

XGM 波长变换器网络的性能分析

张 雷, 李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室, 四川成都 610054)

摘 要: 目前对有限范围波长变换器的研究或者是针对能变换到较长和较短波长的 FWM (SOA (Semiconductor Optical Amplifier) in Four Wave Mixing, 基于半导体光放大器的四波混合) 波长变换器的, 或者是针对具有卷绕 (Wraprounds) 功能的变换器. 本文研究了只具有单边变换且不具有卷绕的 XGM (SOA (Semiconductor Optical Amplifier) in Cross Gain Modulation, 基于半导体光放大器的交叉增益调制) 有限范围波长变换器对网络性能的影响, 从网络的阻塞率方面比较了 FWM 与 XGM 波长变换器对网络性能的影响. 研究结果表明, XGM 波长变换器的性能虽然只相当于具有 10–20% 左右变换范围的 FWM 波长变换器, 但较无波长变换器网络的性能已经有了较大的改善, 同时与全范围波长变换器网络的性能相差并不太远.

关键词: XGM 波长变换器; FWM 波长变换器; 波分复用; 有限波长变换; 阻塞率

中图分类号: TN913.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 04-0611-03

The Performance Analysis of All Optical Network with XGM Wavelength Converter

ZHANG Lei, LI Le min

(National Key Lab of Broadband Optical Transmission and Communication Networks, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: By far, the research about limited range wavelength converter is concentrated on FWM (SOA (Semiconductor Optical Amplifier) in Four Wave Mixing) wavelength converter which can convert the input wavelength to longer or shorter output wavelength, or on wavelength converter which has wraprounds capability. In this paper, the network performance which is influenced by XGM (SOA (Semiconductor Optical Amplifier) in Cross Gain Modulation) wavelength converter which can only convert input wavelength to shorter output wavelength is studied. The research result shows that although the performance of network with XGM wavelength converter approximates to the performance of network with FWM wavelength converter which has 10–20% converting range capability, the performance improvement is significant and is not far away from the performance with all-range wavelength converter.

Key words: XGM wavelength converter; FWM wavelength converter; WDM; limited range wavelength converter; blocking probability

1 引言

WDM (Wavelength Division Multiplexing, 波分复用) 技术由于能充分利用光纤的巨大带宽, 正在成为骨干光纤网中最具吸引力的技术. 在 OXC (Optical Cross Connects, 光交叉连接设备) 中装备有波长变换器 (Wavelength Converter) 的 WDM 网络称为波长变换网络; 反之, 不具有波长变换器的 WDM 网络称为波长连续网络. 波长变换网络较波长连续网络有较低的阻塞率.

波长变换器在过去的一些年中已从最初的光/电波长变换器发展到了全光波长变换器. 在全光波长变换器中, 基于 SOA 的 XGM 与 XPM 目前最适合应用^[1]. XGM 波长变换器的优点在于: 易于实现; 在 10Gb/s 时无需补偿. 不足之处在于: 当转换至同样或较长的波长时, 消光比 (extinction ratio) 迅速降低; 变换后信号反转. XPM (SOA (Semiconductor Optical Amplifier)

in Cross Phase Modulation, 基于半导体光放大器的交叉相位调制) 波长变换器比 XGM 波长变换器较复杂, 但它可以克服 XGM 波长变换器的不足之处, 当它变换至较长和较短的波长时都具有较高的消光比, 它的不足在于它不能应用于相干和模拟调制模式 (coherent and analog modulation)^[2]. FWM 波长变换器转换速率较 XGM 与 XPM 波长变换器快, 且对变换格式透明, 当它变换至较长或较短的波长时都具有较高的消光比, 但由于变换效率不高, 很难得到较大的信噪比; 同时, 当它变换跨度较大时, 变换能力迅速降低^[3].

鉴于目前的技术限制, 制作理想的全范围的全光波长变换器比较困难, 制作有限范围的全光波长变换器是可行的. 对有限范围波长变换器的研究已经有一些文章. 文献[4, 5]中是针对 FWM 有限范围波长变换器; 文献[6, 7]中为了使分析方便, 也为了使链路上的负载均匀分布于每个波长, 假定波长变

换器具有卷绕 (Wraprounds) 的功能, 即最长的波长和最短的波长之间可以相互变换, 这种具有卷绕功能的波长变换器在实际上是较难实现. XGM 波长变换器也是一种有限范围的波长变换器, 它的特性限制了它只能向较短的波长变换, 而且不具有卷绕的特性. 由于它的一些优点, 使它可以用在 WDM 网络中以降低网络的阻塞率.

