

文章编号: 0258-7025(2005)04-0544-05

波分复用波长路由节点的阻塞特性分析

杨春勇, 刘德明, 李 蔚, 何 军, 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 利用概率统计理论的方法, 从节点层次上定量分析了节点规模、复用波长数目以及波长转换对波分复用(WDM)波长路由网络中波长路由节点的影响。提出了基于概率统计的节点阻塞模型。数值结果突出表明波长转换能力越强的全光节点, 其性能越优。为了提高网络资源的使用效率并增强全光网络的灵活性, 必须实现全光网络中的虚波长路由由波长转换器。通过数值计算找到了阻塞性能和代价的折中, 研究中发现配置较低波长转换能力波长转换器的波长路由节点将会具备更强的性价比优势, 当前在构建光通信系统时使用弱波长转换能力的光节点更可行。

关键词 光通信; 概率论; 光交换; 波长转换; 波分复用

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Blocking Probability Analysis of Wavelength Division Multiplexing Wavelength Routing Nodes

YANG Chun-yong, LIU De-ming, LI Wei, HE Jun, HUANG De-xiu

(Department of Opto-Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Based on the theory of probability, a blocking probability model is proposed to investigate the blocking performance of the individual node in wavelength division multiplexing (WDM) wavelength routed all-optical networks. The blocking performance is relevant to the number of wavelengths multiplexed in each fiber link and the number of access fiber link ports, with (full or limited) wavelength conversion. The numerical results show that the wavelength routing node equipped with the higher conversion degree of wavelength converters has the better performance than the node equipped with lower ones. To enhance service efficiency of wavelength resource and to make the all-optical networks more flexible, virtual wavelength routing, wavelength converters in all-optical networks are needed. Trade-off between the performance and the cost is found in this paper. Then to guarantee blocking performance is precondition, wavelength routing nodes deployed with the low conversion degree of the wavelength converters are able to reach the definite blocking performance. The realistic and cost-effective way to construct nodes system in WDM routing networks is to use wavelength converters with weak capability.

Key words optical communication; theory of probability; optical switching; wavelength conversion; wavelength division multiplexing

1 引 言

随着光通信技术的发展, 具备波分复用(WDM)的全光波长路由网络是未来广域骨干网的发展方向。在透明的波长路由光网络中使用光交叉连接器(OXC)和波长转换器(WC)使得成千上万的用户可以利用有限的波长资源达到通信的目的。在

全光波长路由网络中的波长路由器、光交叉连接器或者光分插复用器(OADM), 本文统称波长交叉连接器(WXC)。文献[1,2]中提出了许多用于波长路由网络的波长交叉连接器的理想结构, 然而目前由于技术和价格的原因, 迟迟未能完全走向市场, 因此在全光网络中如何优化配置波长转换器引起了广泛

收稿日期: 2004-01-05; 收到修改稿日期: 2004-11-24

基金项目: 武汉市科技攻关计划(2002100513004)资助项目。

作者简介: 杨春勇(1975—), 男, 重庆人, 华中科技大学光电子工程系博士研究生, 主要从事多波长光纤通信网络交换/路由、节点关键技术的研究。E-mail: yang_chunyong@163.com

的讨论。当前比较一致的观点是,在波长路由光网络中配置波长转换器可以减少连接阻塞和实现波长重用,从而达到提高光交换系统和网络性能的目的,但是定量评价配置波长转换器的性能要受网络拓扑结构、流量模式和路由距离等较多参数的影响,文献[3~11]从网络的角度分析了波长转换器对于网络阻塞性能的影响。文献[12]分析了波长转换理论模型。文献[8]分析了波长转换受限波长转换器对于波长交换网络的影响,但未计入节点的规模。目前关于波长转换器对光网络的影响几乎都是网络层次上的分析,还未见节点级上定量分析波长转换器对于单个节点的性能表现。本文基于概率统计的方法主要研究了节点规模、复用波长数目以及波长转换器对于波长路由网路中节点的影响。

