

# 面向弹性光网络的新型光节点升级策略研究

符小东<sup>1,2</sup>, 李泳成<sup>1</sup>, 沈纲祥<sup>1</sup>

(1. 苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006; 2. 中天宽带技术有限公司, 江苏 南通 226000)

**摘 要:** 在波分复用光网络向弹性光网络演进过程中, 需要将传统的光节点升级为支持无栅格特性的新型可重构光分插复用器 (ROADM)。然而, 对于一个大型网络来说, 其节点不可能一次性全部升级, 而是存在一个逐步升级的过程。针对该问题, 重点研究了升级光节点的选择策略, 并采用频域子波段虚级联技术实现不同代 ROADM 节点间的互通互联。同时, 通过建立整数线性规划 (ILP) 优化模型和提出高效的启发式算法来完成对这些升级节点的选择。仿真结果表明, 提出的升级光节点选择策略十分有效, 可达到与 ILP 优化模型接近的网络频谱使用效率。

**关键词:** 光网络升级; 频域子波段虚级联; 可重构光分插复用器; 节点升级

**中图分类号:** TN915.02

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2018158

## Novel node upgradation strategy for migration to elastic optical networks

FU Xiaodong<sup>1,2</sup>, LI Yongcheng<sup>1</sup>, SHEN Gangxiang<sup>1</sup>

1. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China

2. Zhongtian Broadband Technology, Nantong 226000, China

**Abstract:** For migration from dense wavelength division multiplexing (DWDM) networks to elastic optical networks (EON), it is required to upgrade the traditional reconfigurable optical add-drop multiplexer (ROADM) to the new-generation ROADM that supports flexible grids. However, for a large-scale optical network, it is generally impossible to upgrade the ROADM nodes all in once; rather, they would be upgraded gradually. For this, it is critical to study different strategies for selecting the ROADM nodes to be upgraded. Also, for the interconnection between different generations of ROADM, the sub-band virtual concatenation (VCAT) technique was employed to enable an optical channel to be established via traversing different types of nodes. An integer liner programming (ILP) model and an efficient heuristic algorithm were developed to jointly select the ROADM nodes to upgraded and assign spectrum resources. Simulation studies show that the proposed strategy for the upgraded node selection is efficient to perform close to the ILP model in terms of the maximum number of FS used in the whole network.

**Key words:** optical network migration, sub-band virtual concatenation, reconfigurable optical add-drop multiplexer, node upgradation

### 1 引言

由于云计算、大数据、物联网和人工智能等新兴

信息技术的兴起, 全球网络流量呈现爆发式的增长。根据美国思科公司的预测, 全球 IP 流量将 2016 年至 2021 年间, 以 24% 的复合年均增长率快速增长<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-08-30

通信作者: 李泳成, ycli@suda.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671313, No.61801320); 江苏省科技成果转化基金资助项目 (No.BA2016123)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61671313, No.61801320), The Science and Technology Achievement Transformation Project of Jiangsu Province (No.BA2016123)

为高效地承载这些急速增长的网络业务流量，对现有光网络的升级变得十分重要。目前，密集波分复用（DWDM）技术由于其高效的传输带宽已被广泛地应用于骨干网和城域网中，但依旧存在两大瓶颈：1) DWDM 频谱栅格通常为 50 GHz<sup>[2]</sup>，无法实现更细粒度的灵活频谱分配，从而影响了频谱使用效率；2) DWDM 网络采用了大量 50 GHz 间隔的阵列波导光栅（AWG），限制了其对频谱带宽超过 50 GHz 的超级光通道的支持。

为克服传统 DWDM 网络中的瓶颈，提高光网络频谱使用效率，近年来，新型光纤传输技术和光交换技术层出不穷。首先，在传输方面，新一代具有灵活频谱带宽分配能力的弹性光网络（EON）技术<sup>[3-5]</sup>得到高速发展，被认为是替代传统 DWDM 传输技术的下一代光网络技术。其次，随着可重构光分插复用器（ROADM）技术<sup>[6]</sup>的不断演进，ROADM 正从最初的“有色、有方向性”，渐渐朝着支持“有色、无方向性”“无色、无方向性”和“无色、无方向性、无阻塞性”的“三无”特性发展。目前，为支持 EON 的无栅格特性，ROADM 技术正进一步朝着“无色、无方向性、无阻塞、无栅格”的“四无”特性演进<sup>[7]</sup>。

