

IP/DWDM 光 Internet 中基于软计算的智能多约束 波长分配算法的研究^{*})

王兴伟¹ 刘 聪¹ 黄 敏²

(东北大学计算中心 沈阳 110004)¹ (东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)²

摘 要 波长分配问题是影响 IP/DWDM 光 Internet 中网络资源利用的关键问题之一。本文提出了两种基于软计算的多限制的波长分配算法,使得波长源分配适应实际的网络特征。事实上,由于考虑到多种限制问题,包括成本、功率和网络性能等,因此采用分层解决方案。因为每一层都是 NP 完全问题,所以采用软计算和启发式相结合的方法进行求解,设计并实现了一个仿真软件,仿真表明该算法既是可行的又是有效的。

关键词 IP/DWDM 光 Internet,多限制的波长分配,软计算,模拟退火算法,模拟遗传算法

Research on Soft-Computing-Based Intelligent Multi-Constrained Wavelength Assignment Algorithms in IP/DWDM Optical Internet

WANG Xing-Wei¹ LIU Cong¹ HUANG Min²

(Computing Center, Northeastern University, Shenyang 110004)¹

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)²

Abstract Wavelength assignment is one of the most important research areas in IP/DWDM optical Internet. Taking multiple constraints into account, including cost, power, network performance etc., the wavelength assignment is made much fit to the actual network configurations, however, the problem complexity increases correspondingly, leading to the adoption of a layered solution framework. As each layer sub-problem is NP complete, soft-computing algorithms, including SAA (Simulated Annealing Algorithm) and SGA (Simulated-annealing-Genetic Algorithm), and heuristic algorithms are used jointly to design the intelligent multi-constrained wavelength assignment algorithms respectively. Simulation results have shown that these proposed algorithms are feasible and effective.

Keywords IP/DWDM optical internet, Multi-constrained wavelength assignment, Soft-computing, Simulated annealing algorithm, Simulated-annealing-genetic algorithm

1 引言

路由选择与波长分配 RWA (Routing and Wavelength Assignment) 问题是影响 IP/DWDM 光 Internet 中网络资源利用的关键问题之一^[1]。一般地,可以将 RWA 分为两个子问题进行求解:路由选择子问题和波长分配子问题。其中,WA (Wavelength Assignment) 通常都是在比较理想的条件下进行的^[2~8]。静态波长分配算法常采用整数线性规划和图着色法,动态波长分配算法常采用首次命中、最少使用、最多使用、最小乘积、最小负载和最大和等方法。这些算法大都仅考虑网络拓扑和波长资源约束,往往忽略在实际网络配置中需要考虑的很多条件,造成结果与实际情况偏差较大。为此,本文在综合考虑成本、功率^[9]和网络性能等多种约束条件下,对 WA 从新的角度进行了研究,得到在多种约束条件下的优化配置,同时尽最大可能满足用户需求。这里考虑的成本约束主要包括波长转换器和波长放大器成本约束。由于考虑因素较多,因此采用分层解决方案。因为每一层都是 NP 完全问题^[10],所以采用软计算(本文分别采用模拟退火算法 SAA (Simulated Annealing Algorithm) 与模拟遗传算法 SGA (Simulated-annealing-Genetic Algorithm))^[11]和启发式相结合的方法进行求解。设计并实现了一个仿真软件^[10],仿真表明这些算法既是可行又是有效的。

2 问题描述

2.1 基本假设

将网络抽象成由节点(波长路由器或光交叉连接器)和边(光纤)组成的连通图,用 $G(V, E)$ 表示, V 和 E 分别为图中所有节点和所有边的集合, $N = |V|$, $L = |E|$ 。每个节点都配备足够多的接收器和发射器。光交叉连接器 OXC (Optical Cross-Connect) 分为波长选择交叉连接器 WSXC (Wavelength Selective Cross-Connect) 和波长交换交叉连接器 WIXC (Wavelength Interchanging Cross-Connect)。假设功率信号只在光纤中有损耗,其他光器件都是有源的。

