

# 波分复用网络中稀疏分光的选播路由

谭学功<sup>1,2</sup> 余顺争<sup>1</sup> 张宏滨<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中山大学信息科学与技术学院, 广东 广州 510006)  
<sup>2</sup> 暨南大学华文学院, 广东 广州 510610)

**摘要** 现有波分复用网络选播研究假设网络节点都具备分光能力或都不具备分光能力。综合网络性能和成本, 稀疏分光网络更符合现实。研究了稀疏分光网络中多目标函数的选播路由问题。提出了光迹的概念, 设计了禁忌搜索算法(TTS)。大量仿真实验表明, 相对于最优多播路由算法基础上的选播成员优先算法(MOM), TTS 算法明显优于 MOM 算法, 更加适合稀疏分光网络。

**关键词** 光通信; 选播; 稀疏分光网络; 路由算法; 光迹

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706022

## Manycast Routing in Sparse Splitting Wavelength Division Multiplexing Networks

Tan Xuegong<sup>1,2</sup> Yu Shunzheng<sup>1</sup> Zhang Hongbin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Information Science and Technology, SunYat-Sen University,  
Guangzhou, Guangdong 510006, China

<sup>2</sup> College of Chinese Language and Culture, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510610, China

**Abstract** The premise of all literatures about manycast routing and wavelength assignment problem in wavelength division multiplexing (WDM) networks is that all nodes are either split-capable or split-incapable. Sparse splitting network is a more realistic assumption considering network performance and cost. Manycast routing problem over sparse splitting optical networks with respect to several target functions is studied. The concept of light track and a trail-based tabu search (TTS) are proposed. Manycast member only algorithm (MOM) is an algorithm slightly adapted from the member only algorithm which is known as the best algorithm for sparse splitting multicast routing. Simulation results show that TTS algorithm performs well in comparison with MOM algorithm and is more suitable for sparse splitting networks.

**Key words** optical communications; manycast; sparse splitting networks; routing algorithm; light track

**OCIS codes** 060.4510; 060.4265; 060.4255; 060.4251

## 1 引言

互联网应用如交互式网络电视(IPTV)、视屏会议、对等网络(P2P)等不仅需要大量的带宽, 而且需要支持点对多点的通信。

波分复用(WDM)光纤技术的成熟和应用为通

信网络信息传输提供了巨大的带宽和容量<sup>[1-3]</sup>, 将成为未来骨干网的主要选择。

多播模式下, 源节点与指定的目的地节点间多点通信, 相对于单播, WDM 网络多播机制可以有效地节约网络资源。然而, 多播通信中只要一个目的

**收稿日期**: 2013-01-29; **收到修改稿日期**: 2013-04-11

**基金项目**: 国家自然科学基金-广东联合基金重点项目基金(U0735002)、国家 863 计划(2007AA01Z449)、中央高校基本科研业务费专项资金(12JNKY008)、湖北省自然科学基金(2011CDB088)

**作者简介**: 谭学功(1972—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事光网络的规划与优化、图论与算法等方面的研究。

E-mail: gdtxg@126.com

**导师简介**: 余顺争(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事下一代网络关键技术方面的研究。

E-mail: syu@mail.sysu.edu.cn

地节点无法满足服务要求,请求就会拥塞。

作为多播的通用形式,选播通信<sup>[4]</sup>按照一定的标准选择指定数量的节点作为目的地节点,随后实现源节点与目的地节点间通信的模式。在选播中,目的节点可以根据是否满足服务请求加入或者离开,从而极大地降低了拥塞概率。同时,根据网络现状,选择目的节点,选播可以降低网络负载和时延,提高容错能力。WDM 中使用选播机制,将在高带宽的环境下实现点对多点间可靠、高效的通信。

目前,所有 WDM 选播研究都基于一个前提:假设网络中所有节点都是具备分光能力(SC)的节点。结合网络性能和成本,现实的网络中仅仅部分节点具有分光能力,即为稀疏分光网络<sup>[5]</sup>。正因为认识到稀疏分光网络更符合网络现状,不少学者<sup>[6-8]</sup>将稀疏分光网络下的选播问题作为将要研究和解决的问题。本文对这一重要问题进行了研究。

