

# 双波长数据包并行缓存

彭 鹏<sup>1</sup> 吴重庆<sup>1</sup> 田昌勇<sup>1</sup> 李亚捷<sup>1</sup> 郭 宁<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 北京 100044; <sup>2</sup> 新加坡南洋理工大学网络技术研究中心, 新加坡 637553)

**摘要** 以半导体光放大器为非线性元件的双环耦合全光缓存器(DLOB)为基础, 实现了速率为 2.5 Gb/s 双波长数据的并行缓存。不同波长光信号合成后的功率随机波动, 导致由半导体光放大器交叉相位调制产生的相位差随机波动。在考虑吸收损耗的情况下, 对常用的半导体光放大器增益特性曲线进行了修正并与实测值拟合, 得到了更为准确的增益特性曲线。在此基础上进行了理论分析, 提出了通过调节控制光功率到最佳点以便减小相位差波动的方法。

**关键词** 光通信; 双波长并行缓存; 双环耦合全光缓存器; 半导体光放大器; 增益饱和; 交叉相位调制

**中图分类号** TN929 **文献标识码** A

## Parallel Buffering of Dual-Wavelength Packets Data

Peng Peng<sup>1</sup> Wu Chongqing<sup>1</sup> Tian Changyong<sup>1</sup> Li Yajie<sup>1</sup> Guo Ning<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science,  
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

<sup>2</sup> Network Technology Research Center, Nanyang Technological University, 637553 Singapore

**Abstract** A 2.5 Gb/s dual-wavelength packets parallel buffering in dual-loop optical buffer (DLOB) adopting semiconductor optical amplifier (SOA) as the nonlinear element was demonstrated. Because of the random fluctuation of the combined power by different wavelength signals, the phase difference originating from the cross phase modulation of SOA fluctuates randomly too. Taking the absorption loss into account, we modify the gain characteristic curve of SOA and fit it with experimental values. The characteristic curve is described exactly. We also theoretically analyze the dual-wavelength buffering and propose to set the power of control signal to minimize the fluctuation of the phase difference.

**Key words** optical communication; dual-wavelength parallel buffering; dual-loop optical buffer; semiconductor optical amplifier (SOA); gain saturation, crossing phase modulation

## 1 引 言

全光交换网是现代通信发展的必然趋势, 光缓存器是实现全光交换的重要部件<sup>[1]</sup>。目前提出的光纤型全光缓存器主要有两种: 前向结构的光纤延迟线和反馈结构的法布里-珀罗(F-P)腔或者光纤环<sup>[2]</sup>。随着波分复用技术(WDM)已经广泛应用, 单波长的全光缓存器很难与波分复用技术相适应。因此, 对多波长光信号的并行缓存是全光缓存器的一个重要研究课题。目前光缓存技术的研究都是针

对单个波长光信号的缓存, 本文对双波长缓存进行了研究, 并利用已研制出的双环耦合全光缓存器经过改进实现了双波长的并行缓存。

## 2 理论分析

基于半导体光放大器(SOA)的双环耦合全光缓存器结构<sup>[3,4]</sup>如图 1 所示。它由一个平行排列 3×3 耦合器以及耦合器的两对边端口分别连接起来的两个封闭的光纤环组成, 形成一个横“8”字结构。

收稿日期: 2007-08-30; 收到修改稿日期: 2007-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(60577020, 60672004)资助课题。

作者简介: 彭 鹏(1981~), 男, 河北人, 硕士研究生, 主要从事全光缓存及光网络方面的研究。

E-mail: 05121790@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944-), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光纤传感、全光网络及全光信号处理等方面的研究。E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn

右环中的半导体光放大器用于在控制光的作用下完成对信号的“写入/读出”<sup>[5]</sup>。

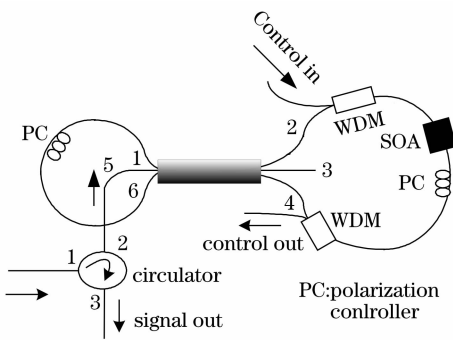


图 1 基于半导体光放大器双环耦合全光缓存器结构  
Fig. 1 Configuration of dual loop optical buffer based on semiconductor optical amplifier

当两波长的光信号合成时,合成信号的功率会产生随机波动。根据半导体光放大器的增益计算公式<sup>[6]</sup>:

$$G = G_0 \exp\left[-(G-1) \frac{P_{in}}{P_s}\right], \quad (1)$$

$G_0$  为小信号增益,  $P_s$  为半导体光放大器的饱和功率。可知当输入光功率  $P_{in}$  不同时,信号光在半导体光放大器中的增益也不同,并且是非线性的。而顺时针(cw)和逆时针(ccw)传输的两束光在半导体光放大器中交叉相位调制(XPM)的相位差  $\Delta\phi$ ,是与增益相联系的<sup>[7]</sup>:

$$\Delta\phi = \phi_{cw} - \phi_{ccw} = \frac{1}{2}\beta \ln(G_{cw}/G_{ccw}), \quad (2)$$

$\phi_{cw}$ 、 $\phi_{ccw}$  分别为顺时针和逆时针方向光信号相位的变化,  $\beta$  为半导体光放大器的线宽因子。在双波长缓存时,无论是否同步,总会出现两个“1”码叠加、或者一个“1”码与一个“0”码叠加两种情况。假定两个波长的“1”码功率相同(设为  $P$ ),其峰值功率分别为  $2P$  或者  $P$ ,功率随机波动增大。根据(1)式的非线性可知,对于这两种不同情况,  $G_{cw}/G_{ccw}$  的值也不同,从而导致相位差也会随机波动,使缓存后的双波长光信号的质量下降。因此,减小双波长光信号在半导体光放大器中相位差的随机波动就成为双波长缓存的关键。

光缓存时半导体光放大器工作在深饱和状态,因此有必要对其增益饱和特性进行研究。将实测曲线与(1)式计算得到的曲线进行比较,如图 2 所示。图 2 中 1 为实测曲线,2 为根据(1)式计算得到的曲线。可以明显看出,此前常用的增益关系公式(1)在饱和区偏离实测曲线较远,误差较大。

由于半导体光放大器工作在深饱和状态下,自

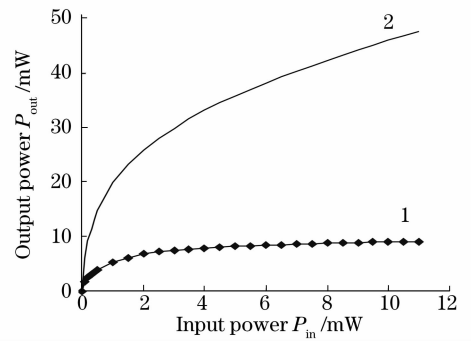


图 2 半导体光放大器输入-输出特性曲线比较  
Fig. 2 Comparison of input-output characteristics of semiconductor optical amplifier

发辐射受到很强的抑制,可忽略自发辐射(ASE)的影响,因此该公式的误差主要是忽略了半导体光放大器的吸收损耗。半导体光放大器吸收损耗  $\alpha$  的数量级约为  $10^3 \text{ m}^{-1}$ ,与饱和区的局部增长系数  $g$  相比较不可忽略。这时光功率的变化<sup>[8]</sup>

$$dP(z)/dz = (g - \alpha)P(z), \quad (3)$$

再将  $g = \frac{g_0}{1 + (P/P_s)}$  ( $g_0$  为小信号增益),代入(3)式并利用初始条件  $P(0) = P_{in}$ ,  $P_{out} = P(L) = GP_{in}$ ,经过复杂的推导,可得:

$$\lg \frac{P_{out}}{P_{in}} = 0.434L(g_0 - \alpha) + 0.434 \frac{g_0}{\alpha} \ln\left(\frac{g_0 - \alpha - \alpha P_{out}/P_s}{g_0 - \alpha - \alpha P_{in}/P_s}\right), \quad (4)$$

