

doi:10.3788/gzxb20184706.0606004

光分组交换网络中增益光开关技术研究

李珉璇^{1,2}, 冯欢¹, 汪欢¹, 谢小平¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:针对光分组交换网络中光开关插入损耗导致交换跳数受限的问题,基于半导体光放大器四波混频非线性效应,提出了一种两级级联的增益光开关技术思路,可以有效实现光交换后输出信号的增益补偿及形状再生,提高信号质量.利用 OptiSystem 仿真平台,优化系统参数,在泵浦光位于信号光中心波长 ± 4 nm 范围、泵浦光功率在(3~15)dBm 区间内,增益光交换输出信号通过增益补偿和形状再生相较于一级交换输出信号可实现增益大于 25 dB、误码率从 10^{-5} 提高至 10^{-18} 、Q 因子从 4.16 提高至 8.71 的大幅度质量改善.该技术在多跳光分组交换网络中有较大应用前景.

关键词:光开关;光分组交换;四波混频;半导体光放大器;多节点交换

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)06-0606004-8

Technical Research on Optical Gain Switch in Optical Packet Switching Network

LI Min-xuan^{1,2}, FENG Huan¹, WANG Huan¹, XIE Xiao-ping¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Since the number of switching hops are severely restricted by the insertion loss of optical switches in an optical packet switching network. A two-cascaded optical gain switch based on four-wave mixing nonlinear effects in semiconductor optical amplifiers was investigated. By using this method, the quality of output signal from the optical switching will be improved as well as achieving the shape regeneration and power compensation, which means the limitation could be overcome. The result from the OPTISYSTEM simulation platform shows that, in an optimization system, the maximum of the gain is more than 25 dB, meanwhile the bit error rate and Q factor could gain a high promotion (from 10^{-5} to 10^{-18} and 4.16 to 8.71, respectively), with the pump wavelength located at the center wavelength of the signal light within ± 4 nm, the power ranging from 3 dBm to 15 dBm. This optical gain switch system will have great application prospect in optical packet switching network with multi-hops.

Key words: Optical switch; Optical packet switching; Four-wave mixing; Semiconductor optical amplifier; Multi-node switching

OCIS Codes: 060.4259; 060.6719; 060.1155; 060.4370

0 引言

随着以交换为中心的信息网络的逐步发展^[1-2],光交换技术已经从传统的颗粒度较大的光线路交换(Optical Circuit Switching, OCS)技术^[3]向颗粒度更小、交换更灵活的光分组交换(Optical Packet

基金项目:国家自然科学基金(No. 91638101)和中华人民共和国科学技术部重大项目(Nos. 2017YFC0803905, 2017YFC0803909)资助

第一作者:李珉璇(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为空间信息交换网络技术. Email: liminxuan2015@opt.cn

导 师:谢小平(1976-),男,研究员,博士,主要研究方向为空间激光通信及空间光网络. Email: xxp@opt.ac.cn

通讯作者:冯欢(1986-),女,助理研究员,博士,主要研究方向为空间光分组交换网络. Email: hfengoptics@opt.ac.cn

收稿日期:2017-12-13; **录用日期:**2018-03-29

<http://www.photon.ac.cn>

Switching, OPS)技术^[4]发展. OPS技术以光分组包为最小的交换颗粒,光分组包由分组头、数据净荷和保护时隙组成,分组头包含了路由和控制信息. OPS网络基于“存储转发”机制,在交换时无需提前建立光路、分配资源.在光分组包到达网络交换节点时,节点暂时存储该分组包,读取分组头信息,根据各链路资源占用情况,选择路由并配置交换矩阵进行转发^[5],光分组包经过多节点转发后到达目的节点.光开关是实现节点交换功能的核心组成,其性能影响甚至决定着 OPS网络的整体性能.

传统光开关具有一定的插入损耗^[6],例如:基于微电子机械系统的光开关已经实现上百个端口的大规模阵列,其平均插入损耗大于 1 dB^[7];半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifiers, SOA)广泛应用于光交换矩阵中^[8],具有 12 dB 输入功率动态范围的 4×4 SOA 光开关的插入损耗为 1 dB^[9];文献^[10]通过对文献^[9]的光开关进行三级级联,实现了 16×16 SOA 光开关阵列,由于受到放大自发辐射噪声的累积和饱和吸收失真的影响,导致耦合后的光开关插入损耗增加为 2.5 dB,降低了 SOA 光开关阵列性能^[11];基于 MZI-SOA 的 16×16 光开关在 15 dB 的输入功率动态范围内插入损耗小于 1 dB^[12].光开关的插入损耗降低了信号在单节点输出的质量,信号在经过多节点交换后积累较大的插入损耗^[13],造成信号的光学信噪急剧劣化、信号严重失真,从而限制了 OPS网络的交换跳数.

