

# 基于关键链路预测的动态路由和波长分配算法

单广军<sup>2,3,4</sup>, 朱光喜<sup>1,2</sup>, 刘德明<sup>3</sup>, 李建明<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学电子与信息工程系, 湖北武汉 430074; 2. 武汉光电国家实验室, 湖北武汉 430074;  
3. 华中科技大学光电科学与工程学院, 湖北武汉 430074; 4. 湖北省电力信息通信中心, 湖北武汉 430077)

**摘要:** 光网络中的路由和波长分配 (RWA) 算法是 NP 难问题. 目前的解决方案大多是基于启发式算法或图论的, 其计算复杂度往往随着网络规模的增加呈指数增长, 而且链路阻塞概率建模也十分困难. 本文提出了一种基于“关键链路”预测机制的 RWA 算法, 并综合考虑跳数和空闲波长数的因素, 不仅通过链路层面, 而且也从网络层面来解决 RWA 问题. 实验结果表明我们的算法可以实现很好的流量负载均衡和低的阻塞率, 具有较小的计算复杂度.

**关键词:** 光网络; 路由和波长分配 (RWA) 算法; 计算复杂度; 阻塞率; 负载均衡

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1673-05

## An Dynamic Routing and Wavelength Assignment Algorithm Based on Key Links Forecasting

SHAN Guang-jun<sup>2,3,4</sup>, ZHU Guang-xi<sup>1,2</sup>, LIU De-ming<sup>3</sup>, LI Jian-ming<sup>1</sup>

(1. *Dep. Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;*  
2. *Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China;*  
3. *College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;*  
4. *Information & Communication Center, Hubei State Grid, Wuhan, Hubei 430077, China*)

**Abstract:** It have been proved that RWA (routing and wavelength assignment) algorithm in arbitrary mesh optical networks is a NP-complete problem. Previous works intended to address this problem through heuristics method or graph theory. However, the computational complexity will be increased exponentially with the network size, also, the mathematical modeling for link blocking probability is quite complicated. We propose a novel RWA algorithm that is based on the “Key Link” forecasting mechanism and jointly take the hop number and free wavelength number into account, thus, it not only addresses RWA problem from link level (setting dynamic weight), also from network level (proactively avoiding “key links”). Results show our scheme can achieve better load balance and lower blocking ratio with low computational complexity.

**Key words:** optical network; routing and wavelength assignment (RWA) algorithm; computational complexity; blocking ratio; load balance

## 1 引言

光网络现在已被公认是承载下一代 Internet 网络的基础传输和交换平台. 从而, 路由和波长分配 (RWA) 问题也就成为光网络中资源优化配置研究的一个热点内容. RWA 问题就是如何为到达的业务流量分配合适的路由和波长, 其优化目标是在给定的波长数目和连接请求数目下, 如何选择路由以使占用的资源 (如波长数、波长转换器数目等) 最省, 或者业务被阻塞的概率最小<sup>[1]</sup>. 一般来讲, RWA 问题可分为静态 (SLE) 和动态 (DLE) 两类. SLE RWA 可以用基于整数线性规划的方法求解, DLE RWA 问题的求解则要更复杂, 因为这时的流量是

以随机的方式到达和离开网络的. 为了简化问题的求解, DLE RWA 一般被划分成两个子问题: 路由选择子问题和波长分配子问题, 并使用启发式算法求得问题的局部优解<sup>[2]</sup>.

本文的主要研究目标是设计一种适应于动态流量的自适应 RWA 算法以平衡网络中的流量分布, 实现较低的网络阻塞率.

## 2 研究动机

### 2.1 计算复杂度

DLE RWA 的路由子问题有三个典型的算法策略: 固定路由 (FR)、固定可交替路由 (FAR) 以及动态自适应

路由(DAR). FR和FAR路由策略比较简单,控制开销小,连接建立时间短,不过在网络负载较重的情况下,阻塞概率比较高.DAR路由策略可以使得流量在网络中分布的更均匀,但DAR类的算法会为每对通信节点去计算网络所有可能的路径,其计算复杂度比较高,需要更多的连接建立时间和控制开销,导致低的资源利用率,并且随着网络规模的扩大,这种情况会更加严重.如文献[3]中提出了一种FPLC(Fixed-paths least-congestion)算法,它提前计算每一个源-目的节点对可能路由,并由此计算每一条可能路由上的阻塞概率,虽然FPLC算法可以主动地选择那些最少可能发生阻塞的路由,不过其算法复杂度为 $O(N^2HF^6)$ ,这里 $N, H, F$ 分别代表网络中的节点数、网络中的最大跳数以及波长数目.举个例子,对于具有32条波长、14个节点的NSFNET网络而言,其算法复杂度不小于85亿次,这实际上是难以接受的.