2.2 有关参数与概念

• 节点对集合 Z : 节点对集合表示为:

$$Z = \{(z_1, z_2) | z_1 \in V \wedge z_2 \in V\} \quad (1)$$

• 节点对最小跳转次数 MNH: 节点对 $z \in Z$ 之间的最小跳转次数 MNH (Minimum Number of Hop), 即所跨越最小物理链路数目减 1, 表示为:

$$MNH(z, G(V, E)) = m(z), \forall z \in Z \quad (2)$$

其中, $m(z)$ 表示节点对 z 之间的 MNH。

• 节点对通路集合与扩展路径宽度: 节点对 z 之间的所有通路集合表示为:

$$A_{z,e} = \{p | l(p) \leq MNH(z, G(V, E)) + e = m(z) + e\} \quad (3)$$

其中, p 表示节点对 z 的某条通路, 它是 E 的子集, 由一些不

^{*}) 国家自然科学基金项目 (60473089, 60003006, 70101006); 国家高技术研究发展计划资助项目 (2001AA121064); 辽宁省科学技术基金 (20032018, 20032019); 教育部现代远程教育工程资助项目。王兴伟 博士, 教授, 主要研究领域为下一代互联网、IP/DWDM 光因特网及移动无线因特网。

构成自环的边组成, $l(p)$ 表示通路 p 的长度, 即此通路上包含所有边的数目, e 被称为路径扩展宽度, $e=0, 1, 2, \dots$ 。

• 波长序号: 光纤上能够承载的波长数目为 W , 波长编号为 $1 \sim W$ 。

• 请求矩阵 T : 表示到达网络的请求, 它只是一个需求量的表示, 但在网络拓扑一定的情况下, 并不是矩阵中所有的请求都能够得到满足。算法的目标是尽量满足 T 的需求。

• 请求数目 m : 表示所有请求的总数。

2.3 问题描述

综合考虑多方面因素, 将多约束条件下的 WA 问题分为四层加以解决, 第一层是波长转换器层 WCL (Wavelength Converter Layer), 第二层是纯路由选择与波长分配层 (Pure-RWAL), 第三层是波长放大器层 (EDFAL), 第四层是功率层 PL (Power Layer), 如图 1 所示。各层通过优化目标函数联系起来。

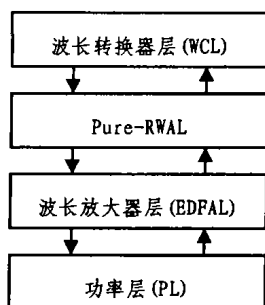


图 1 分层解决机制

• WCL 优化。其优化目标是在尽可能保证网络性能最优的前提下, 使配置的波长转换器尽可能少, 以降低成本。目标函数为:

$$G_1 = F_1(f_{wc}(Cost_{wc}), G_2) \quad (4)$$

• Pure-RWAL 优化。其优化目标是以 WCL 的结果为基础, 根据请求矩阵, 建立最大数目的连接请求。目标函数为:

$$G_2 = F_2(f_{connect}(Num_{connect}), G_3) \quad (5)$$

• EDFAL 优化。其优化目标是以 Pure-RWAL 建立的连接为基础, 在光纤链路上配置波长放大器, 使得配置的波长放大器最少。目标函数为:

$$G_3 = F_3(f_{EDFA}(Cost_{EDFA}), G_4) \quad (6)$$

• PL 优化。其优化目标是在考虑功率平衡的条件下, 以前面三层的配置结果为基础, 对发射器分配功率。由于受到 PL 的约束限制, 因此可能无法完全满足在 Pure-RWAL 建立的连接数。本层目标就是找到能够实际建立的最大连接数。目标函数为:

$$G_4 = F_4(f_{pconnect}(Num_{pconnect})) \quad (7)$$

其中, G_i 和 F_i 为第 i 层的优化结果和目标函数, $i=1, 2, 3, 4$, $Cost_{wc}$ 和 $Cost_{EDFA}$ 分别为波长转换器和波长放大器成本, f_{wc} 、 f_{EDFA} 分别为相应的成本函数, $f_{connect}$ 是以根据建立的最大连接数目 $Num_{connect}$ 为变量的函数, $Num_{pconnect}$ 是在考虑功率平衡下能够建立的最大连接数目而 $f_{pconnect}$ 是针对此变量的函数。

