

碲基波长转换器对 Mesh-Torus 网络阻塞率的影响

巩稼民**, 蔡庆*, 侯玉洁, 任帆

西安邮电大学工程学院, 陕西 西安 710121

摘要 在光网络中同时输入多个波长时, 由于在网络链路中的网络节点是有限的, 多个波长会竞争同一个输出端口, 从而使通信网络受阻。在碲基拉曼波长转换器放置率为 50% 时, 将其应用在 20×20 Mesh-Torus 网络中, 并对网络阻塞率进行分析。利用伯努利-泊松-帕斯卡(BPP)网络模型仿真分析了碲基波长转换器的输入波长数 S 以及转换度 d 对 Mesh-Torus 网络阻塞性能的影响。结果表明: 当 d 相同、 $S=4$ 时, 阻塞率为 $0.088 \sim 0.0945$, $S=6$ 时, 阻塞率为 $0.0960 \sim 0.0995$, 由此说明 S 的增加会减缓网络受阻的时间, 使阻塞率增长较慢; 当 S 相同、 d 增加时, 阻塞率在原来的基础上约降低 $0.0005 \sim 0.004$ 。因此, 在 Mesh-Torus 网络中使用碲基波长转换器降低网络阻塞率是可行的。

关键词 光通信; 全光网络; Mesh-Torus 阻塞率; 输入波长数; 转换度

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.120601

Influence of Te-Based Wavelength Converter on Mesh-Torus Network Blocking Rate

Gong Jiamin**, Cai Qing*, Hou Yujie, Ren Fan

School of Electronics Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications,
Xi'an, Shaanxi 710121, China

Abstract Due to the limited network nodes in the optical network link, the multiple wavelengths simultaneously inputted in network compete for the same output port and thus the communication network is made obstructed. Thus a Te-based Raman wavelength converter is applied to the 20×20 Mesh-Torus network when its placement rate is 50%, and its influence on the network blocking rate performance is analyzed. With the Bernoulli-Poisson-Pascal (BPP) network model, the effects of input wavelength number S and degree of conversion d of the Te-based wavelength converter on the blocking performances of the Mesh-Torus network are simulated and analyzed. The results show that when d is fixed, the variance of blocking rate is within $0.088-0.0945$ for $S=4$ and within $0.0960-0.0995$ for $S=6$, indicating that the increase of S slows down the blocking of network communication and the blocking rate increases slowly. In contrast, when S is fixed and with the increase of d , the blocking rate decreases approximately by $0.0005-0.004$ on the original basis. Therefore, it is feasible to reduce the blocking rate of the Mesh-Torus network with a Te-based wavelength converter.

Key words optical communications; all optical network; Mesh-Torus blocking rate; input wavelength number; degree of conversion

OCIS codes 060.1155; 060.2300; 060.4258; 060.4510

1 引言

在大数据存储、超远距离的数据中心应用等大量新兴业务的需求下, 光网络的带宽需求已达到

$10 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ 甚至是 $100 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ 。传统波分复用(WDM)光网络虽然可以实现大容量传输, 但是由于带宽资源得不到合理利用, 所以在带宽灵活控制方面遇到了瓶颈, 并造成网络资源的极大浪费^[1-2]。

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2018-06-27; 录用日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(61775180)

* E-mail: rofheart@163.com; ** E-mail: gjm@xupt.edu.cn

全光网络透明化、智能化、高带宽等优势使光纤通信成为现代通信网络的重要支柱^[3]。在高速 WDM 交换技术中,一根光纤可以负载 96 个以上的波长信道,可以支持的数据传输速率高达 $100 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在信号传输时,由于网络中有很多不确定因素,能够使用的波长的数量很少,若网络中有很多节点需要这些波长同时工作,相同波长的两个信号将同一个端口作为输出端时,就会发生波长竞争,从而引起网络通信受阻。张雷等^[4]研究了基于交叉增益调制原理的波长转换器和基于四波混频原理的波长转换器对 Mesh-Torus 光网络阻塞性能的影响。但是交叉调制只有在强度调制时才能实现波长转换,四波混频带宽较窄且只有在零色散条件下才能实现波长转换,而受激拉曼散射效应可以实现 C+L 波段任意波长的转换。因此,本文研究了基于受激拉曼散射(SRS)原理的波长转换器对 Mesh-Torus 光网络阻塞率的影响。

