

一种波长转换范围受限全光网中的波长分配算法

秦浩, 张 磊, 刘增基

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 本文研究了波长转换范围受限全光网中的动态路由和波长分配问题, 提出了一种固定备选路由条件下新的路由和波长分配算法. 算法引入了波长相关性的概念, 用波长关联权值定量描述了各路由的前后链路上不同波长之间的相互依赖关系. 在建立连接时首先使用那些依赖性强, 对其他路由影响小的波长, 从全局的角度出发选择最优的路由和波长分配方案. 计算机仿真表明, 本文算法能够适用于稀疏网络和网状网, 在均匀业务强度或者大部分业务量来自于长跳路由的情况下, 本文算法能够显著降低网络阻塞概率和使用的波长转换器数目, 有效提高系统性能.

关键词: 全光网; 范围受限波长转换; 路由和波长分配算法

中图分类号: TN929.11; TN915.02

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2003) 05-0717-04

Dynamic Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Network with Limited-Range Wavelength Conversion

QIN Hao, ZHANG Shi, LIU Zengji

(National Key Lab. On Integrate Services Network, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: A dynamic routing and wavelength assignment algorithm in all-optical network with limited-range wavelength conversion was proposed. The correlation of different wavelengths on different links in all possible routes is described by wavelength weight. Attempts are made to assign wavelengths on each candidate route using shortest-path algorithm based on wavelength weight and choose the best as its route and wavelength assignment scheme. Numerical results obtained for NSFNET and 12-node ring show that our algorithm can greatly reduce the blocking probability and the number of converters needed under uniform traffic or traffic dominated by larger hop routes.

Key words: all-optical network; limited-range wavelength conversion; routing and wavelength assignment

1 引言

路由和波长分配 (RWA, Routing and Wavelength Assignment) 问题^[1,2]可以描述如下: 给定一组需要在全光网络中建立的连接, 为这些连接寻找路由和分配波长, 从而使全光网络运行的某些参数或性能指标最优或者相对较优. 当这些连接请求随机到达或离开时, 相应的 RWA 问题称为动态 RWA 问题, 动态 RWA 问题中需要优化的性能指标是阻塞概率.

全光网中节点间的全光连接称为光路. 当全光网没有波长转换能力时, 由于波长一致性约束, 任何一条光路上的所有链路必须分配相同的波长, 这样的光路称为 WP (Wavelength Path)^[1]. 而配置了全范围波长转换器的全光网则没有波长一致性限制, 可以在光路的不同链路上使用不同的波长, 这样的光路称为 VWP (Virtual Wavelength Path); 波长转换器可以有效提高网络性能, 但是价格昂贵. 目前实用的是转换范围受限的波长转换器 (LWC, Limited-range Wavelength Converter), 这类波长转换器只能将输入波长转换到几个输出波长上, 它削弱了

WP 网络的波长一致性约束, 但是不能完全消除波长一致性约束. 此外, 使用 LWC 转换波长会引入失真和时延.

对于 WP 网络, 已提出了大量的 RWA 算法^[3,5,6]以及这些算法在实际网络中的使用^[2,4], 但是对于配置 LWC 的全光网络, 很少有相应的 RWA 算法^[8,9], 本文研究配置 LWC 的全光网的动态 RWA 问题, 提出了备选路由条件下基于波长相关权值的路由和波长分配算法 (LWCW, Least Wavelength Correlative Weight), 并给出了计算机仿真结果和算法性能.

2 问题描述

给定全光网络 $G = (V, E)$, 其中 V 表示节点集合, $N = |V|$, E 表示光纤链路的集合, $M = |E|$, $\lambda = \{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w \}$, 表示网络中所有可用的波长集合, $W = | \lambda |$. $l \subseteq E$ 表示链路 l 上的可用空闲波长集合. $P(s, d)$ 表示源节点 $s \in V$ 和宿节点 $d \in V$ 之间预先计算好的无公共链路的备选路路径集合, 源宿节点 (s, d) 之间的连接请求按照泊松分布到达, 到达率为 $B(s, d)$, 当网络不能为到达连接请求建立光路时, 该

收稿日期: 2002-07-15; 修回日期: 2002-12-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 90104012)

