

文章编号: 0253-2239(2010)01-0047-07

基于双环耦合全光缓存器的大动态延迟范围的研究

王拥军 吴重庆 疏达 赵曦 王智

(北京交通大学光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 全光交换网的高吞吐量和信道利用率要求全光缓存器具有大的动态延迟范围。建立了基于平行排列 3×3 光纤耦合器的双环耦合全光缓存器(DLOB)的分析模型。分析了限制 DLOB 延迟范围的各个因素。分析发现,通过级联 DLOB,可以实现大动态延迟范围。实验验证级联型 DLOB 的可变延迟范围达到 $1 \sim 9999 T$,延迟粒度为 25 ns,输出信号的误码率低于 10^{-9} 。得到理论模型与分析方法对其他基于半导体光放大器(SOA)光开关的反馈式光学处理结构同样具有借鉴作用。

关键词 光纤光学;全光缓存器;动态延迟范围;半导体光放大器的噪声分析;全光包交换;光网络

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0047

Investigation on the Large Dynamic Variable Delay Range of the Optical Buffer Based on Double Loop Configuration

Wang Yongjun Wu Chongqing Shu Da Zhao Xi Wang Zhi

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

Abstract Dynamic variable delay range is the very important performance for an optical buffer. This paper establishes an analysis model for the optical buffer of double loop configuration based on collinear 3×3 fiber coupler and analyzes the limiting factors which define the double loop optical buffer (DLOB)'s delay range. Numerical simulations find that a large dynamical variable delay range can be realized by cascading DLOB. The experiment demonstrates that a large delay variation of $1 \sim 9999$ times of basic delay unit, the fine granularity of 25 ns and the BER of the output data is as low as 10^{-9} . The theory model and analytical method obtained in this paper can also be used to analyze other optical switches based on SOA

Key words fiber optics; optical buffer; dynamic delay range; noise analysis for semiconductor optical amplifier; optical packets switching; optical networks

1 引 言

近年来随着光纤通信的快速发展,传输与交换的矛盾成为限制通信进一步前进的主要障碍。目前,信息传输在光域中进行,而信息交换则需要电域中完成。电域交换需要经过频繁的光-电-光的转换,不仅效率低下,而且能耗高,制造、运营和维护成本昂贵。全光包交换(OPS)消除了光-电-光的转换,使传输与交换完全在光域中进行,因而被认为是未来光网络发展的最终方案。在 OPS 中,全光缓存

器(OB)是解决包的竞争问题的关键器件。目前,全光缓存器的研究集中在两个方面:一是“慢光”型缓存器机理的探索及研究;二是光纤“延迟线”型缓存器结构的优化。最近,由于电磁诱导透明(EIT)在原子气体中的“慢光”现象^[1]和由受激拉曼散射与受激布里渊散射在光纤中的“慢光”现象^[2,3]等相继被观察和研究,“慢光”型缓存器为全光缓存器提供了一个新的发展方向,但目前还处于“慢光”机理的探索阶段。“延迟线”型缓存器是目前唯一接近实

收稿日期: 2008-12-19; 收到修改稿日期: 2009-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(60877057, 60672004)资助课题。

作者简介: 王拥军(1968—),男,博士研究生,主要从事光纤通信和光纤传感等方面的研究。

E-mail: 06118330@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—),男,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(中国光学学会会员号: S0404200675)

用的光缓存器。按照结构,“延迟线”型光缓存器可以分为两种类型:前向式和反馈式。判断光缓存器是否实用的一个主要依据是它的物理尺寸和动态延迟范围^[4]。在前向式光缓存器中,延迟时间为光包经过光纤延迟线所需的时间。对于多通道、大可调延迟范围、毫秒级的前向式光缓存器,光纤长度超过数万千米。反馈式光缓存器的延迟时间为延迟长度乘以缓存圈数,它的物理尺寸相对较小。早期的反馈式光缓存器需要数千米非线性效应较强的光纤[如包散位移光纤(DSF)等]作为开关元件^[5,6],因而造成缓存器的缓存粒度(Granularity)较大,使得信道的利用率较低。2004年,我们研究小组提出了基于半导体光放大器(SOA)和平行排列 3×3 光纤耦合器构成的双环结构全光缓存器(DLOB)^[7]及其改进结构^[8],该缓存器具有优良的缓存性能,并成功地进行了双波长及多波长缓存的研究与实验^[9,10]。但是,像其它反馈式光缓存器一样,由于受到SOA放大的自发辐射(ASE)噪声积累的影响,DLOB的缓存圈数一般不超过20圈^[7,9],很难满足光路由器处理包头信息和解决竞争所需时间的要求。在全光交换节点中,对包头信息处理以及为等待其它数据包发送所需的最大延迟时间约几个亚毫秒,而最小的时间可能就是一个短帧的帧长,一般只有几个字节。因此光缓存器的延迟时间应该在几个纳秒到几个亚毫秒之间,其动态范围应达到 10^4 以上。因此,衡量光缓存器性能指标不是其绝对延迟,而是动态延迟范围和缓存粒度。大动态延迟范围与小延迟粒度对解决包竞争,提高网络的灵活性和信道的利用率是至关重要的。