为支持从 DWDM 光网络向 EON 的演进，需要对传统 DWDM 光网络中的 ROADM 节点进行升级，以支持 EON 的灵活带宽分配和频谱交换。然而，受制于劳动力资源和成本等因素，对于一个大型光网络来说，通常无法一次性地完成其全部 ROADM 节点的升级，而往往采取阶段性逐步升级的方式。所以，这就存在一个重要研究问题：如何选择各阶段进行升级的 ROADM 节点，以实现 DWDM 光网络的高效演进。

针对上述问题，本文研究了 ROADM 节点升级的选择策略，并采用频域子波段虚级联（sub-band VCAT）技术实现不同代 ROADM 节点间的互通互联。针对升级节点的选择和网络频谱资源的分配问题，本文也建立了 ILP 优化模型，并提出了高效的启发式算法，以实现节点升级策略的性能评估。

## 2 研究现状

### 2.1 ROADM 技术

得益于各类光器件及技术的发展，ROADM 正从“无色、无方向性、无阻塞”，逐步向灵活栅

格/无栅格特性演进。针对 ROADM 技术已存在大量的相关研究，Way 等<sup>[8]</sup>提出了具有小尺寸和低能耗的“无色、无方向性、无阻塞”的 ROADM 架构。基于  $M \times N$  波长选择开关，Gumaste 等<sup>[9]</sup>提出了支持无色、无方向性、无阻塞和无栅格特性的“四无”ROADM 架构。此外，针对 ROADM 无栅格特性对网络性能的影响，Thiagaraian 等<sup>[10]</sup>研究了节点的内部阻塞对由“无色、无方向性”ROADM 组成的网络性能影响。类似地，She 等<sup>[11]</sup>通过使用无向 ROADM 评估网络碎片整理和共享保护 CAPEX 优势，并验证了 ROADM 无阻塞特性的价值。Woodward 等<sup>[12]</sup>则评估了无栅格 ROADM 节点的性能优势，并与其他方案进行了比较。针对传统 ROADM 和支持无栅格型 ROADM 并存的网络，Yu 等<sup>[13]</sup>提出了从固定栅格向灵活栅格节点升级的不同策略。

### 2.2 混合栅格光网络

光网络将最终从 DWDM 光网络演化为灵活栅格光网络，然而在演化升级过程中，将出现多种类型的 ROADM 节点（包括传统的 DWDM 节点和新型的 EON 节点）并存的局面，这将形成一种混合栅格的局面。在此类网络中，未升级节点只支持传统的波分复用技术，而升级后的新型 EON 节点将支持灵活栅格技术。所以，如何使支持不同栅格粒度的传输技术共存，并达到频谱最佳的使用效率已成为此类网络最为关注的问题。Tahon 等<sup>[14]</sup>从网络灵活性和成本两方面分别对 DWDM migrate、Flexgrid 和 Flexgrid migrate 3 种情形的升级方案进行了研究比较。类似地，Zami 等<sup>[15]</sup>通过对齐传输链路上各光通道使用的栅格，减少频谱碎片，进而提高网络频谱资源利用率。此外，Rofoee 等<sup>[16]</sup>提出了一种适用于固定栅格和灵活栅格共存的新型城域网络架构，并通过固定栅格和灵活栅格共享频谱资源的方式，降低网络动态业务的阻塞率。Yu 等<sup>[17]</sup>则解决了混合栅格网络中的路由和频谱资源分配问题，最小化光纤链路中所需的总频谱数。

需要指出的是，上述研究往往都要求光通道的源节点、目的节点的 ROADM 类型必须保持一致，均未很好地解决不同代 ROADM 节点之间互通互联问题。这极大地制约了此类网络建立光通道业务的灵活性，也降低了其频谱资源的使用效率。

### 3 频域子波段虚级联技术

本文采用 sub-band VCAT 技术实现了不同代 ROADM 节点间的互通互联。图 1 给出了一个在不同代 ROADM 节点间互通互联的例子。

在图 1 (a) 中, 由于源节点、目的节点均为 WDM 节点, 因此只能支持 WDM 光通道; 在图 1 (c) 中, 源节点、目的节点均为 EON 节点, 且中间节点也为 EON 节点, 因此, 可以采用频谱最高效的方式建立光通道, 即将 6 个子载波聚合在一起, 使用最少的频谱资源完成传输; 在图 1 (b) 中, 由于光通道即包含 DWDM 节点又包含 EON 节点, 为支持不同类型 ROADM 节点间的互通互联, 采用 sub-band VCAT 传输技术, 将组成超级光通道的 6 个子载波拆分成 2 个独立的子波段进行传输, 并在目的节点进行汇聚。多流带宽可变收发器 (MF-BVT) 可支持 sub-band VCAT 传输技术, 并且该技术也允许 2 个子波段经过不同的路径, 最后在目的节点进行汇聚, 这极大地提高了组网的灵活性<sup>[18]</sup>。

