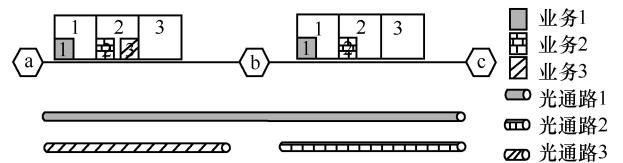


图2 光通道和光通路

辅助图 WA 算法根据负载均衡算法的路由结果以及该路径上的资源占用情况, 得到该路径上的光通路信息, 然后将光通路映射成虚拟链路, 从而构造出辅助图 $G'(V', E')$ 。辅助图构造方法如图 3 所示。请求 q 通过负载均衡路由算法得到传输路径 $p=\{(a,b),(b,c)\}$, 网络中已经存在 4 组业务, 根据光通路的定义可得该路径上存在 3 条光通路, 分别为 $p_{(a,c,1)}$ 、 $p_{(a,b,2)}$ 和 $p_{(a,c,3)}$ 。如果将请求部署在 $p_{(a,c,1)}$ 上, 由于 $p_{(a,c,1)}$ 上已经为业务 1 部署了两个 OEO 端口, 则不需要部署额外的端口即可以保证业务 q 的传输需求, 因此将辅助图中对应光通路 1 的虚拟链路 $(a,c,1)$ 的权值设置为 0。如果将请求 q 部署在光通道 $p_{(a,b,2)}$ 时, 则需要分别在网元 b 上部署两个 OEO 端口, 实现业务 q 和业务 2 的拆分操作, 因此将虚拟链路 $(a,b,2)$ 的权值定义为 2, 同理可得, 虚拟链路 $(a,c,3)$ 的链路权值也为 2。此外, 在链路 (a,b) 和 (b,c) 上均存在一个未被占用的波长 4, 因此可以额外建立一条虚拟链路 $(a,c,4)$ 。如果请求部署在 $(a,c,4)$ 上, 则需要在业务的原宿节点分别部署一个 OEO 端口, 因此虚拟链路 $(a,c,4)$ 的权值为 2。同时, 链路 (a,b) 和 (b,c) 上波长 4 还可以被抽象成两条独立的虚拟链路 $(a,b,4)$ 和 $(b,c,4)$, 且权值均为 2。

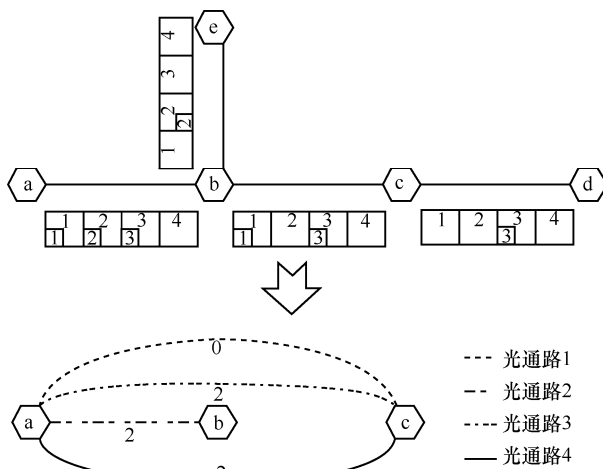


图3 WA 辅助图构造方法

OTN 拓扑经过上述转换后得到辅助图 $G'(V', E')$, 其中 V' 表示已知路由的节点集合, E' 表示根据光通路

构造的虚拟链路集合。由于虚拟链路上的权值表示业务在该链路上传输时需要部署的 OEO 端口数量, 所以根据辅助图 $G'(V', E')$, 可以利用 Dijkstra 算法计算出新增 OEO 端口数量最少的波长分配方案。

4.2 SA-RWA 算法

使用 OEO-RWA 算法只能保证单个请求尽可能地选择一条负载均衡且新增 OEO 端口较少的路由和频谱分配方案, 但无法保证全网批量请求的收益最大。因此, 提出一种改进的模拟退火算法 (SA-RWA), 该算法将对 OEO-RWA 算法结果进一步优化, 如算法 1 所示: 步骤 (1)~步骤 (4) 表示遍历所有的请求, 并调用 OEO-RWA 算法计算请求的初始路由方案, 并扣除请求所需资源, 从而得到初始解。步骤 (5)~步骤 (21) 为局部搜索过程, I 为总迭代次数。每次迭代过程中, 算法会从请求中随机搜索批量请求 Q_i , 请求的数量可以由迭代次数、收敛程度等因素决定。另外, 请求被选择的概率可以根据请求的带宽、所需的 OEO 端口成本等因素决定。步骤 (8)~步骤 (10) 表示将被选择请求所占用的资源释放。步骤 (11)~步骤 (14) 表示遍历请求集合 Q_i , 并重新进行路由和波长分配。步骤 (15)~步骤 (20) 表示将新得到的路由结果和原来的路由结果进行对比, 其中, $r(P)$ 为收益函数。如果新产生的解收益较大, 则选择该解作为下一轮迭代的初始解。

