

# 基于捕食搜索和博弈的静态通信量疏导模式

王兴伟 王庆军 赖武文 黄敏

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

**摘要** 采用分层图,在满足用户通信量请求带宽与延迟约束下,以最大化用户通信量请求总体延迟满意度和最小化网络相对成本为目标,提出了一种 IP over WDM 光 Internet 中的基于捕食搜索和博弈的静态通信量疏导模式。该模式通过控制搜索空间的限制级别来实现局部搜索与全局搜索之间的转换,以寻找优化的通信量疏导方案。在实际网络拓扑上对该模式进行了性能评价,结果表明,同已有通信量疏导模式相比,该模式具有更好的性能。

**关键词** 通信量疏导,捕食搜索,博弈

中图分类号 TP393 文献标识码 A

## Static Traffic Grooming Scheme Based on Predatory Search and Gaming

WANG Xing-wei WANG Qing-jun LAI Wu-wen HUANG Min

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract** Using the layered graph, a static traffic grooming scheme based on predatory search algorithm (PSA) and gaming was proposed for IP over WDM optical Internet, in order that the comprehensive user traffic request delay satisfaction degree is maximized and the network relative cost is minimized under the constraints of the user traffic bandwidth and delay request. In the proposed scheme, the transition between the local and the global search is realized by adjusting the restriction level of search space, and then the optimal traffic grooming scheme is found. It was simulated over actual network topologies and its performance was compared with certain existing traffic grooming scheme. Simulation results show that it has better performance.

**Keywords** Traffic grooming, Predatory search, Gaming

## 1 引言

在 IP over WDM(Wavelength Division Multiplexing)光 Internet 中,通信量请求的带宽需求往往小于波长容量,若占用整个波长,会造成带宽资源的严重浪费,因此需要引入通信量疏导,把低带宽通信量请求复用到高带宽波长通道即光路上,以提高网络资源利用率。在文献[1]中,以最小化使用的波长数和 OADM(Optical Add-Drop Multiplexer)数为目标,采用优化算法来求解环网的路由、疏导和波长分配等问题。在文献[2]中,采用网络流方法解决网状网中的通信量疏导问题。在文献[3]中,以最小化网络费用为目标,提出了 QoS 动态通信量疏导模式。在文献[4]中,采用正交设计演化思想求解网状网中的静态通信量疏导问题。在文献[5]中,以最小化 OADM 使用数为目标,采用整数线性规划方法求解网状网中的通信量疏导问题。在文献[6]中,基于通用图模型解决异构网状网中的通信量疏导问题。在文献[7]中,以最小化光设备费用和波长使用数为目标,采用近似算法求解网状网中的通信量疏导问题。本文面向 IP over WDM 光 Internet,基于分层图<sup>[6]</sup>,采用捕食搜索<sup>[8]</sup>算法,引入博弈<sup>[9]</sup>机制,提出了一种

静态通信量疏导模式,即在满足用户通信量请求带宽与延迟约束下,最大化通信量请求总体延迟满意度和最小化网络相对成本。仿真结果表明该模式是有效的。

## 2 模型设计

### 2.1 网络模型

已知图  $G(V, E)$ ,  $E$  是边集,  $V$  是节点集。  $\forall v_i \in V, i=1, \dots, |V|$ ,  $N_{r_i}, R_{r_i}, N_{i_i}, R_{i_i}, C_{r_i}, C_{i_i}, D_{c_i}, C_{c_i}, D_{g_i}, C_{g_i}$  分别表示  $v_i$  配备的光接收器数、可用光接收器数、光发射器数、可用光发射器数、光接收器使用成本、光发射器使用成本、波长转换延迟、波长转换成本、疏导延迟、疏导成本。若  $v_i$  无波长转换、疏导能力,则  $C_{c_i}$  和  $D_{c_i}, C_{g_i}$  和  $D_{g_i}$  置 0。  $\forall e_{ij} \in E, W, dl_{ij}, C_{ij}$  表示  $e_{ij}$  提供的波长数、传输延迟、传输成本。

### 2.2 数学模型

$R=[r_{sd}]_{|V| \times |V|}$  表示用户通信量疏导请求矩阵,  $r_{sd}=(br_{sd}, [dl_{sd}, dh_{sd}])$  表示从  $v_s$  到  $v_d$  的通信量疏导请求,  $br_{sd}$  表示带宽需求,  $[dl_{sd}, dh_{sd}]$  表示延迟需求,以体现柔性。