3 基于软计算的 WCL、EDFAL 和 PL 智能算法

分别采用软计算方法 SAA 和 SGA 设计 WCL、EDFAL 和 PL 的智能算法。

3.1 基于 SAA 的智能算法

3.1.1 解的表达

• WCL 采用二进制编码方案: 用 0/1 分别表示相应节点不配置/配置波长转换器。解 S 的长度为网络拓扑的节点数。

• EDFAL 采用浮点型编码方案: 每一条链路拥有 NUM_{EDFAMX} (参见 3.1.4 小节) 个预配 EDFA, S 中每一项代表相应 EDFA 所在链路上的位置。

• PL 采用浮点型编码方案: 解中每一项代表相应连接的初始功率, 取值范围是 $(0, P_{max})$, P_{max} 是发射器的最大功率, 解的长度是请求数目 m 。

3.1.2 邻域结构

• WCL 邻域结构: 采用对 S 中单个/两个节点进行取反操作。前者调整幅度较小, 称之为“细调”; 后者调整幅度较大, 称之为“粗调”。在算法实现中, 先进行“粗调”, 后进行“细调”, 这样既有利于最优解可达, 又能加快收敛, 提高算法执行效率。

• EDFAL 邻域结构: 以 3.1.4 小节初始解模板为基准, 每个 EDFA 的位置均可以进行前后浮动, 浮动范围一般设定为 $(0, LEN_{AVERAGE})$, $LEN_{AVERAGE}$ 为平均配置距离。以此浮动范围为框架, 随机得到 EDFA 配置的新解。

• PL 邻域结构: 同 EDFAL, 仅是浮动范围一般设定为 $(0, P_{max})$ 。

3.1.3 目标函数

• WCL 目标函数。采用如下目标函数:

$$G_1 = a_1 \sum_{0 < i < num} S_i * Cost_{wc} + b_1 * G_2 \quad (8)$$

其中, a_1 和 b_1 是两个权值, 决定成本和网络性能所占的比重, $snum$ 是解的长度, S_i 是解中对应位置 i 的值, G_2 是下一层的运算结果。

• EDFAL 目标函数。采用如下目标函数:

$$G_3 = a_3 \sum_{0 < i < num} check(i) * Cost_{EDFA} + b_3 * G_4 \quad (9)$$

其中, a_3 和 b_3 是两个权值, 决定成本和功率性能所占的比重, G_4 是下一层的运算结果, j 是解中相应 EDFA 位置的序号, $check(j)$ 定义如下:

$$check(j) = \begin{cases} 1 & 0 < S_j \leq j \text{ 所对应链路的长度} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)说明, 如果 j 对应解中位置的值在它所对应链路的长度范围内, 则该 EDFA 作为网络中一个存在的 EDFA 计入成本。

• PL 目标函数。采用如下目标函数:

$$G_4 = Getnum(S) \quad (11)$$

其中, $Getnum(S)$ 是按照解对应的功率分配方案得到的最大连接数。在此, 引入通路增益的概念^[10]。

算法步骤如下:

步 1 求出每一条连接的通路增益, 按照从大到小的顺序排列, 存放到集合 P 中; 初始化成功连接数为 0。

步 2 如果集合 P 不空, 则从 P 中取出一条通路增益最大连接, 转步 3; 如果集合 P 为空, 则返回成功连接数, 算法结束。

步 3 将该连接增加到网络拓扑中。

步 4 判断增加此连接后在该通路上所有光纤段中是否出现光纤或者 EDFA 功率饱和的情况; 如果出现, 则从网络拓扑中去掉该连接; 否则, 将该连接保留在网络拓扑中, 成功连接数增 1。转步 2。