针对 OPS网络多交换跳数的需求及传统光开关的高插入损耗限制了 OPS网络交换跳数的问题,本文利用 OptiSystem 仿真平台搭建了两级级联增益光开关,分别研究了增益补偿和形状再生系统中泵浦光波长和功率两个参量对光交换输出信号质量的影响,在泵浦光波长位于信号光中心波长 ± 4 nm 范围、泵浦光功率在 (3~15) dBm 区间内,增益光交换输出信号通过增益补偿和形状再生相较于一级交换输出信号可实现增益大于 25 dB、误码率从 10^{-5} 提高至 10^{-18} 、Q 因子从 4.16 提高至 8.71 的大幅度质量改善,实现高增益光开关系统.该技术通过补偿信号在节点光交换后的增益,对交换输出信号进行形状再生,保证了信号在多节点光分组交换后的质量,从而有效增加了 OPS网络的交换跳数,提升了网络的灵活性和可靠性.

1 四波混频效应分析与级联增益再生

四波混频(Four-wave Mixing, FWM)过程起源于介质的束缚电子对电磁场的非线性响应.当多束光在非线性介质中传输时,由于介质的三阶非线性效应的影响,介质中将产生新的波长,新产生的光场强度与输入光波强度的乘积成正比,相位和频率是几个输入光波的线性组合.FWM 的主要特点可以从三阶极化项来理解

$$\mathbf{P}_{\text{NL}} = \epsilon_0 \chi^{(3)} : \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} \quad (1)$$

式中, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{P}_{NL} 为感应的非线性极化强度.

考虑相互作用的光是四个频率不同的线偏振光场 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$, 且沿同一 x 轴方向偏振, 则总的电场为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \hat{\chi} \sum_{j=1}^4 \mathbf{E}_j \exp[i(\beta_j z - \omega_j t)] + \text{c.c} \quad (2)$$

式中, 传输常数为 $\beta_j = \tilde{n}_j \omega_j / c$, \tilde{n}_j 是模式折射率. 通过三阶非线性光学效应, 可以得到 x 方向上光纤的非线性极化强度为

$$\mathbf{P}_{\text{NL}} = \frac{1}{2} \hat{\chi} \sum_{j=1}^4 \mathbf{P}_j \exp[i(\beta_j z - \omega_j t)] + \text{c.c} \quad (3)$$

可以发现, \mathbf{P}_j 由多个包含三个电场积的项组成, 其中频率 ω_4 上的非线性响应可表示为

$$\mathbf{P}_4 = \frac{3\epsilon_0}{4} \chi_{xxx}^{(3)} [|\mathbf{E}_4|^2 \mathbf{E}_4 + 2(|\mathbf{E}_1|^2 + |\mathbf{E}_2|^2 + |\mathbf{E}_3|^2) \mathbf{E}_4 + 2\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \mathbf{E}_3 \exp(i\theta_+) + 2\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \mathbf{E}_3^* \exp(i\theta_-)] \quad (4)$$

式中, θ_+ 和 θ_- 的定义为

$$\begin{cases} \theta_+ = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \beta_4)z - (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \omega_4)t \\ \theta_- = (\beta_1 + \beta_2 - \beta_3 - \beta_4)z - (\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4)t \end{cases} \quad (5)$$

在四波混频过程中究竟有多少项是有效的, 取决于由 θ_+ 和 θ_- 支配的 \mathbf{E}_4 和 \mathbf{P}_4 之间的相位失配, 只有当相位失配几乎为零时, 才会发生显著的四波混频过程, 这就需要频率及波矢的匹配^[14]. 用量子力学的术语可以描述为: 一个或几个光波的光子被湮灭, 同时产生了几个不同频率的新光子, 且在此参量过程中, 净能量和动量是守恒的, 此时即发生四波混频过程. 在 FWM 过程中, θ_- 对应于频率为 ω_1 和 ω_2 的两个光子湮灭、同时

产生频率为 ω_3 和 ω_4 的两个新光子的情形,即 $\omega_3 + \omega_4 = \omega_1 + \omega_2$,此过程相位匹配条件为 $\Delta k = 0$,即

$$\Delta k = \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 = (\tilde{n}_3 \omega_3 + \tilde{n}_4 \omega_4 - \tilde{n}_1 \omega_1 - \tilde{n}_2 \omega_2) / c \quad (6)$$

当 $\omega_1 = \omega_2$ 时,只需要入射一束泵浦光即可在非线性质中激发 FWM 效应,又称为简并的 FWM 效应,如图 1(a)所示,其中四束光之间满足

$$\omega_s + \omega_i = 2\omega_p \quad (7)$$

级联增益放大的研究分析见图 1(b),即两次简并的 FWM 效应.1)一级 FWM:泵浦光 ω_{p1} 和信号光 ω_{s1} 进行 FWM,消耗泵浦光,得到两个位置对称的闲频光 ω_{i1} 和 ω_{i2} ,即 $\omega_{p1} - \omega_{i1} = \omega_{i2} - \omega_{s1}$.2)二级 FWM:闲频光 ω_{i1} 为二级 FWM 信号光 ω_{s2} ,泵浦光 ω_{p1} 增加功率为二级 FWM 泵浦光 ω_{p2} ,进行 FWM,消耗泵浦光,得到两个位置对称的闲频光 $\omega_{i1'}$ 和 $\omega_{i2'}$,即 $\omega_{s2} - \omega_{i1'} = \omega_{i2'} - \omega_{p2}$.因此, $\omega_{i2'} = \omega_{s1}$,即级联 FWM 后输出的一束与原信号光波长的位置相同.并且,由于 FWM 过程中闲频光复制了信号光的全部信息,闲频光 $\omega_{i2'}$ 与原信号光 ω_{s1} 所携带信息完全一致.因此,信号光基于二级级联 FWM 效应后得到了再生和增益放大.