引入记号  $P_{sd}^{ij}, AD_{sd}^i, DP_{sd}^i, WC_{sd}^i$ : 若传输  $r_{sd}$  的路径经过  $e_{ij}$ , 则  $P_{sd}^{ij}$  置 1, 否则置 0; 若  $r_{sd}$  在  $v_i$  处上路, 则  $AD_{sd}^i$  置 1, 否则

到稿日期:2012-02-10 返修日期:2012-07-14 本文受国家自然科学基金项目(61070162, 71071028, 70931001), 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20100042110025, 20110042110024), 中央高校基本科研业务费专项资金(N110204003)资助。

王兴伟(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究方向为新一代互联网关键技术; 王庆军(1987-), 男, 硕士生, 主要研究方向为网络路由与疏导机制; 赖武文(1987-), 男, 硕士生, 主要研究方向为网络资源管理; 黄敏(1968-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为优化方法及其应用。

置0;若 $r_{sd}$ 在 $v_i$ 处下路,则 $DP_{sd}^i$ 置1,否则置0;若 $r_{sd}$ 在 $v_i$ 处转换波长,则 $WC_{sd}^i$ 置1,否则置0。

在疏导方案 $G$ 下, $r_{sd}$ 的网络延迟、处理延迟、传输延迟 $DL_{sd}^G, DP_{sd}^G, DT_{sd}^G$ 定义如下:

$$DL_{sd}^G = DP_{sd}^G + DT_{sd}^G \quad (1)$$

$$DP_{sd}^G = \sum_{i=1}^{|V|} D_{g_i} \times (AD_{sd}^i + DP_{sd}^i) + \sum_{i=1}^{|V|} D_{c_i} \times WC_{sd}^i \quad (2)$$

$$DT_{sd}^G = \sum_{i=1}^{|V|} \sum_{j=1}^{|V|} dl_{ij} \times P_{sd}^{ij} \quad (3)$$

用户对 $DL_{sd}^G$ 的满意度 $ST_{sd}^G, R$ 中所有通信量请求对延迟的总体满意度 $ST_R^G$ 定义如下:

$$ST_{sd}^G = \begin{cases} 1, & DL_{sd}^G \leq dl_{sd} \\ \frac{dh_{sd} - DL_{sd}^G}{dh_{sd} - dl_{sd}}, & dl_{sd} < DL_{sd}^G < dh_{sd} \\ \epsilon, & DL_{sd}^G = dh_{sd} \\ 0, & DL_{sd}^G > dh_{sd} \end{cases} \quad (4)$$

$$ST_R^G = \sum_{s=1}^{|V|} \sum_{d=1}^{|V|} I_{sd} \times ST_{sd}^G \quad (5)$$

式中, $\epsilon$ 是远小于1的正小数, $I_{sd}$ 表示 $r_{sd}$ 在 $R$ 中的重要程度, $\sum_{s=1}^{|V|} \sum_{d=1}^{|V|} I_{sd} = 1, 0 \leq I_{sd} \leq 1$ 。

网络满载成本 $NC$ 、传输 $R$ 时的网络成本、处理成本、传输成本、网络相对成本 $NC_R^G, PC_R^G, TC_R^G, NRC_R^G$ 定义如下:

$$NC = \sum_{i=1}^{|V|} \sum_{j=1}^{|V|} C_{ij} + \sum_{i=1}^{|V|} (C_{g_i} + N_{r_i} \times C_{r_i} + N_{r_i} \times C_{r_i} + C_{c_i}) \quad (6)$$

$$NC_R^G = PC_R^G + TC_R^G \quad (7)$$

$$PC_R^G = \sum_{s=1}^{|V|} \sum_{d=1}^{|V|} \sum_{i=1}^{|V|} C_{g_i} \times (AD_{sd}^i + DP_{sd}^i) + \sum_{s=1}^{|V|} \sum_{d=1}^{|V|} \sum_{i=1}^{|V|} C_{c_i} \times WC_{sd}^i \quad (8)$$

$$TC_R^G = \sum_{s=1}^{|V|} \sum_{d=1}^{|V|} \sum_{i=1}^{|V|} \sum_{j=1}^{|V|} (C_{ij} \times P_{sd}^{ij}) + \sum_{i=1}^{|V|} ((N_{r_i} - R_{r_i}) \times C_{r_i} + (N_{r_i} - R_{r_i}) \times C_{r_i}) \quad (9)$$