本文通过DLOB的缓存原理,提出了一种简化DLOB分析的物理模型,得到了DLOB的输出与缓存圈数的关系。数值计算发现,经过4级DLOB的

级联,不仅可以提高总的缓存圈数,而且可以实现 $1 \sim 9999 T$ 的大动态范围的可变延迟。一个4级DLOB的实验系统的实验结果验证了大动态范围缓存的可行性。DLOB级联可以同时实现小缓存粒度,大延迟范围,和高调节精度的要求。

2 DLOB的缓存原理

DLOB的结构如图1所示:

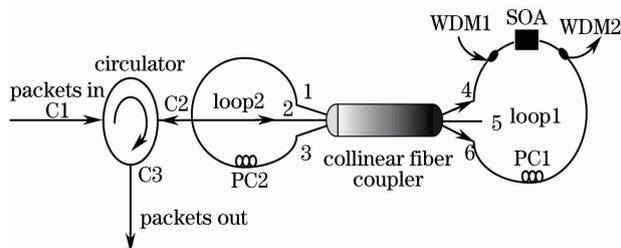


图1 基本缓存单元

Fig. 1 Basic buffer unit

一个 3×3 共线光纤耦合器的1,3端口和4,6端口,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,调节偏振控制器保证1,3或4,6端口的光处于同一偏振方向,右环中的两个波分复用器(WDM)用来向SOA引入控制光及滤除环内的控制光。由于注入了不同功率的控制光脉冲,右环中顺时针(CW)方向和反时针(CCW)方向的信号光通过SOA后产生了相位差 $\Delta\varphi$,可以表示为^[11]

$$\Delta\varphi = \varphi_{cw}(t) - \varphi_{ccw}(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln \frac{G_{cw}}{G_{ccw}}, \quad (1)$$

式中 G_{cw} 和 G_{ccw} 分别为CW方向与CCW方向的光增益, α 表示SOA的线宽增强因子。经过 3×3 耦合器干涉后,暂不考虑DLOB中的功率损耗的情况下,1,2,3端口分配到的光功率为

$$\begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{8} G_{ccw} P_{in}(t-t_1) \left[1 - 2 \exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos(\Delta\varphi) + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \right] \\ \frac{1}{4} G_{ccw} P_{in}(t-t_1) \left[1 + 2 \exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos(\Delta\varphi) + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \right] \\ \frac{1}{8} G_{ccw} P_{in}(t-t_1) \left[1 - 2 \exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos(\Delta\varphi) + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \right] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 P_{in} 为输入的数据包的光功率, t_1 为数据包在右环中的延迟时间。由(2)式可知,当 $\Delta\varphi \approx 0$ 时,光功率完全从2端口输出;当 $\Delta\varphi \approx 0.9\pi$ 时,1,3端口的光功率接近极大值,2端口的光功率接近极小值^[12]。因此当需要缓存时,在光包第一次通过SOA时,向

SOA注入一个与CW方向光包同步的控制光脉冲,使 $\Delta\varphi \approx 0.9\pi$,光包就被写入到光纤环中并沿左右环按“ ∞ ”形周期环绕。当需要读出时,再次注入同步光脉冲,缓存器被擦除,光包将从环形器的C3端口输出。光包在环中的绕行圈数由写入与读出脉冲的

间隔决定。使用反相光脉冲控制法^[13],可以使较大功率信号光被写入缓存器,并能很好的抑制 ASE 噪声。当注入 SOA 的控制光的功率远远大于信号光的功率时,即 $P_c \gg P_s$ 时,信号光在 SOA 中的行为完全由控制光决定,这样不仅稳定了控制过程,抑制了噪声,并且使分析过程变得简单。通常进入 SOA 的信号光功率约为 $200 \mu\text{W}$,则要求写入时的控制光功率大于 2 mW ,此时 SOA 的增益 G_{cw} 约为 4.4 dB (由测量 SOA 的输入-输出功率曲线得到)。按(1)式推算 G_{ccw} 约为 1.5 dB ($\alpha \approx 5.31$),得到存储时控制光功率约为 6 mW 。