连接请求将立刻损失;已建立连接的保持时间服从负指数分布,均值为 1. 给定路径 p , s_p 和 d_p 分别表示路径 p 的源节点和宿节点, $L(p)$ 表示组成路径 p 的链路集合;定义 $Adj(p, l)$ 为所有与 p 有公共链路 l 的路径集合, 并且 $Adj(p, l)$ 中所有路径的源宿节点均与 p 的源宿节点不同, $Adj(p, l)$ 可以由式 (1) 描述*.

$$Adj(p, l) = \{ q \mid l \in L(p) \cap L(q), p \notin \tilde{P} \setminus P(s_p, d_p) \},$$

其中 $\tilde{P} = \bigcup_{s, v, d, v'} P(s, d)$ (1)

设 LWC 的转换为 ϕ , 即输入波长 λ_i 只可以转换为输出波长 $\lambda_o \in [\max(\lambda_i, \lambda_{i-1}), \min(\lambda_i, \lambda_{i+1})]$, 函数 $\phi(\lambda_i)$ 表示链路 l 上的可用空闲波长集合经过 LWC 转换后的波长集合; $\phi(v)$ 表示波长 v 经过 LWC 转换后的波长集合, 同时也可以用来表示能够经由 LWC 转换为波长 v 的波长集合. 使用 LWC 会引入信号失真, 尤其是在一条光路上多次级联使用波长转换器将导致信号失真急剧增加, 因此在为连接请求分配路由和波长时, 应该尽可能的避免使用波长转换器, 也就是说尽可能的遵守波长一致性约束, 只在必须的情况下使用波长转换器. 定义 (u, v) 为将波长 u 转换到波长 v 的代价, 该值反映信号经过 LWC 的失真程度. 当波长 u, v 之间不能相互转换时, $(u, v) = 1$; 当 $u = v$ 时, $(u, v) = 0$. 波长 u 和 v 相差越大, 两者之间的转换引入的失真就越大, (u, v) 也就越大. (u, v) 可以用来尽可能的减少建立连接时波长转换器的使用数目.

给定某 k 跳路径 $p = \{ l_1, l_2, \dots, l_m, \dots, l_k \}$, 为简单起见下文一律使用 λ_m 代替 λ_{l_m} . 定义 $\lambda_m = \{ \lambda_{m-1}, \dots, \lambda_m, 1 < m < k$, 其中 $\lambda_1 = \lambda_1$, 显然如果 $\exists \lambda_k = \lambda_{k-1}$, 将无法在路径 p 上建立新的连接. 定义 $\lambda_m = \{ \lambda_{m+1}, \dots, \lambda_m, 1 < m < k$, 其中 $\lambda_k = \lambda_k$. 经过上述两个计算后, λ_m 是链路 l_m 上空闲而且可以被用来建立连接的波长集合, $\lambda_m \setminus \lambda_m$ 则表示的是虽然在链路 l_m 上空闲, 但是由于波长转换范围受限而不能被路径 p 使用的波长集合, 路径 p 上能够建立的光路数 $f(p) = \min_m |\lambda_m \setminus \lambda_m|$. $F(s, d) = \sum_{q \in P(s, d)} f(q)$ 表示任意源宿节点 s, d 之间一共可以建立的连接数. 对于随机到达的连接请求 (s, d) , RWA 问题求解的是为其寻找一条最优的路径 $p \in P(s, d)$ 以及 p 上各链路上应该分配的波长, 从而使得阻塞概率最小, 同时还要保证建立连接过程中使用的波长转换次数尽可能少.

3 算法描述

3.1 波长相关性

由于波长转换范围受限, 不仅相邻链路存在着一定程度的相互依赖关系, 不相邻的链路也存在着相互依赖的关系, 在波长分配的过程中, 必须考虑这种依赖关系. 当某些波长对前跳链路可用波长集合依赖性较小时, 就可能成为波长分配中的关键因素, 分配不当将直接导致以后到达的连接请求阻塞. 设链路 (A, B) 、 (B, C) 和 (C, D) 可用的空闲波长分别是 $\{ \lambda_2, \lambda_3 \}$ 、 $\{ \lambda_3, \lambda_4 \}$ 和 $\{ \lambda_4, \lambda_5 \}$, $\lambda_1 = 1$, 当到达一个连接请求 (A, D) 时, 如果我们在 (A, B) 上为其分配 λ_2 , 则在 (B, C) 上只能分配 λ_3 , (C, D) 上只能分配 λ_4 ; 但是如果我们在 (A, B) 上为其