2 分析模型

波长交叉连接器如图 1 所示。为了便于讨论,图中均为单向的光纤链路,对应输入光纤链路为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 其中 x_1, x_2, \dots, x_N 对应 N 条输入光纤链路, 输出光纤链路为 $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, 其中 y_1, y_2, \dots, y_N 对应 N 条输出光纤链路。假定其中每根光纤链路均可以使用 w 个波长。对应波长交叉连接器输入端的不同波长集合为 $X = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{w-1}\}$, 不同输出波长集合为 $X' = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{w-1}\}$ 。该波长交叉连接器理论上可以支持最大容量为 $C = N \cdot w$ 个光通道或者连接。每根输入光纤链路有 w 个发送器, 每根输出光纤链路有 w 个接收器。在假定规模为 $N \times N$ 的节点结构中包含的光开关(OSW)为纵横制无阻塞交换结构。共有 N 个波长转换器池(WCB), 每个池中放置 w 个波长转换器。迄今为止, 能够商用的波长转换器只有转换范围受限制的波长转换器, 定义受限波长转换器的转换度为 $d(1 \leq d \leq w)$, 输入波长 λ_i 通过受限波长转换器可以转换的 d 个波长的集合为 $O_i, d=1$ 对应无波长转换, $d=w$ 对应完全波长转换。对于节点中波长转换度 $d=3$, 输入波长 λ_i 可以被转换为输出波长 $\lambda_{(i-1) \bmod w}, \lambda_i$ 和 $\lambda_{(i+1) \bmod w}$ 。用 $\lambda_{(i-1)}$ 代替 $\lambda_{(i-1) \bmod w}, \lambda_{i+1}$ 代替 $\lambda_{(i+1) \bmod w}$, 于是集合 $O_i = \{\lambda_{i-1}, \lambda_i, \lambda_{i+1}\}$ 。

针对研究的波长路由网络节点, 为提出的阻塞统计概率模型作如下的条件约束: 点到点的业务流; 连接的请求无排队, 如果某个光连接请求被阻塞, 将被立即丢弃; 已经存在的连接不再重新分配新的波长; 业务流在输入输出光纤链路中是均匀分布的, 并且彼此链路中的负载相互独立; 给任意光路由通道

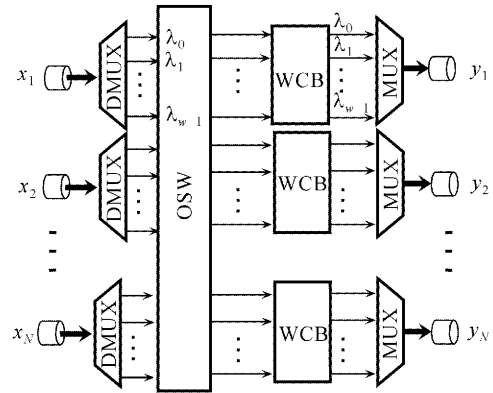


图 1 $N \times N$ 波长路由节点波长交叉连接器结构

DMUX: 波长解复用器; MUX: 波长复用器;

Fig. 1 Wavelength routing node WXC architecture with $N \times N$ dimensions

DMUX: wavelength demultiplexer; MUX: wavelength multiplexer;

OSW: optical switch; WCB: wavelength converter bank

分配的波长遵循随机均匀概率分布。

以上对链路和波长独立性的假设只是为了讨论问题的需要, 是对现实模型的一种近似分析, 至于基于该假设模型的准确性还要依赖于波长交叉连接器所在网络的具体拓扑和业务模式。定义 ρ 为每条链路中波长的利用率, 某个光连接请求使用任一波长 $\lambda_k (k = 0, 1, \dots, w-1)$ 并占用波长交叉连接器的某条输入链路 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 的概率为 ρ_i , 事件 {请求输入链路 x_i 中波长 λ_k 空闲} 用字母 A 表示, 事件 {除链路 x_i 外其余输入链路繁忙} 用字母 B 表示, 则