### 4 升级节点的选择

在本节中, 我们首先通过一个例子展示选择不同升级节点对网络频谱资源使用效率的影响, 如图 2 所示。该例子中需要在 6 节点网络中选择 2 个节点, 将其升级为“四无”ROADM 节点。如图 2 (a) 所示, 网络中链路 (节点 2-节点 3) 使用最多的频谱资源, 如果选择升级节点 0 和节点 1, 升级后链路 (节点 0-1) 节约了一个频隙 (FS), 但链路 (节

点 2-3) 上依旧需要 6 个 DWDM 波长, 整个网络链路上所需的最大频谱资源并未减少。在图 2 (b) 中, 如果升级节点 2 和节点 3, 则链路 (节点 2-3) 可节约 8 个频隙, 对于整个网络, 最大的使用频隙也减少 8 个, 有效地提高了网络的频谱使用效率。由此可见, 如何有效地选择光网络升级节点, 对于提高网络的频谱使用效率十分重要。接下来, 将具体解决光网络升级节点选择问题。首先对光网络升级节点选择的问题进行定义, 然后基于整数线性规划方法和启发式算法分别提出解决方法。

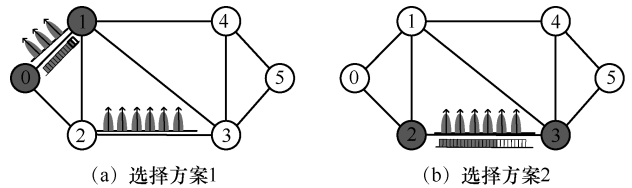


图 2 升级节点的选择

#### 4.1 光网络升级节点选择问题定义

##### 输入信息

- 1) 给定一个网络拓扑  $G_p = (N, L)$ ,  $N$  表示网络中所有的节点,  $L$  表示网络中所有链路。
- 2) 需要在网络中选择  $U$  个节点, 将它们升级为新型“四无”ROADM 节点。
- 3) 网络静态业务需求矩阵  $[\lambda^{s,d}]$ , 其中每个矩阵元素以 Gbit/s 为单位, 表示节点对间的业务需求。
- 4) 节点对间的可用路由集合  $P_r$ , 路由通过链路不相交 k-shortest 路由算法 (KSP) 获得。
- 5) 可用的调制格式包括: BPSK、QPSK 和

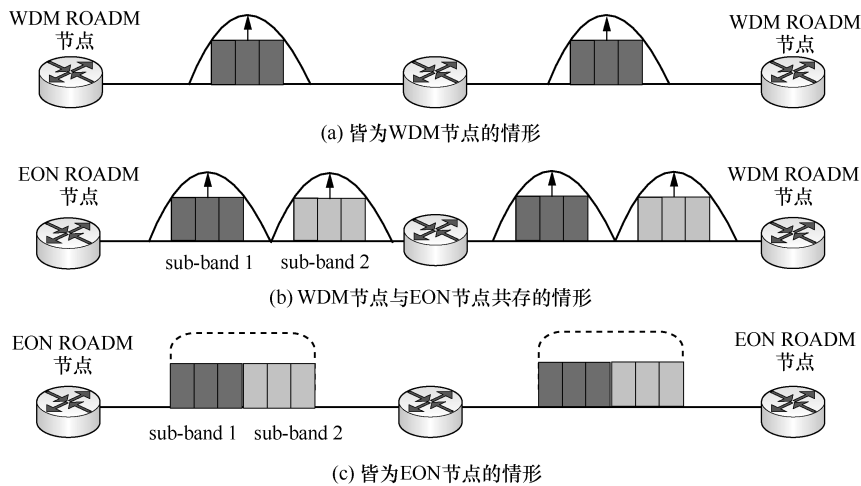


图 1 不同代 ROADM 节点间的互通互联

8-QAM，它们单个 FS 的传输容量和光通道无中继最远传输距离如表 1 所示<sup>[19]</sup>。

表 1 3 种调制格式的 FS 容量和无中继传输距离

调制格式	每个 FS 容量/(Gbit·s <sup>-1</sup> )	无中继传输距离/km
BPSK	25	4 000
QPSK	50	2 000
8-QAM	75	1 000

假设条件

1) 对于 DWDM 网络，每条链路上的可用波长数为 80，每个波长的频谱带宽为 50 GHz。对于 EON 网络，每条链路上可用的 FS 数为 320，每个 FS 的频谱带宽为 12.5 GHz。