算法 1 基于模拟退火的 RWA 优化算法

输入 请求集合 Q , 拓扑信息 $G(V, E, A)$

输出 请求的路由和频谱分配结果 P

- (1) for each $q \in Q$ do
- (2) $p_q = f_{rwa}(G(V, E, A), q)$
- (3) 为请求 q 分配频谱资源
- (4) end for
- (5) for i in $[1, I]$ do
- (6) 随机选择批量请求集合 Q_i
- (7) $G'(V, E, A) = G(V, E, A)$
- (8) for each $q \in Q_i$ do



- (9) 释放请求 q 占用的资源
 (10) end for
 (11) for each $q \in Q_i$ do
 (12) $p'_q = f_{rwa}(G'(V, E, A), q)$
 (13) 根据新计算的结果 p'_q 重新分配资源
 (14) end for
 (15) if $r(P) > r(P')$ then
 (16) for each $q \in Q_i$ do
 (17) $p_q = p'_q$
 (18) end for
 (19) $G'(V, E, A) = G(V, E, A)$
 (20) end if
 (21) end for
 (22) return $P = \{p_q | q \in Q\}$

5 仿真结果和分析

本文基于小规模网络,使用开源软件 SCIP 对 ILP 模型进行求解,验证问题的复杂度。然后基于 174 节点的大规模网络验证两种启发式算法 (OEO-RWA 和 SA-RWA) 的可行性和有效性。

5.1 小规模网络仿真结果

在小规模网络仿真中,本文基于 SCIP 开源软件实现了上述的 ILP 模型,模拟了 6 个节点、11 条双向链路的小规模网络,每个链路上设置 3 个可用波长。仿真结果见表 1 和表 2。

表 1 ILP 模型和启发式算法的端口数量结果对比(单位:个)

模型	请求数量				
	3	4	5	6	7
ILP	4	6	6	6	8
OEO-RWA	6	6	6	6	8
SA-RWA	4	6	6	6	8s

表 2 ILP 模型和启发式算法的求解耗时对比(单位:s)

模型	请求数量				
	3 个	4 个	5 个	6 个	7 个
ILP	4.10	11.30	48.00	136.70	652.40
OEO-RWA	0.229	0.23	0.225	0.265	0.241
SA-RWA	0.245	0.283	0.372	0.394	0.422

表 1 是 ILP 模型和启发式算法的端口数量对比。从表 1 中能够看出,在小规模网络下,启发式算法计算出的端口数量和 ILP 模型基本一致。表 2 为 ILP 模型和启发式算法的耗时对比。虽然通过 ILP 能够得到最优解,但是通过表 2 能够看出,随着请求数量的增加,ILP 求解耗时也急剧增加,这也进一步验证了本文所提问题的复杂度。因此,ILP 求解算法无法适用于大规模网络和批量请求场景。本文所提的两种启发式算法,均能够在毫秒级完成运算,相比 ILP 求解算法,具备更高的实用性。

5.2 大规模网络仿真结果

为了进一步验证启发式算法的有效性,采用了国外某运营商的真实网络数据,如图 4 所示的 174 节点 OTN 拓扑。同时,构造了 15 组随机请求集合,每组请求集合包中含 4 000 多个业务请求。

此外,本文实现了满足波长一致性的 RWA 算法 (Con-RWA)、只允许波长跳波的 RWA 算法 (Diff-RWA) 以及基于业务跳波和汇聚的 RWA 算法 (Ran-RWA) 作为对比算法,并分别从请求阻塞率、端口数量和网络收益 3 个方面对比 OEO-RWA 和 SA-RWA 算法的性能。上述 3 种对比算法在路由时均采用了负载均衡策略,在频谱分配时优先使用 First-Fit 算法。在 Diff-RWA 算法