## 2 相关工作和稀疏分光 WDM 中选播问题介绍

图  $G(V, E)$  表示 WDM 网络(见图 1),  $V$  代表通信节点的集合,  $E$  代表两个节点之间光纤链路的集合。假设  $G(V, E)$  是无向的,即每条边代表两个相反方向的有向光纤链路,每条链路用来传送相应方向的信号。

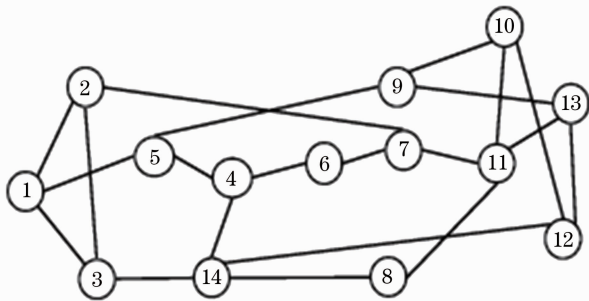


图 1 作为例子的美国科学基金会骨干网络

Fig. 1 National science foundation network as an example

给定网络中,三元组  $(s, D, k)$  定义选播请求,其中  $s \in V$  为源节点,候选节点为  $m$  个节点构成的选播池  $D$ ,选播信息要传送到  $D$  中  $k$  个节点构成的选播群,  $1 \leq k \leq m$ 。

$k = 1$  时,选播变为任播。 $D$  中选择一个最佳节点(选择标准可能是跳数、时延等)作为目的地节点,源节点与目的节点间通信。

$k = m$  时,选播变为多播。源节点与  $D$  中所有节点间通信。

由于存在候选节点集,相对于多播,选播提供了选择的自由。相对于任播,选播可以极大地节约网络资源,减少拥塞,降低时延等。对请求  $(s, D, k)$ ,从选播池中选择选播群有  $\binom{m}{k}$  种不同的方法,如果计算出所有可能的情况再找出最优解,工作量极大,为此一般采用启发式算法解决选播路由问题。

Ding<sup>[9]</sup>首次提出了多种算法研究 WDM 网络中的任播路由与波长分配问题,算法设计的目标是多个任播请求使用的波长数量尽可能少。随后,文献<sup>[10-11]</sup>提出了不同的任播算法降低拥塞概率。Charbonneau 等<sup>[6-8]</sup>深入研究了 WDM 网络中静态选播路由与波长分配问题,设计多种算法使选播所需要的波长数量尽可能的少,从而争取整个网络能量消耗最小。综合考虑成本、波长数、波长通道数等多个目标函数,研究了 WDM 网络选播路由由优化问题<sup>[12]</sup>。

假设网络节点都不具备将输入信号转换到多个端口输出的能力时,对给定的静态选播请求,Plante 等<sup>[13]</sup>在源节点与选播节点构成的覆盖网中设计类似单播的多跳光路径路由。

尽管近年来有不少关于选播路由与波长分配问题的研究成果,然而,目前为止尚未见到稀疏分光网络中选播研究。

已知网络  $G(V, E)$ ,稀疏分光网络指部分网络节点是 SC 节点,其余节点是非分光(SI)节点。对选播请求  $(s, D, k)$ ,路由与波长安排必须满足下面的限制与假设:

1) SI 节点有 Tap-and-Continue 能力:SI 节点提取少量光信号用于本地路由器,同时转发数据在输出信道。

2) 波长连续性限制:为减少问题的复杂性及波长转换带来的技术和成本限制,假设所有节点都不具备波长转换能力。一棵光树通信链接必须始终承载在同一波长通道上。

3) 不同波长限制:一旦两个光树有公共链路,必须使用不同的波长。

4) 选播源节点随机产生。传统上,稀疏分光多播研究一般假设不论源节点是否是 SC 节点,都可以传输信息给任意数量的子节点。显然,这违背了源节点随机出现的事实。

上述两个限制中,前一个限制是由物理特性决定的,后一个是为了网络正常运作、对网络进行设计时所带来的限制。

正是由于上述限制,稀疏分光网络中多播路由问题是个 NP-完全问题(非决定性多项式时间问题)<sup>[5]</sup>,多播是选播的特例,选播路由问题是个更具挑战性的工作。