3.1.4 初始可行解的产生

• WCL 初始可行解的产生: 以网络规模为参考。当网络规模较小时, 将对应的解初始化为零; 当网络规模较大时, 采用随机赋值的方法。

• EDFAL 初始可行解的产生:

1) 确定链路最大 EDFA 数目 $NUM_{EDFAMAX}$

$$NUM_{EDFAMAX} = \lceil LEN_{MAXLINE} / (LEN_{AVERAGE} / \alpha) \rceil + 1 \quad (12)$$

其中, $LEN_{MAXLINE}$ 为网络最大链路长度, α 为光纤衰减率。

$$P_{maxline} = \min\{NUM_{max} * P_{max}, P_{NONLIN, max}\} \quad (13)$$

其中, $P_{maxline}$ 是光纤中可以出现的最大信号的总功率, $P_{NONLIN, max}$ 是光纤的最大总功率, NUM_{max} 是所有光纤中能够承载的最大波长数。解的长度为 $L * NUM_{EDFAMAX}$ 。

由于 EDFA 配置数目是按照最长光路的需要配置的, 因此大多数光路不需要这么多的 EDFA, 当冗余的 EDFA 所对应的项值大于链路长度时, 即 EDFA 配置在光路以外, 则表示该 EDFA 实际是不存在的。本层的优化目标就是尽量减少光路上 EDFA 的数目。

2) 确定初始可行解。确定初始可行解实质上就是确定各个 EDFA 初始配置位置, 应该尽量使得 EDFA 的初始配置位置与最优配置位置相接近。

EDFA 初始配置采用逐个链路配置放大器的方法。这种配置方法不考虑链路上的波长信息, 虽然一般能满足信号的传送需求, 但往往不是最优的配置结果。一般将 EDFA 按照作用分为功率放大器、前置放大器和线路放大器。其中, 线路放大器按照 $LEN_{AVERAGE}$ 平均进行配置。由此, 得到初始解模板。

• PL 初始可行解的产生: 与 EDFAL 类似, 不同的是根据实际功率约束条件的限制, 每个解中的对应项值均是 $(0, P_{max})$ 内的随机浮点数。

3.1.5 构造冷却调度表

WCL、EDFAL 和 PL 具有类似的冷却调度表。

• 初始温度的选取。

$$T_{INI} = T_{max} - T_{min} \quad (14)$$

$$T_{max} = a_{11} * P + a_{12} * Numc * Cost_{wc} + a_{13} \quad (15)$$

$$T_{min} = b_{11} * P + b_{12} \quad (16)$$

其中, a_{11} 、 a_{12} 、 a_{13} 和 b_{11} 、 b_{12} 是不同的权值, 根据实际情况设定, P 是网络性能, $Numc$ 是网络的节点总数, T_{INI} 是初始温度。对于 EDFAL 和 PL 的初始温度, 根据实际情况设定。

• 降温规则。采用常系数降温法。

• 停止准则和每一温度的迭代长度规则。均采用基于不改进的规则。其中, 在一个温度下最大可以迭代的长度为 MetroMax, 最大降温次数为 SAMax。需要说明的是, 在温度下降的前半期, 即从 T_0 下降到 $T_{[SAMax/2]}$, 采用“粗调”方式; 在温度下降的后半期, 即从 $T_{[SAMax/2]+1}$ 下降到 T_{SAMax} , 采用“细调”方式。