本文主要针对具有 XGM 波长变换器的 WDM 网络, 研究了 XGM 与 FWM 波长变换器网络在性能上的差别, 本文中的波长变换器均不考虑具有卷绕功能. 本文安排如下: 第 2 节首先用一个近似的数学模型, 从理论上比较了二者对单一路径的阻塞率的影响; 第 3 节介绍了仿真时用于网络中的路由波长分配算法; 第 4 节通过在 Messtrons 网络中的仿真, 从网络的阻塞率上比较了二者的性能差别; 第 5 节为结论.

2 XGM 与 FWM 波长变换器在单一路径上的性能比较

XGM 波长变换器是一种有限范围变换的波长变换器, 文献[4]中有一个近似的数学模型是关于 FWM 有限范围波长变换器的, 我们稍微做一些变化, 也可将其应用到 XGM 波长变换器. 我们将此模型作为理论分析的基础, 来比较二者对单一路径阻塞率的影响. 图 1 中左图为 FWM 波长变换器的变换示意模型, λ_4 可以转换到 $\lambda_5, \lambda_4, \lambda_3$, 此时转换的范围为 1 个波长; 右图为 XGM 波长变换器的变换示意模型, λ_4 可以转换到 $\lambda_3, \lambda_2, \lambda_1$, 当它转换到 λ_4 时, 消减率会降低, 但此时我们可以不用波长变换器, 从而即增加 XGM 波长变换器的变换范围, 又使网络中的波长变换器的数目有所减低.

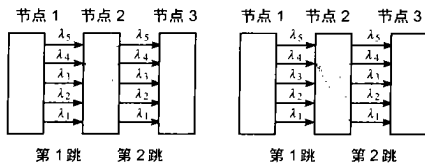


图 1 FWM 波长变换器与 XGM 波长变换器的模型示意图

根据以上模型, 我们定义:

w 为波长数, H 为路径跳数, ρ 为 λ_i 被用于第 j 跳上的概率, P_B 为从第 1 跳到第 H 跳之间所有路径都阻塞的概率. $\bar{\lambda}_{i,j}$ 为起始于第 j 跳, 起始波长为 λ_i , 终止于最终节点的路径; $p(\bar{\lambda}_{i,j})$ 为此路径阻塞的概率. $a(i)$ 为输入波长 λ_i 允许转换的范围. $\bar{\lambda}_{a(i),j+1}$ 为所有起始于第 $j+1$ 跳, 起始波长在 $a(i)$ 之内, 终止于最终节点的路径; $p(\bar{\lambda}_{a(i),j+1})$ 为这些路径阻塞的概率.

$$p(\text{从第 } j \text{ 跳到第 } H \text{ 跳的路径阻塞}) = p\left(\prod_{i=1}^w \bar{\lambda}_{i,j}\right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} p\left(\prod_{i=1}^w \bar{\lambda}_{i,j}\right) &= p\left(\bar{\lambda}_{w,j} \cap \left(\prod_{i=1}^{w-1} \bar{\lambda}_{i,j}\right)\right) \\ &= p\left(\left(\lambda_w \text{ 已用在第 } j \text{ 跳 } \cup \lambda_w \text{ 在第 } j \text{ 跳上空闲并且}\right.\right. \\ &\quad \left.\left.\cdot \bar{\lambda}_{a(w),j+1}\right) \cap \left(\prod_{i=1}^{w-1} \bar{\lambda}_{i,j}\right)\right) \\ &= (1-\rho) \cdot p\left(\left(\prod_{i=1}^{w-1} \bar{\lambda}_{i,j}\right) \cap \bar{\lambda}_{a(w),j+1}\right) + \rho \cdot p\left(\prod_{i=1}^{w-1} \bar{\lambda}_{i,j}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

根据 XGM 波长变换器的特点有:

$$\bar{\lambda}_{a(i),j+1} = \prod_{l=1}^i \bar{\lambda}_{l,j+1} \quad (3)$$

用式(3)代入式(2)得到:

$$p\left(\prod_{i=1}^w \bar{\lambda}_{i,j}\right) = (1-\rho) \cdot p\left(\prod_{i=1}^w \bar{\lambda}_{i,j+1}\right) + \rho \cdot p\left(\prod_{i=1}^{w-1} \bar{\lambda}_{i,j}\right) \quad (4)$$

我们得到跳数为 H 跳, 具有 XGM 波长变换器的路径的阻塞率 $P_B = p\left(\prod_{i=1}^w \bar{\lambda}_{i,1}\right)$

$$P_B = p\left(\prod_{i=1}^w \bar{\lambda}_{i,1}\right)$$

根据 FWM 波长变换器的特点有^[5]:

$$\bar{\lambda}_{a(i),j+1} = \prod_{l=\max(i-k,1)}^{\min(i+k,w)} \bar{\lambda}_{l,j+1} \quad (5)$$

此处 k 为输出波长可以向输入波长两边转换的波长数.