$$\rho_i = P_r\{A | B\} = \rho(1 - 1/N), \quad (1)$$

其中“其余所有输入链路被占用”的概率为 $(1 - 1/N)$ 。定义事件 {请求输入链路 x_i 中波长 λ_k 不被占用} 用字母 C 表示, 则

$$P_r\{C\} = 1 - \rho_i, \quad (2)$$

鉴于所研究的波长交叉连接器的对称性, 任一波长能占用输出链路 $y_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 的某一空闲波长的概率也为 $\rho(1 - 1/N)$ 。假设 P_b 为从至少含有一个空闲波长的输入链路到至少含有一个空闲波长输出链路的一个连接请求的阻塞概率, P'_b 为从输入链路到输出链路的一个连接请求的阻塞概率, 其中包括输入输出链路中因无空闲波长所引起的阻塞。因此可以建立 P_b 和 P'_b 的如下关系

$$\begin{aligned} P'_b &= [\rho(1 - 1/N)]^w + \\ &\{1 - [\rho(1 - 1/N)]^w\} [\rho(1 - 1/N)]^w + \\ &\{1 - [\rho(1 - 1/N)]^w\} \{1 - [\rho(1 - 1/N)]^w\} \cdot P_b, \end{aligned} \quad (3)$$

称 P_b 和 P'_b 分别为内部阻塞概率和外部阻塞概率。式(3)右边前两项为输入和输出链路资源不够所引起的阻塞概率,第三项为因波长交叉连接器所引起的阻塞概率。本文主要讨论内部阻塞概率,因为内部阻塞概率能更好地揭示波长转换在波长交叉连接器节点的性能。然而要计算出 P_b ,首先要获得 P'_b ,然后可以通过式(3)获得内部阻塞概率 P_b 。

对于配置在波分复用网络中的波长交叉连接器,从其输入链路 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 到输出链路 $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 的连接可能会占用 $\{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{w-1}\}$ 中的任意一个波长。定义事件 EV_i 为输入链路 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 使用波长 λ_i 所引起的阻塞,其中 $i \in \{0, 1, \dots, w-1\}$ 标示波长编号。于是外部阻塞概率 P'_b 可以表达为

$$P'_b = P\left\{\bigcap_{i=0}^{w-1} EV_i\right\}, \quad (4)$$

符号 $\bigcap_{i=0}^{w-1} EV_i$ 表示集合连续相交运算 $EV_0 \cap EV_1 \cap EV_2 \cap \dots \cap EV_{w-1}$ 。 $P\{\dots\}$ 表示满足 $\{\dots\}$ 中条件的概率。对于 EV_i ,输入波长使用 λ_i 引起的阻塞包括该波长在输入链路就已被占用或者对应输出链路中找不到可以转换的空闲波长。如果用 λ_i 表示输入波长 λ_i 被占用; Θ_i 为波长 λ_i 可以转换范围内的所有波长都被占用事件。

先考虑波长交叉连接器的两种极端特殊情况,

即无波长转换器配置的情况 $d=1$ 和配置全波段转换波长转换器的情况 $d=w$ 。对于无波长转换能力的波长交叉连接器,一个波长中的信息不可能交换到另外一个波长中去,那么 EV_i 和 EV_j 相互独立,其

中 $i \neq j (0 \leq i, j \leq w-1)$,于是某个连接请求被丢弃发生的条件为:1) 某个波长在输入链路中被占用;2) 某个波长在输出链路中被占用。因此,此时的外部阻塞概率可以表示为

$$P'_b = P\{EV_0\} \cdot P\{EV_1\} \cdots P\{EV_{w-1}\} = \{\rho(1-1/N) + [1-\rho(1-1/N)] \cdot \rho(1-1/N)\}^w = \{2\rho(1-1/N) - [\rho(1-1/N)]^2\}^w, \quad (5)$$

代入式(3)可得无波长转换能力的波长交叉连接器内部阻塞概率为

$$P_b = \{2\rho(1-1/N) - [\rho(1-1/N)]^2\}^w - \{2[\rho(1-1/N)]^w - [\rho(1-1/N)]^{2w}\} / \{1 - [\rho(1-1/N)]^w\}^2. \quad (6)$$

对于配置了全波段波长转换器的波长交叉连接器,能够引起外部阻塞的只有当输入链路或者输出链路中的所有波长均被占用的情况,此时外部阻塞概率

$$P'_b = [\rho(1-1/N)]^w + \{1 - [\rho(1-1/N)]^w\} \cdot [\rho(1-1/N)]^w, \quad (7)$$

