

多约束条件下 WDM 光网中多播选路和波长分配算法

鲁才 王晟 李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术重点实验室 成都 610054)

摘要 在光层构建多播选路和波长分配时, 必须考虑一些约束条件。主要的约束条件有以下 4 种: 稀疏分光器配置约束、波长连续性约束、能量损伤约束及稀疏波长转换器约束。目前, 研究人员只是针对其中一个或两个约束条件进行了算法研究。该文在详细分析各种约束条件之后, 提出了一种基于多约束条件下多播选路和波长分配启发式算法。最后在 CERNET 和 NSFNET 两种网络拓扑上进行了仿真实验。根据算法仿真结果可以得出该算法可以有效地解决多约束条件下的多播路由及波长分配问题。

关键词 多播选路, 波长分配, WDM 网络, 多约束

中图分类号: TN929.18

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1684-05

An Algorithm of Multicast Routing and Wavelength Assignment with Multiple Constraints in WDM Optical Networks

Lu Cai Wang Sheng Li Le-min

(Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks,
University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract At the network layer, several constraints must be taken into account when calculating multicast routing and wavelength assignment. The constraints mainly include the following four aspects: sparse light splitter constraints, wavelength continuity constraints in WDM optical network, power budget constraints and sparse wavelength convert constraints. So far, most papers analyzed only one or two of these constraints respectively. This paper illuminates these constraints in detail first and then brings forward a heuristic algorithm with multiple constraints. Finally, designs two simulations on CERNET and NSFNET network topology. The results of the two simulations indicate the validity and feasibility of the algorithm.

Key words Multicast routing, Wavelength assignment, WDM network, Multiple constraints

1 引言

随着技术的发展, WDM(Wavelength Division Multiplexing)已经成为了一种主流传输技术;与此同时,多播业务的日益增加给网络带宽造成了不小的冲击。由于光器件技术的限制,传统的多播业务实现方法是在电域将数据复制多份,并将 WDM 网络作为单纯的传输媒介进行数据传输。近年来,科研人员研究如何将 WDM 技术与多播技术相融合,也就是说在光域内实现多播业务将会更加有效地利用 WDM 网络的带宽资源。随着光器件技术的发展,特别是分光器(light splitter)的出现,为光域内实现多播业务提供了硬件基础。文献[1]提出了基于分光器 SaD(Splitter and Delivery)交换模块的设计。为了降低成本和功耗,文献[2]对此设计作了一些改进。此外,文献[3]提出了另一种具有 TaC(Tap and Continue)能力的设备。文献[4]对基于 TaC 的多播模型进行了分析并给出了这种模型需要的波长数。具有 SaD 能力的交换机一般称之为 MC-OXC(Multicast Capable-Optical Cross Connect),而对于不支持多播的 OXC 称之为 MI-OXC(Multicast Incapable-Optical Cross Connect)。利用 MC-OXC

可以构建一个有效的多播树来实现光域内的多播业务。对于光域内的多播选路问题,文献[5]首先将 WDM 网络中光路(light path)的概念推广到光树(light tree),文献[6]又将光树的概念扩展到光林(light forest)。

基于 MC-OXC 和光树的概念,我们可以在 WDM 网络上实现多播传输。但在构建 WDM 网络多播选路和波长分配算法过程中要考虑一些约束条件。主要的约束包括:稀疏分光器配置约束、稀疏波长转换器配置约束、波长连续性约束和光信号能力损伤约束等。在多种约束条件下的多播选路和波长分配问题称之为 MC-MRWA(Multiple Constraints Multicast Routing and Wavelength Assignment)问题。目前有很多研究人员对此进行了探索,证明了 4 个约束条件的任一约束问题都是一个 NP 完全问题,并针对各种约束条件设计了比较有效的启发式算法。文献[6,7]研究的是在稀疏分光器配置约束下的多播选路问题;文献[8-10]考虑的是光信号能量损伤约束条件下的多播选路问题;文献[11-13]着重于波长连续性约束问题;文献[14,15]研究了关于波长转换器相关的一些问题。但是这些文献的研究成果通常只是针对一个或两个约束条件。本文在分析各种约束条件的基础上,提出了基于多种约束条件下的启发式算法,通过仿真证明了该算法的可