## 2.2 流量模型

大多数RWA算法都是基于Poisson分布的前提假设,实际上,这并不总是适用的.近期的研究表明,目前Internet网络中的流量普遍存在着自相似的特点,而使用Poisson模型来分析每条链路的阻塞概率并不能反映流量突发特性给链路阻塞率带来的影响.而基于自相似过程的数学建模的数学分析都很复杂,引入到算法中去实现也就很困难.

## 2.3 网络拓扑和链路被占用概率

实际应用当中,大多数网络拓扑结构不是规则的,这会影响到每条链路被占用概率的不同.一些链路被占用的概率总是大于其它链路的被占用概率.对于具体的网络拓扑结构,一些链路可能会比网络中其它的链路更为“重要”,如图1的例子.

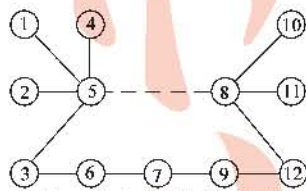


图1 链路重要性的示意图

假设图1中每条链路都只剩下1条波长的残余容量,这时在节点3和节点12间有一个连接请求,若选择路由由3—5—8—12,如再有连接请求位于节点(2,1,4)和(10,11,12)之间,那么它将被阻塞掉.而如果选择路由由3—6—7—9—12,那么在节点(2,1,4)和(10,11,12)之间就还可以再容纳一个潜在的连接请求.对于图1而言,链路 $l_{(5,8)}$ 的重要性要高于链路 $l_{(3,6)}$ .因为一旦链路 $l_{(5,8)}$ 上的资源被耗尽,网络会发生大面积的阻塞.我们称 $l_{(5,8)}$ 这样的链路为网络中的“关键链路”.关键链路由网络拓扑和流量分布决定.对于动态的流量,由于节点对之间的流量分布是不断动态变化着的(一个典型的例子是当遇到节日或突

发事件时,某些链路上将会同时出现众多的并发连接),这给关键链路的判别带来了困难.

## 3 关键链路的判别

基于概率统计模型的自适应RWA算法尽管有着很好的出发点,但由于自相似流量建模的困难导致其在实际应用中可操作性不强.我们认为网络性能的劣化往往是从关键链路开始的,随着网络流量的增加,网络中的关键链路开始增加,如果流量不能及时避开这些关键链路,网络的性能将会迅速下降.要避免或延缓网络性能的迅速劣化,首先必须发现网络中的关键链路,并相应地决定允许哪些流量通过关键链路,而哪些流量应当被阻塞或选择其它路由.关键链路是由流量分布和网络拓扑共同决定的,以下分三步给出对关键链路的定义.

**定义1** LUI(Link Usage Intensity)为某一节点对的所有候选路由经过链路 $L$ 的次数.

LUI实际表示了某一源-目的节点对相对于链路 $L$ 的独立性.可以通过矩阵计算来得到网络中每一条链路的LUI值.以 $(I, J)$ 表示源-目的节点对,以 $(i, j)$ 表示网络中任意的两个相邻节点,对于某一的源-目的节点对 $(I, J)$ ,我们可以为它们之间的 $k$ 个候选路由建立 $k$ 个 $N \times N$ 的矩阵, $N$ 为网络中的节点数目.如果某一条候选路由经过链路 $L_{(i,j)}$ ,则在把矩阵中的对应值标记为1,记为 $L_{(i,j)}^{k,1} = 1$ ,否则标记为0,即 $L_{(i,j)}^{k,0} = 0$ .最后将这些矩阵相加,得到一个矩阵,这个矩阵中的值就表示每一条链路相对于某一节点对 $(I, J)$ 的LUI的值,记 $LUI_{(i,j)}^{\{I,J\}}$ 为链路 $(i, j)$ 相对于节点 $(I, J)$ 的LUI值,则 $LUI_{(i,j)}^{\{I,J\}} = \sum_k L_{(i,j)}^{k,1}$ .可以看出,LUI值越接近 $k$ ,表示源-目的节点对 $(I, J)$ 越依赖于链路 $(i, j)$ ,反之,其相对于链路 $(i, j)$ 的独立性就强.取决于源-目的节点对 $(I, J)$ 对链路 $(i, j)$ 的依赖程度,我们的算法允许某些节点对之间的通信通过关键链路,前提是 $LUI_{(i,j)}^{\{I,J\}} \geq k - \xi$ , $\xi$ 为设定的阈值.