代入式(3)可得配置了全范围波长转换器的波长交叉连接器内部阻塞概率为 $P_b=0$,可以得出结论,对于理想的波长交叉连接器,为每个输出的波长都配置一个全范围的波长转换器,将不会引起阻塞。

最后推导更一般的结论,即对于波长转换受限制波长转换器的配置 $2 \leq d \leq w-1$,考虑先前的定义,此时事件 λ_{w-1} 与事件 $\bigcap_{i=0}^{w-2} EV_i$ 和 Θ_{w-1} 独立;但是由于波长转换受限,事件 $\bigcap_{i=0}^{w-2} EV_i$ 和事件 Θ_{w-1} 存在相关性。于是可得

$$\begin{aligned} P'_b &= P\left\{\bigcap_{k=0}^{w-1} EV_k\right\} = P\{EV_{w-1} \cap \left(\bigcap_{k=0}^{w-2} EV_k\right)\} = P\{(\lambda_{w-1} \cup \Theta_{w-1}) \cap \left(\bigcap_{k=0}^{w-2} EV_k\right)\} = \\ &P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\left\{\bigcap_{k=0}^{w-2} EV_k\right\} + P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\{\Theta_{w-1} \cap \left(\bigcap_{k=0}^{w-2} EV_k\right)\} = \\ &P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\{EV_{w-2} \cap \left(\bigcap_{k=0}^{w-3} EV_k\right)\} + P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\{\Theta_{w-1} \cap [EV_{w-2} \cap \left(\bigcap_{k=0}^{w-3} EV_k\right)]\} = \\ &P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\{(\lambda_{w-2} \cup \Theta_{w-2}) \cap \left(\bigcap_{k=0}^{w-3} EV_k\right)\} + P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\{\Theta_{w-1} \cap [(\lambda_{w-2} \cup \Theta_{w-2}) \cap \left(\bigcap_{k=0}^{w-3} EV_k\right)]\} = \\ &P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\{\lambda_{w-2}\} \cdot P\left\{\bigcap_{k=0}^{w-3} EV_k\right\} + P\{\lambda_{w-2}\} \cdot P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\{\Theta_{w-2} \cap \left(\bigcap_{k=0}^{w-3} EV_k\right)\} + \\ &P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\{\lambda_{w-2}\} \cdot P\{\Theta_{w-1} \cap \left(\bigcap_{h=0}^{w-3} EV_h\right)\} + P\{\lambda_{w-1}\} \cdot P\{\lambda_{w-2}\} \cdot P\{\Theta_{w-1} \cap \Theta_{w-2} \cap \left(\bigcap_{h=0}^{w-3} EV_h\right)\} = \\ &[\rho(1-1/N)]^{w-1} \cdot P\{\Theta_0\} + [\rho(1-1/N)]^{w-2} [1-\rho(1-1/N)] \sum_{1 \leq k \leq w-1} P\{\Theta_0 \cap \Theta_k\} + \\ &[\rho(1-1/N)]^{w-3} \cdot [1-\rho(1-1/N)]^2 \sum_{1 \leq k_1, k_2 \leq w-1, k_1 < k_2} P\{\Theta_0 \cap \Theta_{k_1} \cap \Theta_{k_2}\} + \dots + \end{aligned}$$

$$\rho(1-1/N)[1-\rho(1-1/N)]^{w-2} \sum_{1 \leq k_1, k_2, \dots, k_{w-2} \leq w-1, k_1 < k_2 < \dots < k_{w-2}} P\{\Theta_0 \cap \Theta_{k_1} \cap \Theta_{k_2} \cap \dots \cap \Theta_{k_{w-2}}\} + [1-\rho(1-1/N)]^{w-1} \cdot P\{\Theta_0 \cap (\bigcap_{k=1}^{w-1} \Theta_k)\}. \tag{8}$$