行性和有效性。

本文接下来的部分安排如下,第2节分析各种约束条件,第3节设计 MC-MRWA 算法,第4节叙述仿真过程及结果,第5节是算法的总结。

2 多播选路和波长分配问题的约束条件

在这一节主要对4种约束条件进行讨论。

2.1 稀疏分光器配置约束

文献[1]首先提出了SaD交换机的设计模型。利用SaD交换机,我们可以光域内构建有效的多播树。如图1所示,假设多播会话为 (s,D) , $D=\{d_1,d_2,d_3\}$ 为目的节点, s 为源节点。在 u 为MI-OXC情况下,此多播会话分解成为3个独立单播会话;而当 u 为MC-OXC情况下,链路 $s \rightarrow u$ 段可以共享,并在 u 节点进行分叉。从而形成了一棵多播树,节省了 $s \rightarrow u$ 段链路资源。

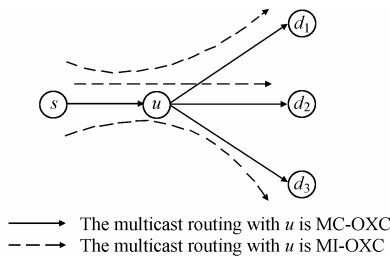


图1 有(无)MC-OXC 情况下的多播会话
Fig.1 The multicast sessions with (without) MC-OXC switches

在所有网络节点都配置为 MC-OXC 情况下,多播选路问题和电域内的问题类似,即著名的 STP (Steiner Tree Problem)问题;如果所有节点都不具备 MC,则多播选路问题转化为求多个具有相同源点的最短路问题。考虑到网络成本和 MC-OXC 交换机的造价,网络中部分节点具有多播能力。显然在这种情况下多播选路问题不会比 STP 问题简单,故稀疏分光器配置约束下的多播选路问题是一个 NP 完全问题。

2.2 能量损伤约束

文献[8]首先提出了能量约束下的多播选路问题,并得出为了获得良好的网络性能。其主要思想在构建多播树时尽量平衡各个目的点到源节点的光路深度。文献[10]对WDM网络多播路由的能量损伤约束进行了详细的分析,并提出了针对能量损伤约束条件的多播选路算法。能量损伤约束主要包括两个方面:一是每个目的节点接收到的光信号能量必须大于一个门限值,以确保目的端能正常接收信号;其二是每两个目的节点之间能量差异要保证在一个范围之内,以确保服务的公平性。这两方面可以用式(1)和式(2)来表示,其中参数 Δ 表示目的端能够容忍的最大能量损失系数; δ 表示在公平性条件下任意两个不同目的节点间能量差异的最大值; P_{out} 表示信号到达目的节点端的能量; P_{in} 表示信号从源节点发出时的能量。

$$P_{out}(s,v) \geq \Delta P_{in}(s), \quad \forall v \in D \tag{1}$$

$$\frac{1}{\delta} \leq \frac{P_{out}(s,v)}{P_{out}(s,u)} \leq \delta, \quad \forall v,u \in D \tag{2}$$

利用MC-OXC构建的光多播树,能量损伤主要包含两个方面,其一是光信号传输过程中的信号衰减造成的能量损伤;其二是信号通过分光器后信号能量损耗。如图2所示,信号从 s 传输到 d_1 节点能量损耗包括了信号从 $s \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow d_1$ 链路的信号衰减,此外还包括了信号在2节点处能量分成了两份,从而造成了能量的损失。

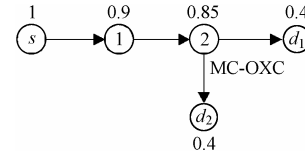


图2 光信号的能量损耗
Fig.2 The loss of optical signal power

光信号在光纤中传输时信号衰减可以用式(3)来表示,其中 L 表示传输距离, Q 表示光纤系统的衰减参数,对于一个确定的光传输系统, Q 值是一个确定的常数^[7]。

$$P_{out} = P_{in} Q^L \tag{3}$$

对于 MC-OXC 交换机,在理想的情况下,单个输出信号的能量是输入信号能量的 $1/N$ (扇出率 fan-out),其中 N 为 MC-OXC 的输出数。实际上交换机内部都嵌有光放大器以补偿信号的能量。此外,分光器分为两种,一种是有源可配置的 SaD MC-OXC;另一种是无源不可配置的 SaD MC-OXC。当信号通过有源 MX-OXC 时,其信号输出能量与交换机实际的扇出率无关,只与多播数在此节点分叉数有关。信号通过 MC-OXC 后能量可以用式(4)表示,其中 m 为分叉数, R 为交换机参数。公式的详细推导可以参见文献[7]。

