

文章编号: 0258-7025(2008)12-1930-05

大范围可调的双环全光缓存器的控制技术的研究

王拥军 吴重庆 疏 达 赵 曦 王亚平 赵 爽

(北京交通大学理学院光信息科学技术研究所, 北京 100044)

摘要 分析了基于平行排列 3×3 耦合器的双环结构全光缓存器的原理, 提出了 4 种全光缓存器的读写方法: 正相光脉冲控制法, 反相光脉冲控制法, 正相电脉冲控制法和反相电脉冲控制法, 介绍了 0.89π 相移的调节方法, 构建了一个环长 63 m 的光缓存器的实验系统, 实验不仅验证了 4 种读写方法, 而且结果表明, 当缓存圈数超过 20 圈时, 反相光脉冲控制法是唯一可行的方法, 实验还发现使用光脉冲控制法时, 为了抑制噪声需要提高控制激光器的偏置电流, 使控制光的直流分量在 $500 \mu\text{W} \sim 1 \text{ mW}$ 之间, 或者注入不同于信号光和控制光的直流光。使用电脉冲控制法时, 也必须注入直流光来抑制噪声。

关键词 光通信; 全光缓存器; 控制技术; 噪声抑制

中图分类号 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083512.1930

Investigation on Control Technique of Adjustable Double Loop Optical Buffer in Large Range

Wang Yongjun Wu Chongqing Shu Da Zhao Xi Wang Yaping Zhao Shuang

(*Institute of Optical Information, Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract In this paper, we discussed the theory of the double loop optical buffer (DLOB) based on collinear 3×3 coupler, and put forward 4 types of read-write methods in DLOB: positive optical pulse control, negative optical pulse control, positive electrical pulse control and negative electrical pulse control. We also introduced 0.89π -phase adjusting method. A double loop optical buffer experiment system had been built in which the loop was 63 meter length. The experiment had not only proved 4 types of read-write methods, but also demonstrated that the negative optical pulse control was the only doable method when the optical packets traversed in DLOB exceeding 20 round-trips. In order to suppress the noise, we can enhance the bias current of the control light, the “base” power of the control light was required from $500 \mu\text{W}$ to 1 mW by the way of enhancing the bias current of the control laser, or injecting a direct light whose wavelength was different from the signal light and control light. In the electrical pulse control, it also needed injecting a direct light to suppress the noise.

Key words optical communication; all optical buffer; control technique; suppressing noise

1 引 言

在目前的光网络中, 信息传输是在光域中进行, 交换则需要在电域中完成。基于电信号的交换设备不仅结构复杂, 体积庞大, 而且能耗惊人, 运营和维

护费用昂贵。近年来, 随着用户数量和业务类型的不断增长, 尤其是密集波分复用 (DWDM) 光传输系统的飞速发展, 对超高速、大容量的交换设备的需求也在不断增加, 由光-电-光转换所引起的“电子瓶

收稿日期: 2008-08-23; 收到修改稿日期: 2008-09-28

作者简介: 王拥军(1968—), 男, 博士, 主要从事光纤通信和光纤传感方面的研究。E-mail: 06118330@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—), 男, 教授, 主要从事光纤通信, 光纤传感和全光网络方面的研究。

E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn (通信作者)

颈”的限制使得交换与传输的矛盾也越来越突出。全光包交换(OPS)技术的研究与发展为下一代光网络的发展提供了良好的解决方案,OPS 可以彻底消除光-电-光的转换,使传输与交换完全在光域中完成。在 OPS 中,全光缓存器(OB)在解决包竞争方面起着至关重要的作用。利用“慢光”效应^[1, 2]实现光缓存是未来光缓存器发展的方向,但是,“慢光”还处于早期的研究阶段,离实际应用还有很长的距离。目前的光缓存器一般由光纤延迟线(FDLs)、光开关、光相移器、光放大器、光耦合器等组成,其结构主要分成两类:(a)前向式和(b)反馈式,图 1 表示了这两种类型的结构原理。理想的光缓存器应该具有动态可编程的延迟时间、可以随即写入或擦除、对包的比特率和包格式完全透明、方便集成等特点。前向式光缓存器使用大量的光纤,体积庞大,不易集成;反馈式光缓存器可以节约大量的光纤,缩小体积,但是,由于光信号需要反复通过光放大器,容易引起噪声积累,而且控制技术相对复杂。本文将讨论基于平行排列 3×3 光耦合器的双环反馈式光缓存器的结构原理,详细分析它的电控制技术和光控制技术,并通过实验验证,当缓存圈数超过 20 圈时,反向光控制技术是唯一可行的。