3.2 基于 SGA 的智能算法

传统的 SAA 执行时自始至终仅保留一个当前解^[11], 在改进的 SAA 中, 至多又设了一个保存当前所经历过的最好解的变量^[12], 但这并不能很好地解决 SAA 本身所存在的某些局限性, 因此将遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 的种群和竞争思想引入到 SAA 中, 构造 SGA。SAA 和 GA 的结合方式是多种多样的。本文以 SAA 为基本框架, 将 GA 运用到寻找邻域解的过程中。在每次产生新解的基础之上生成初始种群, 接着对此进行交叉和变异遗传操作, 然后利用 3.1.3 小节的目标函数进行种群选取, 产生出较优的新种群, 最后从中选出一个最优染色体作为新产生状态返回^[10]以进行其他的模拟退火操作。这样做使 SGA 可以充分利用已有的知识来指导解空间的每一步搜索, 从而进一步提高解的质量。仿真研究表明这样做起到了预期的效果。

4 Pure-RWAL 启发式算法

首先, 根据请求矩阵, 采用扩展的最短路径算法^[10]为各个请求寻找通路, 然后用启发式算法在通路的各链路上分配波长。

4.1 路由选择算法

根据请求矩阵为所有请求节点对选出工作通路。令 $e=0$, 即选择路由的准则是使每一条光通路所占用的物理链路和所经过的 OXC 节点最少(最短路径), 从而使网络总流量最小化。如果不能找到最优解, 则改变 e , 继续求解。

本文采用启发式算法进行求解^[10], 根据链路拥塞率为每对节点分配最不拥挤的通路, 使它们尽量均匀分布在网络拓扑中, 避免出现多条通路占用同一条物理链路而其他链路非常空闲的局面。

4.2 波长分配算法

该算法的运算以 WCL 波长转换器的配置结果为基础。由于经过 WIXC 节点的通路在某种程度上不受波长连续性的限制而所经过的节点中没有 WIXC(全都是 WSXC)的通路受波长连续性限制, 因此, 为了使问题简化, 采用对所有已经分配的光通路进行拆分的方法。所谓拆分就是将途中经过若干个 WIXC 的光通路拆分成相应个途中没有 WIXC 的子通路, 然后以子通路作为波长分配的基本单位, 详见文^[10]。由此, 得到的波长分配结果只是一个初步结果, 这些分配了波长的通路在考虑功率约束情况下是否能够真正建立, 还需要接受 EDFAL 的检验, 其代价函数定义为:

$$G_2 = a_2 * Num_{connect} + b_2 * G_3 \quad (17)$$

其中, a_2 和 b_2 是权值, 根据实际情况设定。

5 仿真研究与结果

设计并实现了一个仿真软件, 针对一些实际的网络拓扑(包括 NSFNET、CERNET 等)^[10]进行了仿真。

5.1 基于 SAA 的智能算法参数评价

下面以 WCL 为例。

• SAMax/MetroMax/温度更新系数与网络性能的关系。从图 2 可以看出, 连接数随着参数 SAMax、MetroMax 以及温度更新系数的增加呈上升趋势, SAMax 影响较明显, 但在一定取值之后渐趋平缓。

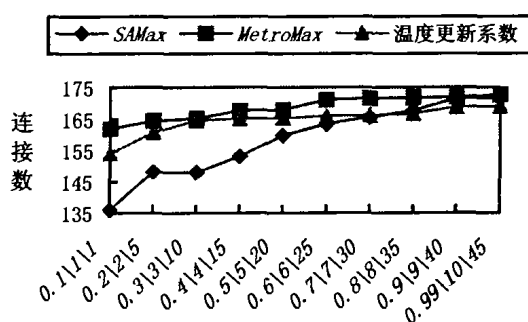


图2 SAMax/MetroMax/温度更新系数与网络性能的影响

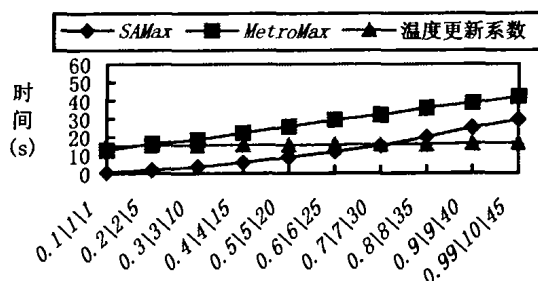


图3 SAMax/MetroMax/温度更新系数与运算时间的关系

(下转第44页)