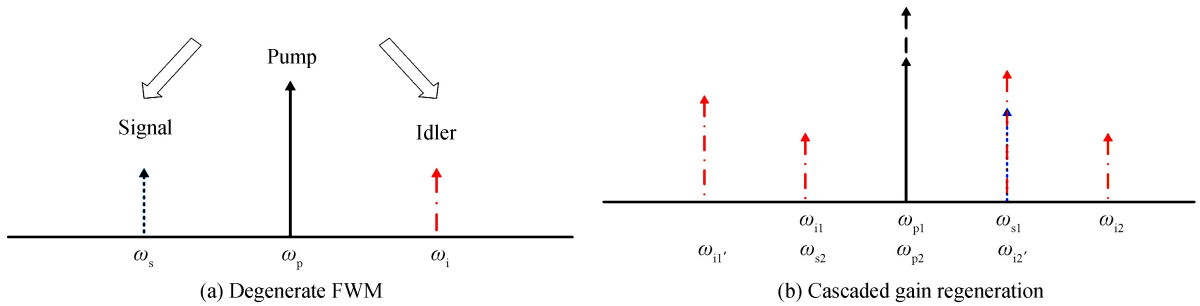


图 1 简并的四波混频效应与级联增益再生

Fig.1 Degenerate FWM and cascaded gain regeneration

2 增益光开关技术

在 OPS 网络中,光交换矩阵是节点的主要配置,波长变换光开关是实现光分组包在交换矩阵中交换的一种技术途径^[15].如图 2(a)所示,任意信道输入光 λ_0 通过波长变换转换为输出光 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 中的任一波长,并从相应信道端口输出,实现 $N \times N$ 光开关功能.基于 FWM 效应实现 1×2 波长变换光开关的结构见图 2(b),调节泵浦光波长参数使之与输入信号光产生简并 FWM 效应,通过滤波得到两路输出转换信号光.利用 OptiSystem 仿真软件搭建典型的 1×2 波长变换光开关系统,输入光 λ_0 波长 1 547 nm、功率 3 dBm,调节系统参数模拟实际应用中插入损耗情况,得到输出光 λ_1, λ_2 参数见表 1,光开关交换后信号质量较差.因此,本文基于半导体光放大器 FWM 效应,提出了一种两级级联的增益光开关技术思路,可以有效实现在光开关中交换后信号的增益补偿及形状再生, 1×2 波长变换增益光开关方案见图 3.

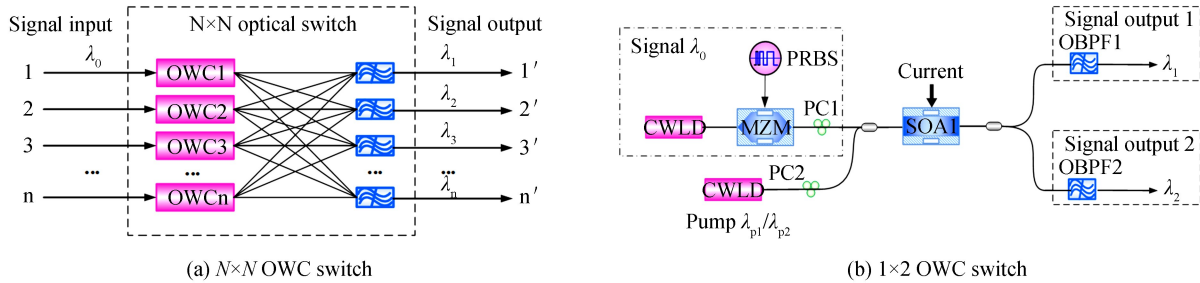


图 2 波长变换光开关

Fig.2 Optical wavelength conversion (OWC) switch

表 1 1×2 波长变换光开关参数

Table 1 Parameters of 1×2 OWC switch

Output signal	Wavelength	Q	BER	Power
λ_1	1 551 nm	4.16	1.53×10^{-5}	-21.372 dBm
λ_2	1 552 nm	4.10	1.83×10^{-5}	-20.421 dBm