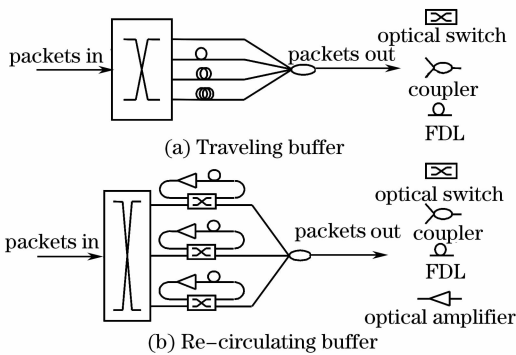


图 1 延迟线型光缓存器的类型
Fig. 1 FDL-type optical buffer

2 结构与原理

平行排列 3×3 光耦合器的双环“环绕式”光缓存器的结构如图 2 所示,3×3 耦合器的 1,3 和 4,6 相连分别构成双环结构光缓存器的左环和右环,SOA 作为相移器被偏心放置在右环中,调节偏振控制器可以使 1,3 或 4,6 端口的光处于同一偏振方向。光信号从环形器的 C1 端口进入,经 C2 端口进入 3×3 耦合器的 2 端口,3×3 耦合器的传输矩阵可表示为^[3]

$$\begin{bmatrix} E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & -j\sqrt{2}/2 & -1/2 \\ -j\sqrt{2}/2 & 0 & -j\sqrt{2}/2 \\ -1/2 & -j\sqrt{2}/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $E_i (i = 1 \dots 6)$ 表示端口 1 到 6 的光信号的电场强度。代入 $E_1 = 0, E_3 = 0$, 并利用光功率与电场强度关系,得到端口 4,5,6 的光功率为: $P_4 = P_6 = 1/2 P_2 = 1/2 P_{in}, P_5 = 0$, 可见,在 4,6 端口各分配到一半功率的输入光,并分别沿顺时针方向(CW)和逆时针方向(CCW)传输。经过 SOA 在右环传输一圈后,3×3 耦合器 1,2,3 端口输出的光功率可以用(2)式表示^[3,4]

$$\begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{8} P_{in} G_{cw} \left(1 + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) - 2\exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos\Delta\varphi \right) \\ \frac{1}{4} P_{in} G_{cw} \left(1 + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) + 2\exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos\Delta\varphi \right) \\ \frac{1}{8} P_{in} G_{cw} \left(1 + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) - 2\exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos\Delta\varphi \right) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 α 表示 SOA 的线宽增强因子, $\Delta\varphi$ 为两个方向的光经过 SOA 后的相位差,可以表示为(3)式^[5]

$$\Delta\varphi = \varphi_{cw}(t) - \varphi_{ccw}(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln \frac{G_{cw}}{G_{ccw}}, \quad (3)$$

式中 G_{cw} 和 G_{ccw} 分别是 CW 方向与 CCW 方向的光增益。由(2),(3)式可见,通过控制两个方向的信号光经过 SOA 时的增益可以控制输入信号光的光功率在三个端口的分配。当 $\Delta\Phi = 0.89\pi$ ^[6], 1,3 端口的光功率相等并达到较强,而 2 端口输出的光功率较弱,光信号沿左环传输一圈后,由(3)式可以知道,各有一半的光功率分配到 4,6 端口,并沿右环传输,如果保持 $\Delta\Phi$ 不变,光信号就被写入并沿左右环按“8”字形周期环绕。当需要读出时,控制 $\Delta\Phi$ 使其再次改变 0.89π 相位,光信号将被读出并从 2 端口输

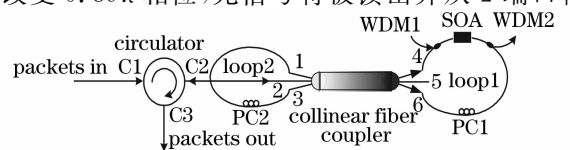


图 2 基本缓存单元
Fig. 2 Basic buffer unit

出。使用电控制方法和光控制方法都可以实现对 $\Delta\Phi$ 的控制,当 CW 方向的光信号通过 SOA 时,注入一个与其同步的控制光脉冲(与信号光波长不同)或电脉冲,而当 CCW 方向的信号光通过 SOA 时,没有同步脉冲注入,通过适当调节同步脉冲的功率可以使 $\Delta\Phi = 0.89\pi$ 。