分配 λ_3 , 则在链路 (B, C) 上有两个波长可以选择; 也就是说后跳链路上的波长分配依赖于前跳链路如何分配波长, 而无论链路是否相邻. 另外如果我们为连接请求 (A, D) 分配波长依次为 $\{ \lambda_3, \lambda_3, \lambda_4 \}$, 那么在当前连接保持的条件下, 源宿节点对 (A, D) 上新到达的连接请求将阻塞, 而事实上路由 (A, D) 能够建立两个连接, 这里 (B, C) 上的 λ_3 就是一个关键波长. 一般说来, 对前跳波长依赖性强的波长其关键程度就弱一些, 分配波长时应该首先分配那些依赖性强的波长, 否则就可能因为前跳波长的占用使这些波长即使空闲也不可.

$$(p, l_m, v) = \begin{cases} 1/|\lambda_m \setminus \lambda_m|, & v \in \lambda_m, m = 1 \\ \frac{(p, l_{m-1}, u)}{|\lambda_{m-1} \setminus \lambda_{m-1}|}, & v \in \lambda_{m-1}, 1 < m < k \\ u \in \lambda_{m-1}, & v \notin \lambda_{m-1}, m = 1 \dots k \end{cases} \quad (2)$$

定义 (p, l, v) 为路径 p 中链路 l 上的波长 v 的波长关联权值, 式 (2) 给出了 (p, l, v) 的计算方法. 从中可以看出 (p, l_{m-1}, u) 被平均分配到链路 l_m 上的波长集合 λ_m 中, (p, l_m, v) 则是前跳链路上波长集合 λ_{m-1} 中每个波长的关联权值的加权和, 从总体上反映了 v 对前跳链路上可用波长集合的依赖程度和关键程度. 该值越大, 对前跳波长占用与否的依赖就越小, 其关键程度也就越高. 我们用图 1 所示的例子来说明, 图中虚线表示属于集合 $\lambda_m \setminus \lambda_m$ 的波长, 这些波长不参与波长关联权值的计算; 点线表示可用的波长转换. 其中第三跳链路上 λ_4 依赖于第二跳的 λ_3 和 λ_5 , 其关联权值为 $(p, l_2, \lambda_3) + (p, l_2, \lambda_5)/2 = 3/4$; 而 λ_6 的关联权值为 $(p, l_2, \lambda_5)/2 = 1/4$, λ_6 能否用来建立连接将完全依赖于前跳 λ_5 是否已经使用.

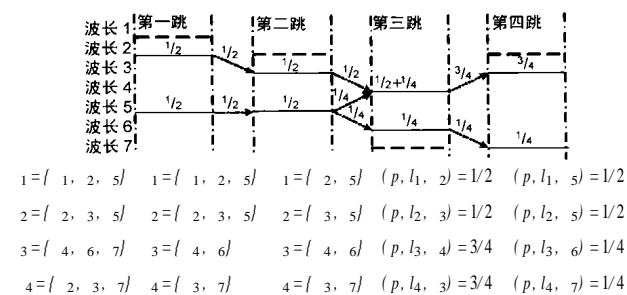


图 1 四跳路由, $\lambda_1 = 1$, 波长关联权示例

3.2 LWCW-RWA 算法

LWCW-RWA 算法试图描述给定路由的前后链路上各波长之间的相互依赖关系以及其他与之有公共链路的路由对公共链路上波长的需求关系, 在建立连接时首先使用那些依赖性最强, 对其他路由影响最小的波长, 最后从全局的角度出发选择最优的路由和波长分配方案.

给定路径 p , 对 $l \in L(p)$ 上的每个波长 v 分配权值 (p, l, v) , 其中当 $v \in \lambda_l$ 时有 $(p, l, v) = 0$. 波长权值 (p, l, v) 由如下三部分的权值组成. (1) 波长分配顺序权值 $\phi(v)$, 该值用于指定波长分配顺序策略, 如随机分配波长. 对于 first-fit