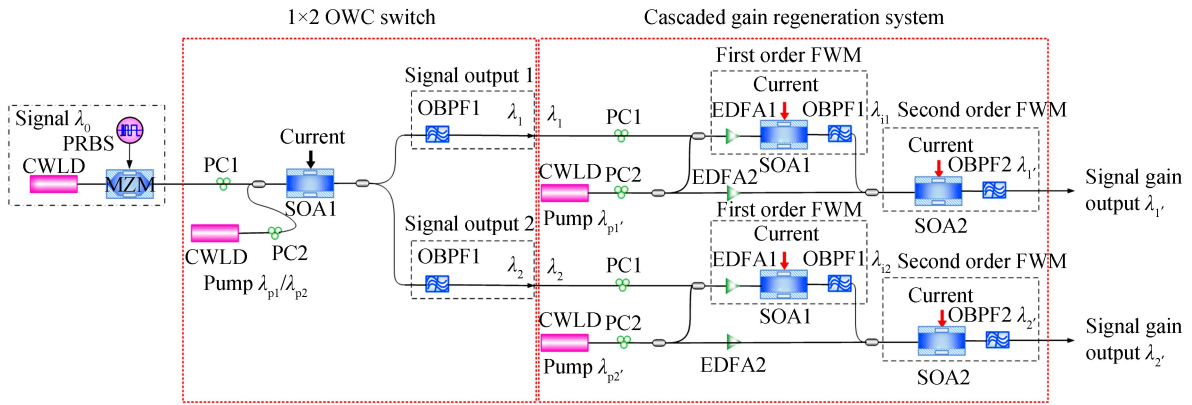


图3 1×2 波长变换增益光开关方案
Fig.3 Scheme of 1×2 OWC gain switch

以输入信号光波长从 λ_0 交换至输出信号光波长 $\lambda_{1'}$ 为例,系统工作流程为:1)在 1×2 光开关中,信号光 λ_0 经基于光波长变换的交换矩阵后从 λ_1 波长输出端口输出,由于模拟了交换插入损耗,交换输出信号较差;2) λ_1 对应端口的输出光信号进入基于 SOA 中 FWM 效应的两级级联的增益补偿和再生系统,首先经过一级 FWM 效应:信号光 λ_1 和泵浦光 λ_{p1} 经偏振控制器 PC1 和 PC2 调节保证偏振状态一致,泵浦光通过 3 dB 耦合器分为两束,一束与信号光 λ_1 耦合后经放大器 EDFA1 放大,在一级 SOA 中进行 FWM,输出光经可调光带通滤波器 OBPF1 得到一级转换闲频光 λ_{11} ,作为二级 FWM 的信号光;在二级 FWM 过程中:另一束泵浦光经 EDFA2 放大后与一级转换闲频光 λ_{11} 耦合,在二级 SOA 中进行 FWM,输出信号光经 OBPF2 得到二级转化闲频光 $\lambda_{1'}$.根据基于 FWM 效应的级联增益再生分析,恰当选择系统参数,可保证 $\lambda_{1'}$ 与 λ_1 相同,且为 1×2 光开关输出信号 λ_1 的增益再生信号.输入信号光波长从 λ_0 交换至输出信号光波长 $\lambda_{2'}$ 的系统工作流程同上.为实现交换输出信号的增益再生,测试该增益光开关技术可行性和增益再生系统调节范围,本文利用 OptiSystem 仿真平台搭建如图 4 所示的增益光开光系统,当输入信号光 1 547 nm 转换为增益输出信号光 1 551 nm 时,在(1 544~1 558)nm 范围内以 1 nm 为步进调节增益再生系统的泵浦光波长,在(0~17)dBm 范围内以 1 dB 为步进调节泵浦光功率,测试分析增益光开关系统输出信号质量.

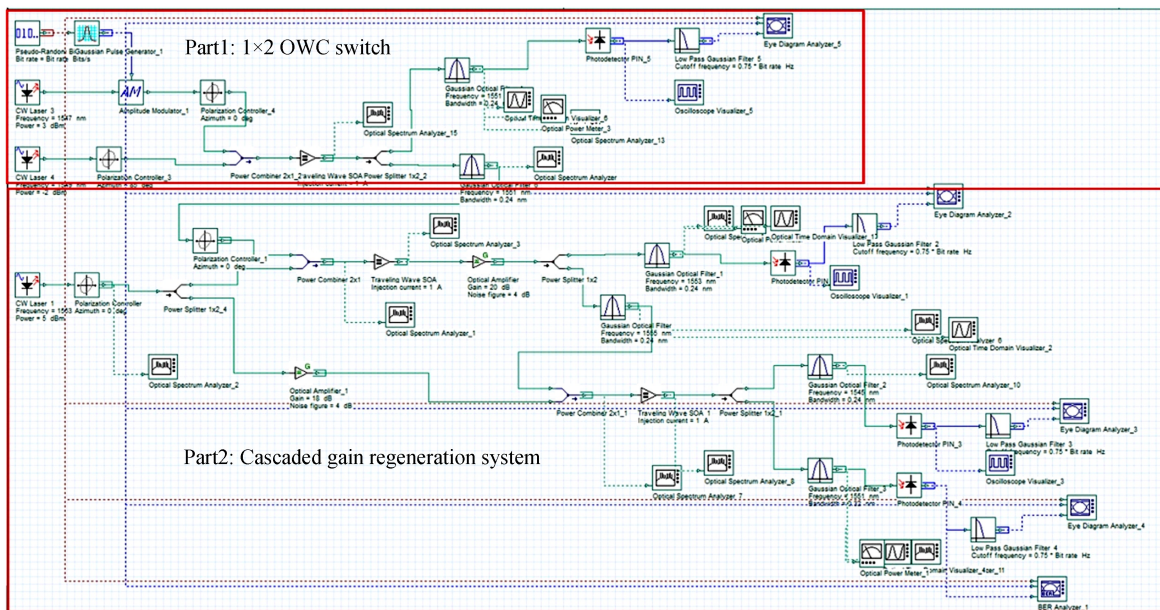


图4 OptiSystem 仿真平台下 1×2 波长变换增益光开关系统
Fig.4 1×2 OWC gain switch system on OptiSystem simulation platform