一般使用泊松流来表示网络业务的分布,随着对网络业务研究的深入,平滑业务、峰值业务等随之出现。为了对各种网络状态进行研究,使用伯努利-泊松-帕斯卡(BPP)模型来表示网络业务的一般分布^[5]。在网络链路负荷均匀的情况下,以放置率为 50%配置波长转换器为一种优化配置^[6]。基于此种模型,本文将基于 SRS 的碲基波长转换器以 50%的放置率应用在 Mesh-Torus 网络中,仿真分析了相关参数对 Mesh-Torus 网络阻塞性能的影响。阻塞性能是指网络系统在稳态时,网络链路中的空闲波长都开始工作使得呼叫被阻塞的平均概率。通过比较仿真结果发现,增大波长转换器输入波长数 S 或转换度 d (有限波长转换范围)都可以达到降低网络阻塞率的效果。

2 基本原理

2.1 Mesh-Torus 网络阻塞率计算模型

采用 Mesh-Torus 网络进行阻塞率的研究,图 1 给出了 4×4 Mesh-Torus 网络拓扑结构图,由 4 个横向环网和 4 个纵向环网交错构成,图中黑点表示节点能够实现波长转换,而白点表示节点不能够实现波长转换。在该网络拓扑下,具有波长转换能力的节点和不具有波长转换能力的节点交错配置,且从任意一个节点看网络拓扑结构都相同。

由于在实际的光纤链路中能够复用的波长数是有限的,所以使用 BPP 模型来表达 WDM 网络业务的一般分布更贴近实际^[7]。其中,使用业务突发度

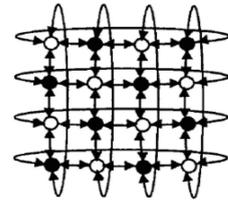


图 1 4×4 Mesh-Torus 网

Fig. 1 4×4 Mesh-Torus network

Z 来表示网络服务台系统在稳态时的峰值因素,其定义为服务器在忙的个数的方差和均值的比值。 $Z < 1$ 表示网络业务处于平滑状态, $Z = 1$ 表示网络业务处于一般状态,而 $Z > 1$ 表示网络业务处于峰值状态。假设网络每跳链路中光纤使用了 S 个波长,在 BPP 模型中采用了有限波长转换技术,其表示波长转换发生时,只转换到附近的几个波长上。本文将部分虚波长通路(PVWP)应用于 Mesh-Torus 结构并计算网络阻塞率。由于网络阻塞率受很多因素影响,在分析前作以下假设^[5]: 1) 每个信号呼叫到达任一节点的可能性相同; 2) 呼叫保持指数上升分布; 3) 最短路径随机选取,呼叫选取的路径如果不连通则该路径阻塞; 4) 每跳链路中所使用的波长转换器数目相同; 5) 链路负载是独立的且链路上的波长均匀分布于各节点中,独立于其他链路。