## 3 算法设计

### 3.1 选播成员优先算法

在 WDM 网络中,稀疏分光背景下的众多多播算法中,MO 算法(成员优先算法)因简单、高效闻名<sup>[5]</sup>。结合选播的特性,在 MO 算法基础之上设计

了选播成员优先(MOM)算法。基本思路如下:对于一个请求 $(s, D, k)$ , $V_T$ 表示目前树 $T$ 上的 SC 节点或者 SI 叶节点, $V'_T$ 表示树 $T$ 上非叶子 SI 节点, $V'_T$ 中节点不能连接其余任何节点。所有目前未加入到树上的选播节点,按照到达树上的跳数,最小跳数的节点优先加入到树上,前提是连接到树的路径上不包括 $V'_T$ 节点;如果多个节点跳数相同,标号小的节点优先选择。一旦选择的节点加入的最小跳数路径含 $V'_T$ 节点,则须要从源节点重新构造树。对于请求 $(s, D, k)$ ,一旦选择了 $k$ 个选播节点,算法终止。

algorithm MOM

algorithm MOM  $(s, D, k)$ , where  $G(V, E)$  is a WDM network,  $D$  is a manycast pool,  $k$  is the number of manycast group,  $c$  is the number of manycast nodes in the current solution.

begin

1  $F(s, D, k) = \emptyset, c = 0$ .

2  $V_T = s, V'_T = \emptyset$ , and  $T = \emptyset$ .

3 try to find the least hop count path  $P(v, u)$ , where  $v \in V_T, u \in D$ , which does not involve any node in  $V'_T$ .

4 if such a path  $P(v, u)$  is found, add every link  $e \in P(v, u)$  to the manycast tree  $T$ .

5 if  $v$  is a SI node, move  $v$  from  $V_T$  to  $V'_T$ .

6 for any node  $y$  on  $P(v, u)$ , where  $y$  is a nonleaf node,

7 if  $y$  is a SI node, move  $y$  to  $V'_T$ .

8 otherwise, move  $y$  to  $V_T$ .

9 move  $u$  from  $D$  to  $V_T$ .

10  $c = c + 1$ .

11 if  $(c = k)$ , stop; otherwise, go to step 3.

12 else (i. e. no such a path  $P(v, u)$  can be found) move the branches in  $T$  to  $F(s, D, k)$  and go to step 2 to construct another tree.

对一个选播请求, MOM 算法得到以源节点为根的光树或多棵光树构成的光森林。

### 3.2 禁忌搜索算法

禁忌搜索(TTS)算法基本思路如下:对于一个请求 $(s, D, k)$ ,首先按照最短路径和 SC 节点优先的原则找到预备解;对预备解中的部分节点,回溯路径得到光迹(概念见 3.2.1 节);将光迹作为初始解,以波长通道数为目标函数,禁忌搜索最优解。

类似于局部最陡搜索算法,每个循环中,禁忌搜索算法选择邻域中的最优解,移动当前解。局部最陡搜索算法的当前解比不上记载的最优解时,算法终止。但禁忌搜索却是继续搜索,直到算法终止条件出现。为防止陷入局部搜索,禁忌算法通过对禁忌表进行部分解的禁忌,实现更大区域的搜索。如果在一定数量的迭代后还没有更好的解出现,算法

终止以防止无效率的搜索<sup>[14]</sup>。

TTS 算法具体包括三个步骤:产生预备解、回溯产生初始解和禁忌搜索。

#### 3.2.1 光路、光树、光迹

图论中<sup>[15]</sup>,对于已知图 $G(V, E)$ ,路径定义为:图中一个有限的非空点、边交叉出现的序列,其中点不允许重复出现。如图 1 中 2-1-5-4-14 所示。在 WDM 网络中,对应于图论的路径概念,一条所有链路都采用同一波长的路径定义为光路;任何两个节点间存在唯一的光路连通图定义为光树。

图论中迹定义为:图 $G$ 中一个有限的非空点、边交叉出现的序列,其中边不允许重复出现。如图 1 中 2-1-5-1-2-7-6。在 WDM 网络中,对应于图论的迹的概念,将一个所有链路采用同一波长的迹定义为光迹。光迹与光路的最大区别在于前者允许同