$$NRC_R^G = \frac{NC_R^G}{NC} \quad (10)$$

### 2.3 博弈分析

定义参与人集合 $S_p = \{1, 2\}$ ,1和2分别表示网络提供方和用户方。针对 $G, S_N = \{s_{11}, s_{12}\}$ 和 $S_U = \{s_{21}, s_{22}\}$ 分别表示网络提供方和用户方策略集, $s_{11}$ 和 $s_{21}, s_{12}$ 和 $s_{22}$ 分别表示网络提供方和用户方同意、不同意接受 $G$ 。双方博弈收益矩阵定义如下:

$$U_N^G = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ST_R^G - 1}{E_0} & -\frac{1}{NRC_R^G} \\ -\delta_1 \times \frac{ST_R^G - 1}{NRC_R^G} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$U_U^G = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ST_R^G & -\delta_2 \times ST_R^G \\ -ST_R^G & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $a_{11}, a_{12}, b_{11}$ 和 $b_{12}$ 分别代表网络提供方采用 $s_{11}$ 而用户方采用 $s_{21}$ 和 $s_{22}$ 下的网络提供方和用户方收益; $a_{21}, a_{22}, b_{21}$ 和 $b_{22}$ 分别代表网络提供方采用 $s_{12}$ 而用户方采用 $s_{21}$ 和 $s_{22}$ 下的网络提供方和用户方收益; $E_0$ 代表 $ST_R^G$ 的经验下限值; $\delta_1$ 和 $\delta_2$ 是取值大于1的惩罚因子,表示在网络提供方不同意而用户方同意接受 $G$ 及在网络提供方同意而用户方不同意接受 $G$ 时会造成负面影响。若下式满足,则达到Nash均衡<sup>[9]</sup>, $i, j, i^*, j^* = 1, 2$ 。

$$\begin{cases} a_{i^*j^*} \geq a_{ij^*} \\ b_{i^*j^*} \geq b_{ij^*} \end{cases} \quad (13)$$

## 3 疏导模式描述

本文的目标是在满足用户通信量请求带宽与延迟约束下最大化用户总体延迟满意度和最小化网络相对成本。

### 3.1 分层图构造

构造分层图 $G'(V', E')$ 如下: $\forall v_i \in V$ ,在 $G'(V', E')$ 中添加 $(W+2) \times 2$ 个顶点 $v_i^{1,0}, \dots, v_i^{W+2,0}$ 和 $v_i^{1,1}, \dots, v_i^{W+2,1}$ ;  $\forall v_i \in V$ ,在 $G'(V', E')$ 中所有波长层上添加波长旁路边 $w_{ei}$ ,在接入层上添加疏导边 $ge_i$ ,若有可用波长 $\lambda^l$ 发射器则添加发射器边 $te_{il}$ ,若有可用 $\lambda^l$ 接收器则添加接收器边 $re_{il}$ ,若可实现 $\lambda^l$ 到 $\lambda^w$ 转换则添加转换器边 $ce_{ilw}$ ,若有从 $v_i$ 到 $v_j$ 的 $e_{ij}$ 且 $\lambda^l$ 可用则添加波长边 $le_{ijl}$ ,边权重分别置0、 $D_{g_i}, 0, 0, D_{c_i}, dl_{ij}, 1 \leq l, w \leq W$ 。

### 3.2 疏导模式

在捕食过程中,没有发现猎物或猎物迹象时,捕食动物会沿着一定方向以很快的速度搜寻猎物;一旦发现猎物或猎物迹象,捕食动物会放慢搜寻步伐,在有猎物或猎物迹象的区域进行集中式搜索,以期找到猎物。如果在某一区域集中搜索了一段时间并没有找到猎物,捕食动物将会放弃这块区域,继续在整个捕食空间搜寻猎物。

捕食搜索算法<sup>[8]</sup>就是在模拟动物捕食行为的基础上提出的一种仿生计算方法。该算法先在整个搜索空间进行全局搜索,找到当前最优解,然后在其附近区域(邻域)进行集中搜索,若搜索多次还未找到更优解,则放弃局部搜索,再在整个搜索空间进行全局搜索,如此循环,直到找到最优解(或近优解)。具体做法是,通过定义邻域来寻找当前最优解的相邻解,使用限制(Restriction)来表征其邻域大小;为了实现在其附近逐渐扩大搜索区域,定义了由 $n$ 个级别的限制组成的序列: $Restriction(0), \dots, Restriction(n-1)$ ,这里, $Restriction(i)$ 表示在限制级别 $i$ 下的限制。限制级别越大,搜索区域就越大。限制级别初始设置为零,在某一限制级别下,搜索一定次数当前最优解的邻域后,若还未找到更优解,则限制级别加1,继续搜索。当限制级别达到某一阈值时,意味着在所限制的区域内进行多次有效搜索还未找到更优解,则放弃该区域限制的搜索方式,将限制设置成更高级别,即跳出原来限制的较小区域,转向更大区域进行搜索。在搜索过程中,如果当前最优解得到改善,则重新计算各个级别的限制值,重复以上过程。通过调节限制级别,可以实现局部和全局搜索及其转换,防止其陷入局部最优。