如图 2 所示, L_1 链路中有 x 个空闲波长, L_2 链路中有 y 个空闲波长。在 PVWP 中 L_1 和 L_2 两跳链路通过第 $k+1$ 碲基波长转换器连接而且两跳链路需要建立光通路, L_1 链路上的 $\{x\}$ 是 x 个空闲波长组成的集合, $\{x'\}$ 是 $\{x\}$ 经过部分波长转换后得到的集合, $\{y\}$ 是 L_2 链路上的 y 个空闲波长组成的集合。 L_1 和 L_2 之间建立光路的条件为 $\{x'\}$ 与 $\{y\}$ 的交集不能为空集,假设其交集为 n ,在 l 跳的链路上均匀放置了 m 个拉曼波长转换器,此时网络链路恰好被分成 $m+1$ 个跳长, k 个子跳,其中 $k = l/(m+1)$,从而求出跳长为 4 时有 n 条光通路的概率,最后以每 2 跳为单位进行递推,得到了 l 跳链路有 n 条光通路的概率为^[7]

$$p_n^{(4)} = \sum_{x=0}^S \sum_{y=0}^S \sum_{x'=\min\{2d \times f_{on} + x, S\}}^{\min\{(2d+1)x, S\}} \frac{\binom{x'}{n} \binom{S-x'}{y-n}}{\binom{S}{y}} \times \frac{\binom{S}{1} \binom{x'-2d}{x}}{\binom{S}{x}} \times t_x^{(2)} \times t_y^{(2)}, \quad (1)$$

式中: $\max(0, i+j-S) \leq n \leq \min(i, j)$; $t_x^{(2)}, t_y^{(2)}$ 分

别表示在两跳链路中有 x 条以及 y 条光通路的概率^[5]; f_{on} 为开关函数, 表达式为

$$f_{on} = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

在 $M \times M$ Mesh-Torus 网络中(假定 M 是偶数), 假设一对源节点和目的节点的连接路径是在许多最短路径中随机选择的, 可以求得 l 跳链路有 n 条光通路的概率, 其中 r_l 表示某一 l 跳链路形成光通路的概率^[7], 最后求得 Mesh-Torus 网络的阻塞率 B 的表达式为

$$p_n^{(l)} = \sum_{x=0}^S \sum_{y=0}^S \sum_{x'=\min\{2d \times f_{on} + x, S\}}^{\min\{(2d+1)x, S\}} \frac{\binom{x'}{n} \binom{S-x'}{y-n}}{\binom{S}{y}} \times \frac{\binom{x'}{n} \binom{S-x'}{y-n}}{\binom{S}{y}} \times p_x^{(l-2)} \times t_y^{(2)}, \quad (3)$$

$$B = \sum_{l=1}^M p_0^{(l)} r_l. \quad (4)$$

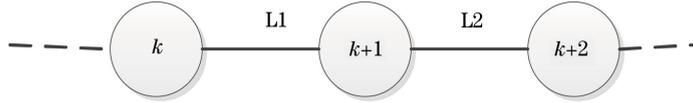


图 2 部分节点具有部分波长转换能力的链路

Fig. 2 Link in which partial nodes have partial capability of wavelength conversion

在(3)式中当 $n=0$ 时, 可以求出 l 跳链路的阻塞概率为 $p_0^{(l)}$, 由(4)式可以求得在 M 以及业务突发性一定时, 改变输入波长数 S 或者转换度 d 时网络的阻塞率。

2.2 碲基波长转换器模型

碲基光纤与传统硅基光纤相比具有更大的拉曼增益系数和拉曼频移^[8], 因此可以利用较短的光纤实现较高的拉曼增益。基于 SRS 的碲基波长转换器原理图如图 3 所示。

在图(3)中, 由于抽运光的实际功率为毫瓦级别, 所以需要经过掺铒光纤放大器(EDFA)对抽运光功率进行放大、整形, 然后再与连续探测光在 2×1 耦合器中进行耦合, 耦合后的抽运光与连续探测光在碲基光纤中发生 SRS 效应, 此时抽运光的能量会传送给探测光, 通过滤波器过滤出抽运信号, 在接收端输出探测光信号, 从而实现了波长