1)增益再生系统泵浦光波长范围

当泵浦光功率为 5 dBm 时,在(1 544~1 558)nm 范围内调节泵浦光波长,调节精度 1 nm,该区间内系

统输出信号的功率、 Q 因子和 BER 分别见表 2.以泵浦光波长为横坐标,输出信号的最高 Q 因子值为纵坐标,绘制 Q 因子曲线如图 5(a)所示;以输出信号的误码率(Bit Error Rate, BER)为纵坐标,绘制 BER 曲线如图 5(b)所示.结合输出信号的 Q 因子和误码率的情况,确定信号光与泵浦光发生非走离的泵浦光波长调节区间为(1 547~1 550)nm 和(1 553~1 555)nm,分别位于信号光 1 551 nm 两侧.

表 2 随泵浦光波长改变的输出信号质量参数

Table 2 Quality parameters of output signal as the pump wavelength variation

Pump wavelength	(1544~1546) nm	1 547 nm	1 548 nm	1 549 nm	1 550 nm	1 553 nm	1 554 nm	1 555 nm	(1 556~1 558) nm
Q	0	4.3	6.53	6.91	3.29	8.71	8.23	7.46	0
BER	1	6.88×10^{-6}	3.02×10^{-11}	2.5×10^{-12}	4.6×10^{-4}	1.46×10^{-18}	8.85×10^{-17}	3.88×10^{-14}	1

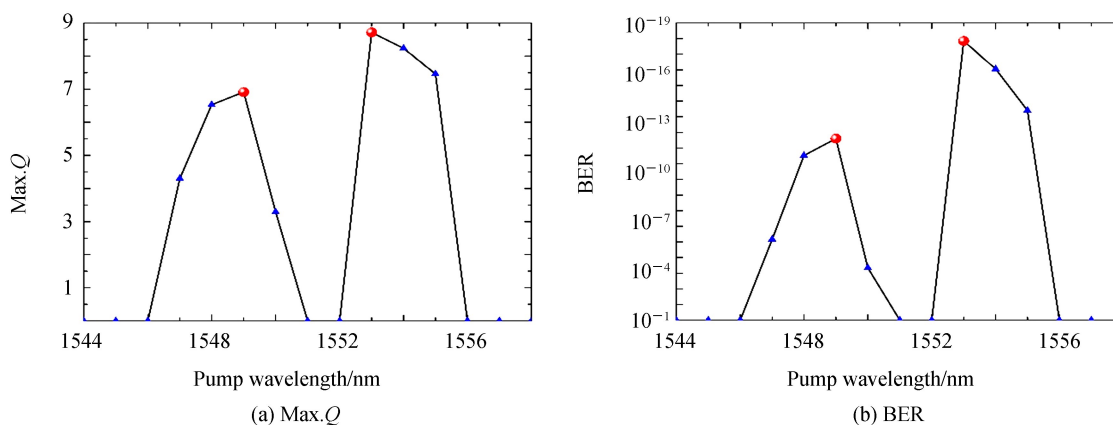
图 5 输出信号最高 Q 因子、误码率随泵浦光波长变化曲线图

Fig.5 Curve graph of output signal Max.Q factor and BER as the pump wavelength variation

针对表 2 中位于信号光 1 551 nm 两侧, Q 因子最高、误码率最低的两个泵浦光波长最佳位置 1 549 nm 和 1 553 nm,分别调节泵浦光功率,研究增益再生系统的泵浦光功率可调节范围.