本文基于捕食搜索算法和博弈机制设计静态通信量疏导模式,旨在求解优化的疏导方案。

#### 3.2.1 解的表达和生成

解 $x = [a_{sd}]_{|V| \times |V|}$ 对应疏导方案 $G$ 。首先对于每个 $r_{sd}$ ,采用Dijkstra第 $k$ 最短路算法<sup>[10]</sup>找出满足其带宽与延迟要求的路径,构成可行路径集 $P_{sd} = \{P_{sd1}, \dots, P_{sdi}, \dots, P_{sdk}\}$ ,其中, $sd_i$ 是路径编号, $i=1, \dots, k$ 。从 $P_{sd}$ 中任选一条可行路径,将其编号赋予与 $r_{sd}$ 对应的 $a_{sd}$ ,构成 $x$ 。

#### 3.2.2 邻域定义

对于 $x = [a_{sd}]_{|V| \times |V|}$ ,随机选择节点对 $s$ 和 $d (s \neq d)$ ,从与 $a_{sd}$ 对应的 $r_{sd}$ 的 $P_{sd}$ 中随机选择与 $a_{sd}$ 不相等的路径编号替换 $a_{sd}$ 当前值,从而得到当前解的一个相邻解。如此生成多个这样的相邻解,组成当前解的邻域。

### 3.2.3 目标值的确定

解  $x$  的目标值函数定义如下:

$$f(x) = \frac{1}{\Omega \cdot (\alpha \cdot \frac{1}{NRC_R^G} + \beta \cdot ST_R^G)} \quad (14)$$

式中,  $\Omega$  是博弈权重值, 达到 Nash 均衡时取大于 1 的值, 否则置 1;  $\alpha$  和  $\beta$  是调节系数, 取决于是否偏向网络提供方或用户方, 值相等时表示对双方是公平的。显然,  $f(x)$  越小, 解  $x$  对应的  $G$  越优。

### 3.2.4 限制计算

当前最优解得到改善时, 需要重新计算限制, 并将当前限制级别清零。记限制级别数为  $n$ , 限制计算流程如下:

步骤 1 搜索  $n-1$  次当前最优解的邻域, 得到  $n-1$  个当前最优解的相邻解。

步骤 2 将  $n-1$  个相邻解的目标值和当前最优解的目标值按升序排列。

步骤 3 将排好序的  $n$  个目标值依次赋给限制  $Restriction(0), \dots, Restriction(n-1)$ 。

步骤 4 选取  $Restriction(0), \dots, Restriction(\lfloor n/t \rfloor)$  作为算法局部搜索限制,  $Restriction(n-\lfloor n/t \rfloor), \dots, Restriction(n-1)$  作为算法全局搜索限制。其中,  $t$  值随  $n$  大小而定。

### 3.2.5 疏导模式流程

步骤 1 随机生成一个初始解  $x$ , 令最优解  $x_{best} = x$ , 限制级别  $level = 0$ , 循环次数  $counter = 0$ , 设定邻域搜索次数  $m$  与每个限制下的最大循环次数  $CM$ , 并计算限制。

步骤 2 若  $level < n$ , 则搜索  $x$  的邻域  $m$  次并取目标值最小的解  $x_{min}$ , 转步骤 3; 否则, 转步骤 7。

步骤 3 若  $f(x_{min}) \leq Restriction(level)$ , 则令  $x = x_{min}$ , 转步骤 4; 否则, 转步骤 5。

步骤 4 若  $f(x) < f(x_{best})$ , 则令  $x_{best} = x$ ,  $level = 0$ ,  $counter = 0$ , 重新计算限制, 转步骤 2; 否则, 转步骤 5。

步骤 5  $counter = counter + 1$ , 若  $counter < CM$ , 则转步骤 2; 否则,  $level = level + 1$ ,  $counter = 0$ , 转步骤 6。

步骤 6 若  $level = \lfloor n/t \rfloor$ , 则  $level = n - \lfloor n/t \rfloor$ ; 转步骤 2。