转换。在非色散限制和等线性损耗的条件下, 由石英光纤中 N 信道前向瞬态 SRS 耦合波方程求得^[9]

$$\begin{cases} p_i(z, t) = p_i(t - z/\mu) \cdot \exp(-\alpha z) \cdot \exp(-G_{ji}) \\ G_{ji} = -\frac{C\Delta\nu + b}{\bar{\lambda}MA_e} (k_j - k_i) \cdot p_1(t - z/\mu) \cdot L_e \\ L_e = \frac{1 - \exp(-\alpha z)}{\alpha} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $p_i(t - z/\mu)$ 为初始探测光功率; $p_i(z, t)$ 为转换后的探测光功率; $p_1(t - z/\mu)$ 为第一信道的抽运光功率; 其余各信道为连续探测光; k_i 为 i 信道的波数 ($k_i = \lambda_i^{-1}$), 单位为 cm^{-1} ; M 为保偏系数 ($1 \leq M \leq 2$); C 为常数; $\bar{\lambda}$ 为信道波长的平均值, 单位为 μm ; A_e 为光纤有效面积; L_e 为光信号传输到 z 处的有效相互作用距离; α 为线性损耗系数。

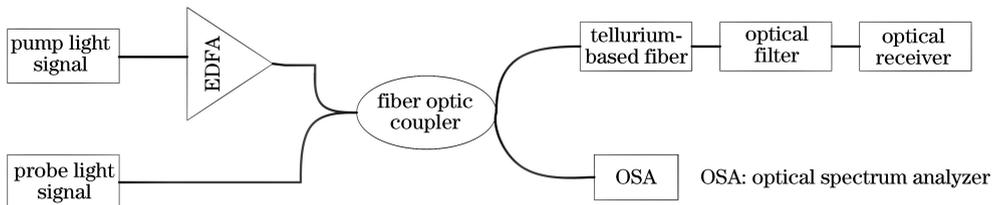


图 3 基于 SRS 的碲基波长转换器原理框图

Fig. 3 Block diagram of Te-based wavelength converter based on SRS

碲基光纤的拉曼增益谱图如图 4 所示, 碲基光纤与传统的硅基光纤相比具有较大的增益系数和较宽的拉曼频移, 故碲基光纤成为发生 SRS 的良好介质, 其归一化拉曼增益系数数量级为 $10^{-12} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ ^[9-10]。因此采用较短的碲基光纤会产生较好的 SRS 效果,

在后面的仿真计算中需要对碲基光纤的拉曼增益谱进行直线拟合。在普通光纤中, 目前可用的频移范围一般为 $0 \sim 545 \text{ cm}^{-1}$ ^[11], 图 4 中选取碲基光纤 $380 \sim 420 \text{ cm}^{-1}$ 作为光纤波长转换部分, 然后对其进行近似直线拟合。选择该区域的原因是该频移段