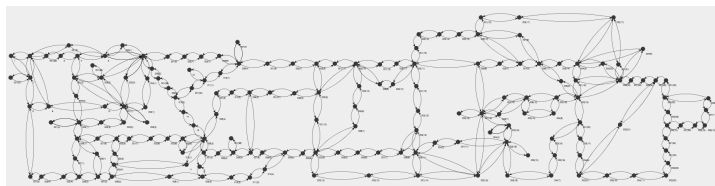


图 4 仿真拓扑

和 Ran-RWA 算法中,针对跳波和汇聚的业务采用深度优先算法实现波长分配。

请求阻塞率的仿真结果如图 5 所示,随着 OTN 中频谱资源的减少,Con-RWA 算法最先发生拥塞,Diff-RWA 算法次之。Ran-RWA 算法的请求阻塞率远低于另外两种对比算法,这说明了业务的细粒度调度能够有效降低请求的阻塞率。OEO-RWA 算法的请求阻塞率十分接近 Ran-RWA 算法,说明 OEO-RWA 算法虽然在波长分配时考虑了端口部署的情况,但是对请求的阻塞率影响较小。SA-RWA 算法通过局部搜索进一步改善了 OEO-RWA 算法的业务部署情况,所以请求阻塞率最低。

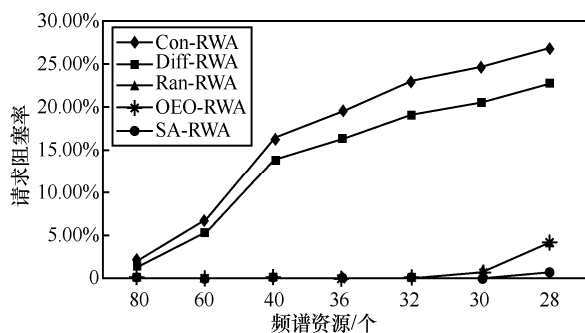


图5 请求阻塞率的仿真结果

端口部署结果如图 6 所示,Con-RWA 算法和 Diff-RWA 算法需要部署的端口数量会随着频谱资源的减少而降低,这主要是由请求阻塞率上升引起的。Ran-RWA 算法需要的端口数量最多,且端口数量会随着频谱资源减少而增多。这说明在频谱资源减少的情况下,通过部署更多的 OEO 端口,能够保证请求的阻塞率。在频谱资源相同的情况下,OEO-RWA 算法所需要的端口数量远低于 Ran-RWA 算法,这说明基于辅助图的 WA 算法能够有效减少 OEO 端口的数量。SA-RWA 算法在 OEO-RWA 算法的基础上通过局部搜索进一步优化了业务的路由和频谱分配方案,提高了端口的利用率,所以端口数量比 SA-RWA 算法更少。

5 种算法在不同频谱资源下的收益结果如图 7

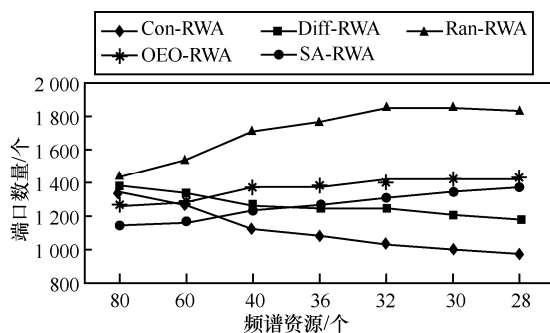


图6 端口部署结果

所示,OEO-RWA 算法和 SA-RWA 算法相比于其他算法,既能够降低请求阻塞率,又能够降低所需要的端口数量,所以网络总收益要高于其他 3 种对比算法。Con-RWA 算法和 Diff-RWA 算法由于请求的阻塞率较高,网络总收益偏低。值得注意的是,在频谱资源比较充足的情况下,Con-RWA 算法和 Diff-RWA 算法的总收益会略大于 Ran-RWA 算法,这是因为 Ran-RWA 算法为了满足少部分业务的传输需求,部署了大量的 OEO 端口,导致了网络收益的下降。

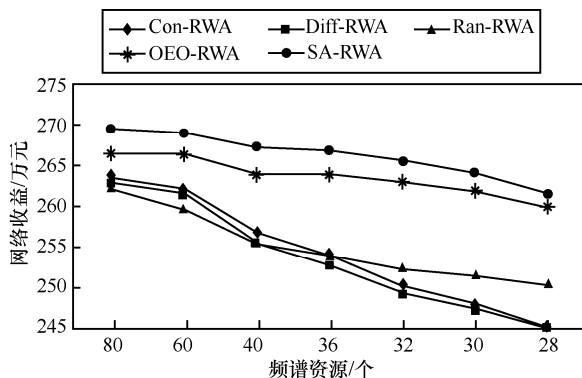


图7 5 种算法在不同频谱资源下的收益结果

6 结束语

本文针对 OTN 的业务部署和 OEO 端口部署问题进行了 ILP 建模,并从理论上证明该问题为 NP-hard 问题。此外,本文提出了两种启发式算法:OEO-RWA 算法和 SA-RWA 算法,并通过仿真验证了该算法能够在保证频谱资源利用率的同时降低 OEO 端口数量,从而提升网络整体收益。随着