式中  $L$  为半导体光放大器有源区的长度,  $g_0$  与  $\alpha$  单位为  $\text{m}^{-1}$ 。对于所使用的半导体光放大器,  $P_s = 11.6 \text{ mW}$ ,  $L = 1 \text{ mm}$ 。当电流  $I = 150 \text{ mA}$  时,取不同的  $g_0$ ,  $\alpha$  与实际测量曲线进行拟合,得到  $g_0 = 7600 \text{ m}^{-1}$ ,  $\alpha = 4300 \text{ m}^{-1}$ ,如图 3 所示。图 3 中 1 为实测曲线,3 为拟合的曲线。

为了获得较好的消光比,缓存器采用反相位控

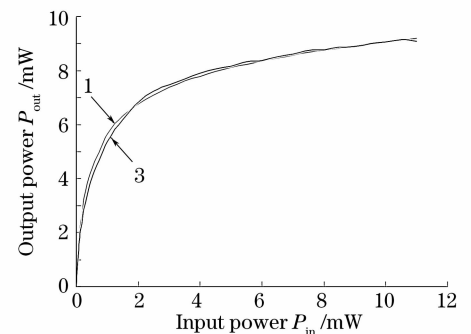


图 3 半导体光放大器输入/输出特性曲线的拟合  
Fig. 3 Fitting of input-output characteristics of semiconductor optical amplifier

制光脉冲<sup>[9,10]</sup>。在不进行读写控制的时候,控制光的初始功率为  $P_1^*$ ;在写入与读出时,控制光功率为  $P_2^*$ ,且  $P_2^* < P_1^*$ ,参见图 4。右环中顺时针方向信号光受到较低的控制光功率  $P_2^*$  控制,由于半导体光放大器偏离环的中央,所以当逆时针方向上信号光到达半导体光放大器时,控制光已经恢复到初始功率  $P_1^*$ ,从而产生相位差,完成读/写操作。

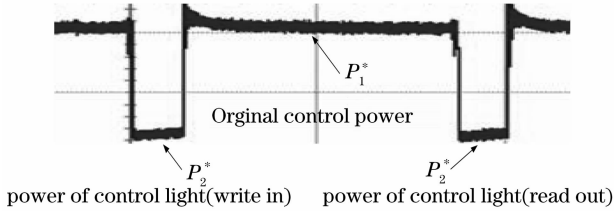


图 4 反相控制光脉冲格式

Fig. 4 Format of negative control pulse

为了实现光信号的写入与读出,需要使顺时针方向和逆时针方向光信号的相位差达到  $\pi$ ,即

$$\Delta\phi = \phi_{cw} - \phi_{ccw} = \frac{1}{2}\beta\ln(G_{cw}/G_{ccw}) = \pi. \quad (5)$$

可见,为了满足(5)式, $G_{cw}$ 与 $G_{ccw}$ 二者只有一个可以独立变化。由于信号光相对于控制光较小,由(4)式可知, $G_{cw}$ 主要取决于 $P_1^*$ , $G_{ccw}$ 主要取决于 $P_2^*$ ,所以 $P_1^*$ 与 $P_2^*$ 二者只有一个可以独立变化。

在双波长缓存时,设 $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 分别表示峰值功率为 $P$ 和 $2P$ 两种不同情况时的相位差。显然同一组 $P_1^*$ 与 $P_2^*$ 不能使两种情况的 $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 同时满足(5)式。为此,令

$$(\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2)/2 = \pi, \quad (6)$$

并以 $|\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2| < \delta$ 作为一组合适的 $P_1^*$ 与 $P_2^*$ 的选择依据,当 $P_1^*$ 确定之后,与之相对应的 $P_2^*$ 也就得以确定。其中 $\delta$ 是一个可容忍的波动范围。这样就保证两种情况下的相位差都接近 $\pi$ 。