步骤 7 输出  $x_{best}$  作为最优疏导方案, 算法结束。

## 4 仿真实现与性能评价

为了评价上述疏导模式(简称模式 1)的性能, 本文基于 VC++6.0 进行了仿真实现, 并将其与文献[6]中的启发式疏导模式(简称模式 2)分别在 CERNET、CERNET2 和 NSFNET 拓扑上进行了结果对比。仿真软件的主要功能包括拓扑管理、通信量疏导请求生成、通信量疏导方案生成、性能评价等。图 1 是仿真软件界面; 表 1 是仿真实现的部分主要函数列表; 表 2 是两种模式在不同通信量疏导请求比例(通信量疏导请求数与网络节点数之比, 记为 TGR)下  $ST_R^G$  和  $NRC_R^G$  的对比结果。可见, 本文模式具有更好的性能。

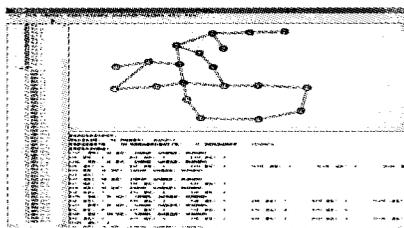


图 1 仿真软件界面

表 1 部分主要函数

函数名	功能
void ConvertPyToLg(...)	根据物理拓扑生成分层图
void SearchNeib(...)	搜索邻域
void Restriction(...)	限制计算
int FindCurOPT(...)	寻找当前最优解
int Nash(...)	寻找 Nash 均衡点
void UMatrix(...)	用户博弈收益矩阵计算
void NMatrix(...)	网络提供方博弈收益矩阵计算
float TargetVal(...)	目标值计算

表 2 性能对比

TGR	CERNET (模式 1; 模式 2)		CERNET2 (模式 1; 模式 2)		NSFNET (模式 1; 模式 2)	
	$ST_R^G$	$NRC_R^G$	$ST_R^G$	$NRC_R^G$	$ST_R^G$	$NRC_R^G$
20%	1.010	0.806	1.006	0.709	1.010	0.768
40%	1.015	0.938	1.001	0.685	1.040	0.945
60%	1.011	0.936	1.022	0.935	0.994	0.894
80%	1.032	1.093	1.014	1.071	1.049	0.916
100%	1.030	0.943	1.016	0.960	1.071	0.917

**结束语** 本文在满足用户通信量请求带宽与延迟约束下以最大化用户通信量请求总体延迟满意度和最小化网络相对成本为目标, 基于分层图, 提出了一种基于捕食搜索和博弈的静态通信量疏导模式。仿真结果表明, 本文提出的模式是可行和有效的。原型系统的开发、对动态通信量请求的扩展以及对静态和动态通信量疏导模式的集成是未来研究工作的重点。此外, 对处理流程和主要函数实现的优化是提高本文模式实用化程度的关键, 可促进其实际应用。

## 参考文献

- [1] Zhang Xi-jun, Qiao Chun-ming. An effective and comprehensive approach for traffic grooming and wavelength assignment in SONET/WDM rings [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(5): 608-617
- [2] Xiao Shi, Xiao Gao-xi, Leung Y. A network flow approach for static and dynamic traffic grooming in WDM networks [J]. Computer Network, 2006, 50(17): 3400-3415
- [3] 王兴伟, 佟呈呈, 黄敏. 一种 QoS 动态通信量疏导模式 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(6): 802-804
- [4] 王兴伟, 佟呈呈, 黄敏. 延迟与带宽受限智能静态通信量疏导模式 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(9): 1253-1256
- [5] Junghee H. A traffic grooming problem considering hub location for synchronous optical network-wavelength division multiplexing networks [J]. Journal of Computers & Industrial Engineering, 2010, 59(1): 1-8
- [6] Zhu Hong-yue, Zang Hui, Zhu Ke-yao, et al. A novel generic graph model for traffic grooming in heterogeneous WDM mesh networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(2): 285-299
- [7] Spyridon A, Lisa Z. Approximation algorithms for grooming in optical network design [J]. Theoretical Computer Science, 2011, 29(412): 3738-3751
- [8] Linhares A. Preying on optima: A predatory search strategy for combinatorial problems [C] // Proc of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1998: 2974-2978
- [9] Varian H. 微观经济学 (3) [M]. 北京: 经济科学出版社, 1997
- [10] Kleinberg J, Tardos E. 算法设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006