借助数学归纳方法可以证明(8)式的正确性,限于篇幅,本文不做推导证明。代入 w, N 以及 d 的值,然后将式(7)代入式(3)可以得到相应的内部阻塞概率。为了检验式(7)的正确性,可以代入作为特例的 $d = 1$ 或者 $d = w$ 计算推导,结果分别与式(5),(6)一致。

作为例子,推导了 $w = 4, N = 20$ 的解析表达式如下

$$P_b = \begin{cases} (14\rho_i^4 - 32\rho_i^5 + 24\rho_i^6 - 8\rho_i^7 + 2\rho_i^8)/(1-\rho_i^4)^2 & \text{当 } d = 1 \text{ 时} \\ 8\rho_i^5(1-\rho_i)^2/(1-\rho_i^4)^2 & \text{当 } d = 2 \text{ 时} \\ 4\rho_i^6(1-\rho_i)^2/(1-\rho_i^4)^2 & \text{当 } d = 3 \text{ 时} \end{cases} \tag{9}$$

取 $w = 5, N = 20$ 可得

$$P_b = \begin{cases} [(2\rho_i - \rho_i^2)^5 - 2\rho_i^5 + \rho_i^{10}]/(1-\rho_i^5)^2 & \text{当 } d = 1 \text{ 时} \\ 15\rho_i^6(1-\rho_i)^2/(1-\rho_i^5)^2 & \text{当 } d = 2 \text{ 时} \\ 10\rho_i^7(1-\rho_i)^2/(1-\rho_i^5)^2 & \text{当 } d = 3 \text{ 时} \\ 5\rho_i^8(1-\rho_i)^2/(1-\rho_i^5)^2 & \text{当 } d = 4 \text{ 时} \end{cases} \tag{10}$$

3 数值结果分析

在统计分析模型的基础上,给出了当 $N = 20, w = 4$ 和 $N = 20, w = 5$ 时的数值结果,见图 2(a)和(b)。正如第 2 节所述,具备全波段内波长转换能力的波分复用网络的波长交叉连接器节点是无阻塞

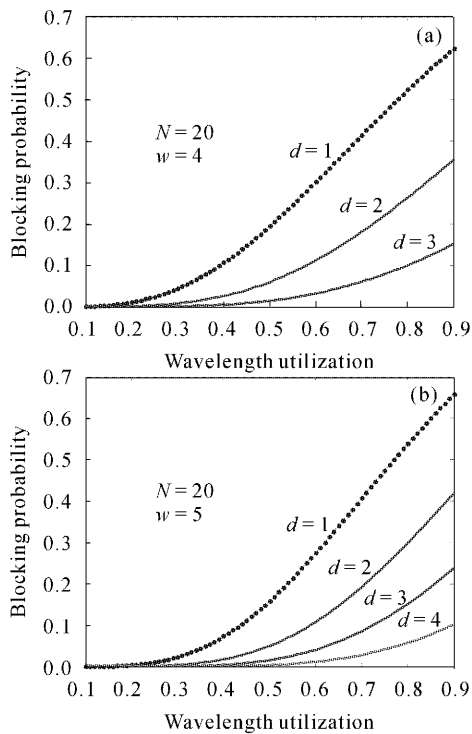


图 2 当 N 为 20, 在 w 为 4 和 5 的情况下, 波长路由节点相对于波长利用率的内部阻塞率

Fig. 2 Internal blocking probability against wavelength utilization for w with 4 and 5 wavelengths while N is 20

的,即波长交叉连接器的内部阻塞为零。毫无疑问在波分复用网络中配置这样的波长交叉连接器性能表现上最优,然而要实现全波段内的全光波长转换器就目前的技术而言还是极其困难的。因此本文从更实际的受限波长转换出发,研究不同转换度 d 条件下波长交叉连接器的阻塞性能表现。从图 2(a)和(b)中可以看出当波长转换度和波长交叉连接器节点度一定的情况下,阻塞率随波长利用率的增大而增大;当波长利用率和波长转换度以及节点度相同的情况下,复用波长的数目越大,阻塞率越小;相同的波长利用率和节点度条件下,波长交叉连接器的阻塞率随转换度的增大而减小,对于图 2(a)取 $\rho = 0.5$ 时,在波长转换度为 $d = 1$ 的情况下,阻塞率是 0.19551,在波长转换度为 $d = 3$ 的情况下,阻塞率是 0.01406,足见波长转换器转换能力增加对波长交叉连接器节点阻塞性能的改善程度。与配置全波段波长转换器相比,配置较低波长转换能力波长转换器的波长交叉连接器节点将会具备更强的性价比优势。