**定义2** LMD(Link Multiplex Density)为网络中所有源-目的节点对的候选路由经过链路 $L$ 的次数.

LMD实际表示了某一条具体链路相对于整个网络的重要性.记 $R_{(I,J)}^k$ 为源-目的节点对第 $k$ 候选路由,则:

$$\begin{cases} R_{(I,J)}^k = 1, & \text{if the } k\text{th route traversing } L \\ R_{(I,J)}^k = 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

记 $LMD_{(i,j)}$ 为链路 $L_{(i,j)}$ 的LMD值,那么有:

$$LMD_{(i,j)} = \sum_k R_{(I,J)}^k, 1 \leq LMD_{(i,j)} \leq kN(N-1)/2 \quad (2)$$

由定义 1 和定义 2,可推导出某一条链路的 LMD 值是网络中所有可能源-目的节点在该链路上 LUI 值的累加,即:

$$LMD_{(i,j)} = \sum_{(l,l' \in N)} LUI_{(i,j)}^{(l,l')} \quad (3)$$

可以发现 LMD 的值实际上由网络拓扑结构和  $k$  的取值范围所决定,因此一旦候选路由数  $k$  和网络拓扑被确定,LMD 值就可预先被计算出.给定一个阈值  $\delta$ ,如果  $LMD_{(i,j)} \geq \delta$ ,我们可以认为链路  $L_{(i,j)}$  比其它链路对网络更具有影响力.  $1 \leq \delta \leq (k \cdot N(N-1))/2$ ,  $N$  为网络中的节点数.

**定义 3** 如果一条链路符合如下条件:  $W_f \leq \lambda$ ,  $V_e \geq v$ ,  $LMD_{(i,j)} \geq \delta$ ,则定义其为关键链路.这里  $W_f$  为该链路上的空闲波长,  $V_e$  为该链路上的波长耗尽速度,  $\lambda$ 、 $v$  分别为  $W_f$  和  $V_e$  的阈值.

每隔时间周期  $T$ ,对链路上所剩余的波长数目采样一次,从而可以根据拉格朗日插值法<sup>[4]</sup>确定  $V_e$  值,单位为波长数/秒,  $V_e$  值也就每隔时间  $T$  做周期性更新.

从关键链路的定于可看到,一条链路是否成为关键链路是由两方面因素决定的,一方面来自静态因素,如网络拓扑结构和备选的路由数目;另一方面来自动态因素,如波长耗尽速度,链路上剩余空闲波长等.其实波长耗尽速度等主要受流量分布的影响,但如前所述,如果按照概率统计建模的方法直接估计每条链路上资源可能被占用的概率来作为 RWA 算法决策的依据,其计算复杂度将相当大.我们避开复杂的概率统计建模,转而利用流量分布特性的作用结果——波长耗尽速度来估计下一时刻的链路使用情况,并结合网络拓扑等因素,选择避开最可能发生阻塞的那些链路,以达到降低算法复杂度和提高网络资源利用率的目的.

## 4 算法描述

### 4.1 算法描述

在给出了对关键链路的定义后,下面给出关于动态权重的定义.

定义  $W_f/H^{\beta}$  为附加给一条路由的动态权重,其中  $W_f$  表示一条路由所经全部链路中具有最小空闲波长的数目,  $H$  表示一条路由的总跳数,  $\beta$  是影响因子,可以通过调整  $\beta$  的值来控制选路策略.

在完成了对关键链路和动态权重的定义之后,我们设计了一个称为 KLDW(Key Links Forecast with Dynamic Weight)的算法.该算法的流程如图 2 所示.