③ 迭代次数:一般取 1000 次以上。由于神经网络计算并不能保证在各种参数配置下迭代结果收敛,当迭代结果不收敛时,允许最大的迭代次数。

④ 数据转换:可以对输入层各个节点的数据进行转换,提供转换的方法有取对数、平方根转换和数据标准化。下面给出归一化公式(5),使计算过程中 Sigmoid 函数不至于溢出:

$$x' = 0.8x - x_{\min}/x_{\max} - x_{\min} + 0.1 \quad (5)$$

式中: x 代表归一化前训练模式的各分量值; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别表示训练模式分量值中的最大者和最小者; x' 代表归一化后训练模式的分量。

归一化的目的是使训练模式分量值保持在区间 $[0.1, 0.9]$ 之内,使网络计算时在网络规模有限的情况下不会溢出。这种线性变换的归一化并未使模式产生性质上的变形,从而保证信息没有失真。

⑤ 选择学习样本:选取多组对应不同权值时的特征参数值作为学习样本,供网络系统学习。这些样本应尽可能地反映节点各种负载状态。神经网络的学习过程即根据样本确定网络的联接权值和误差反复修正的过程。

⑥ 确定作用函数,通常选择非线性 S 型函数, Sigmoid 调整神经元激励函数形式,一般取 $0.9 \sim 1.0$ 之间。

⑦ 建立系统负载能力评价知识库。通过网络学习确认并保存的网络结构包括:输入、输出和隐节点数以及反映其关联度的网络权值、阈值的组合;即为具有推理机制的负载评价知识库。

⑧ 实际系统中应用。将实际备份节点负载状况特征值转换后输入到已经过训练具有推理功能的 BP 网络中,运用系统负载能力评价知识库处理后得到请求节点与备份节点链路

状态预测值并转换为节点权值。实际系统测试结果又作为新的学习样本输入神经网络,使知识库进一步充实。当实际值与预测值差超过阈值时对 BP 网络重复训练。

结论 基于改进 BP 算法的动态反馈负载均衡策略去除了复杂的管理员人工调节,而动态地根据服务器负载和性能来调节。而且在传统加权轮询算法中,权值仅由服务节点负载状况决定,并没有考虑实际请求发出节点与备份节点间的链路状态,但在 CDN 系统中用户节点与内容备份节点间的链路状态又是非常重要的。而基于 BP 算法的动态负载均衡算法同时考虑了以上两方面因素以及服务请求的不同类型、后台服务器的不同能力,利用神经网络良好的自学习、自适应、非线性逼近能力预测链路状态,并通过将链路状态的预测值转换为权值进行用户请求的动态分配,因此能很好地适应 CDN 负载均衡的要求。

参考文献

- 1 谢希仁. 计算机网络[M]. 北京:电子工业出版社,1999
- 2 戴葵. 神经网络实现技术[M]. 北京:国防科技大学出版社,1998
- 3 王永庆. 人工智能原理与方法[M]. 西安:西安交通大学出版社,1997
- 4 丛爽,赵何. 反向传播网络的不足与改进[J]. 自动化博览,1999,1:25~26
- 5 Stevens W R. TCP/IP Illustrated Volume 1: The Protocols [M]. 北京:机械工业出版社,2000
- 6 Nilsson N J. Artificial Intelligence A New Synthesis [M]. 北京:机械工业出版社,2000
- 7 Cybenko D H. Approximation by superpositions of a sigmoidal function [J]. Math. Control, Signals, Systems, 1989, 2: 303~314
- 8 Tanenbaum A S, Steen M v. Globule: an Open-Source Content Distribution Network [EB/OL]. <http://www.globule.org/>, 2000-2004