3 DLOB 的性能分析

由于反馈式光缓存器需要多次经过 SOA,SOA 中的 ASE 噪声的积累会导致信号损伤,消光比下降,信噪比恶化,使缓存圈数被限制在 20 圈左右。为了分析 ASE 噪声对缓存信号的影响,DLOB 可以简化为图 2(a)的形式,其中的滤波器表示两个 WDM,带宽为 Δf 。WDM, 3×3 耦合器及光纤延迟线的损耗由可变光衰减器代替。而图 2(a)可以展

开为图 2(b)的级联 SOA 的等效形式,其中下标 k 表示缓存圈数, L 为左右环的插入损耗, L' 为环形器的 C1 或 C3 端口到 SOA 的损耗, G_i ($i = 1, \dots, k$) 是存储阶段 SOA 的增益, G_w (或 G_r) 是写入(读出)时 SOA 的增益,由于 $P_c \gg P_s$, G_i 可以用常数 G 代替, G_w (或 G_r) 用 G' 代替。

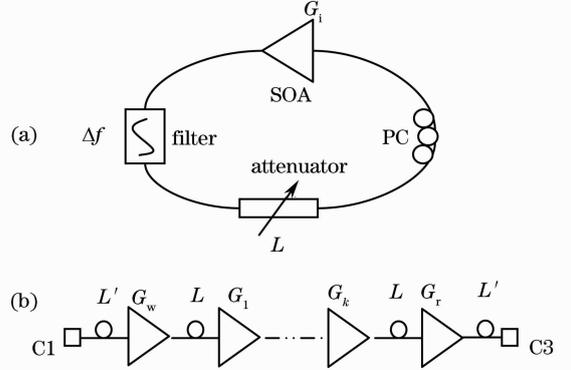


图 2 分析模型。(a)简化的单环模型;(b)SOA 级联模型
Fig. 2 Analysis model. (a) simplified single-loop model;
(b) cascaded SOA model

假定输入信号光是相干的,写入到环中的信号光光子数的均值和方差可以表示为^[14]

$$\langle n_0 \rangle = G'L' \langle n_{in} \rangle + (G' - 1)n_{sp} \Delta f, \quad (3)$$

$$\sigma_0^2 = G'L' \langle n_{in} \rangle + (G' - 1)n_{sp} \Delta f + 2G'L'(G' - 1)n_{sp} \langle n_{in} \rangle + (G' - 1)^2 n_{sp}^2 \Delta f, \quad (4)$$

式中 n_{sp} 和 $\langle n_{in} \rangle$ 分别表示 SOA 的自发辐射系数和输入光的平均光子数。缓存 k 圈后,输出信号光光子数的均值和方差为

$$\langle n_{out} \rangle = \left[G' \frac{\langle n_0 \rangle}{2} (LG)^k + (G - 1)n_{sp} \Delta f \sum_{i=1}^k (LG)^{k-i} LG' + (G' - 1)n_{sp} \Delta f \right] L', \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{out}^2 = & \left[\frac{\langle n_0 \rangle}{2} (LG)^k LG' + (G - 1)n_{sp} \Delta f \sum_{i=1}^k (LG)^{k-i} LG' + (G' - 1)n_{sp} \Delta f + \langle n_0 \rangle n_{sp} (G - 1) (LG')^2 \sum_{i=1}^k (LG)^{2k-i} + \right. \\ & \langle n_0 \rangle n_{sp} (G' - 1) (LG)^k LG' + n_{sp}^2 \Delta f (G - 1)^2 (LG')^2 \sum_{i=1}^k (LG)^{2k-2i} + n_{sp}^2 \Delta f (G' - 1)^2 + \\ & 2n_{sp}^2 \Delta f (G - 1)^2 (LG')^2 \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k (LG)^{2k-i-j} + 2n_{sp}^2 \Delta f (G - 1) (G' - 1) (LG') \sum_{i=1}^k (LG)^{k-i} + \\ & \left. \left(\frac{\sigma_0^2}{4} - \frac{\langle n_0 \rangle}{2} \right) (LG)^{2k} (LG')^2 \right] L'^2. \quad (6) \end{aligned}$$