由(2)式、(4)式、(6)式可得,相位差 $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 分别随 $P_2^*$ 增大的变化曲线(计算中 $\beta$ 取实测值5.5),如图5所示。图中,曲线1、2、3分别表示 $\Delta\phi_1$ 的变化,曲线4、5、6分别表示 $\Delta\phi_2$ 的变化。对应光信号的峰值功率 $P$ 分别为0.1 mW,0.2 mW,0.3 mW。由图可见,相位差波动 $|\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2|$ 随着输入到半导体光放大器中的信号光峰值功率的增大而变大,随着写入读出控制光功率的增大而减小。若要求相位差波动 $\delta < 0.1$  rad,在 $P = 0.1$  mW时,则写入与读出的顺时针控制光功率只需大于1.36 mW。

虽然继续增大控制光功率,可以进一步减小相位差波动,但信号光在半导体光放大器中的增益会

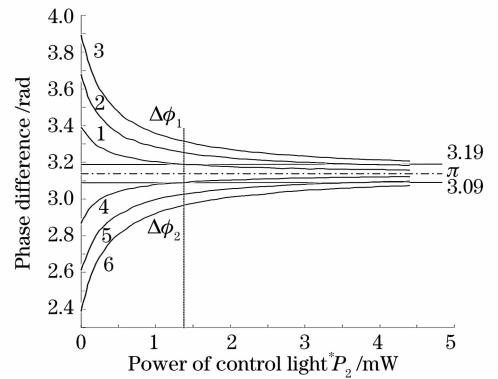


图 5 相位差  $\Delta\phi_1$  和  $\Delta\phi_2$  随  $P_2^*$  增大的变化曲线

Fig. 5 Phase difference of  $\Delta\phi_1$  and  $\Delta\phi_2$  against  $P_2^*$

越来越小,如果没有足够的增益来弥补缓存器的损耗,不利于多圈缓存。因此,当输入信号光功率  $P = 0.1$  mW 时  $P_2^* = 1.36$  mW,  $P_1^* = 6.15$  mW 就是保证相位差波动小于 0.1 rad 的最佳工作点。

### 3 实 验

实验系统如图 6 所示。波长  $\lambda_1 = 1553.33$  nm 与  $\lambda_2 = 1554.94$  nm 的分布反馈式激光器(DFB1 和 DFB2)发出的直流光,经波分复用耦合器 WDM1 波形合成之后,由脉冲码型发生器(PPG)驱动的外调制器,产生伪随机码的数据。然后用波分复用器 WDM2 将它们分路,其中一路经过一段光纤随机延迟后,再由 WDM3 合路。这样可认为两路数据是随机到达的。合成的数据包将产生幅度波动(图 7)。

读/写控制单元分别向光开关以及控制光 DFB3 发出触发信号,光开关接到指令完成对需要缓存数据的截取,截取后的数据包通过光环行器进入平行排列  $3 \times 3$  耦合器;DFB3(波长为 1556.56 nm)的光功率被调至最佳工作点,接到指令后发出相应格式的反相控制光输入到半导体光放大器中,从而将信号“写入”缓存器。在读出时再次重复上述控制过程。

环内的偏振控制器(PC)用来调节参与干涉的两束信号光的偏振态以便获得最佳的干涉效果。

读出的双波长信号从环形器的 3 端口输出,并经 WDM4 解复用之后进行观测。实验中光信号速率为 2.5 Gb/s,缓存的数据包长 16 个字节,宽度为 6.4 ns,缓存器整个环长为 300 m,因此缓存一圈的时间为 1.5  $\mu$ s,数据包被缓存的时间是它的整数倍。

图 8 为两个波长的数据包并行缓存 10 圈后经解复用后的整体波形。图中 A 是被缓存数据包前一个环周期的参考数据包,B 为被缓存的数据包

的漏光, C 是缓存以后输出的数据包。漏光主要是因为基于半导体光放大器的干涉仪由于交叉增益调制与交叉相位调制并存,使得干涉后  $3 \times 3$  耦合器 5