3 全光缓存器读写的控制方法

要实现光缓存器的读写,必须注入一个同步的光脉冲或电脉冲,从而实现对 $\Delta\Phi$ 的控制。光控方法可以分为正相光脉冲控制法和反相光脉冲控制法,电控方法也可以分为正相电脉冲控制法和反相电脉冲控制法,从原理分析,四种方法都可以实现对光缓存器的读写,但是,它们对输出信号会产生不同的影响,输出信号的质量决定控制方法的优劣。

3.1 光控制方法

控制光脉冲由波分复用器(WDM)引入光纤环时,由于 SOA 中交叉相位调制和交叉增益调制现象并存,所以当光沿 CW 和 CCW 经过 SOA 时,在控制光的作用下两束光将经历不同的非线性相移和增益,可用光场复振幅所对应的复增益来表示

$$g_{cw} = |g_{cw}| \exp(-j\varphi_{cw}), \quad (4)$$

$$g_{ccw} = |g_{ccw}| \exp(-j\varphi_{ccw}), \quad (5)$$

式中 CW 和 CCW 方向的光功率增益和复增益的关系可表示为 $G_{cw} = |g_{cw}|^2, G_{ccw} = |g_{ccw}|^2$, 由(4), (5)式可以得到(3)式。由于 SOA 的增益是非线性的,它可以表示为

$$G = G_0 \exp[(1 - G) \frac{P_{in}}{P_{sat}}], \quad (6)$$

式中 G_0 和 P_{sat} 分别为 SOA 的小信号增益和饱和功率。当调节控制光功率使信号光间的相位差达到 0.89π 时,其增益差为

$$\frac{G_{cw}}{G_{ccw}} = \exp(\frac{2 \times 0.89\pi}{\alpha}), \quad (7)$$

利用(6), (7)式就可计算出进行“写-读”操作时所需的控制光功率。

在实验中达到 0.89π 相移时的控制光脉冲功率可由以下方法测得:断开缓存器的 1,3 端口,从环形器的 1 端口输入光信号(包),调节控制光的偏置电流和脉冲电流,用示波器观察环形器的 C2 端口和 3×3 耦合器的 1,3 端口,当环形器的 C2 端口输出最小, 3×3 耦合器的 1,3 端口输出最大时,即认为产生了 0.89π 相移。

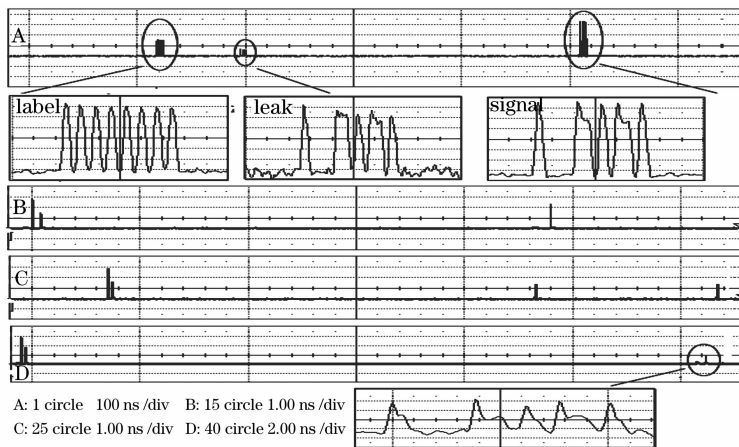


图 3 反相光控实验结果

Fig. 3 Result of negative light pulse control

当注入正的光脉冲时,称为正相光控,注入负的光脉冲时,称为反相光控,图 3、图 4 分别是反相光控和正相光控的实验结果,实验中注入 SOA (Inphenix 公司)的电流为 110 mA,信号光波长为 1556.56 nm,输入功率为 $550 \mu\text{W}$,控制光波长为 1553.7 nm,环长约 63 m,输入的光信号由光标记(两个字节,5555)和光信息(两个字节,435A)组成。

信号格式由 PPG(programmable pulse generator)产生,经过外调制器 MZI 对 1556.56 nm 的信号进行调制,一个外部控制单元控制产生与 CW 方向的光信息(435A)同步的控制信号,并控制 1553.8 nm 的激光器产生控制光,并由 WDM1 加入到 SOA 中,WDM2 作为滤波器去除环中控制光。信号光光标记不在缓存器中存储,只作为光信息缓存时间的