* 设 A, B 为两个集合, 则 $A \setminus B = A - B$

波长分配策略来说,可以简单的设定 $(v) = v$. (2) 波长自相关权值 $S(p, l, v) = (p, l, v)$, 该部分权值反映了路由 p 中链路 l 上波长 v 在 p 中的关键程度. 在波长分配过程中, 设置自相关权的目的是尽可能的首先使用那些依赖性强的波长. (3) 波长互相关权值 $C(p, q, l, v)$, 这里 p, q 满足 $l \in L(p) \cap L(q), q \in P(s_p, d_p)$; 该部分权值反映了与 p 有公共链路 l 的路径 q 在链路 l 上对波长 v 的需求程度, 设置该权值的目的是在给 p 分配波长时尽可能的减小对其他路径的影响. $C(p, q, l, v)$ 由式(3)给出, 在式(3)中我们用 $f(q)$ 在 $F(s_q, d_q)$ 中占据的比例对 (q, l, v) 进行加权, 从而精确的描述路径 q 对链路 l 上波长 v 的需求.

$$C(p, q, l, v) = \frac{(q, l, v) f(q)}{F(s_q, d_q)} \quad l \in L(p) \cap L(q), q \in P(s_p, d_p) \quad (3)$$

$$(p, l, v) = f(v) + f_s B(s_p, d_p) S(p, l, v) + f_c \sum_{q \in Adj(p, l)} B(s_q, d_q) C(p, q, l, v) \quad (4)$$

波长总权值由式(4)给出, 其中 f, f_s 和 f_c 分别是三项权值的加权系数, 它们的大小分别反映了各部分权值在波长总权值中的重要程度, 其中 (v) 的作用只是在其他权值完全相同的情况下决定波长分配顺序, 因此 f 应该足够小. 在波长权值的基础上我们使用文[7]中提出的扩展分层图技术为路径 p 分配波长, 首先为路径 p 做相应的扩展分层图, 设置分层图中代表波长的边的权值为相应 (p, l, v) , 分层图中转换边的权值设置为 $f(u, v)$, 其中 f 是波长转换成本的加权系数; 该值应该足够大, 否则在建立连接时不能保证波长转换器数目最少. 在分层图上使用 Dijkstra 算法计算最短路径, 该最短路径实际上代表着路径 p 上的最优波长分配方案; 定义 p 的路径权值 (p) 等于沿分层图最短路径上各波长边和转换边的权值总和. 对于随机到达的连接请求 (s, d) , 对所有 $p \in P(s, d)$ 计算 (p) , 选择满足 $(p^*) = \min_{p \in P(s, d)} (p)$ 的路径 p^* 及其相应的波长分配方案为连接请求 (s, d) 建立呼叫.

4 仿真与计算

为了说明本文算法性能, 我们从上文提出的 LWCW-RWA 算法(记为 SR+CR+AR 算法, 其中 SR 表示自相关权, CR 表示互相关权, AR 表示适应性路由策略)出发, 给出只考虑其中某些方面而得到的三个 RWA 算法作为基准算法. (1) 不考虑波长关联权, 即 $f_s = f_c = 0$. 采用 first-fit 路由(记为 FR)选择策略, 即按序扫描备选路由集合, 选择其中第一条能够在其上分配波长并建立连接的路径. 记为 NR+FR 算法(NR 表示不考虑相关权). (2) 不考虑波长关联权, 即 $f_s = f_c = 0$. 采用 3.2 节的路由选择策略, 即选择备选路由集合中路径权值最小的路径. 记为 NR+AR 算法. (3) 考虑波长自相关权, 即 $f_c = 0$. 采用 3.2 节的路由选择策略. 记为 SR+AR 算法.

选取著名的 NSFNET 和 12 节点的环网进行了计算机仿真来说明本文算法的性能. 这里链路是对称的, 即如果存在一条节点 i 到 j 的链路, 则必然存在 j 到 i 的链路. 采用文[10]中的业务量生成公式 $B(s, d) = r^{H(s, d)-1} T$ 来生成业务需求矩阵, 其中 $H(s, d)$ 是 $P(s, d)$ 中最短的路径长度, T 表示单跳

路由上的业务强度. 当 $r = 1$ 时表示均匀业务量分布; $r = 0.5$ 时表示大部分业务量来自于短跳路径, 此时各链路上波长的相互依赖程度相对较低; $r = 2$ 时表示大部分业务量来自于长跳路径, 此时各链路上波长的相互依赖程度相对较高. 下面给出的所有曲线都是在 $W = 16, f = 10^{-7}, f_s = f_c = 10^{-2}, f = 1$, 两条无公共链路的备选路由条件下得到的. 本文中阻塞概率 P_B 和仿真过程中波长转换器的使用次数 N 来衡量算法性能.