一节点多次出现。

### 3.2.2 预备解

对于请求  $(s, D, k)$ ,  $D$  表示选播池节点集, 集合  $M$  表示选播节点集, 采用最短路径和 SC 节点优先原则构造预备解  $T = (V', E')$ 。初始解  $T = (V', E')$ ,  $V'$  仅含源节点,  $E'$  是空集首先找到所有选播池中到源节点中跳数最少的节点, 跳数相同时 SC 节点优

先, 该节点加入到  $M$ , 计数器为 1, 相应路径上的节点加入到  $V'$ , 路径上的链路加入到  $E'$ ; 随后找到  $V'$  中节点和  $D-M$  中节点对, 使得这对节点间的跳数最少, 同样地,  $D$  中 SC 节点优先选择, 相应路径上的节点和路径分别加入到  $V'$  和  $E'$ , 计数器加 1; 继续, 计数器为  $k$  时算法终止, 输出预备解。

preparation solution of TTS

1 renumber node; source is node 1; node 2 to  $m+1$  are in manycast pool  $D$ ;  $C$  is conut.

2  $M = \emptyset$ .

3 while  $D-M \neq \emptyset$ ,

4 begin  $T = (V', E')$  with  $V' = \{1\}$  and  $E' = \emptyset$ .

5 find node  $u \in D-M$  such that  $|H_{1u}| = \min_{i \in D-M} \{|H_{1i}|\}$ , if several nodes has the same hop count, SC node is selected first.

6  $V' = V' \cup \{\text{nodes on the path } H_{1u}\}$ .

7  $E' = E' \cup \{\text{links on the path } H_{1u}\}$ .

8  $M = M \cup \{u\}$ .

9  $C = C + 1$ .

10 while  $(C < k)$ ,

11 find  $u_1 \in V'$  and  $u_2 \in D-M$  such that  $|H_{u_1 u_2}| = \min_{i \in V', j \in D-M} \{|H_{ij}|\}$ ; if several nodes have the same hop count, SC node is selected first.

12  $V' = V' \cup \{\text{nodes on the path } H_{u_1 u_2}\}$ .

13  $E' = E' \cup \{\text{links on the path } H_{u_1 u_2}\}$ .

14  $M = M \cup \{u_2\}$ .

15  $C = C + 1$ .

16 print  $[T = (V', E')]$ .

其中  $H_{ij}$  表示节点  $i, j$  间的最小跳数的路径,  $|H_{ij}|$  表示  $H_{ij}$  的跳数。

### 3.2.3 初始解

禁忌搜索对初始解的依赖较大, 不同的初始解, 在搜索过程中耗费时间和资源往往不同。在预备解的基础上采用回溯办法, 得到初始解。

回溯: 已知路径中,  $(u, v)$  是一条链路, 节点  $v$  从节点  $u$  获得信息, 沿链路  $(v, u)$  回传信息给节点  $u$ , 称节点  $v$  回溯。

回溯意味着增加了波长通道数, 为防止过多波长信道的使用, 适当的回溯规则至关重要。节点是否需要回溯, 规定如下:

1) 源节点不回溯; 按照源节点到达选播节点的跳数, 跳数最长的路径上的节点不回溯;

2) 其余的节点是否需要回溯, 根据 SC 节点和 SI 节点区别对待。对 SC 节点, 其所有子节点不用

考虑回溯。对 SI 节点, 子节点分为三种情况: 如果 SI 节点需要回溯, 其所有子节点均需要回溯; 如果 SI 节点不需回溯, 但该节点只有一个子节点, 其子节点不回溯。如果 SI 节点不需要回溯, 而且不止一个子节点, 对于最长路径上的子节点不回溯, 其余节点必须回溯。

例如图 1 中假设源节点为 2, 选播群  $D = \{6, 12, 13\}$ ,  $k = 2, 5$  是 SC 节点。

按照 MOM 算法, 得到两棵光树为 2-7-6, 2-7-11-13, 共 5 个波长通道, 源节点 2 是 SI 节点, 无法分光, 需要两次发射机, 由于链路 2-7 被通过两次, 根据不同波长限制原则, 需要两个波长。

