

基于大动态延迟范围全光缓存器的时隙处理

王拥军¹ 张晓磊¹ 吴重庆² 王智² 尚超¹ 杨昭怡¹ 忻向军¹

(¹北京邮电大学电子工程学院信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)
²北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

摘要 提出利用级联型双环耦合全光缓存器(DLOB)进行全光时隙处理的方案,并对光分组的时隙压缩、时隙扩展、时隙交换或重排等全光时隙处理功能进行了实验验证。实验结果表明,经过两级 DLOB,数据速率为 2.448 Gb/s 的两个光分组的时间间隔可以在 24.3 μs ~110 ns 之间进行压缩,或在 100 ns~26.11 μs 之间进行扩展,并且可以达到无误码输出。这种利用级联 DLOB 对光分组的时隙处理方法,对全光缓存器的研究有一定的参考价值。

关键词 光学器件;全光交换;全光缓存器;时隙处理;可配置延迟

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1005001

Slot Processing Based on Large Dynamic Delay Range All-Optical Buffer

Wang Yongjun¹ Zhang Xiaolei¹ Wu Chongqing² Wang Zhi² Shang Chao¹

Yang Zhaoyi¹ Xin Xiangjun¹

¹ State Laboratory of Information Photonics and Optical Communication,

Beijing University of Posts and Telecommunications, School of Electronic Engineering, Beijing 100876, China

² Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Beijing Jiaotong University,

Beijing 100044, China

Abstract Based on a cascaded double-loop all-optical buffer (DLOB) structure, a new all-optical slot processing scheme is proposed. The all-optical slot processing functions which include slot compressing, slot expanding and slot interchanging or re-aligning, are proved by experiments. The results demonstrate that the interval between two 2.448 Gb/s optical packets can be compressed from 24.3 μs to 110 ns, or expanded from 100 ns to 26.11 μs by two-level DLOB, and the output optical packets have no bit error. The all-optical slot processing scheme proposed in this paper can provide as a reference for all-optical buffer.

Key words optical devices; all-optical switch; all-optical buffer; slot processing; configurable delay

OCIS codes 200.4490; 060.4510; 060.1155; 130.4815

1 引言

全光分组交换(OPS)由于具有粒度细、速度高、吞吐量大、路由丰富、配置灵活等优点,被认为是解决“光-电-光(O-E-O)”转换以及“电子瓶颈”限制、能够充分利用光纤传输带宽的终极方案。OPS 中的光缓存器作为解决分组竞争的核心组件需要根据不同的网络状态以及拥塞情况灵活配置。结构紧凑、配置灵活、价格低廉、可实用的延迟线型全光缓存器已成为研究热点。目前,全光缓存器面临的一大挑

战是设计合理的结构,以便使用较短的固定长度的光纤延迟线来实现大动态范围的可控延迟时间。文献[1]提出了一种树状折叠结构的光缓存器,可将延迟线的长度减少一半;文献[2]利用有源垂直耦合器构成 4×4 的开关矩阵,配置不同长度的光纤,组成 4 个延迟环,通过控制各开关的 on/off 状态能够灵活地实现 1~9999 个单位时间的延迟;文献[3]提出了一个环形与树状的混合结构,使得光纤延迟线得到了更有效的利用。但是,这些方案各自都存在明

收稿日期: 2013-04-19; 收到修改稿日期: 2013-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61077014,61077048)、中央高校基本科研业务费专项资金(2009CZ07)

作者简介: 王拥军(1968—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信与光传感方面的研究。E-mail: wangyj@bupt.edu.cn

显的不足,文献[1]中的树状结构,使用了大量的半导体光放大器(SOA)和 3 dB 耦合器,结构较复杂,并需要使用高功率光纤放大器进行功率补偿;文献[2]中的有源垂直耦合开关,需要注入大电流在有源层中形成载流子梯度,从而实现对注入光的偏折,其原理还是一种电控光开关,不适用于全光交换;文献[3]提出的混合结构也是将 SOA 作为一种电控光开关。鉴于以上不足,本课题组提出了基于平行排列 3×3 耦合器的双环结构全光缓存器(DLOB),并对其单个缓存器以及级联结构的缓存器进行了设计与分析^[4-5],提出使用反相光脉冲控制方法^[6]在四级级联结构的缓存器中成功实现了 $1 \sim 9999$ 个单位时间的延迟^[7-8]。