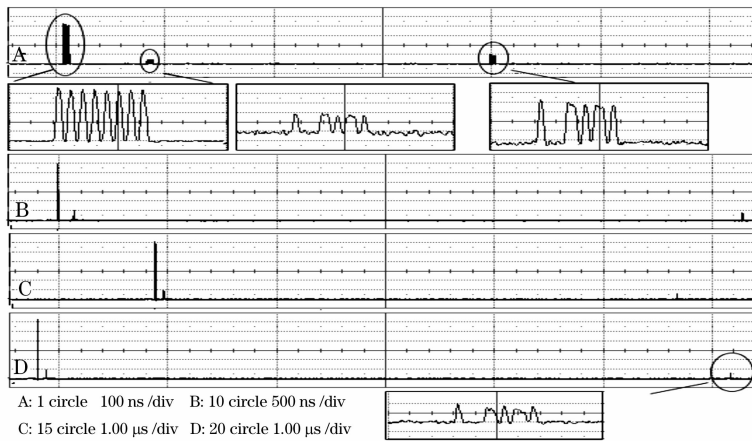


图 4 正相光控实验结果

Fig. 4 Result of positive light pulse contro

参考。从实验结果可以看出,使用正相光脉冲控制法时,由于控制脉冲功率大,使得进入缓存器的光功率很小,经过 5 圈后,输出的信号光几乎和写入时的“漏光”功率相比拟。“漏光”是不可避免的,它产生的原因是 3×3 光耦合器 2 端口输出的光功率的极小值不为零^[7]。而使用反相光脉冲控制法时,写入脉冲功率小,存入缓存器的信号光的功率较大,经过 25 圈后,读出的信号光的功率仍然可以到达

$200 \mu\text{W}$,30 圈后,信号质量劣化。实验发现,为了抑制 SOA 的噪声,注入的控制光的直流部分要求较大,一般在 $500 \mu\text{W} \sim 2 \text{mW}$ 之间,这样也使得 SOA 对信号光的放大减小,但是为了保证输出信号的信噪比,注入直流光是必须的。另外,注入不同于信号光和控制光波长的直流光也可以达到抑制噪声的作用^[8]。

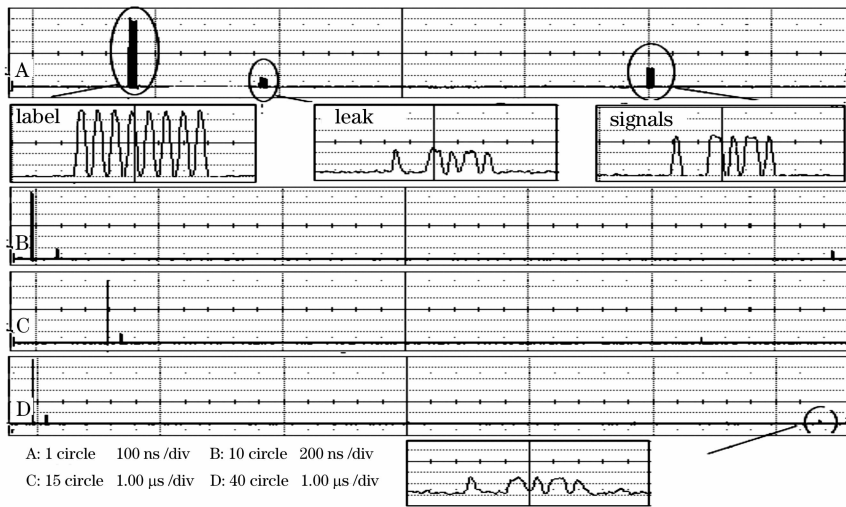


图 5 反向电控实验结果

Fig. 5 Result of negative electrical pulse control

3.2 电控制方法

当 CW 和 CCW 方向的信号光经过 SOA 时,对 SOA 注入不同的电流,在相同的输入光功率,可以获得不同的增益,根据(3)式,可以获得 $\Delta\Phi$ 相移,当 $\Delta\Phi = 0.89\pi$ 时,同样可以实现读写功能。当注入正的电流脉冲时,称为正相电控,注入负的电流脉冲时,称为反向电控。 0.89π 相移时的控制电流脉冲的值由实验测得,测量方法和 3.1 节相同,只是需要