从(3)式~(6)式可以得到输出信号光的功率 P_s 为

$$P_s = \frac{1}{2} G'^2 L'^2 (LG)^k P_{in}. \quad (7)$$

消光比(R_E)为

$$R_E = 10 \lg \frac{P(1)}{P(0)}, \quad (8)$$

式中

$$P(0) = \left[G'(G' - 1) (LG)^k n_{sp} \Delta f / 2 + (G - 1)n_{sp} \Delta f \sum_{i=1}^k (LG)^{k-i} LG' + (G' - 1)n_{sp} \Delta f \right] h\nu L', \quad (9)$$

$$P(1) = \langle n_{\text{out}} \rangle h\nu. \quad (10)$$

输出光信号被光探测器接收并转换为电信号,电信号经放大后进行判决。忽略放大器的热噪声,接收到的电信号的信噪比(R_{SN})为

$$R_{\text{SN}} = \frac{G'^4 L'^4 \eta_c^2 \eta_q^2 \langle n_{\text{in}} \rangle^2}{8B_0 \sigma_{\text{out}}^2}, \quad (11)$$

式中 η_c, η_q 分别为探测器的耦合系数和量子效率, B_0 为信号的比特率。将参数 $n_{\text{sp}} = 4.2, B_0 = 2.5 \text{ Gb/s}, \Delta f = 100 \text{ GHz}, \eta_c \eta_q = 0.9, G = 1.5 \text{ dB}, G' = 4.4 \text{ dB}$ 代入(3)式~(11)式,可以得到单级缓存时输出功率 P_s, R_E 和 R_{SN} 它们与缓存圈数的关系曲线示于图 3(a)~图 5(a)。从计算结果可以看出,1)随着缓存圈数的增加,ASE 噪声的积累使得 R_{SN} 急剧下降,当 $LG = 0.8$ 时,缓存 20 圈后, R_{SN} 约 15 dB, 40 圈时,

R_{SN} 下降到 -20 dB ; 2)由于 ASE 噪声的积累,使输出信号光出现了直流“基座”,造成 R_E 下降; 3)由于存在写入“漏光”^[15],“漏光”功率一般为输入信号光功率的 $1/10 \sim 1/3$,缓存 20 圈时输出信号光功率已经接近或低于“漏光”功率,接收机已经无法分辨需要接收的数据包信号或“漏光”信号。以上分析表明,单级缓存时,缓存圈数被限制在 20 圈左右。要增加缓存圈数,需要降低线路损耗。降低线路损耗受两方面因素的限制:1) 3×3 耦合器, WDM 的插入损耗和光纤延迟线的损耗是不可避免的; 2)当 $LG \geq 1$ 时,反馈回路将振荡放大,使得反馈环处于不稳定状态,即,降低线路损耗是受限的。因此,在单级缓存时,通过提高缓存圈数得到的动态延迟范围是有限的。

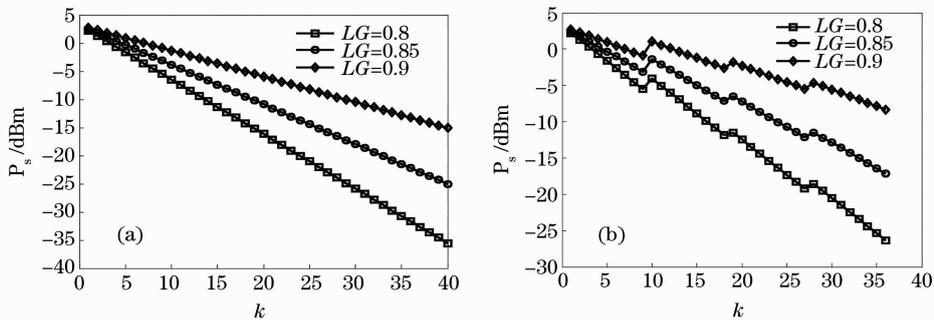


图 3 输出功率与缓存圈数的关系。(a)单级 DLOB; (b)级联 DLOB

Fig. 3 Relation of output optical power versus buffered cycles. (a) single buffer; (b) cascaded DLOB

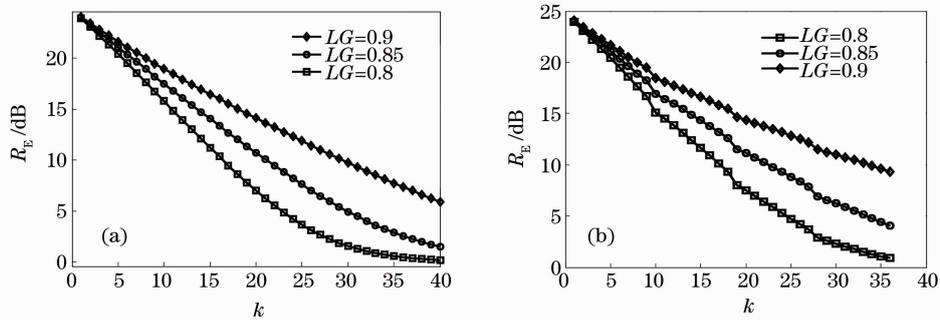


图 4 消光比(R_E)与缓存圈数的关系。(a)单级 DLOB; (b)级联 DLOB

Fig. 4 Relation of R_E versus buffered cycles. (a) single buffer; (b) cascaded DLOB