2) 最佳泵浦光波长位于 1 549 nm 处增益再生系统泵浦光功率可调节范围

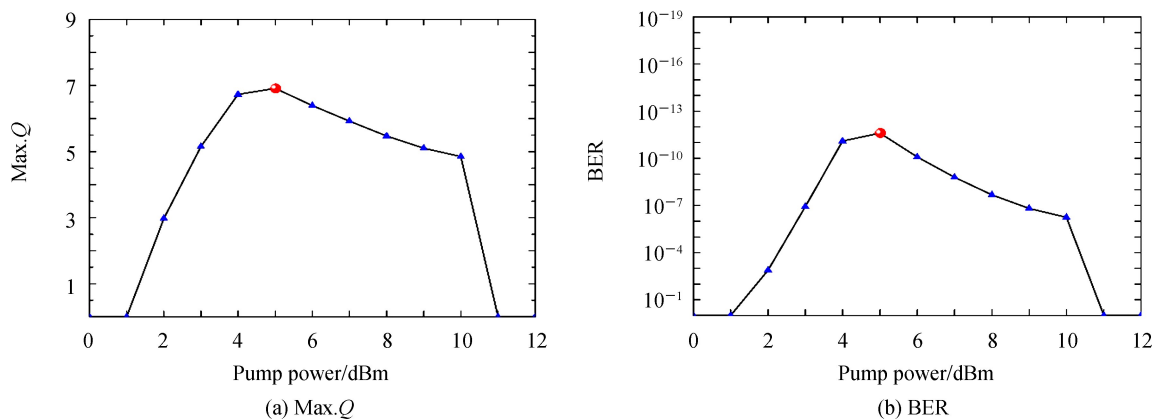
图 6 输出信号最高 Q 因子、误码率随泵浦光 1 549 nm 处功率变化曲线图

Fig.6 Curve graph of output signal Max.Q factor and BER as the pump power @1 549 nm variation

当泵浦光波长为 1 549 nm 时,在(0~12)dBm 范围内调节泵浦光功率,调节精度 1 dBm.以泵浦光功率为横坐标,输出信号的最高 Q 因子值为纵坐标,绘制 Q 因子曲线如图 6(a)所示;以输出信号的 BER 为纵坐标,绘制 BER 曲线如图 6(b)所示.结合输出信号的 Q 因子和误码率情况,确定增益再生系统的泵浦光功率调节区间为(2~10)dBm.该区间内 Q 因子最高、误码率最低的泵浦功率最佳值为 5 dBm,此时输出信号光功率从-21.372 dBm 提高至 3.715 dBm, Q 因子从 4.16 提高至 6.81,BER 从 1.53×10^{-5} 提高至 4.8×10^{-12} .一级 1×2 波长变换光开关交换输出信号和增益光开关交换输出信号的眼图对比见图 7,质量参数对比见表 3.

表 3 一级 1×2 波长变换输出信号与增益光开关输出信号质量参数对比 (增益再生系统泵浦光@1 549 nm)
 Table 3 Comparison of output signal quality parameters between first order 1×2 OWC and gain optical switch (pump of gain regeneration system @1 549 nm)

	Q	BER	Power
Non-gain signal	4.16	1.53×10^{-5}	-21.372 dBm
Gain signal	6.81	4.8×10^{-12}	3.715 dBm

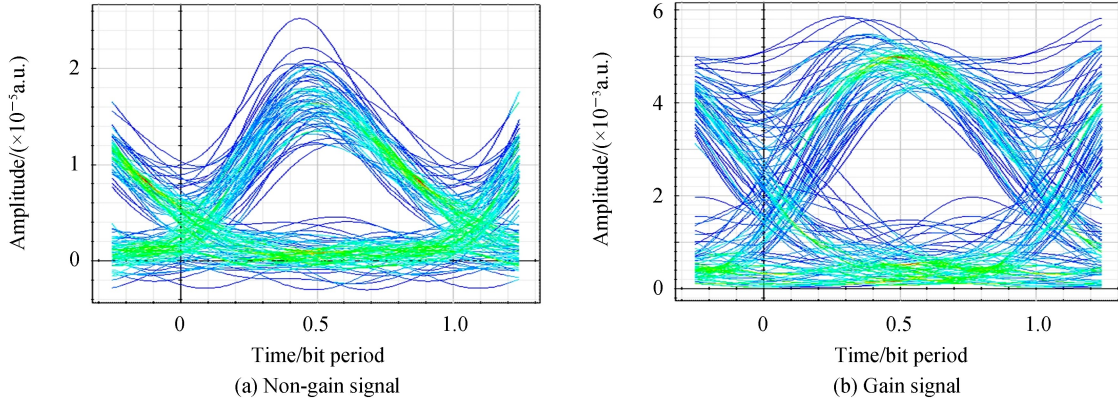


图 7 一级 1×2 波长变换输出信号与增益光开关输出信号眼图对比 (增益再生系统泵浦光@1 549 nm)
 Fig.7 Comparison of output signal eye pattern between first order 1×2 OWC and gain optical switch (pump of gain regeneration system @1 549 nm)