在 OPS 网络中,当多个用户分组同时竞争同一个输出端口时,优先级最高的分组直接通过,其他的分组被放入光缓存器中暂存,根据分组的优先级及网络状态决定各分组在光缓存器中的延迟时间,这就是全光缓存器的基本功能。全光缓存器更为诱人的用途是其能够完成光分组时隙处理上的诸多功能,利用其可以方便地实现包括光分组时域间插、时隙交换或重排、时域的压缩与扩展等功能,并且处理过程对光分组中的用户载荷完全透明。此外,在高速光时分复用网络的边沿节点中,结合高速光开关,全光缓存器可以方便地完成光分组的复用、解复用(或并-串、串-并转换)等功能。文献[9]利用基于垂直有源耦合开关的光缓存器实现了光分组时隙排列的诸多功能,但其中对开关的控制需要注入 450 mA 以上的大电流,开关速度大于 1.5 ns,与 OPS 网络要求的高速光控开关还有一定距离。本文利用级联 DLOB 阵列在光域中实现光分组的时隙间插、时隙交换与时隙的压缩与扩展等功能,在完成所有功能的过程中,DLOB 中的 SOA 均注入常数电流,由控制光的功率改变光开关的工作状态,是一种全光时隙处理模式。

2 系统原理

级联 DLOB 的结构如图 1 所示,其主要由 k 个不同的 DLOB 组成,各 DLOB 单圈的延迟时间为 $T, 10T, \dots, 10^k T$,光分组在各 DLOB 中的缓存圈数为 n_0, n_1, \dots, n_k ,经过 k 级缓存光分组的延迟时间为

$$t = n_0 T + n_1 10T + \dots + n_k 10^k T. \quad (1)$$

控制光分组在各 DLOB 中的缓存圈数在 $0 \sim 9$ 之间变化,对于 4 级级联的 DLOB 阵列,对光分组可以实现范围为 $0 \sim 9999T$ 的动态延迟。

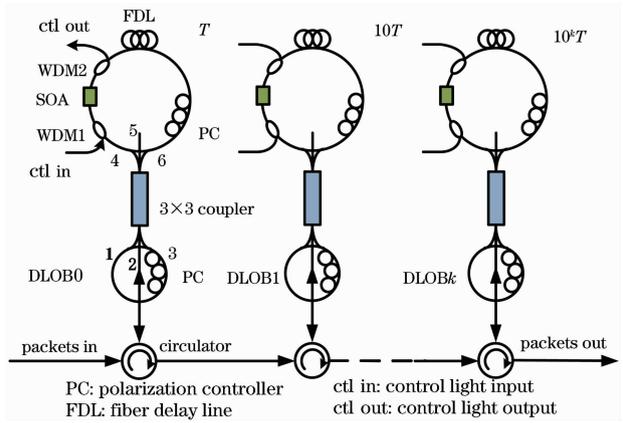


图 1 级联型 DLOB 结构

Fig. 1 Configuration of cascaded DLOB

DLOB 的主要元件为平行排列的 3×3 耦合器,将其 4、6 端口相连构成 DLOB 的主环,1、3 端口相连构成副环,2 为 DLOB 的输入、输出端口。当光信号从 DLOB 的中间端口 2 输入,4、6 端口平分信号光的功率,并分别按顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向沿主环传输,如果主环中不存在相移器件,则沿两个方向传输的光信号绕主环一圈到达 3×3 耦合器的 4、6 端口时具有相同的强度与相位,信号光将从 2 端口输出。如果在主环中引入非线性相移器件 SOA,通过波分复用器(WDM1)向 SOA 中注入不同于信号光波长的、与 CW 方向的信号同步的、高功率的控制光脉冲,并且限制数据包的长度,避免 CW 与 CCW 方向的信号光在 SOA 中相遇,这样, CW 与 CCW 的信号光在 SOA 中将会经历不同的增益与相移,其相位差为

$$\Delta\phi = \phi_{cw} - \phi_{ccw} = -\frac{\alpha}{2} \ln\left(\frac{G_{cw}}{G_{ccw}}\right), \quad (2)$$