$$P_{out} = \frac{RP_{in}}{m} \leq P_{in} \tag{4}$$

2.3 波长连续性约束和稀疏波长转换器配置约束

如果没有波长转换器,WDM网络中每一条光路必须分配相同的波长,这就是WDM网络中路由的波长连续性约束。如果网络中每个节点都具有波长转换功能,则WDM网络的波长连续性约束就不存在。选路问题转化为与电路交换网络中的选路问题类似。考虑到网络成本,实际网络中只是部分节点具有波长转换功能。单播传输的波长连续性问题,很多研究人员进行了比较深入的研究,提出了如分层图(Layered graph)法等有效的解决方法。在多播传输情况下,光路扩展为光树,从而增加了问题的复杂性。

3 多约束条件下的多播选路和波长分配算法

通常来讲,将WDM网络上的选路和波长问题分解为两步进行。对于WDM网络上的多播传输,划分为多播选路问题和多播波长分配问题。在约束条件下,我们容易证明这两个问题都是NP完全问题。本文将两个问题统一考虑,在进行多播树扩展的同时进行波长的预分配。其算法的主要思想

是基于多播树的扩张,在扩张过程中,新加入的多播树分支必须是满足所有约束条件中的最短的光路分支。

为了详细说明本文的算法,设 $G(V,E)$ 表示网络拓扑, V 表示节点(顶点)集, E 表示链路(边)集。给定网络拓扑,一个多播会话可以表示为 (s,D) ,其中 s 表示源节点, $D=\{d_1,d_2,\dots,d_n\}\subset V$ 表示 $n(=|D|\leq|V|-1)$ 个目的节点; $F(s,D)$ 表示多播树组成的光林, T 表示当前构建的多播树; V_T 表示当前多播树中支持多播分支的节点集,包括部分MC节点和末端MI节点; V'_T 表示当前多播树中不能支持多播分支的节点集,包括当前多播树中除了 V_T 的所有节点。另外设 D^* 表示还未被光林所覆盖的目的节点集。设找到一条满足所有约束条件的最短光路 $p(u,v)$, $u\in V_T$, $v\in D^*$,并加入多播树。重复这一过程直到 $D^*=\emptyset$ 或找不到这样的路径为止。如果 $D^*=\emptyset$,则算法正常输出光林,否则重新构建新的多播树或者会话阻塞。对于稀疏分光器配置约束条件,根据算法的基本思想,每一条新增的光路起点都在 V_T 中,这样确保了多播树中的每一个分叉点都是MC节点,从而满足该约束条件。下面主要叙述算法在满足其他约束条件的设计思想。

3.1 波长连续性即稀疏波长转换器配置约束条件

在考虑波长连续性约束时,我们设计了多个子桶(sub-buckets) B_1,\dots,B_n 。 $B_i(i=1,\dots,n,n\leq|V|)\subset V_T\cup V'_T$,每一个子桶由当前多播树中的部分节点组成。每个子桶分配一个波长集 W_i 记录该子桶的空闲波长。如图3所示,实线组成的子图是当前多播树,其中节点2和节点6是具有波长转换能力的节点,则节点2、6将当前多播树分割为3个部分,我们用3个子桶表示,设为 B_1,B_2 和 B_3 。 $B_1=\{s,1,2\}$, $B_2=\{2,5,6,d_2\}$, $B_3=\{6,d_1\}$ 。每一个子桶除了子图的边缘节点存在波长转换器外,其余节点不存在。这样在进行波长分配时,每一子桶必须分配相同的波长,以满足波长连续性约束条件的限制。如图3所示,假设新增一条光路为 $5\rightarrow 3\rightarrow 4\rightarrow d_3$,由于 $5\in B_2$,则3,4归入 B_2 ,4为波长转换节点,则新增一个子桶 $B_4=\{4,d_3\}$ 。同时更新或记录子桶 B_2,B_4 的空闲波长集。

在多播树扩张的同时,同时考虑新增光路与当前多播树连接点所在的子桶必须存在至少一条相同波长的空闲通道。如图3所示,为了满足波长连续性限制, B_2 的空闲波长集 W_2 与链路 $5\rightarrow 3\rightarrow 4$ 必须存在至少一条相同波长的空闲通道。