调节的是注入 SOA 的电流值。当使用电控方法时,同样需要注入不同于信号光波长的辅助光来抑制噪声。实验使用的信号光波长为 1556.56nm ,辅助光的波长为 1553.8nm ,正相电控时,SOA 的偏置电流 80mA ,脉冲电流 30mA ,辅助光的功率 $700 \mu\text{W}$ 。反相电控时,SOA 的偏置电流 70mA ,脉冲电流 35mA ,辅助光的功率 2mW 。实验结果示于图 5 和图 6。由图(5)和图(6)可见,使用反相电控时,写

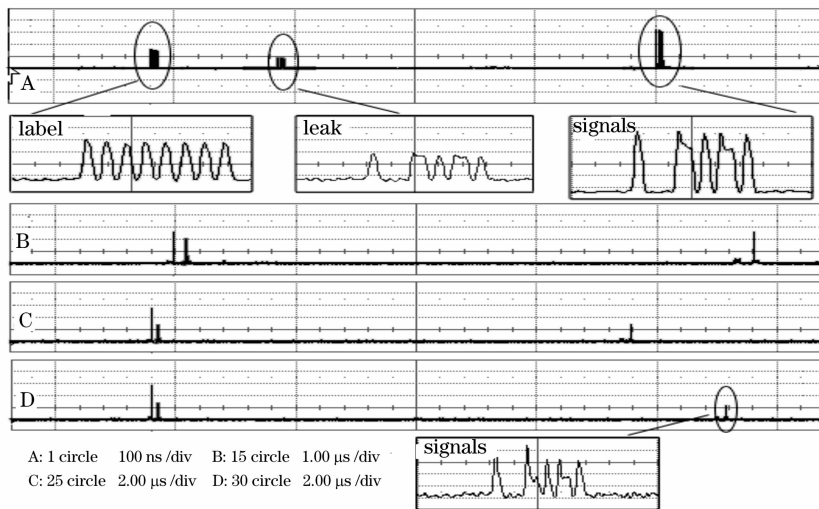


图 6 正向电控实验结果

Fig. 6 Result of positive electrical pulse control

入缓存器的信号光功率较小,经过 5 圈后,输出的信号光几乎和写入时的“漏光”功率相比拟。使用正向电控时,写入缓存器的信号功率较大,经过 25 圈后,读出的信号光的功率仍然可以到达 $200\mu\text{W}$,但与反相光控相比,输出信号失真严重。

4 结 论

双环结构的全光缓存器,都存在随着缓存圈数的增加,输出的信号质量会急剧恶化的问题,但选择合适的控制方法,既可以起到抑制噪声的作用,又可以提高缓存圈数。实验表明,使用反相光脉冲控制法,并引入较大的直流“基座”,可以使缓存圈数达到 30 圈以上,使用正相电脉冲控制法,并引入直流光抑制噪声,可以使缓存圈数达到 15 圈以上。

参 考 文 献

- 1 L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*, 1999, **397**(6720): 594~598
- 2 F. L. Kien, J. Q. Liang, K. Hakuta. Slow light produced by

- far-offresonance Raman scattering[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2003, **9**(1): 93~101
- 3 Aiming Liu, Chongqing Wu. Dual-loop optical buffer (DLOB) based on a 3×3 collinear fiber coupler[J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 2004, **16**(9): 2129~2131
- 4 Songnian Fu, P. Shum, Liren Zhang *et al.*. Design of SOA-based dual-loop optical buffer With a 3×3 collinear coupler; Guideline and Optimizations[J]. *IEEE J. Lightw. Technol.*, 2006, **24**(7): 2768~2778
- 5 M. Eiselt, W. Pieper. SLALOM: Semiconductor laser amplifier in a loop mirror[J]. *IEEE J. Lightw. Technol.*, 1995, **13**(10): 2099~2112
- 6 Li Yajie, Wu Chongqing, Wang Yongjun. 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. 基于半导体光放大器的光控器件中控制光性能分析[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 952~957
- 7 Wang Yaping, Wu Chongqing, Wang Yongjun *et al.*. Noise analysis of optical packet replication based on the semiconductor fiber ring[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, to be published
王亚平, 吴重庆, 王拥军等. 基于 SOA 光纤环形腔的光数据包复制器的噪声特性研究[J]. *中国激光*, 2009, 待发表
- 8 LI Yajie, WU Chongqing. Noise and dynamic gain analysis of re-circular all-optical buffer[J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2006, **17**(10): 1186~1190
李亚捷, 吴重庆. 环路型全光缓存器中噪声及动态增益的研究[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(10): 1186~1190