式中 α 为 SOA 的线宽增强因子, G_{cw} 、 G_{ccw} 分别为 CW 与 CCW 方向的信号光的增益。当 $\Delta\phi$ 为 π 时,1、3 端口的光功率接近最大,2 端口的光功率接近最小,相位差为 π 的两个方向的信号光经过副环一圈,通过 3×3 耦合器后,其功率在 4、6 端口平分,保持 SOA 的工作状态,即保持 CW 与 CCW 的信号光大小相等,相差为 π ,信号光就会在主副环之间来回环绕,光分组被缓存;当需要读出时,再次向 SOA 注入控制光脉冲,使两个方向上的信号光的相位差再次改变 π ,这时,2 端口得到最大的信号光功率,1、3 端口的信号光功率最小,光分组就被读出。应用反相光脉冲控制方法^[6],级联 DLOB 可以实现 $0 \sim 9999T$ 的动态可调延迟时间^[8]。

3 光分组之间的时隙处理

在 OPS 网络中,光分组是随机出现的,当光分组比较密集时,容易引起网络拥塞;当光分组比较少时,会造成资源浪费。因此,适当的平滑网络流量可以改善服务质量,提高网络的资源利用率。利用全光缓存器的存储转发功能,通过适当的调度算法,压缩或扩展光分组之间的时间间隔,可以有效地平滑 OPS 网络的流量。

使用级联 DLOB 进行光分组时隙压缩的实验验证系统如图 2 所示,缓存系统由两级 DLOB 组成, DLOB0 的环长为 48 m, DLOB1 的环长为 530 m。激光器 1(LD1)发出的波长为 $\lambda_1 = 1556.56 \text{ nm}$ 的连续光进入马赫-曾德尔干涉(MZI)光调制器中,由可编程脉冲发生器(PPG)发出两个数据分组 A 和 B 进行调制。每个分组包含 184 bit,码率为 2.488 Gb/s, 分组 A、B 间隔为 $24.3 \mu\text{s}$, 并且每 $100 \mu\text{s}$ 重复发送一次。经调制器后,分组 A、B 的信息被调制到波长为 λ_1 的光上,变成光分组 A、B。PPG 在发出数据分组的同时,也发出一个帧同步信号,并送入控制单元中。控制单元(CU)通过帧同步(syn)信号、分组长度、间隔及需要在各 DLOB 中的缓存时间等信息发出控制脉冲,控制 LD2、LD3 输出波长为 $\lambda_2 = 1553.8 \text{ nm}$ 控制脉冲,实现对 DLOB0 与 DLOB1 的读写功能。SOA 的工作电流为 250 mA,输入信号光的幅度约为 $600 \mu\text{W}$,控制光的高光平均约为 6.1 mW,低光平均约为 2 mW。光分组 A 先到达 DLOB0, CU 控制 LD2 发出写入光脉冲,使分组 A 在 DLOB0 中缓存 9 圈后, CU 控制 LD2 发出读出光脉冲,分组 A 从 DLOB0 输出到达 DLOB1; 类似于对 DLOB0 的操