TTS 算法中, 按照 3.2.2 节的算法得到预备解为 2-7-6, 7-11-13 两个分支。按照回溯规定, 节点 6 需回溯, 回溯后初始解为: 2-7-6-7-11-13, 共 5 个波长通道。相对于预备解, 增加了 1 个波长通道, 只需

要 1 个发射机和 1 个波长。

### 3.2.4 禁忌搜索

禁忌搜索每个循环包括：计算当前解的邻域；移动到邻域中最好的解；为了避免死循环，禁忌搜索把最近进行的一些移动放在一个禁忌表  $T$  中（在目前的迭代中这些移动是被禁止的，在一定次数的迭代之后它们又被释放出来）；更新最优解。禁忌表被循环修改，最后定义一个停止准则来终止整个算法。

TTS 中禁忌搜索部分采用 3.2.3 节的初始解为当前解，目标函数值为波长通道数，计算出当前解的邻域。

当前解  $X$  的邻域  $N(X)$  定义为：

1) 对于不在  $X$  上的每个节点，删掉  $X$  的一个选播节点，按照最短路径添加该节点和选播池中节点，结合 3.2.2 节和 3.2.3 节找到新解。

2) 对于在  $X$  上的节点，不考虑源节点和选播

节点，每次删掉一个节点的同时，增加新的选播节点，结合 3.2.2 节和 3.2.3 节找到新解。

例如图 1 中初始解为 2-7-6-7-11-13，删掉初始解上节点 7，按照最短路径加入的原则，得到邻域中一个解 2-3-14-12-13，所有节点不需要回溯，需要 4 个波长通道；删掉节点 6，添加节点 1 到解上，得到邻域中一个解为 2-7-11-13 和 2-1-3-14-12，节点 7, 11, 13 需要回溯，需要 10 个波长通道。

禁忌终止条件包括循环次数、内存使用、运行时间等，本文的终止条件为：一定的迭代数量内还没有更好的解出现，算法终止。类似于文献[13]，文章中使用的迭代次数是网络节点的个数的两倍，禁忌表长为 4~10 之间的随机数。用  $S(i)$  表示第  $i$  次迭代的解， $B$  表示最优解， $N$  表示解无法更好时的迭代次数， $T$  表示禁忌表。

TS algorithm for TTS

1 generate initial solution  $S(0)$ .

2  $B=S(0)$ .

3  $T(0)=\emptyset, i=1, n=0$ .

4 while (true),

5 evaluate all the solutions in the neighbor of  $S(i)$ .

6 select the best move that is not in  $T(i)$  or is aspirated.

7 update  $S(i)$  with the best solution in the neighborhood and update  $T(i)$ .

8 if  $S(i)$  is better than  $B$ ,

9  $B=S(i)$ .

10  $n=0$ .

11  $i=i+1$ .

12 else,

13  $n=n+1$ ,

14 if  $n>N$ ,

15 break.

## 4 仿真实验及分析

比较 MOM 算法和 TTS 算法的仿真结果。在所有实验中， $S$  表示 SC 占有所有节点的比例，SC 节点均匀分布在网络中。参数  $P$  表示作为候选目的节点的选播池节点在所有节点的比例。对于一个给定的  $P$ ，选播池节点随机产生。

实验采用 Waxman<sup>[16]</sup> 模型产生随机网络拓扑  $G(V, E)$  模拟 WDM 网络。30 个节点被随机分布到一个矩形坐标区域中。任意结点  $u$  和  $v$  间的链路按

照下面的概率函数产生：

$$P_i(u, v) = \lambda \exp[-p(u, v)/\gamma\delta], \quad (1)$$

式中  $p(u, v)$  表示节点  $u, v$  间的欧氏距离， $\delta$  是所有节点间的最大距离， $\lambda, \gamma$  是  $(0, 1)$  间给定常数。当  $\lambda$  增大时，网络中边的密度增大；当参数  $\gamma$  减小时，网络中距离小的边相对于距离大的边的密度增大。仿真实验中  $\lambda, \gamma$  分别取 0.3、0.4。