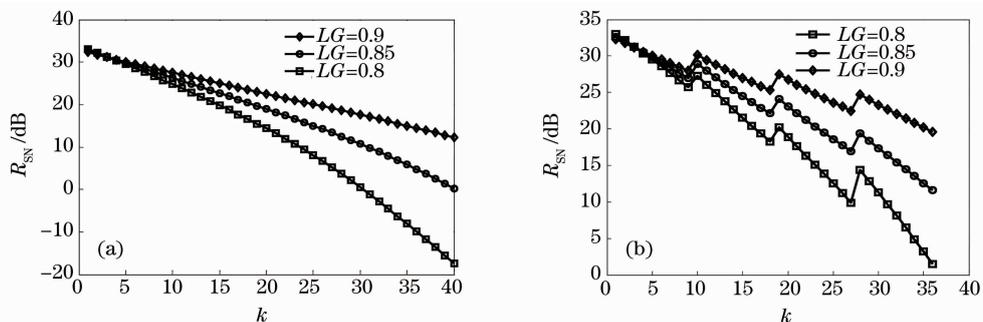


图 5 R_{SN} 与缓存圈数的关系。(a)单级 DLOB; (b)级联 DLOB

Fig. 5 Relation of R_{SN} versus buffered cycles. (a) single buffer; (b) cascaded DLOB

4 级联 DLOB 性能分析

基于双环耦合全光缓存器 DLOB 的级联结构如图 6 所示。图中整个缓存器由 $k+1$ 级基本缓存单元级联构成,光信号在每一级缓存单元存一圈的时间分别为 $T, 10T, \dots, 10^k T$, 在每一级的缓存圈数为 n_0, n_1, \dots, n_k 。那么,总的缓存时间为

$$n_d = n_0 T + 10n_1 T + \dots + 10^k n_k T. \quad (12)$$

如果 n_0, n_1, \dots, n_k 的变化范围为 $0 \sim 9$, 就会得到一个十进制的缓存器。对于 4 级级联,可变延迟时间的范围为 $1 \sim 9999T$ 。两个 PC 各需要 2 m 的光纤,最小缓存单元的环长被限制在 5 m,延迟粒度为 25 ns,可变延迟范围为 25 ns \sim 0.25 ms。如果压电式 PC^[16] 能够成熟并被使用,最小环长可以减少到 1 m。对于 5 级级联,延迟粒度为 5 ns,可变延迟范围为 5 ns \sim 0.5 ms,即可以同时满足大延迟范围和小延迟粒度的要求。