作,使分组 A 在 DLOB1 中缓存 9 圈后输出。当分组 A 在 DLOB1 中时,分组 B 到达节点,在 DLOB0、DLOB1 中缓存 5 圈、0 圈后输出。图 3 为示波器(OSC)记录的输出端的波形图,由于 DLOB 存在写入漏光^[7],漏光与输出波形之间的间隔就是光分组在 DLOB 中的缓存时间,从图 3 可以看出,最终输出时两分组的间隔被压缩到了 110 ns,压缩比接近 240,从前面对级联 DLOB 的讨论可知,使用 4 级 DLOB 级联,最大压缩比可以达到 9999;输出的分组 A、B 的次序被改变,即同时实现了时序重排的功能;分组 A 的消光比约为 10 dB,信噪比约为 15 dB;由于两个光分组间隔较近,无法分别测到它们的眼图,光分组 A、B 叠在一起的眼图插在图 3 中,由于两个分组缓存的圈数有差异,造成分组的幅值有所差别,并且分组 A 的噪声较大,使得眼图的上沿较宽。但是,眼图还是比较清晰,开度较大,可以实现无误码输出。

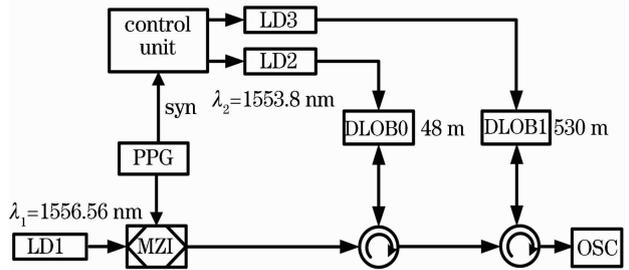


图 2 实验系统

Fig. 2 Experimental system

使用图 2 的实验系统可以验证级联 DLOB 时隙扩展功能, PPG 发出两个分别包含 184 bit 数据分组 A 和 B, A、B 之间间隔为 100 ns, 并且每 $100 \mu\text{s}$ 重复发送一次。光分组 A 不在 DLOB0 或 DLOB1

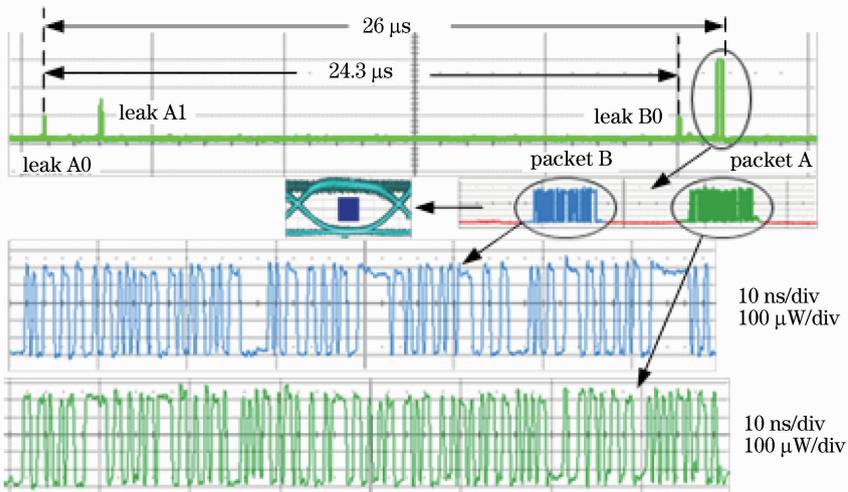


图 3 时隙压缩实验结果

Fig. 3 Experimental results for time slot compression

中缓存,光分组 B 在 DLOB0 与 DLOB1 中各存 9 圈。图 4 为示波器记录的输出端的波形及分组的部分细节图,可以看出,经过两级 DLOB,光分组 A、B 的时间间隔由 100 ns 扩展到 26.11 μ s,使用 4 级 DLOB 级联,可以使光分组 A、B 的时间间隔在 0~

9999 个单位时间之间进行动态调节。图 5 为示波器记录的光分组 A、B 的眼图及计算的误码率(BER, R_{BE}),眼图清晰,开度较大,光功率大于 -15 dBm 时,误码率小于 10^{-8} 。