2) 在为 DWDM 光通道分配波长时，需遵守波长连续性的要求；在为 EON 光通道分配频谱资源时，需遵守频谱连续性、邻接性的要求。

3) 在为光通道选择调制格式时，总是选择最远无中继传输距离大于光通道距离且频谱效率最高的调制格式。

目标

最小化网络中使用的 FS 的最大索引值。这里需要指出，新型光节点的使用能有效地提高光网络的频谱使用效率。因此，对新型光节点的升级问题，以“网络中使用的 FS 的最大索引值”作为优化目标能有效评估不同节点升级策略对于提高网络频谱使用效率的益处。当然，我们也可从网络成本、能耗等其他方面对节点升级问题展开优化研究。

针对升级光节点的选择问题，本文建立了 ILP 优化模型，并提出了相应的启发式算法。其中，启发式算法包含了升级节点、路由及调制格式的选择和频谱分配 (RMSA) 2 个过程。

4.2 ILP 优化模型

ILP 优化模型的集合、参数和变量如下。

1) 集合

$L$ ：网络中所有链路的集合。

$N$ ：网络中所有节点的集合。

$R$ ：网络中所有节点对的集合。

$P_r$ ：节点对  $r$  之间的可用路由集合（通过 KSP 算法获得）， $r \in R$ 。

$\Gamma_p^r$ ：节点对  $r$  之间的路由  $p$  经过的节点集合， $p \in P_r$ ， $r \in R$ 。

$A_p^r$ ：节点对  $r$  之间的路由  $p$  经过的链路集合，

$p \in P_r$ ， $r \in R$ 。

2) 参数

$T_r$ ：节点对  $r$  之间的业务带宽需求（单位为 Gbit/s）。

$M_p^r$ ：节点对  $r$  之间路由  $p$  可用调制方式的最高频谱效率（BPSK、QPSK 和 8-QAM 对应的频谱效率分别为 1 bit/(s·Hz)，2 bit/(s·Hz) 和 3 bit/(s·Hz)）。

$\nabla$ ：一个较大值。

$\varepsilon$ ：每个 FS 的频谱带宽（本文假设为 12.5 GHz）。

$\rho$ ：建立一个 DWDM 光通道所需 FS 数（假设建立一个 DWDM 光通道需为 4 个 FS）。

$G$ ：相邻光通道之间的防护频带个数（假设相邻光通道之间的防护频带个数为一个 FS）。

$\sigma$ ：DWDM 光通道中可用于传输用户数据的 FS 数，即  $\sigma = \rho - G$ 。

$U$ ：升级为“四无”ROADM 节点的总数。

3) 变量

$\mu_n$ ：一个二进制变量，当节点  $n$  被选择为升级节点时，值取为 1，否则节点  $n$  取值为 0。

$\lambda_p^r$ ：一个二进制变量，当节点对  $r$  之间的路由  $p$  上皆为升级节点时，取值为 1，否则取值为 0。

$S_p^r$ ：一个整数变量，表示节点对  $r$  之间的路由  $p$  上光通道的起始 FS 索引值。

$\phi_{z,q}^{r,p}$ ：一个二进制变量，如果  $S_p^r > S_q^z$ ，则取值为 1，否则取值为 0。

$d_p^r$ ：一个整数变量，表示路由  $p$  上光通道承载节点对  $r$  之间带宽需求的大小。

$x_p^r$ ：一个整数变量，表示当节点对  $r$  之间的路由  $p$  只包含 EON 节点时，其建立的光通道占用的 FS 数量。

$y_p^r$ ：一个整数变量，表示当节点对  $r$  之间的路由  $p$  包含 DWDM 节点时，其建立的光通道的起始波长索引值。

$k_p^r$ ：一个二进制变量，表示当节点对  $r$  之间路由  $p$  上的光通道的起始 FS 索引值大于 0 时，取值为 1，否则取值为 0。

$\zeta_p^r$ ：一个整数变量，表示节点对  $r$  之间路由  $p$  上承载的 DWDM 光通道的数量。

$C$ ：整个网络使用的 FS 的最大索引值。

4) 目标函数

最小化:  $C$ 。

5) 约束条件

$$\lambda_p^r \leq \mu_n, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r, n \in \Gamma_p^r \quad (1)$$

$$\lambda_p^r \geq \sum_{n \in \Gamma_p^r} (\mu_n - 1) + 1, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (2)$$