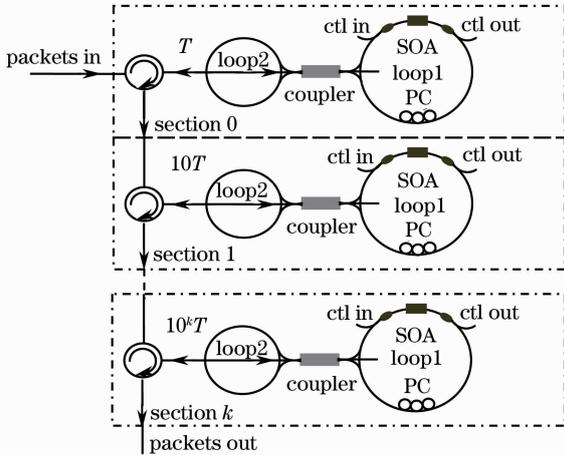


图 6 级联 DLOB

Fig. 6 Cascaded DLOB

对于 4 级 DLOB 级联的情况,总的缓存圈数最大为 36 圈。当线路情况良好时 ($LG > 0.9$), 单级

缓存 36 圈也比较困难。但对于级联 DLOB,由于在各级写入与读出时插入了放大过程,实现缓存 36 圈是有可能的。通过将前一级输出的结果循环代入 (2) 式 \sim (8) 式,可以得到级联 DLOB 的输出功率 P_s, R_E 和 R_{SN} 与缓存圈数的关系曲线[如图 3(b) \sim 图 5(b)]。从计算结果可以看出:1) 由 ASE 噪声引起的 R_E, R_{SN} 下降的趋势没有改变;2) 同单级缓存器输出相比,由于增加了各级中的放大过程,使输出功率与 R_{SN} 各提高了 6 dB,而 R_E 基本持平;3) 当 $LG = 0.85$ 时, R_E, R_{SN} 分别达到 4 dB 与 12 dB,可以满足接收要求。由于前 3 级的光纤损耗可以忽略,实际输出的信号的功率, R_E 和 R_{SN} 比计算值要高。通过进一步优化结构,降低器件的插入损耗,可以实现 5 级 DLOB 的级联。因此,级联型 DLOB 通过配置不同的环长实现大动态范围延迟,通过各级的放大作用提高总的缓存圈数。

5 实验系统与实验结果

实验系统如图 7 所示,缓存器由 DLOB0 \sim DLOB3 级联而成,相对应的光纤延迟线的长度分别为约 5, 48, 530 和 4800 m,可变延迟范围为 25 ns \sim 0.2455 ms,粒度为 25 ns。控制光的波长为 1553.8 nm,信号光的波长为 1556.56 nm,信号光由连续波激光器产生,接到外调制器的光输入端,信号帧的格式由脉冲码型发生器 (PPG) 产生,并经过外调制器调制到光信号上,比特率为 2.5 Gb/s。外部控制单元 MCU 用来产生与 CW 方向的信号光同步的控制信号,并加到控制激光器的输入端,控制光的高光平均约 6.10 mW,低光平均约 2 mW。四级缓存单元中的 SOA (Inphenix 产品) 的工作电流分别为 200, 195, 205 和 210 mA。分别在各级的输出端用示波器 (OSC) 记录输出波形。

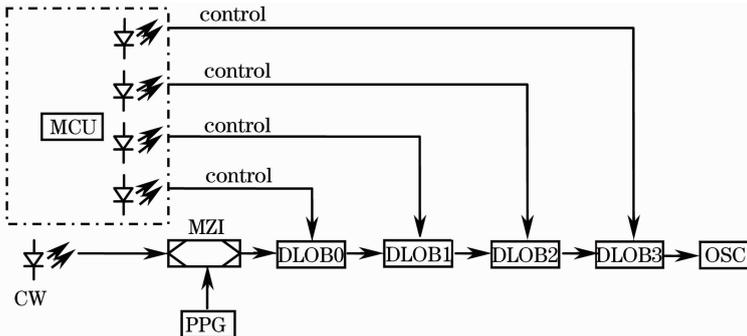


图 7 实验系统

Fig. 7 Experimental system

由于第一级缓存单元的环长仅 5 m,缓存的波长被限制在几个字节,因此选择 4 级缓存时信号帧

的内容由标记和净负荷两部分组成,标记为 5555H,净负荷为 E113H,标记不在缓存器中存储,

只作为光信息缓存圈数的参考。图 8 为示波器记录的缓存器输出的时域波形。

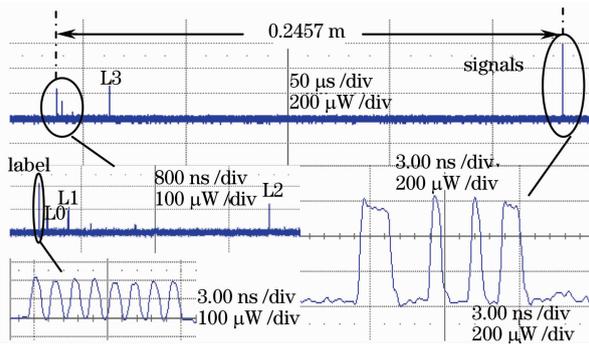


图 8 4 级 DLOB 实验结果

Fig. 8 Experimental results of 4 cascaded DLOB output

由图 8 可以看出,输出信号光的幅值可以达到 $400 \mu\text{W}$,噪声功率约 $50 \mu\text{W}$;出现了 4 个漏光(L0, L1, L2, L3),并逐级被压缩,最后一级漏光虽然达到了信号光幅值的三分之一,但不会影响接收机对缓存包的判断,通过改善 3×3 耦合器的对称性,漏光的幅值可以进一步被压缩;由于控制光功率的波动,信号光的幅值出现约 $30 \mu\text{W}$ 的摆幅。虽然由于包长太短,无法测得输出信号的眼图,但实验结果已经验证了经过 4 级 DLOB 的缓存可以实现 $1 \sim 9999T$ 的大范围可调延迟。