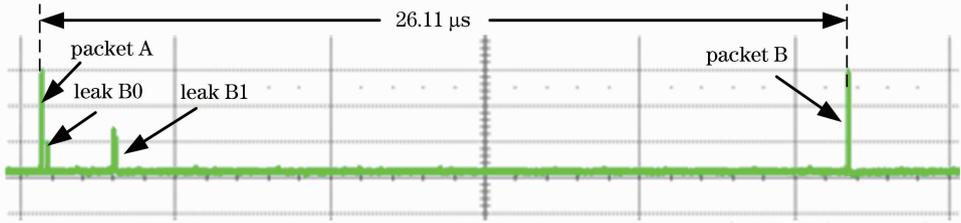


图 4 时隙扩展实验波形图

Fig. 4 Waveform for time slot expanding experiment

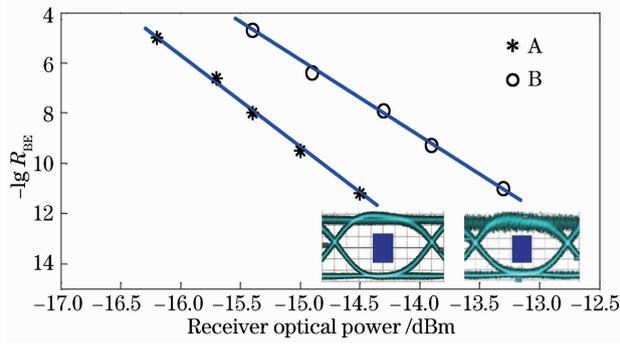


图 5 眼图与误码率

Fig. 5 Eye diagrams and error bit rate

利用图 2 的实验系统可以验证级联 DLOB 的时隙交换功能,输入的光分组有 A、B、C、D 四个,长度分别为 624, 376, 248, 120 bit, 各分组的间隔为 120 ns, 每 50 μ s 重复发送一次。由于光分组较大, DLOB0 无法容纳,因此,各分组在 DLOB0 中为直

通方式。为了进行对比,光分组 A、B、C、D 各缓存 1、2、3、4 圈后,不改变光分组之间的实现次序,按 A、B、C、D 顺序输出。图 6 为示波器记录的波形及分组的部分细节图,可以看出,各包之间的间隔被伸展为 2.67 μ s,各包输出功率接近 700 μ W,输出信号的信噪比接近 25 dB,消光比约为 16 dB,输出信号的波形比较完美,可以保证没有误码。

当光分组按 ABCD 顺序输入,控制 LD3,使分组 A、B、C、D 分别在 DLOB1 中缓存 4、3、2、1 圈,输出时的次序变为 DCBA。图 7 为波器记录的波形及分组的细节图,可以看出,各分组的输出功率接近 600 μ W,输出信号的信噪比接近 25 dB,消光比约为 16 dB,信号的波形细节清晰,能够保证没有误码。调整各分组的缓存圈数,4 个光分组可以按照 16 种组合次序输出。这个实验同时验证了 DLOB 的时隙扩展功能。

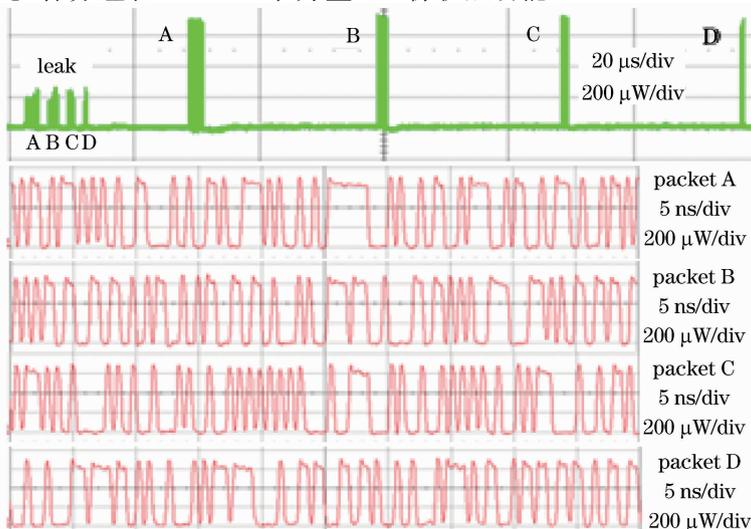


图 6 时隙顺序排列实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms for slot alignment sequentially