3)最佳泵浦光波长位于 1 553 nm 处增益再生系统泵浦光功率可调范围

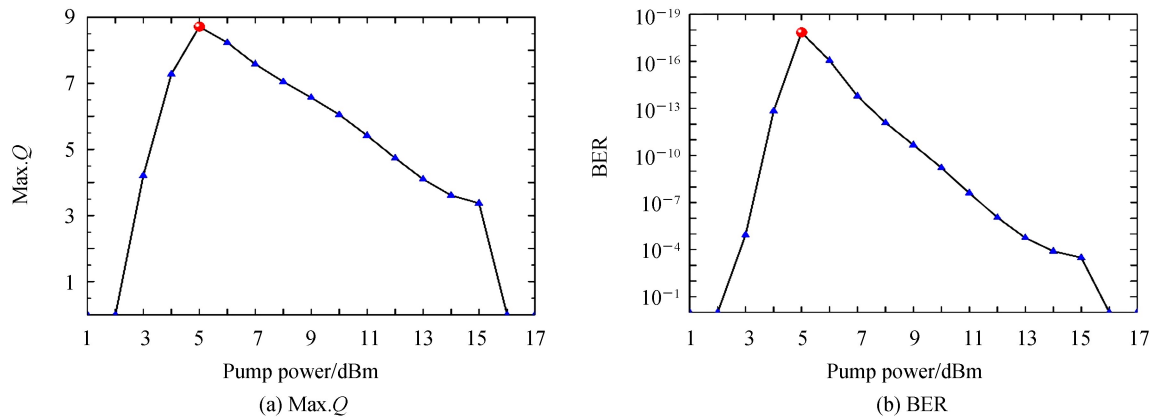


图 8 输出信号最高 Q 因子、误码率随泵浦光 1 553 nm 处功率变化曲线图
 Fig.8 Curve graph of output signal Max.Q factor and BER as the pump power @1 553 nm variation

当泵浦光波长为 1 553 nm 时,在(1~17)dBm 范围内调节泵浦光功率,调节精度 1 dBm.以泵浦光功率为横坐标,输出信号的最高 Q 因子值为纵坐标,绘制 Q 因子曲线如图 8(a)所示;以输出信号的 BER 为纵坐标,绘制 BER 曲线如图 8(b)所示.结合输出信号的 Q 因子和误码率情况,确定增益再生系统的泵浦光功率调节区间为(3~15)dBm.该区间内 Q 因子最高、误码率最低的泵浦功率最佳值为 5 dBm,此时输出信号光功率从-21.372 dBm 提高至 3.664 dBm,Q 因子从 4.16 提高至 8.71,BER 从 1.53×10^{-5} 提高至 1.46×10^{-18} .一级 1×2 波长变换光开关交换输出信号和增益光开关交换输出信号的眼图对比见图 9,质量参数对比见表 4.

表 4 一级 1×2 波长变换输出信号与增益光开关输出信号质量参数对比 (增益再生系统泵浦光@1 553 nm)
 Table 4 Comparison of output signal quality parameters between first order 1×2 OWC and gain optical switch (pump of gain regeneration system @1 553 nm)

	Q	BER	Power
Non-gain signal	4.16	1.53×10^{-5}	-21.372 dBm
Gain signal	8.71	1.46×10^{-18}	3.664 dBm

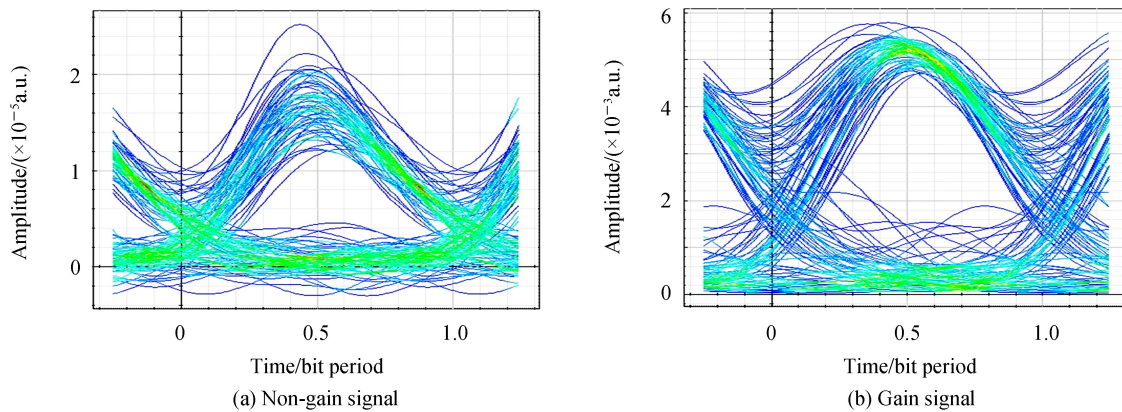


图9 一级 1×2 波长变换输出信号与增益光开关输出信号眼图对比(增益再生系统泵浦光@1553 nm)
Fig.9 Comparison of output signal eye pattern between first order 1×2 OWC and gain optical switch
(pump of gain regeneration system @1553 nm)

综上,当输入信号光从1547 nm增益交换至1551 nm波长输出时,通过分析增益补偿和形状再生系统中泵浦光波长和功率参量对交换输出信号质量的影响,优化系统参数,确定了泵浦光波长位于信号光中心波长 ± 4 nm范围、泵浦光功率在(3~15) dBm区间的较大调节范围内,增益光开关输出信号通过增益补偿和形状再生,相较于一级波长变换的交换输出信号可实现增益大于25 dB、误码率从 10^{-5} 提高至 10^{-18} 、Q因子从4.16提高至8.71的大幅度质量改善。