数据包从第二级缓存单元输入,包长为 200 bit,单级缓存 20 圈时的结果如图 9 所示。结果表明,输出信号幅值接近“漏光”幅值;噪声幅值约 $30 \mu\text{W}$,信噪比约 9 dB;受噪声影响,输出信号的眼图已经越过了最小开度模板的界限,误码率大于 10^{-9} 。实验结果与前面的分析基本吻合。

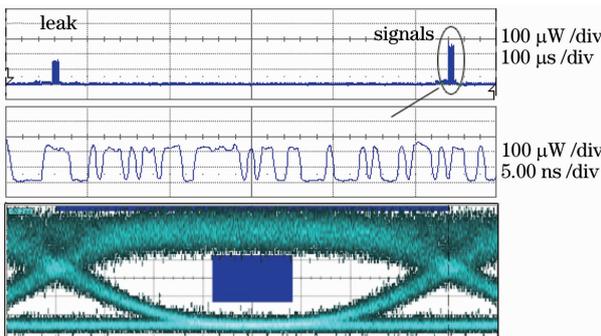


图 9 单级 DLOB 缓存 20 圈的结果

Fig. 9 Results for single DLOB after buffered 20 cycles

数据包从第二级缓存单元输入,包长为 200 bit,级联缓存输出时域波形示于图 10,对应细节示于图 11。结果表明,经过 3 级 999 倍单位延迟的缓存后,输出信号的幅值到达 $660 \mu\text{W}$,最大的漏光幅值约 $220 \mu\text{W}$,不会影响接收机对缓存包的判断;记录的噪声幅值约 $50 \mu\text{W}$,推算得到的信噪比约 11 dB;细

节图显示信号幅值约 $600 \mu\text{W}$,计算得到的消光比约 10 dB;三级缓存后的眼图十分清晰,通过眼图可以测量出品质因数 Q ,由 Q 计算得到的误码率示于图 12,显然,三级缓存后,误码率(BER)低于 10^{-9} 。实验结果与级联情况的数值分析基本相符。

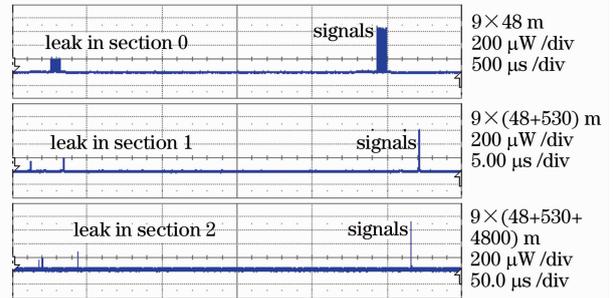


图 10 缓存器输出的时域波形

Fig. 10 Waveforms of the output of the buffer

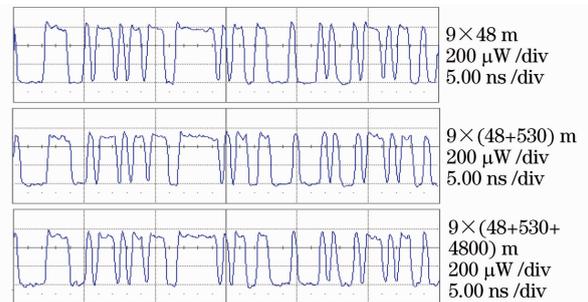


图 11 输出波形的细节

Fig. 11 Details of output signals

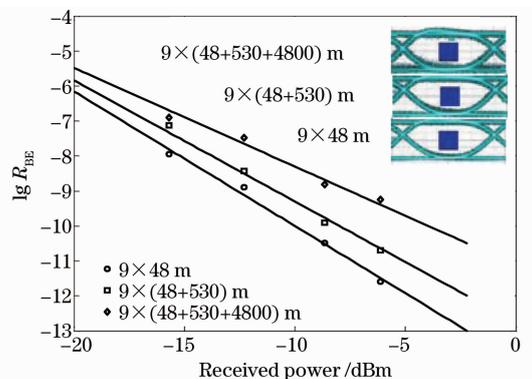


图 12 输出信号的误码率

Fig. 12 BER performance of the cascaded DLOB output signal

目前,国外提出的大范围可变延迟的光缓存器结构一般也采用多个光缓存单元的级联方式。文献[17]提出了一种可动态配置光缓存器的级联结构,虽然该缓存器需要的光纤长度有所减少,理论上的延迟时间可以在纳秒到亚毫秒之间调节,但是它基本属于一种前向结构,物理尺寸较大。该结构的另一个不可忽视的问题是,每级缓存器单元需要多次经过 2×2 耦合器,对于单级 9 倍的延迟,由 2×2 耦