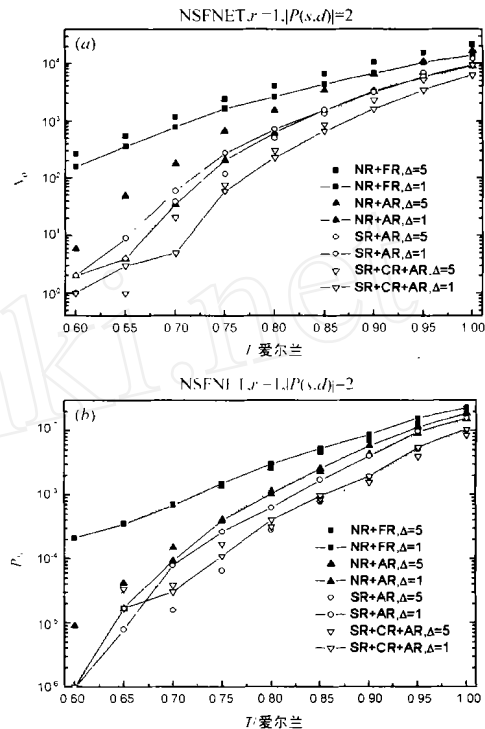


图 2 NSFNET 中 $r=1$ 条件下不同算法的性能曲线

图 2 给出了 NSFNET 中均匀业务强度条件下应用不同算法得到的性能曲线. 从图中可以看到, 使用本文提出的算法可以有效的降低网络整体阻塞概率和波长转换器的使用次数, 随着 RWA 算法中综合考虑的因素越来越多, 网络性能逐步改善, 因此使用 SR+CR+AR 算法获得了最好的性能. 另外随着波长转换度的增加, 网络阻塞概率随之降低, 但是波长转换器的使用次数则有所增加. 图 3 给出了 $r=2$ 时两种网络应用不同算法得到的性能曲线. 可以看到无论是稀疏网络还是网状网, 本文算法都能够有效降低 P_B 和 N , SR+CR+AR 算法仍然是最优的算法, 尤其是在网络负载较轻的情况下, 该算法的性能优势相当明显. 另外无论是哪种网络, 当 $r = 1$ 时, SR+AR 算法的性能接近于 NR+AR 算法的性能; 当 $r = 5$ 时, SR+AR 算法的性能则更加接近于 SR+CR+AR 算法的性能. 这是因为当 r 比较小时, 前后链路上波长之间的相互依赖程度高, 各路由上的波长分配相互影响较大, 仅仅考虑波长的自相关权值不能准确地反映波长之间的相互依赖关系; 而增大 r 则削弱了波长之间的相互依赖关系, 各路由上的波长分配之间的相互影响相对较小.

图 4 给出了 $r=0.5$ 时 12 节点环网应用不同算法得到的

性能曲线。从图中我们可以看到 SR + CR + AR 算法对于网络阻塞性能的提升很小,相对于 NR + AR 算法使用的波长转换器的次数却大大增加。这是因为大部分的业务量来自于短跳路径,各链路上不同波长之间相互依赖程度很低,波长之间的相互关联也很少,此时本文提出的波长相关性也不再适用。NSFNET 网络下的情况与环网相同。

计算机仿真表明,本文算法能够适用于稀疏网络和网状网。使用 SR + CR + AR 算法能够显著降低网络阻塞概率和使用的波长转换器数目,有效提高系统性能;不过 SR + CR + AR 算法的复杂度要远远高于 SR + AR 算法,因为 SR + CR + AR 算法要考虑