光网络技术的发展, 正交频分复用 (OFDM) 技术也逐渐应用到 OTN 中, OFDM 技术能够更加灵活地分配频谱资源, 但是也增加了 RWA 和端口部署问题的难度。因此, 在后续的研究中, 将进一步研究相关算法, 解决 OFDM 网络中的端口部署问题。

参考文献:

- [1] 吕向东, 梁雪瑞, 喻千尘, 等. 光通信技术研究现状及发展趋势[J]. 电信科学, 2019, 35(2): 70-78.
LV X D, LIANG X R, YU Q C, et al. Research status and development trend of optical communication technology[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(2): 70-78.
- [2] 关志勇. 光传送网迅速发展下的 ROADM 光电混合组网应用探讨[J]. 电子世界, 2014(18): 4-5.
GUAN Z Y. Discussion on the application of ROADM photoelectric hybrid network under the rapid development of transport network[J]. Electronics World, 2014(18): 4-5.
- [3] 杨烈斌. 不同网络因素对提升城域核心传送网络效率的影响[J]. 电信技术, 2012, 1(8): 82-86.
YANG L B. The influence of different network factors on improving the efficiency of metropolitan core transport network[J]. Telecommunication Technology, 2012, 1(8): 82-86.
- [4] KOZLOV V G. 可插拔光收发机: 市场与技术[J]. 崔嘉斌, 纪越峰, 译. 电信科学, 2019, 35(3): 7-11.
KOZLOV V G. Pluggable optical transceiver: market and technology[J]. Translated by CUI J B, JI Y F. Telecommunications Science, 2019, 35(3): 7-11.
- [5] PATEL A N, JI P N, JUE J P, et al. Routing, wavelength assignment, and spectrum allocation in transparent flexible optical WDM (FWDM) networks[J]. Optical Switching & Networking, 2012, 9(3): 191-204.
- [6] WAN X, HUA N, ZHAENG X. Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(8): 603.
- [7] 赵中楠, 王健, 郭红微. 基于 SDN 的自适应路由与波长分配方法[J]. 通信学报, 2019, 40(9): 95-105.
ZHAO Z N, WANG J, GUO H W. Adaptive routing and wavelength assignment method based on SDN[J]. Journal on Communications, 2019, 40(9): 95-105.
- [8] 徐展琦, 王靖, 徐博, 等. 弹性光网络中选路和频谱指派的建模和高效启发式算法[J]. 光子学报, 2014, 43(7): 53-57.
XU Z Q, WANG J, XU B, et al. Modelling and heuristic algorithms

for routing and spectrum assignment in elastic optical networks[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(7): 53-57.

- [9] 李艳春, 刘方爱. 一种稀疏波长转换光网络中的波长分配算法[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(3): 66-68.
LI Y C, LIU F A. A wavelength assignment algorithm for optical networks with sparse-limited wavelength conversion[J]. Computer Technology and Development, 2006, 16(3): 66-68.
- [10] 何军, 刘德明, 李蔚, 等. 混合光波长转换在波分复用光网络中的应用[J]. 中国激光, 2004(8): 963-966.
HE J, LIU D M, LI W, et al. Utilization of hybrid optical wavelength conversion in wavelength division multiplexing optical networks[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004(8): 963-966.
- [11] 刘焕淋, 徐一帆, 陈勇. 基于频谱感知的业务分割-合并的弹性光网络资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 892-898.
LIU H L, XU Y F, CHEN Y. Spectrum-aware traffic split-merge resource allocation strategy for elastic optical networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(4): 892-898.
- [12] AWERBUCH B, LEIGHTON T. Improved approximation algorithms for the multi-commodity flow problem and local competitive routing in dynamic networks[Z]. 1994.

[作者简介]



胡道允 (1990-), 男, 中兴通讯股份有限公司 SDN 算法工程师, 主要研究方向为网络管控系统、智能网络算法、智能运维等。



杨振泰 (1993-), 男, 中兴通讯股份有限公司 SDN 研发工程师, 主要研究方向为智能网络算法。

陆钱春 (1986-), 女, 中兴通讯股份有限公司 SDN 算法工程师, 主要研究方向为智能网络优化、智能运维等。

齐进 (1971-), 男, 博士, 中兴通讯股份有限公司管控产品研发总工程师, 主要研究方向为网络控制与管理、大数据分析、智能运维等。