对选播请求  $(s, D, k)$ ，源节点随机分布。按照惯

例,  $k = \left\lfloor \frac{|D|}{2} \right\rfloor$ , 实验分为两组: 第一组中  $P$  分别为 30%, 50%, 70%,  $S$  分别为 10%~70%, 比较 SC 比例变化和相对固定选播池节点比例下两种算法的结果; 第二组中  $S$  分别为 30%, 50%, 70%,  $P$  在 10%~90% 间变化, 比较选播池节点比例变化和相对固定 SC 节点比例下两种算法的结果。

在所有的光网络资源中, 波长始终是波长路由光网络中最重要资源之一; 在路由时使用尽可能少的波长通道意味着减少参与通信的资源, 而且规

模越小使用的波长也可能越少。

发射机的次数是比较两个算法效果的另一个参数。为保证实验的精确性, 比较 10000 次实验的平均波长数、发射机次数、波长信道数。

表 1 是 MOM 算法下当选播池比例  $P$  分别为 30%, 50%, 70% 时实现选播的平均波长数。表 2 是 MOM 算法下当 SC 节点比例  $s$  分别为 30%, 50%, 70% 时实现选播的平均波长数。

表 1 当  $P=30\%, 50\%, 70\%$  时 MOM 算法下的平均波长数

Table 1 Average numbers of wavelengths of MOM algorithm when  $P=30\%, 50\%, 70\%$

S	P						
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%
30%	2.393	2.138	1.940	1.907	1.856	1.897	1.798
50%	3.363	2.941	2.932	2.554	2.424	2.406	2.329
70%	4.402	4.158	3.759	3.544	3.280	3.185	2.669

表 2 当  $S=30\%, 50\%, 70\%$  时 MOM 算法下的平均波长数

Table 2 Average numbers of wavelengths of MOM algorithm when  $S=30\%, 50\%, 70\%$

S	P								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
30%	1	2.034	2.416	2.983	3.542	4.413	4.831	5.660	6.157
50%	1	1.744	1.924	2.596	2.862	3.733	4.275	4.594	5.390
70%	1	1.716	1.879	2.475	2.485	3.241	3.782	4.074	5.372

当  $P$  为 10% 时, 选播变成了任播, 一个请求只需要一个光路实现, 无论  $S$  比例为多少, 只需一个波长; 当  $P$  相对固定时, 随着 SC 节点的增多, 同样的请求, MOM 算法有更多的机会构建光树, 需要的波长数也越来越少。类似地, 在同样多的 SC 节点比例下,  $P$  的比例越来越大时, 选播节点群数量越大, 光树的规模越大, 同一波长信道出现在不同光树的概率也越大, 所需波长数量越来越多。表 1 和表

2 很好地验证了上述分析。由于在每个选播中, 源节点、选播池节点、SC 节点都是随机选择, 在极个别情况下出现了与整体规律不符合的现象(如表 1 中  $S=30\%, P=60\%$  时)。

相对于光路, 光树可以极大地降低发射机的次数<sup>[17]</sup>, MOM 算法下两组实验所需发射机的次数如表 3、4 所示。

表 3 当  $P=30\%, 50\%, 70\%$  时 MOM 算法下的平均发射机个数

Table 3 Average numbers of transmitters of MOM algorithm when  $P=30\%, 50\%, 70\%$

S	P						
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%
30%	3.4343	3.1686	2.7429	2.4602	2.2251	2.1324	1.8275
50%	5.9181	5.3971	5.3289	4.1587	3.8253	3.3781	3.2631
70%	8.3941	7.6823	7.0553	6.7837	5.7893	5.2763	4.4761

表 4 当  $S=30\%, 50\%, 70\%$  时 MOM 算法下的平均发射机个数

Table 4 Average numbers of transmitters of MOM algorithm when  $S=30\%, 50\%, 70\%$

S	P								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
30%	1	2.809	3.732	5.729	6.809	8.452	9.342	10.96	12.242
50%	1	2.610	3.232	4.861	5.237	7.376	8.503	9.634	10.383
70%	1	2.256	3.054	4.216	4.620	6.070	7.891	8.628	9.893

表 3 是 MOM 算法下当  $P$  分别为 30%, 50%, 70% 时实现选播的平均发射机的个数。表 4 是 MOM 算法下当 SC 节点比例分别为 30%, 50%, 70% 时实现选播的平均发射机次数。