合器的插入损耗造成输出光功率衰减了 54 dB。而且,整个缓存器用到的大量的 SOA 光开关和 2×2 耦合器,成本较高。文献[18]提出了一种基于集成开关的有源垂直耦合器(AVC)光缓存器结构,延迟时间可以在 $1 \text{ ns} \sim 1 \mu\text{s}$ 之间调节,但是它的开关速度为纳秒级,比较慢,有源开关的微小增益不足以补偿环路的插入损耗,需要外加光放大器。以上光缓存器方案只提供了实现大范围缓存的可能性,但是真正的大延迟范围并没有在实验系统中验证。就我们所了解的全光缓存器的研究情况,级联 DLOB 实现的 $1 \sim 9999T$ 的缓存范围是当前在实验系统中实现的最大的动态延迟范围。

6 结 论

以上的理论分析和实验结果表明,由于受 SOA 的 ASE 噪声积累的影响,单级 DLOB 的缓存圈数被限制在 20 圈以下,可调延迟范围及绝对延迟不能满足 OPS 网络对光缓存器延迟的要求,通过级联 DLOB,可以提高输出光功率,改善信噪比,使光缓存器的延迟范围提高到 $1 \sim 9999T$,解决了小的缓存粒度,大动态延迟范围与绝对延迟时间之间的矛盾。

参 考 文 献

- 1 Wu Chongqing, Yuan Baozhong. Slow light and all-optical buffer [J]. *Phys.*, 2005, **34**(12): 922~926
吴重庆,袁保忠. 光速减慢和光缓存技术[J]. *物理*, 2005, **34**(12): 922~926
- 2 Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharping. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(15): 153902-1
- 3 F. L. Kien, J. Q. Liang, K. Hakuta. Slow light produced by far-offresonance Raman scattering [J]. *J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2003, **9**(1): 93~101
- 4 J. Monk, B. Eggleton. Photonics: Expect more delays [J]. *Nature*, 2005, **433**(7028): 811~812
- 5 A. Agarwal, L. J. Wang, Y. K. Su. All-optical erasable storage buffer based on parametric nonlinearity in fiber[C]. *OFC*, 2001. ThH-S-1
- 6 A. M. Liu, C. Q. Wu, Y. D. Gong. Optical buffer configuration based on 3×3 collinear fiber coupler[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(16): 1017~1019
- 7 A. M. Liu, C. Q. Wu, Y. D. Gong. Dual-loop optical buffer (DLOB) based on a 3×3 collinear fiber coupler [J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(9): 2129~2131
- 8 Zhang Lijun, Wu Chongqing, Li Yajie. Novel read/write independently controlled 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
- 9 C. Y. Tian, C. Q. Wu, Z. Y. Li *et al.*. Dual-wavelength packets buffering in dual-loop optical buffer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 578~580
- 10 Peng Peng, Wu Chongqing, Tian Changyong *et al.*. Parallel buffering of dual-wavelength packets data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 835~839
彭 鹏,吴重庆,田昌勇等. 双波长数据包并行缓存 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 835~839
- 11 M. Eiselt, W. Pieper. Slalom. Semiconductor laser amplifier in a loop mirror [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(10): 2099~2112
- 12 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分析 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 952~957
- 13 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu Da *et al.*. Investigation on control technique of adjustable double loop optical buffer in large range [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1930~1934
王拥军,吴重庆,疏 达等. 大范围可调的双环全光缓存器的控制技术的研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1930~1934
- 14 Y. Yamamoto. Noise and error rate performance of semiconductor laser amplifiers in PCM-IM optical transmission systems [J]. *J. Quant. Electron.*, 1980, **EQ-16**(10): 1073~1081
- 15 Y. J. Li, C. Q. Wu, S. N. Fu *et al.*. Power equalization for SOA-based dual-loop optical buffer by optical control pulse optimization [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2007, **43**(6): 508~516
- 16 S. S. Yang, C. Q. Wu, Z. Y. Li. Distributed measurement of birefringence by P-OTDR assisted with piezoelectric polarization controller [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(9): 3304~3306
- 17 Yong-Kee Yeo, Jianjun Yu, Gee-Kung Chang. A dynamically reconfigurable folded-path time delay buffer for optical packets switching [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11): 2559~2561
- 18 Nan Chi, Zhuoran Wang, Siyuan Yu. A large variable delay, fast reconfigurable optical buffer based on multi-loop configuration and an optical crosspoint switch matrix [C]. *OFC10SA*, 2006, OF07