用式(5)代入式(2)得到:

$$\begin{aligned} p\left(\prod_{i=1}^w \bar{\lambda}_{i,1}\right) &= (1-\rho) \cdot p\left(\left(\prod_{i=1}^{w-1} \bar{\lambda}_{i,j}\right) \cap \left(\prod_{l=\max(i-k,1)}^{\min(i+k,w)} \bar{\lambda}_{l,j+1}\right)\right) \\ &\quad + \rho \cdot p\left(\prod_{i=1}^{w-1} \bar{\lambda}_{i,j}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

我们得到跳数为 H 跳, 具有 FWM 波长变换器的路径的阻塞率 $P_B = p\left(\prod_{i=1}^w \bar{\lambda}_{i,1}\right)$

$$P_B = p\left(\prod_{i=1}^w \bar{\lambda}_{i,1}\right)$$

FWM 波长变换器的波长变换度 D 为^[4]:

$$D = \frac{100k}{(w-1)} (\%) \quad (7)$$

对于全范围波长变换器, 我们用以下公式计算阻塞率^[8]:

$$P_B = 1 - (1 - \rho^w)^H \quad (8)$$

对于无波长变换器, 我们用以下公式计算阻塞率^[8]:

$$P_B = [1 - (1 - \rho)^H]^w \quad (9)$$

我们用以上公式计算出 8 个波长, 跳数为 3 跳时, XGM 与具有各种变换范围的 FWM 对路径的阻塞率的影响, 见图 2, 图中曲线 a 为无波长变换器时的性能曲线, 曲线 b 、曲线 c 、曲线 d 分别为变换范围为 10%、20%、50% 时的 FWM 波长变换器的性能曲线. 曲线 e 为全范围波长变换器的性能曲线, 曲线 f 为 XGM 波长变换器的性能曲线. 在计算中, 我们首先确定变换度 D , 再由式(7)得到 $k = D * (w - 1) / 100$, 当 k 不为整数时, 我们取大于 k 的最小整数. 从图中可以看出, 在 8 个波长时, XGM 波长变换器的阻塞率接近 10% 左右变换范围的 FWM 波长变换器的阻塞率. 也可看到, 此时 $k = 1$, 实际的 $D = 14\%$, XGM 波长变换器的性能大约相当于 10% - 20% 左右变换范围的 FWM 波长变换器的性能.

以上是我们理论上分析了 XGM 与 FWM 波长变换器对单一路径阻塞率的影响, 可以看到 XGM 只相当于一定变换范围内的 FWM 波长变换器的性能, 但由于模型是建立在波长和链路都独立的条件下, 故在增益上可能会和实际有所出入.

3 路由波长分配算法

在现有的文献[4~7]中, 路由波长分配算法都是基于固定路由下的波长分配算法. 我们仿真中的路由波长分配算法是基于固定路由下的波长分配算法. 我们首先选定一条最短路由, 再在这条路由上的各条链路上运用波长分配算法, 找到一条合适的波长.

在网络中, 我们针对 XGM 波长变换器的特点, 设计了一种适用于 XGM 波长变换器网络的波长分配算法. 先把波长从

长到短按顺序排列成 $\lambda_w, \lambda_{w-1}, \dots, \lambda_1$, 开始先在第 1 跳上选一个最短的空闲波长, 再在第 2 跳上判断此波长是否空闲, 若空闲则选此波长为第 2 跳上的波长, 若为其他连接所占有, 则在此比波长短的波长中选一个最长的空闲波长, 重复此种波长选择方法, 若不能找到合适的波长, 则在第 1 跳上的比刚试过的波长长的波长中选一个最短的空闲波长作为初始波长, 再重复以上的波长搜寻步骤。

在以上的 XGM 波长分配算法中, 我们将在发送和接收链路上分别寻找合适的波长, 此点的考虑是基于以下原因: 如果接收和发送的波长一致, 则由于中间节点的 XGM 波长变换器不具有把短波长变换到长波长的功能, 故接收链路将会阻塞。

对于 FWM 波长变换器, 波长分配算法如下: 先把波长从长到短按顺序排列成 $\lambda_w, \lambda_{w-1}, \dots, \lambda_1$, 先在第 1 跳上选一个最短的空闲波长, 再在第 2 跳上判断此波长是否空闲, 若空闲则选此波长为第 2 跳上波长, 若为其他的连接所占有, 则在此波长的变换范围内的波长中选一个最低的空闲波长作为第 2 跳

上的波长, 重复此种波长选择的方法, 若在第 i 跳不能找到合适的波长, 则在第 $i-1$ 跳上比刚试过的波长长的波长中选一个最短的空闲波长作为初始波长, 再重复以上的波长搜寻步骤。

在以上的 FWM 波长分配算法中, 我们为了和 XGM 波长分配算法做相应的比较, 在发送和接收链路上也分别寻找合适的波长。

4 网络仿真及结果

网络仿真是基于 Mesh torus 进行的, 仿真假设:

每个波长只能有一个连接, 连接到达服从泊松过程, 连接持续时间服从指数分布, 每次连接请求的目的节点均匀分布于剩余的所有节点, 网络只支持点到点的连接, 连接请求不排队, 即一旦阻塞立即丢弃。

仿真的拓扑图是 $N \times N$ Mesh torus^[7], 最短路径在 Mesh torus 中用的是文献[7]中的算法, 呼叫次数为 1000000 次, 每条链路的光纤为双向单光纤。

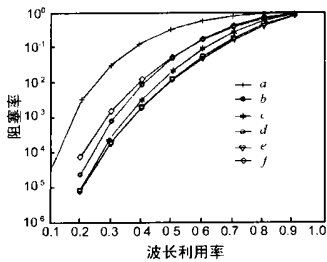


图 2 3 跳、8 个波长的路径阻塞率

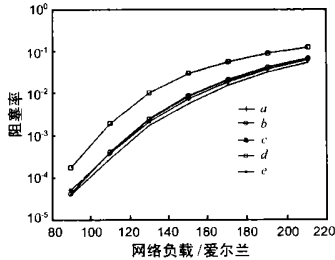


图 3 XGM 与 FWM 在 16 个波长, 5×5 Mesh torus 网络中的阻塞率比较

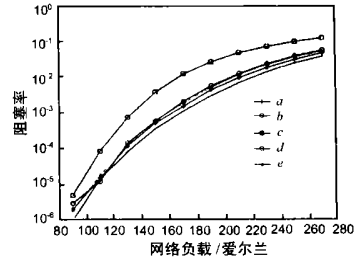


图 4 XGM 与 FWM 在 16 个波长, 8×8 Mesh torus 网络中的阻塞率比较

图 3、图 4 分别是波长数为 16 时, 5×5 Mesh torus 网络和 8×8 Mesh torus 网络中 XGM 与 FWM 波长变换器的性能比较。我们从图中可以看出, 在 Mesh torus 网络中, XGM 波长变换器的性能与 10% 变换范围的 FWM 波长变换器的性能最为接近。同时我们也看出, 当波长数一定时, 增加跳数, XGM 与 FWM 波长变换器的性能差距略微有所增大, 但 XGM 与 10% 变换范围的 FWM 波长变换器的性能一直较一致。与理论分析略微不同的是, XGM 与 20% 变换范围的 FWM 也很接近。从以上图中还发现, XGM 较无波长变换时的性能已经有了较大的改善, 与全范围波长变换器的性能相差并不大。

综上所述, XGM 波长变换器的性能在实际网络中, 与具有 10%–20% 变换范围的 FWM 波长变换器的性能较接近。

5 结论

本文首次比较了具有单边变换的 XGM 波长变换器与具有有限双边变换范围的 FWM 波长变换器对网络性能的影响。首先, 用一个近似的数学模型从理论上比较了在单一路径上二者的性能; 然后, 在 $N \times N$ Mesh torus 网络中, 通过仿真从网络的阻塞率方面比较了二者的性能差别。最后得出, XGM 较无波长变换器网络的性能已经有了较大的改善, 与具有 10%–20% 变换范围的 FWM 波长变换器的性能较为接近, 并且与全范围波长变换器的性能相差并不远。

参考文献:

[1] B Ramanurthy, et al. Wavelength conversion in WDM networking [J].

IEEE J Select Areas Commun, 1998: 1061–1073.

[2] T Durhuus, et al. All optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifier [J]. J Lightwave Technol, 1996: 942–954.

[3] R Sabella, et al. Optical transport networks employing all optical wavelength conversion: Limits and features [J]. IEEE J Select Areas Commun, 1996, 14(5): 968–978.

[4] J Yates, et al. Limited range wavelength translation in all optical networks [A]. Proc. INFOCOM '96 [C]. 1996. 954–961.

[5] H Harai, et al. Performance analysis of wavelength assignment policies in all optical networks with limited range wavelength conversion [J]. IEEE J Select Areas Commun, 1998. 1051–1060.

[6] T Tripathi, et al. Computing approximate blocking probabilities in wavelength routed all optical networks with limited range wavelength conversion [A]. Proc. INFOCOM '99 [C], 1999. 406–416.

[7] V Shama, et al. Limited wavelength translation in all optical WDM mesh networks [A]. Proc. INFOCOM '98 [C], 1998. 506–509.

[8] R A Barry, et al. Models of blocking probability in all optical networks with and without wavelength changers [J]. IEEE J Select Areas Commun, 1996: 858–867.

作者简介:

张 雷 男, 1971 年 12 月生于江苏无锡, 博士生, 主要研究方向为 WDM 全光网络。

李乐民 男, 1932 年 5 月生于浙江吴兴, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要研究方向是信息传输与通信网。