当  $P$  为 10% 时, 选播变成了任播, 一个请求只需要一个光路, 无论  $S$  比例为多少, 无论源节点是否是 SC 节点, 只需一个发射机; 当  $P$  相对固定时, 随着 SC 节点的增多, 同样的请求, MOM 算法有更多的选择构建光树, 相应地使用发射机的次数也就越少。类似地, 在同样多的 SC 节点比例下,  $P$  的比例越来越大时, 参与构建光森林的节点增加, 需要更多的发射机次数。

对照表 1~4, 发现同样条件下发射机的次数一定不小于波长数。这是因为假设源节点无任何特殊要求, 对一棵光树, 如果源节点是 SI 节点, 一个发射机, 但只需要一个波长。

对于同一个选播请求, TTS 算法下得到一个光迹, 无论网络中有多少 SC 节点(甚至是所有节点都无法分光的极端情况), 无论选播池节点占网络节点的比例(甚至是源节点外所有节点都属于选播池的极端情况), 也无论源节点是否是 SC 节点, 光迹始终只需要一个波长, 源节点始终只要一个发射机。表 1~4 中实验结果显示, MOM 算法下, 除任播的极端情况, 每次请求平均需要至少 1.7 个最多 5.4 个波长, 平均需要最少 1.8 个最多 12.2 个发射机。就使用的波长和发射机而言, 显然 TTS 算法远远优于 MOM 算法。

TTS 算法使用光迹, 可能部分节点需要回溯, 相对于预备解, 会增加波长信道数量, 禁忌搜索以波长信道为目标函数, 尽可能找到波长信道数较少的光迹。

图 2 对照  $P$  分别为 30%, 50%, 70% 时 MOM 算法和 TTS 算法的波长信道数。  $P$  相对固定时, 随着 SC 节点的增加, 两种算法没有明显的变化趋势。但是 TTS 算法始终优于 MOM 算法。相对于 MOM 算法, TTS 算法下的波长信道数最少减少 15%, 最多减少 30%。

图 3 对照  $S$  分别为 10%, 30%, 50% 时 MOM 算法和 TTS 算法的波长信道数。  $S$  相对固定时, 随着选播池节点的增加, 规模会越来越大, 两种算法下的波长信道数都递增。但是三种情况下 TTS 算法都优于 MOM 算法。相对于 MOM 算法, TTS 算法下的波长信道数平均最少减少 15%, 最多 40%。