### 4.2 算法分析

该算法的基本思想是首先尽量地避免经过关键链路.算法根据关键链路的判决条件,剔除源-目的节点对候选路由中包含关键链路的那些路由,但也设定了

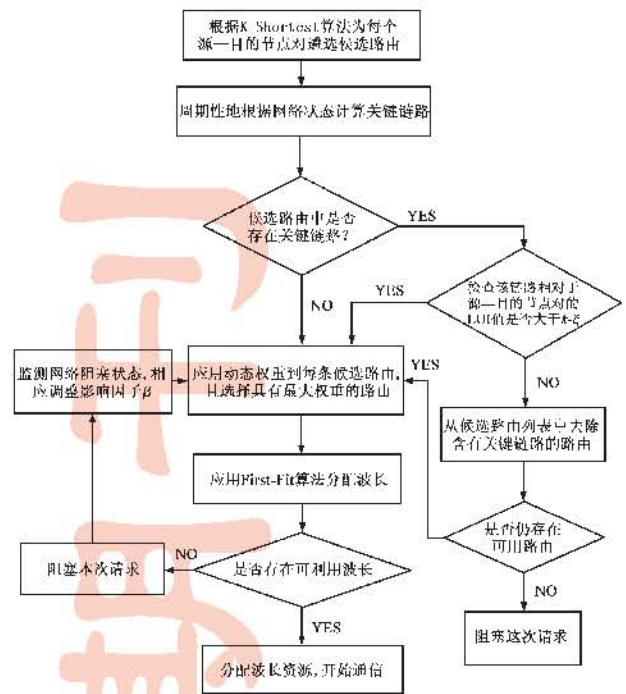


图2 KLDW算法流程图

一个判决条件:  $LUI_{(i,j)} \geq k - \xi$ ,如果一条关键链路对于某个源-目的节点对的 LUI 值大于或等于  $k - \xi$ ,则说明该源-目的节点对非常依赖于此关键链路,算法会仍然允许该源-目的节点对间的通信通过此关键链路.这样就避开了可能在那些关键链路上形成过重的流量负载,以达到流量负载均衡的目的.另一方面,该算法不根据流量概率统计分布去求每一条链路的可能占用概率,而是通过对链路上的空闲波长数目进行间隔取样来求得波长的耗尽速度,我们的算法复杂度只取决于单位时间内取样点的数目,为  $O(T)$ ,  $T$  为取样时间间隔.

其次,该算法也将通过动态权重的设置及时调整路由策略,从而尽量避免在网络中形成关键链路.

令  $W_n$  表示为第  $n$  条路由上的最小残留空闲波长数,  $H_n$  表示为第  $n$  条路由的跳数.假设:

$$\frac{W_1}{H_1} > \frac{W_2}{H_2} > \dots > \frac{W_x}{H_x} > \dots \quad (4)$$

在所选择的路由应是最具有最小流量负载的算法思想下,那么也就是这条路由应当比其它别的路由具有更多的残留空闲波长.设第  $x$  路由在式(4)中具有最大的残留空闲波长,则根据最小流量负载的算法思想,应使得:

$$W_1/H_1^{\beta} < W_x/H_x^{\beta} \quad (5)$$

$$\text{即, } \beta < \frac{\lg(W_x/W_1)}{\lg(H_x/H_1)} \quad (6)$$

令  $A = (\lg(W_x/W_1))/(\lg(H_x/H_1))$ ,则式(6)成为

$$\beta < A \quad (7)$$

以 16 波长, 最多 5 跳的光网络为例, 当  $W_x = 16, W_1 = 15, H_x = 5, H_1 = 1$  时,  $A$  达到最小值 0.04, 而当  $W_x = 16, W_1 = 13, H_x = 5, H_1 = 4$  时,  $A$  到达最大值 0.93. 也就是说当  $\beta < 0.04$  时, 算法会为到达的连接请求选择最小负载的路由, 而当  $\beta > 0.93$  时, 算法不会为到达的连接请求选择最小负载路由. 当  $0.04 < \beta < 0.93$  时, 算法会有选择地为连接请求选择负载较小的路由.

另一方面, 当需要为到达的连接请求选择最短路径的场合, KLDW 算法考虑为连接请求选择具有最小跳数的路由. 可以得出:

$$W_1/H_1^2 > W_x/H_x^2 \quad (8)$$

$$\text{即, } \beta = \frac{\lg(W_x/W_1)}{\lg(H_x/H_1)} = A \quad (9)$$

在上述应用场合, 当  $W_x = 3, W_1 = 16, H_x = 1, H_1 = 5$  时  $A$  达到极小值 1.04, 而当  $W_x = 1, W_1 = 16, H_x = 4, H_1 = 5$  时,  $A = 12.43$ . 也就是说, 当  $\beta > 12.43$  时, 算法将会为所有到达的连接请求选择最短的路由, 当  $1.04 < \beta < 12.43$  时, 算法会为部分的连接请求选择最短路由.