为了验证模型的准确性,限于篇幅,只对 $N = 20, w = 4$ 的情况进行模拟仿真,计算结果见图 3 (对 10^6 次连接请求仿真结果的平均值)。仿真条件为:连接请求的到达遵循泊松随机过程,连接的持续时间遵循单位时间的指数分布,所有源目的节点对的业务是均匀分布的,为每个连接随机分配波长。从图 3 可以看出理论分析和模拟结果基本吻合,但是随着波长转换度的增加,理论分析和模拟结果差

距变大(可能是因为理论模型对波长独立性的假设),而实际上随着波长转换度的增大,波长间的相关性越来越强。

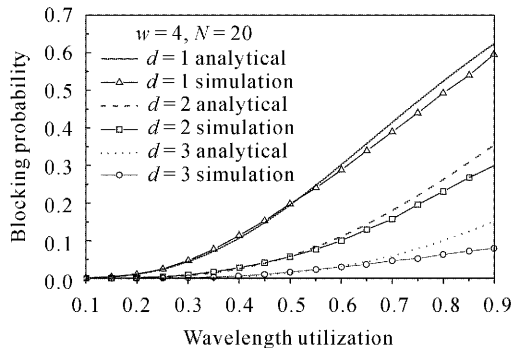


图3 波长路由节点相对于波长利用率的内部阻塞率数值结果和仿真结果比较

Fig. 3 Analytical and simulation results of internal blocking probability against wavelength utilization

4 结 论

基于概率统计理论,研究波长路由网络中单个节点的阻塞性能,提出了一个阻塞率近似模型。数值计算和仿真结果表明该模型是符合现实规律的。可以预见,如果为该模型做出更好的条件约束,近似的程度将会更加准确。本文的分析模型正进一步应用于全光波长路由器的研究。

参 考 文 献

- 1 P. Green. Progress in optical networking [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2001, **39**(1):54~61
- 2 X. D. Qin, Y. Y. Yang. Optical crossconnect architectures for wavelength-routed WDM networks [J]. *Optical Networks Magazine*, 2003, (July/August):50~62
- 3 R. A. Barry, P. A. Humblet. Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changers [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, **14**(5):858~867
- 4 M. Kovacevic, A. Acampora. Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, **14**(5):868~879
- 5 B. Ramamurthy, B. Mukherjee. Wavelength conversion in WDM networking [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, **16**(7):1061~1073
- 6 A. Birman, Computing approximate blocking probabilities for a class of all-optical networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, **14**(5):852~857
- 7 S. Subramaniam, M. Azizoglu, A. K. Somani. All-optical networks with sparse wavelength conversion [J]. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, 1996, **4**(4):544~557
- 8 X. D. Qin, Y. Y. Yang. Blocking probability in WDM switching networks with limited wavelength conversion [C]. *Proceedings Eleventh International Conference on Computer Communications and Networks*, 2002, **14~16**(10):454~459
- 9 H. Harai, M. Murata, H. Miyahara. Heuristic algorithm for allocation of wavelength convertible nodes and routing coordination in all-optical networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(4):535~545
- 10 J. Yates, J. Lacey, D. Everitt *et al.*. Limited-range wavelength translation in all-optical networks [C]. in *Processing IEEE INFOCOM'96*, 1996, **3**(24~28):954~961
- 11 T. Tripathi, K. N. Sivarajan. Computing approximate blocking probabilities in wavelength routed all-optical networks with limited-range wavelength conversion [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, **18**(10):2123~2129
- 12 Zhao Tonggang, Ren Jianhua, Li Wei *et al.*. Theoretical model analysis of wavelength conversion based on semiconductor laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9):1071~1075
赵同刚,任建华,李蔚等. 半导体激光器实现波长转换理论模型分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9):1071~1075