综上分析和对照, TTS 算法全面优于 MOM 算法。

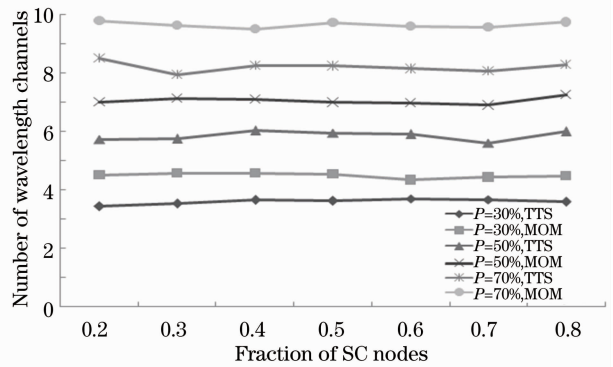


图 2 选播池节点比例为 30%、50%、70% 时的波长信道数

Fig. 2 Numbers of wavelength channels when  $P=30%$ , 50%, 70%

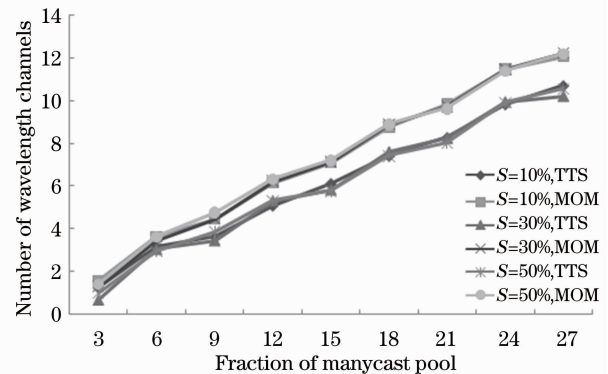


图 3 SC 节点比例分别为 10%、30%、50% 时的波长信道数

Fig. 3 Numbers of wavelength channels when  $S=10%$ , 30%, 50%

## 5 结 论

研究了稀疏分光下的选播路由问题。区别传统的光树, 提出了光迹的思路, 达到最小化使用波长数和发射机次数, 并通过禁忌搜索减少波长通道。对照最优多播算法基础上的 MOM 算法, 实验显示 TTS 算法明显优于 MOM 算法, 更适合解决稀疏分光选播路由问题。多播、任播是选播的特例, TTS 算法可以稍作修改应用到多播、任播中。基于节能的绿色光网络中选播路由问题是下一阶段将进行的研究课题。

## 参 考 文 献

- Guo Aihuang, Feng Shengyi, Xue Lin, *et al.*. Research on power efficient routing algorithm in green optical networks [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0406002.  
郭爱煌, 冯圣毅, 薛琳, 等. 基于节能的绿色光网络路由算法的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0406002.
- Guo Aihuang, Xue Lin. Recent research progress in green IP

- over WDM network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 070001.
- 郭爱煌, 薛琳. 绿色 IP over WDM 网络研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 070001.
- 3 Niu Dawei, Wang Hai, Yu Weibo, *et al.*. A cross traffic estimate model for optical burst switching networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1106002.
- 牛大伟, 王海, 于卫波, 等. 一种适用于光突发交换网络的背景流量估计模型[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1106002.
- 4 G Arush, J Plante, V Vokkarane. Mnycast: energy-efficient multicasting in WDM optical unicast networks [C]. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2011. 1–6.
- 5 X J Zhang, J Y Wei, C M Qiao. Constrained multicast routing in WDM networks with sparse light splitting [J]. *J Lightwave Technology*, 2000, 18(12): 1917–1927.
- 6 N Charbonneau, V M Vokkarane. Static manycast routing and wavelength assignment over wavelength-routed optical WDM networks [C]. *3rd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems*, 2009. 1–3.
- 7 N Charbonneau, V M Vokkarane. Tabu search meta-heuristic for static manycast routing and wavelength assignment over wavelength-routed optical WDM networks [C]. *IEEE International Conference Communications (ICC'10)*, 2010. 1–5.
- 8 N Charbonneau, V M Vokkarane. Routing and wavelength assignment of static manycast demands over all-optical wavelength-routed WDM networks [J]. *IEEE/OSA J Optical Communication Sandnet Working*, 2010, 2(7): 442–455.
- 9 D R Ding. A hybrid method for solving ARWA problem on WDM network [J]. *Computer Communications*, 2007, 30(2): 385–395.
- 10 K Bhaskaran, J Triay, V M Vokkarane. Dynamic anycast routing and wavelength assignment in WDM networks using ant colony optimization (ACO) [C]. *IEEE International Conference on Communication (ICC'11)*, 2011. 1–6.
- 11 B G Bathula, J M Plante, V M Vokkarane. Crosstalk-aware anycast routing and wavelength assignment in optical WDM networks [C]. *4th International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems*, 2010. 94–96.
- 12 Xuegong Tan, Shunzheng Yu, Hongbin Zhang, *et al.*. An efficient algorithm for optimal manycast routing problem over WDM networks [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013.
- 13 J Plante, A Gadkar, V Vokkarane. Dynamic manycasting in optical split-incapable WDM networks for supporting high-bandwidth applications [C]. *IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications*, 2012. 856–860.
- 14 I R Jain. Internet 3.0: ten problems with current internet architecture and solutions for the next generation [C]. *IEEE Military Communications Conference*, 2006. 1–9.
- 15 J A Bondy, U S R Murty. *Graph Theory With Applications* [M]. Great Britain: The Macmillan Press, 1976.
- 16 B M Waxman. Routing of multipoint connections [J]. *IEEE J Sel Commun*, 1988, 6(9): 1617–1622.
- 17 L H Sahasrabudde, B Mukherjee. Light trees: optical multicasting for improved performance in wavelength routed networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1999, 37(2): 67–73.

栏目编辑: 王晓琰