可以看出动态权重  $W_x/H_x^2$  从两个方面对 RWA 选择策略施加影响.  $\beta$  值固定的情况下, KLDW 算法将由最小残留空闲波长数和路由的跳数来决定. 而不同  $\beta$  的取值将影响 KLDW 算法的路由选择策略, 即当网络中剩余波长数目较少时增加选取具有较低负载路由的概率. 而当网络中剩余波长数目较多时, 则倾向于选取较短的路由, 算法具体实现的做法是事先将  $\beta$  分立为一系列离散的值, 然后根据网络资源的状况调整去  $\beta$  在该一系列离散值中取值.

## 5 数值仿真

以 14 节点的 NSFNET 网络作为算法的仿真平台, 其拓扑结构如图 3 所示. 该网络拓扑由 4 条光纤, 每条光纤 16 波所组成, 其中节点 2, 3, 5, 10, 13 具有全波长转换功能<sup>[5]</sup>. 为了比较我们算法的性能, 选取经典的 FAR 算法和 FPLC 算法作为比较对象. 网络流量模型采取泊松分布. 仿真工具为 OPNET 结合 MATLAB.

从上一节的算法分析中可知,  $\beta$  的取值可以影响选路算法以何种概率选取较短路由或较少负载路由. 令  $R$  为网络中剩余空闲波长链路数目和总的波长链路数

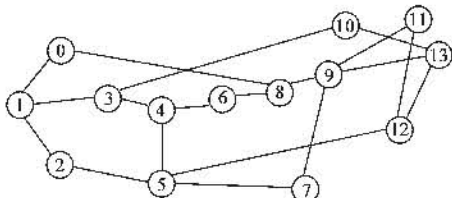


图3 14节点的NSFNET网络拓扑

目的比值, KLDW 算法将根据  $R$  的值对  $\beta$  进行相应调整. 实验表明, 为了实现 KLDW 算法的良好性能表现, 将  $R$  分成 5 个等级就已能够满足要求了.  $\beta$  的具体取值如下:

$$\beta = \begin{cases} 8, & R < 0.2 \\ 6, & 0.2 \leq R \leq 0.5 \\ 3, & 0.5 \leq R \leq 0.6 \\ 1, & 0.6 \leq R < 0.7 \\ 0.2, & R \geq 0.7 \end{cases} \quad (10)$$

图 4 是关于阻塞性能的比较. 可以看到采用 First-fit (FF) 原则的 FAR 算法当流量负载不高 (不超过 210Erlang) 时有着最小的阻塞率, 这是因为 FAR 算法采用的是固定加备选路由的方式, 波长分配采用首次适应原则, 其优势是算法执行简单, 且在我们的仿真中波长信道设置的较多 (64 条波长通道), 所以在低流量负载时, FAR-FF 算法执行的效果较好. 当负载超过 210Erlang 时, FPLC 算法的表现将优于 FAR-FF 算法, 这是因为, 第一, FAR-FF 总是试图将流量分布于那些最短的路径上; 第二, 随着负载的增加, 最短和次短路径上的波长资源会越来越少, 这两点因素综合起来, 非常容易在网络中形成“关键链路”, 自然随着流量负载的不断增加, 其阻塞率也就增加了. 而作为一种自适应算法的 FPLC 算法考虑到了流量负载平衡的问题, 所以在较高流量负载的情况下, 其表现优于 FAR-FF 算法. 相对于 FAR-FF 和 FPLC 算法, KLDW 算法在流量负载不断增加的情况下, 其阻塞率是最小的. 这是因为我们的算法从两方面入手来均衡流量负载在网络中的分布: 一是从网络层面策略性地回避网络中的关键链路, 二是从链路层面引入了动态权重针对网络资源状况来调整路由和波长分配的选择策略.

图 5 展示了平均跳数与负载的关系. 毫无疑问, FAR-FF 算法在所有算法中具有小的平均跳数, 因为它总是趋向于选择最短路由或次短路由. 当负载低于 210Erlang, KLDW 算法的平均跳数要少于 FPLC 算法, 不过随着流量负载的持续上升, 这种情况将发生逆转. 这是因为随着流量负载的增加, 网络中将越出现来越多的关键链路, 为了避开经由关键链路而实现流量均衡, KLDW 算法不得不经历更长的路由. 另外一个影响因素来自于动态权重中的影响因子  $\beta$ , 在高流量负载的情况下,  $\beta$  会自适应地趋向较小值, 从而以较长的跳数换取较低的阻塞率性能.