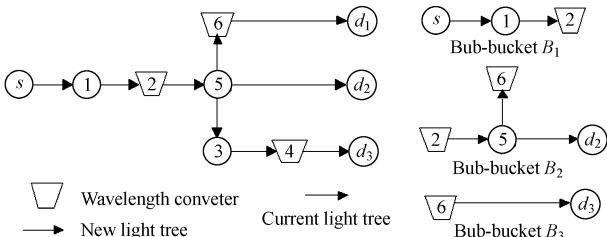


图3 波长连续性及稀疏波长转换器约束基于子桶的解决方法

Fig. 3 The constraints of wavelength continuity and sparse wavelength converter configuration basing sub-buckets

新增路加入多播树之后,更新 W_2 ,而 W_4 记录了链路 $4\rightarrow d_3$ 的

空闲波长集。通过子桶的概念,解决了波长连续性和波长转换器稀疏配置的约束。

3.2 能量损伤约束条件

根据文献[7],WDM网络上的多播路由必须满足式(1)和式(2)能量约束条件。在多播树扩张的同时,每增加一条光路除了本条光路自身满足的能量约束条件外,还必须计算其对当前光树产生的能量影响。设 s 点能量为1,每增加一条光路 $p(u,v)(u\in V_T, v\in D^*)$,计算 $p(u,v)$ 上所有节点的能量值,并重新更新当前光路中以 u 点为起点的所有分支节点的能量值。如果 v 点及其他影响的节点能量都满足式(1)和式(2),则 $p(u,v)$ 加入后的光树满足能量约束限制。如图3所示,新增光路 $5\rightarrow 3\rightarrow 4\rightarrow d_3$,则在节点5扇出率由2变为了3。所以影响到在5点分支的所有目的节点,则需要重新计算6, d_1,d_2 节点的能量值。

此外,为了提高网络的效率,每对节点之间有多条备用路由。在选路时,选择一条满足约束条件的最短的一条加入多播树;如果所有的备用路由都不满足约束条件则呼叫阻塞。在计算网络中每对节点之间的 k 条最短路由,可以用meta-Dijkstra算法进行计算。

根据上述约束条件的处理方法,下面叙述MC-MRWA算法的具体步骤:

算法输入:图 $G(V,E)$ 及图中每对节点之间的 K 条最短路由集合 P ,多播会话 (s,D) ;

算法过程:

- (1) $F(s,D)=\phi, D^*=D$;
- (2) $T=\phi, V_T=\{s\}, V'_T=\phi, B_1=\{s\}, W_1=\{0\}$ (都为空闲);
- (3) 从 P 中找一条最短路由 $p(v,u), v\in V_T, u\in D^*$,且 $p(v,u)$ 满足以下条件:

$p(v,u)$ 不包含 V'_T 中的节点; $p(v,u)$ 不包含 V_T 中的节点除了 v 点以外的其他节点;

如果找到 $p(v,u)$,设 $v\in B_i, y=v$;

While($y\neq u$) {

沿着 $p(v,u)$,设链路 $L(y,r)\in p(v,u)$;

如果 $W_i\cap W_{L(y,r)}=\phi$ 则丢弃 $p(v,u)$ 回到(3);否则 $W_i=W_i\cup W_{L(y,r)}$;

如果 r 有波长转换器,则创建子桶 $B_j, W_j=\{0\}$ (全部都是空闲状态), $i=j$;

$y=r$;

如果找不到满足条件的 $p\{v,u\}$,则当 $T=\phi$ 时,呼叫阻塞,算法终止,否则将 T 加到 $F(s,D)$ 中,转到(2);

计算 u 点 $p(v,u)$ 上各个节点的能量值,更新 T 中以 v 为起点的分支的所有节点的能量,并通过(1)式、(2)式检验 T 中的目的节点和 u 点是否满足能量损伤约束,如果满足,则转到(4),否则放弃 $p(v,u)$ 转到(3);