端口与 1、6 端口的输出功率不能同时达到最大值和最小值,存在不协调性<sup>[11]</sup>。在左环加半导体光放大器可以消除漏光<sup>[12]</sup>。

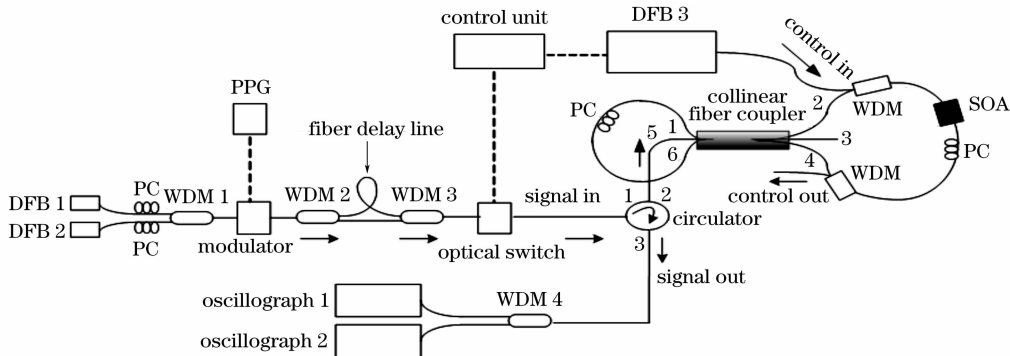


图 6 实验系统结构图

Fig. 6 Configuration of experimental system

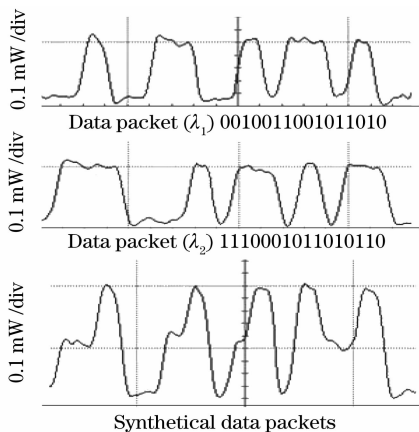


图 7 两个不同的波长数据包缓存前的波形

Fig. 7 Waveform of two different wavelength data packets before buffering

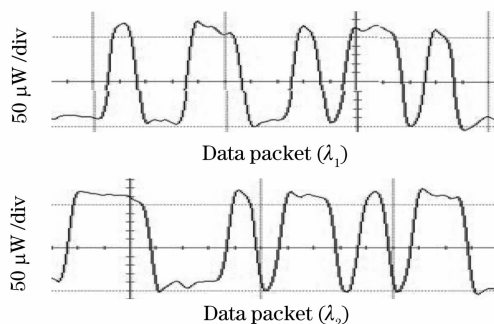


图 9 两个不同波长的数据包缓存 10 圈后的波形  
Fig. 9 Waveform of two different wavelength data packets after 10 circles buffering

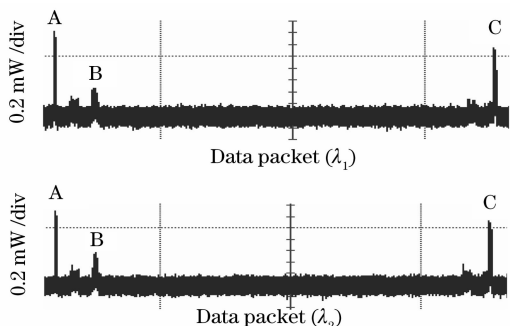


图 8 两不同波长数据包缓存 10 圈后的整体波形  
Fig. 8 Whole waveform of different wavelength data packets after 10 circles buffering