图 6 是链路利用率的比较, 可以看出 KLDW 算法的链路利用率是三种算法中最高的, 对于同样的网络资源, 高的链路利用率自然导致低的阻塞率, 这也从另一个方面说明了我们的算法在降低网络阻塞率的优势.

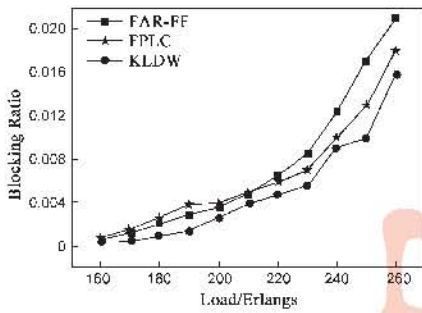


图4 阻塞性能

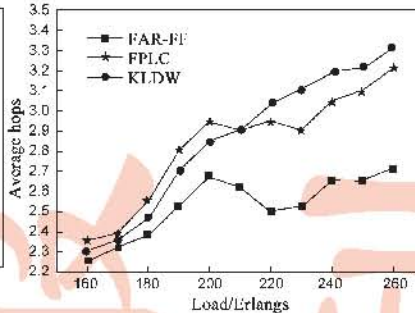


图5 平均跳数

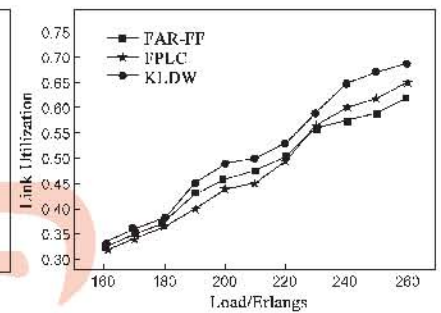


图6 链路利用率

## 6 结束语

本文提出了一种称之为 KLDW(Key Links Forecast with Dynamic Weight)的 RWA 算法.通过引入关键链路的概念,该算法不需要通过复杂的数学建模就可以实现较好的网络阻塞性能和流量负载平衡,具有较小的计算复杂度.

### 参考文献:

- [1] Christodouloupoulos K, Manousakis K, Varvarigos E. Comparison of routing and wavelength assignment algorithms in WDM networks[A]. Proc IEEE Global Telecommunications Conference[C]. New Orleans, USA, 2008. 1 - 6.
- [2] 肖诗源,刘贤德,金鑫.一种波长转换受限 WDM 网络的动态路由和波长分配算法[J].电子学报,2005,33(6): 1140 - 1142.  
Xiao Shiyuan, Liu Xiande, Jin Xin. An algorithm for dynamic routing and wavelength assignment in WDM network with limited wavelength conversion[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1140 - 1142. (in Chinese)
- [3] Ling L, Somani A K. Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(5): 779 - 786.
- [4] Saad M E M, Zhi-Quan L. A Lagrangean decomposition approach for the routing and wavelength assignment in multifiber WDM networks[A]. Proc. IEEE Global Telecommunications Conference[C]. Taipei, 2002, Nov. 2002. 2818 - 2822.
- [5] Xiaowen C, Bo L, Chlamtac I. Wavelength converter placement under different RWA algorithms in wavelength-routed all-optical networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(4): 607 - 617.

### 作者简介:



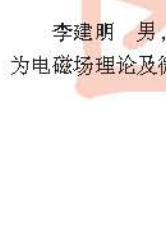
单广军 男,华中科技大学电子与信息工程系博士生,光电子科学与工程学院讲师.研究方向为下一代光互联网络体系结构及光子器件.  
E-Mail: Laoniu99@126.com



朱光晔 男,华中科技大学电子与信息工程系教授,博士生导师.武汉光电国家实验室光通信及智能网络研究部主任.研究方向为无线通信系统及信息技术.



刘德明 男,华中科技大学光电子科学与工程学院教授,博士生导师.华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室主任.研究方向为智能光网络及光电子器件.



李建明 男,华中科技大学电子与信息工程系博士生,研究方向为电磁场理论及微波技术.