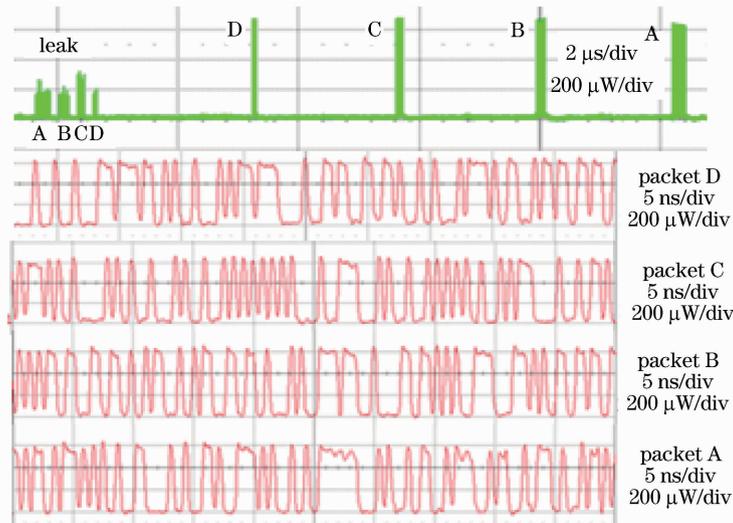


图 7 时隙倒序排列实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms for slot alignment reversely

4 结 论

全光时隙压缩与扩展、全光时隙交换或重排是 OPS 网络中的重要时隙处理方法。本文提出的利用级联 DLOB 实现对光分组时隙的处理方案, 经过实验验证级联 DLOB 结构能够完成光分组的全光时隙压缩与扩展、全光时隙交换以及重排的功能。经过两级 DLOB, 两个分组的时隙压缩比接近 24; 两个分组的时间间隔从 100 ns 到 26.11 μ s 可调; 利用反相光脉冲控制方法, 可以实现对 4 个依次输入的光分组以 16 种不同的顺序进行时隙交换或重排。这种基于级联 DLOB 对光分组进行时隙处理的方法, 对全光缓存器的研究具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Yong-Kee Yeo, Jianjun Y, Gee-Kung Chang. A dynamically reconfigurable folded-path time delay buffer for optical packets switching[J]. J Photon Technol Lett, 2004, 16(11): 2559–2561.
- 2 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]. Optical Fiber Communication Conference, 2006. OFO7.
- 3 Xinwan Li, Limei Peng, Jianping Chen, *et al.*. A novel fast programmable optical buffer with variable delays [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2008. JThA4.

- 4 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Wang Zhi, *et al.*. Signal impairment analysis of optical controlled apparatus caused by semiconductor optical amplifier [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6): 4042–4048.
王拥军, 吴重庆, 王智, 等. 半导体光放大器引起的光控器件总的信号损伤分析 [J]. 物理学报, 2010, 59(6): 4042–4048.
- 5 Yongjun Wang, Chongqing Wu, Xiangjun Xin, *et al.*. Investigation on performance of all optical buffer with large dynamical delay time based on cascaded double loop optical buffer [J]. Chin Phys B, 2010, 10(9): 094209.
- 6 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研究 [J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1930–1934.
- 7 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu Da, *et al.*. Investigation on the large dynamic variable delay range of the optical buffer based on double loop configuration [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 47–53.
王拥军, 吴重庆, 疏达, 等. 基于双环耦合全光缓存器的大动态延迟范围的研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(1): 47–53.
- 8 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu Da, *et al.*. Cascaded all-optical buffer based on double-loop configuration [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(3): 597–601.
王拥军, 吴重庆, 疏达, 等. 双环结构级联型全光缓存器的研究 [J]. 中国激光, 2009, 36(3): 597–601.
- 9 Zhuoran Wang, Nan Chi, Siyuan Yu. Time-slot assignment using optical buffer with a large variable delay range based on AVC crosspoint switch [J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(8): 2994–3001.