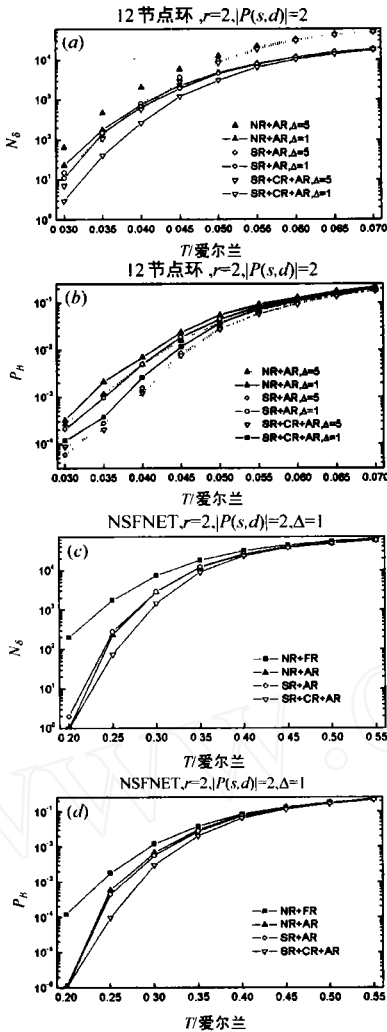


图3 $r = 2$ 时不同网络下应用不同算法的性能曲线

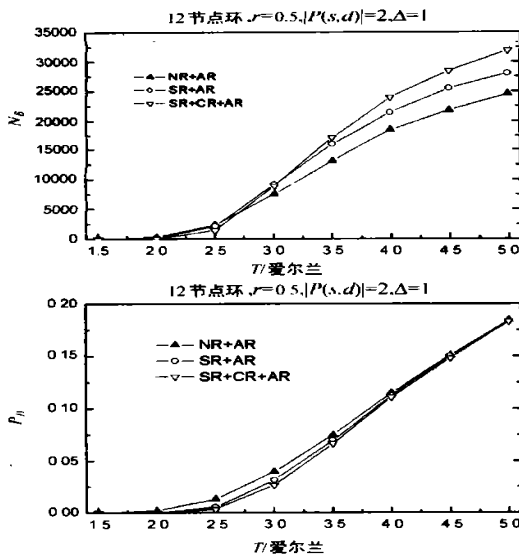


图4 $r = 0.5$ 时环网应用不同算法的性能曲线

所有与给定路由有公共链路的路由。在 $r > 1$ 的情况下,如果比较小,应该使用 SR + CR + AR 算法以获得更好的网络性能;如果比较大,则可以使用复杂度相对较低的 SR + AR 算法来获得接近于 SR + CR + AR 算法的性能。最后本文算法不适用于 $r < 1$ 的情况,此时算法不但不能有效降低网络阻塞概率,并且波长转换器的使用次数还会大大增加。

参考文献:

- [1] N Wauters, P Demeester. Design of the optical path layer in multi-wavelength cross-connected networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(5) : 881 - 892.
- [2] H Zang, et al. Dynamic lightpath establishment in wavelength-routed WDM networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(9) : 100 - 108.
- [3] X Zhang, C Qiao. Wavelength assignment for dynamic traffic in multi-fiber WDM networks [A]. In Proc. 7th International Conference on Computer Communications and Networks [C]. Lafayette, Louisiana, Oct. 1998. 479 - 485.
- [4] A Mkhitar, M Azizoglu. Adaptive wavelength routing in all-optical networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(2) : 197 - 206.
- [5] M Kodialam, T V Lakshman. Integrated dynamic and wavelength routing in IP over WDM networks [A]. In Proc of IEEE INFOCOM 2001 [C]. Anchorage, Alaska, Apr. 2001. 358 - 366.
- [6] 徐世中, 李乐民, 王晟. 波分复用光传送网中备用选路下的选路和波长分配算法 [J]. 电子学报, 2002, 30(4) : 488 - 491.
- [7] H Harai, et al. Performance of all-optical networks with limited-range wavelength conversions [A]. Proceedings of IEEE ICC '97 [C]. Montreal, Canada, June, 1997. 416 - 421.
- [8] R Melhem, et al. Minimizing wavelength conversions in WDM path establishment [J]. Journal of Photonic Network Communications, 2001, 3(3) : 201 - 216.
- [9] L Zhang, L Li. Effects of routing and wavelength assignment algorithms on limited-range wavelength conversion in WDM optical networks [A]. Proceedings of Int. Conf. on Communications Circuits and Systems and West Sino Expositions [C]. Chengdu, China, 2002. 860 - 864.
- [10] A Sridharan, K N Sivarajan. Blocking in all-optical networks [A]. IEEE INFOCOM 2000 [C]. Tel-Aviv, Israel, Mar. 2000. 990 - 999.

作者简介:



秦浩男, 1976 年出生, 现为西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室博士研究生, 主要研究方向为全光网的静态和动态路由由波长分配算法等。

张 男, 1975 年出生, 现为西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室博士研究生, 主要研究方向为光突发交换, 路由和波长分配算法等。

刘增基 男, 1937 年出生, 现为西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要从事宽带通信网络技术的研究。