- (4) $p(v,u)$ 满足约束所有约束条件,将 $p(v,u)$ 加入 T ,并将

$p(v, u)$ 中除 v, u 之外的所有MC的点加入 V_T , 所有MI的点加入 V'_T 。如果 v 为MI, 则将 v 点从 V_T 中移到 V'_T , 将 u 加入 V_T 。如果 $D^* = \phi$, 则在 T 中的每个子桶随机分配一个空闲波长并将 T 加入 $F(s, D)$, 算法终止, 否则转到(3)。

算法输出: 呼叫阻塞或多播光林 $F(s, D)$

4 算法仿真

在这一节设计了针对 CERNET 和 NSFNET 两种网络拓扑的算法仿真实验, 如图 4 和图 5 所示。

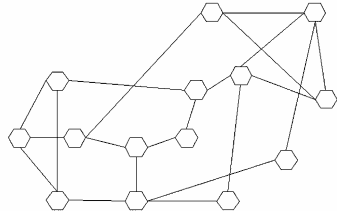
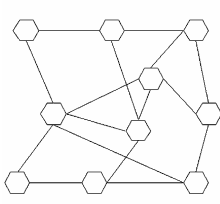


图 4 CERNET 网络拓扑

图 5 NSFNET 网络拓扑

Fig.4 The topology of CERNET

Fig.5 The topology of NSFNET

在仿真实验中我们作以下假设:

- (1)波长转换器和分光器在网络中独立均匀分布。设全波长转换器分布参数为 T , 分光分布参数为 S , $T, S \in [0,1]$;
- (2)每条链路包含相同的波长数 W , 并标记为 0 到 $W-1$;
- (3)呼叫按参数为 λ 的 Poisson 分布到达, 呼叫持续时间按参数为 $1/\mu$ 的负指数分布, 设 $\rho = \lambda/\mu$ 为网络的呼叫强度;
- (4)对于每个多播会话(s, D), s, D 随机分布, $|D|$ 服从参数为 G 的均匀分布;
- (5)每对节点之间备用路由数 K , 如果两节点之间可选路由小于 K 条, 则用 ∞ 填充;
- (6)假设网络信号衰减系数 Q 为一个常数, Δ 表示接收端能够容忍的最大能量损失系数; δ 表示在公平性条件下任意两个不同目的节点间能量差异的最大值。

图 6 是通过模拟仿真得到的数据结果。根据仿真结果可以得出以下几点结论:

- (1)利用 MC-MRWA 算法, 网络阻塞率随着备用路由条数 K 值增加而减少, 但是到了一定程度后网络阻塞率不再减少而有增加的趋势。在理论上, 随着 K 值的增加, 呼叫的可选路由增多, 但是占用的网络资源比较多, 从而影响后面的呼叫。故 K 值增加到一定程度后, 网络阻塞概率不是减小, 而会增加或者趋于平稳。
- (2)随着网络中 MC-OXC 数量的增多, 更有利于建立优化的多播树, 故阻塞率会渐渐的减小。但 MC-OXC 的分布对阻塞概率影响很大, 由于在仿真中, MC-OXC 分布是随机的。导致了网络阻塞概率随着 MC-OXC 增加产生波动, 不是单调减少。
- (3)随着网络中目的节点 $|D|$ 数量的增多, 一个呼叫占用的网络资源也增多, 故呼叫阻塞率会随着 $|D|$ 的增加而增加。
- (4)随着网络中波长转换器数量的增加, 波长连续性约束