式(1)和式(2)确保在路由  $p$  上若存在 DWDM 节点时,  $\lambda_p^r=0$ 。反之, 所有节点皆为 EON 节点时,  $\lambda_p^r=1$ 。

$$\sum_{n \in \mathbf{N}} \mu_n = U \quad (3)$$

实际上, 升级节点的总数不超过允许升级的节点总数。

$$\sum_{p \in \mathbf{P}_r} d_p^r = T_r, \forall r \in \mathbf{R} \quad (4)$$

每个节点对间, 在多条路径上传输的业务流量之和等于节点对间业务流量的总需求。

$$\xi_p^r \varepsilon M_p^r + \nabla \lambda_p^r \geq d_p^r, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (5)$$

$$(\xi_p^r - 1) \varepsilon M_p^r \leq d_p^r - 1 + \nabla \lambda_p^r, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (6)$$

确保在包含 DWDM 节点的路由上建立的光通道的容量足够承载分配到该路由上的业务流量需求。

$$S_p^r \leq \rho y_p^r + \nabla \lambda_p^r, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (7)$$

$$\nabla \lambda_p^r + S_p^r \geq \rho y_p^r, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (8)$$

计算在经过 DWDM 节点路由上建立的光通道的起始  $FS$  索引值。

$$x_p^r \varepsilon M_p^r + \nabla(1 - \lambda_p^r) \geq d_p^r, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (9)$$

$$(x_p^r - 1) \varepsilon M_p^r \leq d_p^r - 1 + \nabla(1 - \lambda_p^r), \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (10)$$

确保在皆为 EON 节点的路由上建立的光通道的容量足够承载分配到该路由上的业务流量需求。

$$S_p^r \leq \nabla k_p^r + \nabla(1 - \lambda_p^r), \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (11)$$

$$\nabla(1 - \lambda_p^r) + S_p^r \geq k_p^r, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (12)$$

计算在皆为 EON 节点的路由上建立的光通道的起始  $FS$  索引值。

$$\phi_{z,q}^{r,p} + \phi_{r,p}^{z,q} = 1, \forall r, z \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r, q \in \mathbf{P}_z, r \neq z \quad (13)$$

$$S_p^r + (x_p^r + Gk_p^r) - S_q^z \leq \nabla \phi_{z,q}^{r,p} + \nabla(1 - \lambda_p^r), \forall r, z \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r, q \in \mathbf{P}_z, r \neq z, A_p^r \cap A_q^z \neq \emptyset \quad (14)$$

$$S_p^r + \rho \xi_p^r - S_q^z \leq \nabla \phi_{z,q}^{r,p} + \nabla \lambda_p^r, \forall r, z \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r, q \in \mathbf{P}_z, r \neq z, A_p^r \cap A_q^z \neq \emptyset \quad (15)$$

确保任意 2 条光通道分配的频谱资源在它们的共享链路上不重叠。

$$\nabla(1 - \lambda_p^r) + C \geq S_p^r + (x_p^r + Gk_p^r) - 1, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (16)$$

$$\nabla \lambda_p^r + C \geq S_p^r + \rho \xi_p^r - 1, \forall r \in \mathbf{R}, p \in \mathbf{P}_r \quad (17)$$

计算网络中使用的  $FS$  的最大索引值。

### 4.3 启发式算法

ILP 优化模型可为小型网络找到最优的升级节点, 保证最小化使用的  $FS$  的最大索引值。但是, 对于大规模网络来说, ILP 优化模型的计算复杂度高, 无法在较短的时间内获得最优解。因此, 本文也提出了一个高效的启发式算法, 它包含了升级节点的选择策略和基于频谱窗平面的 RMSA 算法<sup>[20]</sup>。由于基于频谱窗平面的 RMSA 算法相对较为成熟, 本文不作详细介绍, 读者可参考文献[20]。接下来, 我们具体介绍以下 3 种升级节点选择策略。

1) 随机选择策略 (random), 即随机地从拓扑中选择升级节点。

2) 基于节点物理维度策略 (ND, node degree), 即将节点按照物理维度由高到低排序, 然后从最高维度的节点开始依序升级。

3) 基于节点升级收益策略 (NUG, node upgradation gain), 即尝试升级每个节点, 然后采用 RMSA 算法确定升级后网络使用的  $FS$  的最大索引值, 最后选择索引值最小的节点首先升级。对于每个节点升级均采用上述过程, 直到足够数量的节点完成升级。具体操作如下。

#### NUG 策略具体操作

输入:  $\mathbf{G}_p = (\mathbf{N}, \mathbf{L})$ ,  $U$

1) 令  $N_{\text{DWDM}} = \mathbf{N}$ ,  $N_{\text{EON}} = \emptyset$ ,  $k = 1$ ; 其中,  $N_{\text{DWDM}}$  表示网络中传统 ROADM 节点集合,  $N_{\text{EON}}$  表示网络中新型 ROADM 节点集合。