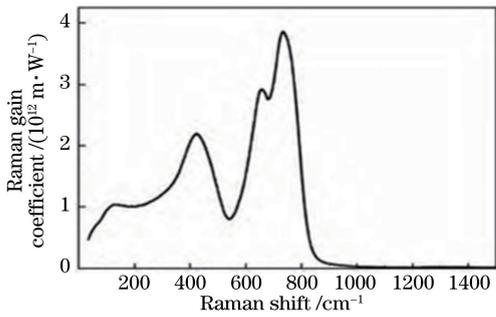


图4 碲基光纤的拉曼增益谱

Fig. 4 Raman gain spectrum of Te-based fiber

内拉曼增益系数较高并且可实现波长转换的范围较大。对其进行直线拟合的公式为

$$g(\Delta\nu) = a\Delta\nu + b, \quad (6)$$

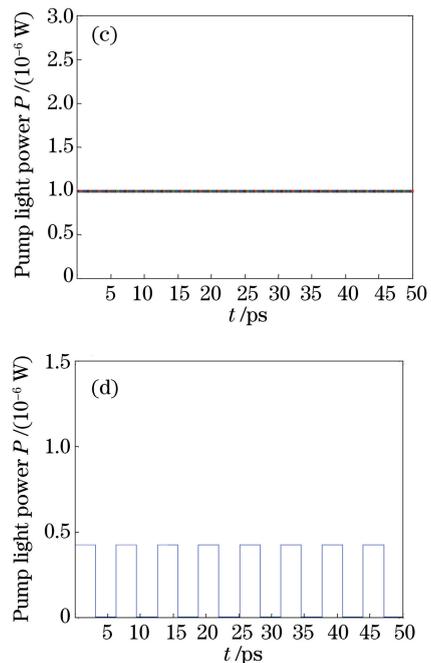
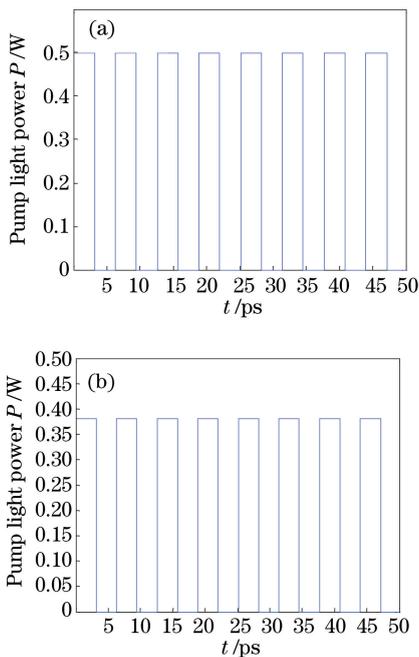


图5 转换前后的功率变化。(a)转换前抽运光功率;(b)转换后抽运光功率;(c)转换前探测光功率;(d)转换后探测光功率

Fig. 5 Power changes before and after conversion. (a) Pump light power before conversion; (b) pump light power after conversion; (c) probe light power before conversion; (d) probe light power after conversion

从以上仿真结果中观察到,图5(a)是转换前的抽运光信号功率,为0.5 W,经过碲基波长转换器后抽运光能量转换到探测光上,图5(b)为转换后抽运光功率,功率降到0.37 W左右;图5(c)为转换前的探测光功率,为 1×10^{-6} W,图5(d)为经过碲基波长转换器转换后的探测光功率,约为0.4 W,而且转换后的探测光波形与转换前的抽运光波形一致,这说明在碲基光纤中发生的SRS效应实现了波长转换且转换效果良好。其次将碲基波长转换器应用于 20×20 Mesh-Torus网络中,进一步分析并验证碲基拉曼波长转换器的参数对网络阻塞率的影响。在

式中: a 为 $2.6 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{cm} \cdot \text{W}^{-1}$; b 为 $-2.3132 \times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ 。由于仿真计算过程中采用的是近似直线拟合,故不可避免地会造成一定的误差。

3 分析与讨论

仿真真是将短波长的抽运光信号转换到长波长的探测光信号中,碲基拉曼波长转换器的参数为:抽运信号光 λ_1 为1480 nm,峰值功率为0.5 W;连续探测光 λ_2 为1560 nm,初始功率为 1×10^{-6} W,光纤长度 L 为60 m,保偏系数 $M=2$,线性损耗系数 α 为 $0.02 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$,有效面积 A_e 为 $2.6 \times 10^{-11} \text{ m}^2$,群速度 u 为 $2.8 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。仿真后所得结果如图5所示。

业务突发度 $Z > 1$ 情况下对网络阻塞进行分析,保持 d 或 S 不变,通过改变波长转换器输入的 S 或者 d 来观察网络阻塞率的变化情况,得到如图6所示的结果。

图6分析了当 d 相同时不同的输入波长数对网络阻塞性能的影响。在同一业务突发度和同一转换度 d 下, $S=4$ 时阻塞率变化范围为 $0.088 \sim 0.094$, $S=6$ 时,阻塞率变化范围为 $0.0960 \sim 0.0995$,说明阻塞率随输入波长数 S 增多而增长,这是因为在业务突发度、转换度一定时,随着信号数的增加,网络中的空闲波长几乎被用完,呼叫被阻塞的概率加大,最终网