当输入信号光从1547 nm增益交换至1552 nm波长输出时,分析流程和仿真结果与上述过程一致。

3 结论

为支持OPS网络中光数据包的多节点交换,保证数据经过各节点光开关交换后的质量,本文提出了一种基于FWM效应的两级级联增益光开关技术思路.利用OptiSystem仿真平台搭建系统,通过研究增益再生系统泵浦光波长和功率对交换后光信号质量(眼图、Q因子、误码率、光功率)的影响,优化系统参数,在原始信号光波长位于1551 nm、泵浦光波长(1547~1550) nm和(1553~1555) nm、泵浦光功率(3~15) dBm的较大范围内,增益光开关输出信号通过增益补偿和形状再生,相较于一级交换输出信号可实现增益大于25 dB、误码率从 10^{-5} 提高至 10^{-18} 、Q因子从4.16提高至8.71的大幅度质量改善.本技术思路应用于交换节点光开关中可形成增益型光开关阵列,保证节点交换输出信号的质量,提高节点对光数据包的处理能力,从而有效增加OPS网络中光数据包的交换跳数,提升网络的灵活性和可靠性。

参考文献

- [1] ZHANG Ping, QIN Zhi-chao, LU Zhou. The space wideband backbone interconnected system in the integrated space and terrestrial information network[J]. *ZTE Technology Journal*, 2016, **22**(4): 24-28.
张平,秦智超,陆洲.天地一体化信息网络天基宽带骨干互联系统初步考虑[J].中兴通讯技术,2016,**22**(4):24-28.
- [2] SARIDIS G M, PENG S, YAN Y, *et al.* Lightness: a function-virtualizable software defined data center network with all-optical circuit/packet switching[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(7): 1618-1627.
- [3] SHIOMOTO K, INOUE I, OKI E. Network virtualization in high-speed huge-bandwidth optical circuit switching network[C]. IEEE INFOCOM Workshops, 2008: 1-6.
- [4] XU S, FUJIKAWA K, FURUKAWA H, *et al.* Experimental assessment of seamless interconnection of OPS and EPS networks with IP addressing and routing control[C]. European Conference on Optical Communication; Proceedings of VDE, 2016.
- [5] CAO X, YOSHIKANE N, POPESCU I, *et al.* Software-defined optical networks and network abstraction with functional service design[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, **9**(4): C65-C75.
- [6] WONFOR A, WANG H, PENTY R, *et al.* Large port count high-speed optical switch fabric for use within datacenters [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, **3**(8): A32-A39.
- [7] KAWAJIRI Y, NEMOTO N, HADAMA K, *et al.* 512 \times 512 Port 3D MEMS optical switch module with toroidal concave mirror[J]. *NTT Technical Review*, 2012, **10**(11): 1-7.
- [8] LIN Xiao, SUN Wei-qiang, HU Wei-sheng. Reliability of SOA-based optical switch matrix in tree arrangement[J]. *Acta*

Photonica Sinica, 2014, **43**(S1): 25-29.

林霄,孙卫强,胡卫生. 树型结构半导体光放大器光交换矩阵的可靠性[J]. 光子学报,2014,**43**(S1):25-29.

- [9] WANG K, WONFOR A, PENTY R V, *et al.* Active-passive 4×4 SOA-based switch with integrated power monitoring [C]. IEEE Optical Fiber Communication Conference and Exposition, 2012: 1-3.
- [10] WANG K, WONFOR A, PENTY R V, *et al.* Demonstration of cascaded operation of active-passive integrated 4×4 SOA switches with on-chip monitoring for power control and energy consumption optimization [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2013: 1-3.
- [11] GUAN Ai-hong, SUN Jun-qiang. Research on regeneration characteristics of optical pulse in active non-linear fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(01): 99-103.
管爱红,孙军强. 用于 WDM 光网络的一种低串扰无损耗光开关矩阵[J]. 光子学报,2007,**36**(01):99-103.
- [12] WONFOR A, WHITE I H, DING M, *et al.* Emulation of a 16×16 optical switch using cascaded 4×4 dilated hybrid MZI-SOA optical switches [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2017.
- [13] WU Yue, YAN Juan-juan, ZHENG zheng. Improved performance of wavelength routing optical network with all-optical regenerator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(S1): 60-63.
武玥,闫娟娟,郑铮. 全光再生器对波长路由网络性能改善的研究[J]. 光子学报,2011,**40**(S1):60-63.
- [14] PAN Wei. All-optical wavelength conversion for mode-division multiplexing signals using four-wave mixing in fiber [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2016: 17-18.
潘玮. 基于光纤四波混频的模式复用信号全光波长转换 [D]. 浙江:浙江大学,2016:17-18.
- [15] LI H, IMAIZUMI H, TANEMURA T, *et al.* Experimental study on dynamic range of SOA switch for multi-wavelength optical packet switching [C] IEEE International Conference on Photonics in Switching, 2009: 1-2.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 91638101); Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China Major Projects (Nos. 2017YFC0803905, 2017YFC0803909)

引用格式: LI Min-xuan, FENG Huan, WANG Huan, *et al.* Technical Research on Optical Gain Switch in Optical Packet Switching Network [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0606004

李珉璇,冯欢,汪欢,等. 光分组交换网络中增益光开关技术研究 [J]. 光子学报,2018,**47**(6):0606004