2) 如果  $k = 1$ , 则选择经过其流量最大的节点  $n^*$  为升级节点,  $k++$ ; 其中, 假设光通道业务都在节点对间的最短路由上建立, 统计每个节点上经过流量的总和, 然后选择流量最大的节点。

3) 如果  $k > 1$ , 则对于每一个  $n \in N_{\text{DWDM}}$

4) 采用基于 SWP 的 RMSA 算法, 计算每个节点在其升级后网络使用的  $FS$  的最大索引值  $C_n$ 。

5) 令  $n^* = \arg \min_n C_n$ 。

6)  $N_{\text{DWDM}} = N_{\text{DWDM}} \setminus \{n^*\}$ ,

$$N_{EON} = N_{EON} \cup \{n^*\}, k++;$$

7) 如果  $k \leq U$ ，则返回 3)，否则终止。

## 5 仿真和结果分析

### 5.1 测试条件

为比较不同节点升级选择策略的性能，本文基于 ILP 优化模型和启发式算法，评估了混合栅格网络的频谱资源使用效率。图 3~图 5 分别给出了本文的测试网络：6 节点，9 链路的 n6s9 网络；10 节点，22 链路的 smallnet 网络；14 节点，21 链路的 NSFNET 网络。其中，每条链路上的数字表示相邻节点间其物理距离，单位为 km。

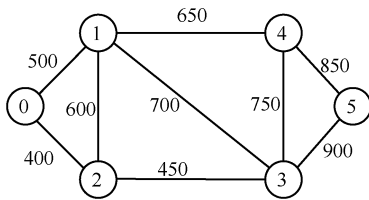


图 3 n6s9 网络

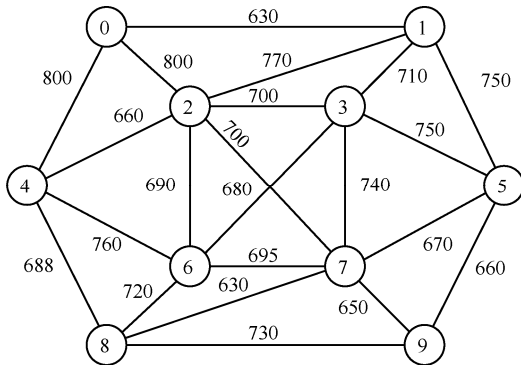


图 4 smallnet 网络

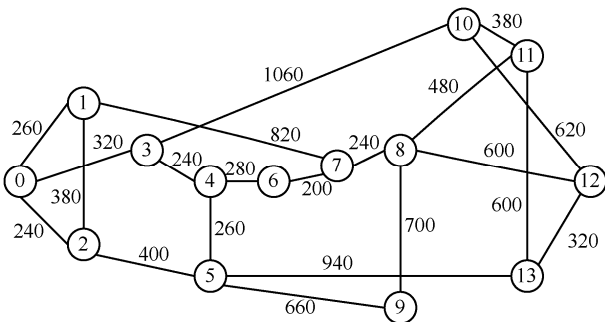


图 5 NSFNET 网络

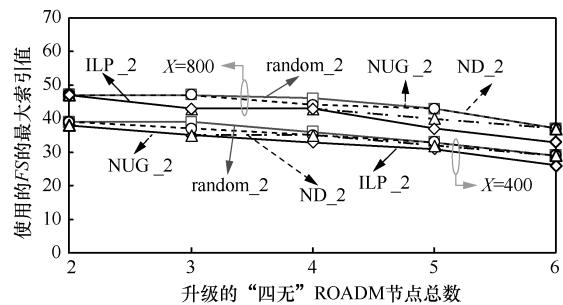
此外，我们假设每个网络中每条光纤链路可提供 320 个 FS，每个 FS 的频谱带宽为 12.5 GHz。光通道可选择的 3 种调制方式如表 1 所示。每个节点对之间的业务带宽需求在  $[200, X]$  Gbit/s 的范围内均匀分布，

其中， $X$  表示节点对间的最高带宽需求。

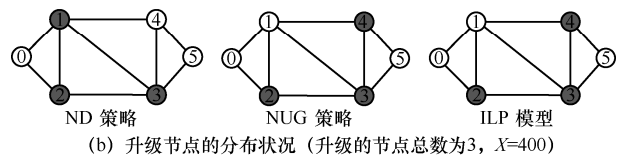
针对 ILP 优化模型采用链路不相交 KSP 路由算法，为每个节点对找到  $k$  条无共享链路的最短路由，形成可选路由集合。在 2.4 GHz CPU 和 8G 内存的 64 位服务器上，利用 AMPL/Gurobi 软件求解 ILP 优化模型，其 MIPGAP 设置为 5%。同时，采用 JAVA 语言开发了启发式算法。