图 9 为两个不同波长的数据包并行缓存 10 圈后输出波形的细节。可知,经过 10 圈的缓存,光信号的幅度略有下降,但信号质量完好,码型没有明显的恶化。

### 4 结 论

以半导体光放大器(SOA)为非线性元件的双环耦合全光缓存器(DLOB)为基础,实现了双波长数据的并行缓存。为了准确分析缓存器中半导体光放大器饱和区的读写控制性能,在考虑吸收损耗的情况下,对常用的半导体光放大器增益特性曲线进行了修正并与实测值拟合,得到了更为准确的增益特性曲线。理论分析表明,调节控制光的功率可以减小因双波长合成后信号的幅度波动引起的相位差的随机波动;并提出了一种合理选择控制光工作点,使其相位差波动限制在可容忍范围内又能有较大增益的方法。实验结果表明,该方法可实现 2.5 Gb/s 双波长数据包的 10 圈以上的并行缓存。

### 参 考 文 献

1 Yang Chunyong, Liu Deming, Li Wei *et al.*. Blocking probability analysis of wavelength division multiplexing wavelength routing nodes[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(4):

- 544~548  
杨春勇,刘德明,李 蔚等. 波分复用波长路由节点的阻塞特性分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 544~548
- 2 Wu Chongqing. Recent progress of all-optical buffer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **26**(5): 369~373  
吴重庆. 全光缓存器研究的新进展[J]. 半导体光电, 2005, **26**(5): 369~373
- 3 A. M. Liu, C. Q. Wu, M. S. Lim *et al.*. Optical buffer configuration based on a  $3 \times 3$  collinear fibre coupler [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(16): 1017~1019
- 4 He Na, Wu Chongqing, Wei Yan *et al.*. Fused planar  $3 \times 3$  single mode fiber coupler [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 324~327  
何 娜,吴重庆,卫 炎等. 熔锥平行排列  $3 \times 3$  单模光纤耦合器的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(3): 323~327
- 5 Wu Chongqing. Interaction of two beam in semiconductor optical amplifier and its applications for all-optical signal processing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(10): 17~22  
吴重庆. 半导体光放大器的光-光相互作用及在全光信号处理中的应用(I) [J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(10): 17~22
- 6 Yang Xianglin. *Optical Amplifier and Its Application* [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2000. 107~114  
杨祥林. 光放大器及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 107~114
- 7 A. M. Liu, C. Q. Wu, Y. D. Gong *et al.*. Dual-loop optical buffer (DLOB) based on a  $3 \times 3$  collinear fiber coupler [J]. *Photon. Technol. Lett.*, *IEEE.*, 2004, **16**(9): 2129~2131
- 8 N. K. Dutta, Qiang Wang. *Semiconductor Optical Amplifiers* [M]. New Jersey: World Scientific Publishing, 2006. 130~133
- 9 Li Yajie, Wu Chongqing, Wang Yongjun *et al.*. Performance analysis of control pulse in optical controlled apparatus based on semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 952~957  
李亚捷,吴重庆,王拥军等. 基于半导体光放大器的光控器件中控制光的性能分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(2): 952~957
- 10 Li Yajie, Wu Chongqing, Li Yun *et al.*. New method for power equilibrium in re-circular all optical buffer based on semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1469~1473  
李亚捷,吴重庆,李 赟等. 基于半导体光放大器的环路型全光缓存器中功率均衡的新方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(10): 1469~1473
- 11 Li Yajie, Wu Chongqing, Wang Yongjun *et al.*. Analysis of the unbalanced state of an interferometer based on an SOA [J]. *Chin. J. Semiconductor*, 2006, **27**(10): 1851~1856  
李亚捷,吴重庆,王拥军等. 基于半导体光放大器的干涉型器件中不协调性的分析[J]. 半导体学报, 2006, **27**(10): 1851~1856
- 12 Zhang Lijun, Wu Chongqing, Li Yajie. Novel read/write independently controled all-optical buffer based on dual-semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1945~1948  
张立军,吴重庆,李亚捷. 基于双半导体光放大器的读/写分别控制的新型全光缓存器[J]. 光学学报, 2007, **27**(11): 1945~1948