(上接第 33 页)

• SAMax/MetroMax/温度更新系数与运算时间的关系。从图 3 可以看出,运算时间随着参数 SAMax 及 MetroMax 的增加而明显增大,而温度更新系数的取值对于运算时间的影响不是特别明显。

同样,对 EDFAL、PL 以及费用参数等也做了类似的评价,详见文[10]。

5.2 基于 SGA 的智能算法参数评价及其同基于 SAA 的比较

对 SGA 涉及到参数及其仿真结果进行了评价并且与基于 SAA 的智能算法进行了对比分析^[10]。

表 1 是对两种算法在相同条件下建立连接数、配置 WC 数和运行时间的比较。比较时,以 SGA 所得结果为基准。从表 1 可以看出,SGA 性能总体上优于 SAA。

表 1 WC 配置结果比较

SGA		SAA
建立连接数之比 (SAA : SGA)	配置 WC 数之比 (SAA : SGA)	运算时间之比 (SSA : SGA)
0.85 : 1	1.4 : 1	0.44 : 1
1.02 : 1	1.2 : 1	0.5 : 1
0.91 : 1	0.83 : 1	0.43 : 1
0.98 : 1	1.6 : 1	0.58 : 1
0.99 : 1	1.17 : 1	0.5 : 1
0.93 : 1	0.75 : 1	0.45 : 1
1.02 : 1	1.14 : 1	0.48 : 1

结束语 本文在保证网络性能的前提下,综合考虑了网络拓扑、波长资源、波长转换器、波长放大器以及功率等多种约束条件,对 WA 问题进行求解。采用分层解决方案,运用软

计算与启发式相结合的方法来具体实现,尽可能满足用户连接请求。此外,设计并实现了一个仿真软件。仿真结果表明,算法是可行和有效的。

参考文献

- 1 Al-Salameh D Y, Farehi M T, Gartner W J, et al. Optical networking. Bell Labs Technical Journal, 1998, 01, 3(1): 39~61
- 2 Shen Gangxiang, Bose S K, Cheng Tee Hiang, et al. Efficient wavelength assignment algorithms for light paths in WDM optical networks with/without wavelength conversion. Photonic Network Communications, 2000, 06, 2(4): 349~359
- 3 Ye Yabin, Zhang Hanyi, Qin Tao, et al. Statistics study of routing and wavelength assignment algorithms in WDM all optical network. Optics Communications, 2000, 11, 185(4-6): 315~320
- 4 Podcameni A, Lopes J. Using a simple algorithm and platform in optical DWDM networks for reaching a satisfactory wavelength-routing assignment. Microwave and Optical Technology Letters, 2001, 03, 28(6): 406~410
- 5 Evripidis Bampis, Rouskas George N. The scheduling and wavelength assignment problem in optical WDM networks. Journal of Lightwave Technology, 2002, 05, 20(5): 782~789
- 6 Ozdaglar Asuman E, Bertsekas Dimitri P. Routing and wavelength assignment in optical networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 04, 11(2): 259~272
- 7 Josue K, Nicolas P, Maurice G, et al. Routing and wavelength assignment of scheduled lightpath demands. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(8): 1231~1240
- 8 王兴伟,程辉,李佳,黄敏. 一种 IP/DWDM 光因特网中的组播路由算法. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(12): 1165~1168
- 9 Maher A, Byrav R, Deogun Jitender S. Routing and wavelength assignment with power considerations in optical networks. Computer Networks, 2000, 32(5): 539~555
- 10 刘聪. IP/DWDM 光因特网中多约束波长分配算法的仿真研究与实现[学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2003
- 11 刑文顺, 谢金星. 现代优化计算方法. 北京: 清华大学出版社, 1999
- 12 Chu Xiaowen, Li Bo, Chlamtac Imrich. Wavelength converter placement under different RWA algorithms in wavelength-routed all-optical networks. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(4): 607~617