### 5.2 使用的 FS 的最大索引值

n6s9 网络在  $X=400$  和  $X=800$  的情况下网络中使用的 FS 的最大索引值如图 6 所示。其中，“random”“ND”和“NUG”分别对应于 3 种升级节点选择策略的结果，“ILP”表示 ILP 模型的结果，数字 2 表示节点对之间存在 2 条链路不相交的可选路由。



(a) 使用的 FS 的最大索引值



(b) 升级节点的分布状况 (升级的节点总数为 3,  $X=400$ )

图 6 n6s9 网络在  $X=400$  和  $X=800$  使用的 FS 最大索引值

从图 6 (a) 中可以发现，随着升级节点总数的增加，网络中使用的 FS 的最大索引值逐渐变小。这是因为随着网络中升级节点数的增加，网络中频谱分配的灵活度不断提升，从而改善了网络的频谱资源使用效率。当全部节点均升级为新型“四无”ROADM 光节点时，整个网络便升级为完全的弹性光网络，所以其使用的 FS 的索引值最小。

此外，比较 3 种升级节点选择策略，可以发现 2 种非随机策略 (NUG 和 ND) 的性能优于随机策略，这是由于随机策略无法保证选取较优的升级节点组合，故无法保证其较优的结果。比较 2 种非随机策略，我们发现当为网络的升级节点数大于 3 个后，NUG 策略性能优于 ND 策略，并与 ILP 优化模型的优化结果十分接近，这表明了 NUG 策略的高效性。

针对 n6s9 测试网络，图 6 (b) 比较了节点升级总数为 3 且  $X=400$  时，不同策略升级节点选择情况。NUG 策略和 ILP 模型都选择了节点 2、节点 3 和节点 4，而 ND 策略则选择了节点 1、节点 2 和节点 3。能够提供和 ILP 优化模型相同的结果，这再一次表明了所提出的 NUG 策略的有效性。

类似地，对于 smallnet 和 NSFNET 网络，针对  $X=400$  的情形进行了仿真。图 7 和图 8 分别给出了  $X=400$  时，smallnet 和 NSFNET 网拓的仿真结果。可以发现，在采用 NUG 策略的网络中，其使用的 FS 的最大索引值始终小于或等于 ND 策略，这再一次证明了 NUG 策略的高效性。分析具体的节点选择情形，在 smallnet 网络中，当升级节点数为 6 时，NUG 策略使用的 FS 数明显少于 ND 策略，而它们的节点选择差异在于节点 0 和节点 4。类似地，在 NSFNET 网络中，当升级的节点数为 10 时，NUG 策略需要明显更少的 FS 数，这主要由于 2 种策略在节点 11 和节点 7 上的不同选择。