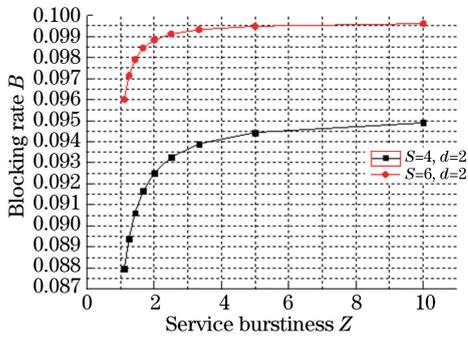


图 6 $S=4, 6$ 和 $d=2$ 时阻塞率随业务突发度的变化情况

Fig. 6 Blocking rate versus service burstiness when $d=2$ and $S=4, 6$

络阻塞率呈增长趋势。在业务突发度 $Z=5$ 时网络阻塞率基本达到平稳状态,说明网络中空闲波长基本被用完,因此增加输入波长数并不会对网络阻塞率产生很明显的影 响,这种情况下可以增大转换度,使网络路径更加灵活,从而减小网络的阻塞率。

图 7 分析了当输入波长数相同时,不同的转换度对网络阻塞性能的影响。在同一业务突发度和同一个 S 输入时, $d=3$ 时的网络阻塞率相对于 $d=2$ 时的阻塞率明显下降,降低的范围为 $0.0005 \sim 0.004$ 。这是因为转换度的增加使得信号路由的选择范围更大,缩短了信号等待空闲波长进行信号传输的时间,网络链路的流量负荷的增加导致网络中信号在传输的过程中相互干扰加强,最终,转换度的增加使网络受阻加重,但是转换度的增加在一定程度上减小了网络阻塞率增长的趋势。结果表明,增加转换度 d 能够减小网络阻塞率。

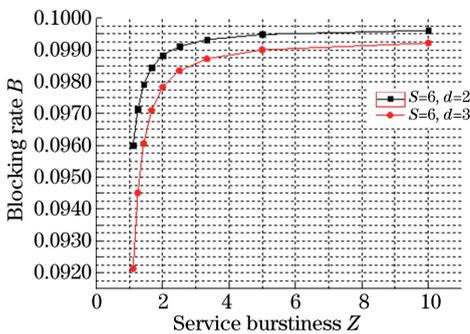


图 7 $S=6$ 和 $d=2, 3$ 时阻塞率随业务突发度的变化情况

Fig. 7 Blocking rate versus service burstiness when $S=6$ and $d=2, 3$

图 6 和图 7 分别从波长转换度 d 和输入波长数 S 两个参数对 Mesh-Torus 网络阻塞性能的影响进行了分析。 $Z=5, d=2$ 时, $S=4$ 时,网络阻塞率约为 0.0946 , $S=6$ 时约为 0.0995 ,而 $Z=5, S=6$ 时, $d=3$ 时网络阻塞率约为 0.099 。可以看出,波长

数对 Mesh-Torus 网络阻塞性能影响更大。这是由于在静态网络中,每条路由的任意一跳链路上的波长数量是有限的,如果超过特定的波长数量,一方面网络负载加大,另一方面网络中信号呼叫被阻塞的概率加大,所以在其他条件不变时,应该综合考虑输入波长数以及波长转换度的数量,从而使波长转换器达到最优配置并最终提高网络通信速度。

分析中可以看出,业务突发度也对 Mesh-Torus 网络阻塞率产生了一定的影响。当 $Z < 2$ 时,网络阻塞率呈指数增长,这是因为网络中空闲波长较多时可以满足各个信号的呼叫请求,此时呼叫被阻塞的概率较小,因此网络受到阻塞的程度较小,这种状态下波长转换器作用不明显。但是当 $Z > 2$ 时,网络阻塞率增长趋势变缓,这是由于此时链路负载饱和,波长转换器缓解了网络链路中呼叫被阻塞的时间,从而减小了 Mesh-Torus 网络阻塞率的增长趋势。当 $Z > 5$ 时,网络阻塞率增长趋势平稳,这说明通过波长转换技术调节网络容量是有限度的。