就会减弱。如果每个节点都是具有波长转换能量, 则波长连续性约束就不存在, 故网络阻塞率小。但波长转换器的分布对阻塞概率有较大的影响。

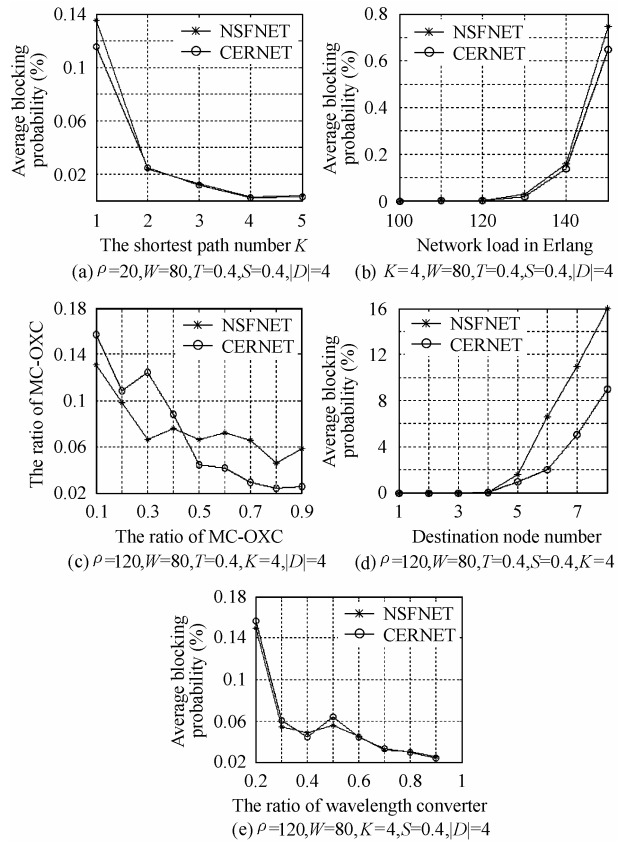


图 6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

5 总结

对于 WDM 网络上点对点之间的单播情况, 波长路由和波长分配算法已经有了深入的研究。但这些研究成果不适用于 WDM 网络上多播业务的情况。本文针对 WDM 网络上多播业务的各种约束限制, 在分析 WDM 网络上 MC-MRWA 问题的多约束条件基础上, 提出了满足多个约束条件下的波分路由和波长分配启发式算法。并通过子桶的概念解决波长连续性和波长转换器配置约束问题。通过仿真实验, 验证了算法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] Hu W S, Zeng Q J. Multicasting optical cross connects employing splitter-and-delivery switch. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10: 970-972.
- [2] Ali M, Deogun J. Power-efficient design of multicast wavelength routed networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(10): 1852-1862.
- [3] Ali M, Deogun J S. Cost-effective implementation of multicasting in wavelength-routed networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18: 1628-1638.

- [4] Libeskind-Hadas R. Efficient collective communication in WDM networks with a power budget. *Computer Communications and Networks*, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on 16-18 Oct., 2000: 612–616.
- [5] Sahasrabudde L H, Mukherjee B. Light trees: optical multicasting for improved performance in wavelength routed networks. *IEEE Communications Magazine*, 1999, 37: 67–73.
- [6] Zhang X, Wei J Y, Qiao C. Constrained multicast routing in WDM networks with sparse light splitting. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18: 1917–1927.
- [7] Yan Shuguang, Ali M, Jitender Deogun. Route optimization of multicast sessions in sparse light-splitting optical networks Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01. IEEE, Volume: 4, 25-29 Nov., 2001 vol. 4: 2134–2138.
- [8] Xin Yufeng, Rouskas George N. Light-Tree routing under optical layer power budget constraints. *OSA Journal of Optical Networking*, 2004, 3(5): 282–302.
- [9] Wu Kun-Da, Wu Jieh-Chian, Yang Chu-Sing. Multicast routing with power consideration in sparse splitting WDM networks. *Communications*, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on, Volume 2, 11-14 June, 2001 Vol. 2: 513–517.
- [10] Yufeng Xin, Rouskas N. Multicast routing under optical layer constraints. Hong Kong, 2004, Proceedings of IEEE Infocom March 2004: 7–11.
- [11] Jia X H, Du D Z, Hu X D, Lee M K, Gu J. Optimization of *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49: 341–350.
- [12] Sahin G, Azizoglu M. Multicast routing and wavelength assignment in wide-area networks. *Proc. SPIE*, 1998, vol. 3531: 196–208.
- [13] Ramesh S, Rouskas G N, Perros H G. Computing call blocking probabilities in multi-class wavelength routing networks with multicast traffic. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20: 89–96.
- [14] Chu Xiaowen, Li Bo, Zhang Zhensheng. A dynamic RWA algorithm in a wavelength-routed all-optical network with wavelength converters. INFOCOM 2003, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, Volume: 3, 30 March-3 April, 2003, vol.3: 1795–1804.
- [15] Obermann K, Kind S, Breuer D, Petermann K. Performance analysis of wavelength converters based on cross-gain modulation in semiconductor-optical amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(1): 78–85.
- 鲁才: 男, 1975年生, 博士生, 研究方向为宽带通信网、光网络多播、光网络鲁棒资源配备.
- 王晟: 男, 1971年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为WDM光网络和IP网络技术.
- 李乐民: 男, 1932年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为数字信息传输与通信网.