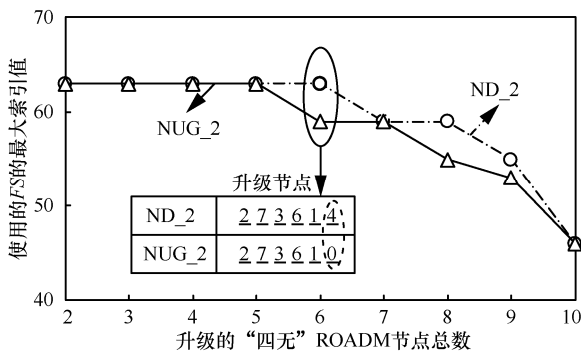


图 7 smallnet 网络在  $X=400$  时使用的 FS 最大索引值

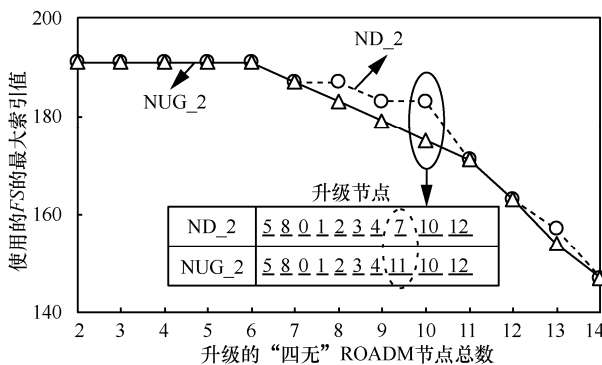


图 8 NSFNET 网络在  $X=400$  时使用的 FS 最大索引值

## 6 结束语

DWDM 光网络向 EON 演进是目前光网络的

发展趋势，其中涉及到光网络节点的升级问题。然而对于一个大型网络来说，其节点不可能一次性全部升级，存在一个循序渐进、逐步升级的过程，这将涉及到如何高效地选择这些阶段性升级节点的问题。为此，本文提出了升级光节点的选择策略，并采用 VCAT 技术实现不同代 ROADM 节点间的互通互联，同时也建立了 ILP 优化模型和提出了高效的启发式算法。仿真结果表明，本文所提出的基于 NUG 的升级节点选择策略十分有效，其性能明显优于其他 2 种节点选择策略，并实现与 ILP 优化模型十分相近的结果，有效提高了网络频谱资源使用效率。

## 参考文献:

- [1] CISCO. Cisco visual networking index: forecast and methodology. 2016-2021[R]. CISCO: Cisco VNI, 2017.
- [2] ITU. ITU-T G694.1:Spectrum grids for WDM applications: DUDM frequency grid[R]. ITU, 2002.
- [3] SHEN G X, ZUKERMAN M. Spectrum-efficient and agile CO-OFDM optical transport networks: Architecture, design, and operation[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(5): 82-89.
- [4] SHIEH W, DJORDJEVIC I. OFDM for optical communications[M]. Manhattan: Academic Press, 2009.
- [5] WANG C, SHEN G X, BOSE S K. Distance adaptive dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with shared backup path protection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(14): 2955-2964.
- [6] LI Y C, GAO L, BOSE S K, et al. Lightpath blocking analysis for optical networks with ROADM intra-node add-drop contention[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59: 102305.
- [7] WAY W. Optimum architecture for M×N multicast switch-based colorless, directionless, contentionless, and flexible-grid ROADM[C]// Optical Fiber Communication Conference.2012: 1-30
- [8] WAY W, JI P N, PATEL A N. Contention resolution within colorless and directionless ROADM[C]//Optical Fiber Communication Conference. 2013: 1-3.
- [9] GUMASTE A, MAHALE S, KUSHWAHA A, et al. A novel pCDC ROADM architecture using M×N WSS[C]//National Conference on Communication. 2016: 1-6.
- [10] THIAGARAJAN S and ASSELIN S. Nodal contention in colorless, directionless ROADMs using traffic growth models[C]//European Conference and Exhibition on Optical Communication. 2012: 1-3.
- [11] SHE Q Y, ZHANG Q and RUNDBERGET. CAPEX benefits of colorless directionless ROADM in WDM transport networks[C]//Optical Fiber Communication Conference. 2013: 1-3
- [12] WOODWARD L, FEUER M D. Benefits and requirements of flexible-grid ROADMs and networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(10): A19-A27.

- [13] YU X S, TORNATORE M, XIA M, et al. Migration from fixed grid to flexible grid in optical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(2): 34-43.
- [14] TAHON M, VERBRUGGE S, COLLE D, et al. Valuing flexibility in the migration to flexgrid networks[C]//Optical Fiber Communication Conference. 2013: 1-3.
- [15] ZAMI T. Interest of the MIXGRID setup for elastic spectral efficiency[A]. 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication. 2013: 1-3.
- [16] ROFOEE B R, ZERVAS G, YAN Y, et al. Flexible and adaptive optical metro networking on fixed/flex grid exploiting hybrid time/frequency for shared resource allocation[C]//European Conference and Exhibition on Optical Communication. 2014: 1-3.
- [17] YU X, TORNATORE M, ZHAO Y L, et al. When and how should the optical network be upgraded to flex grid?[C]//2014 European Conference on Optical Communication(ZCOC), 2014: 1-3.
- [18] WANG X L, SHEN G X and FU X D. Benefit of sub-band virtual concatenation in enhancing availability of elastic optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1098-1110.
- [19] BOCOI A, SCHUSTER M, RAMBACH F, et al. Reach-dependent capacity in optical networks enabled by OFDM[C]//Optical Fiber Communication Conference. 2009: 1-3.
- [20] ZHANG Y, ZHANG Y, BOSE S K, et al. Migration from fixed to flexible grid optical networks with sub-band virtual concatenation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(10): 1752-1765

#### [作者简介]



符小东（1978-），男，江苏南通人，中天宽带技术有限公司总经理、苏州大学产业教授，主要研究方向为光通信与网络。



李泳成（1989-），男，江苏南通人，博士，苏州大学助理研究员，主要研究方向为光通信与网络。



沈纲祥（1975-），男，浙江绍兴人，博士，苏州大学教授、博士生导师，主要研究方向为光通信与网络。