4 结 论

将碲基拉曼波长转换器应用于 20×20 Mesh-Torus 网络中,在节省资源以及经济成本的前提下,在 BPP 模型中研究碲基拉曼波长转换器的相关参数(S, d)对 Mesh-Torus 网络的阻塞性能影响并对其进行仿真分析。结果表明:在业务突发度一定的情况下,增加输入波长数 S 会使阻塞率的增长趋势得到一定程度的减缓;增加转换度 d 会减小 Mesh-Torus 网络的阻塞率,另外在不同的业务突发度下对网络阻塞率的影响也是不一样的。因此增加碲基波长转换器的输入波长数 S 和转换度 d 可以降低 Mesh-Torus 网络的阻塞性能。仿真结果对于以后研究光网络中阻塞性能的相关问题有一定参考价值。

参 考 文 献

- [1] Zhao J J, Zheng D, Hu J H, *et al.* Node-first virtual network mapping algorithm in elastic optical network [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (9): 0906003.
赵继军, 郑斗, 胡劲华, 等. 弹性光网络中节点优先的虚拟网络映射算法 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0906003.
- [2] Li M, Zhang Y F, Ren S, *et al.* Research progress of next generation optical networks technology for cloud computing [J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2015, 52(7): 070003.
- 李明, 张引发, 任帅, 等. 面向云计算的下一代光网络技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070003.
- [3] Zhang Y F, Ren S, Liao X M, *et al.* Study on high power inter-channel crosstalk attack in optical networks [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 080607.
- 张引发, 任帅, 廖晓闽, 等. 光网络中大功率带间串扰攻击研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080607.
- [4] Zang L, Li L M. The performance analysis of all optical network with XGM wavelength converter[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(4): 611-613.
- 张雷, 李乐民. XGM 波长转换器网络的性能分析[J]. 电子学报, 2002, 30(4): 611-613.
- [5] Subramaniam S, Somani A K, Azizoglu M, *et al.* A performance model for wavelength conversion with non-Poisson traffic[C]//Proceedings of INFOCOM '97, April 7-11, 1997, Kobe, Japan. New York: IEEE, 1997: 499-506.
- [6] Ye T. Research on wavelength converter configuration and virtual topology design of WDM optical transport network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2001: 12-25.
- 叶通. WDM 光传送网波长转换器配置和虚拓扑设计问题的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2001: 12-25.
- [7] Ye T, Qiu K, Tang M G. Performance analysis of Mesh-Torus with limited-range wavelength conversion based on PVWP [J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(7): 32-37.
- 叶通, 邱昆, 唐明光. 基于 PVWP 的有限波长转换的 Mesh-Torus 网络的性能分析[J]. 通信学报, 2001, 22(7): 32-37.
- [8] Li J G. Research of all-optical wavelength conversation based on stimulated Raman scattering in tellurite fiber[D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2014: 37-42.
- 李君改. 基于碲基光纤 SRS 效应波长转换研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2014: 37-42.
- [9] Hamza H S. A scalable optical WDM multicast Benes network with multi-channel wavelength converters [J]. Photonic Network Communications, 2011, 21(2): 201-213.
- [10] Huang Q R, Zhong W D. An optical wavelength-routed multicast packet switch based on multitime-slot multiwavelength conversion [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(18): 1518-1520.
- [11] Gong J M, Meng L H, Yang M, *et al.* Optical wavelength conversion for stimulated Raman scattering based on photonic crystal fiber[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 1206011.
- 巩稼民, 孟令贺, 杨萌, 等. 基于光子晶体光纤的受激拉曼散射全光波长转换研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1206011.