

光纤延迟线型全光缓存器的研究

吴重庆

(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 概括了本课题组在近十年中进行的光纤延迟线型全光缓存器的研究工作,介绍了基本的基于 3×3 平行排列耦合器的基本缓存单元——双环耦合全光缓存器(DLOB),并以此为基础,构建出缓存时间为 $1 \sim 9999$ T(时间单位)的大动态范围、多波长等全光缓存器,速率都在 2.5 Gb/s 以上,并研制出基于偏振的全光缓存器。对这些缓存器的原理、关键技术以及实验结果进行了介绍。最后,对于这一类光纤缓存器的优点及未来发展方向进行了讨论。

关键词 全光缓存器;光纤型全光缓存器;延迟线型光缓存器;大动态范围光缓存器;多波长光缓存器;偏振缓存器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900116

Study on Fiber-Delay-Line-Based Buffer

Wu Chongqing

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

Abstract The research achievements of optical buffer based on optical fiber delay line in recent 10 years are introduced. The basic buffer element, dual loop optical buffer (DLOB), is introduced. Based on DLOB, some new structures of buffer for different applications are proposed, such as the buffer with big dynamics of delay from 1 to 9999 T and the eight wavelengths buffer. All of these buffers are operated at the bit rate above 2.5 Gb/s. A polarization-rotation-based optical buffer is proposed. The principle, key technologies and experimental results are introduced for all above buffers. At last, the advantages and development future are discussed.

Key words all-optical buffer; fiber-based all-optical buffer; fiber-delay-line-based buffer; big-delay-dynamics buffer; multi-wavelength optical buffer; polarization rotation optical buffer

OCIS codes 060.1810; 060.4259; 060.1155

1 引 言

全光信号存储器件是未来全光通信、全光路由和全光计算的关键部件。全光存储器件包括全光存储器(All-optical memory)与全光缓存器(All-optical buffer)等。二者的区别在于,全光缓存器是对于输入信号延迟一段时间后一次性输出,延迟时间可预先设定或者被其他事件随机触发,但读出后缓存器内的数据自然丢失;全光存储器则是将数据长时间存储,可以多次读出而不丢失数据,要擦去存储器内的数据,必须使用清零信号。存储器又可分为随机存储器(RAM)和固定存储器(ROM)两种。

全光缓存器的最潜在的应用是光分组交换网中的全光路由器。在过去 20 年中光通信的传输技术

突飞猛进,光纤传输系统的容量已经高达每秒数十太比特。尽管电的路由器也达到了每秒亚太比特级,但与超大容量的光传输仍然不适应,从而引起了互联网拥塞。但是电路路由器向更高吞吐量扩展是十分困难的,对于供电和空间的需求也变得十分不理想,只有全光分组交换能够潜在地解决这个瓶颈。路由器的关键部件包括交换矩阵、信号处理单元和各类存储器与缓存器件。全光开关和电信号处理的器件相对成熟,而全光存储器件目前还没有明确的技术途径,因此全光存储器件就成为全光路由器乃至全光分组交换网的瓶颈所在。

除了光通信应用之外,全光缓存器是未来光子计算机的关键。目前电子计算机的运算速度已经在

收稿日期: 2011-07-07; 收到修改稿日期: 2011-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(60877057, 60907027, 61077048)资助课题。

作者简介: 吴重庆(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤和光波导等方面的研究。E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn

每秒数十亿次以上,22 nm 的芯片技术已经走向实用,进一步提高运算速度遇到了许多困难,不仅要求更精细的芯片技术,比如 18 nm 的芯片技术,而且电路的互联也成为一个难点。传统的导线或者电路板上的电导体,由于分布电容和分布电感的存在,使得传输速度大大下降,同时,开放的导线相当于一个发射/接收天线,电路间的互相串扰变得十分严重,于是片上光互连技术应运而生。这虽然可以部分地解决这个问题,但是光互连要经过电-光-电的转换,每一个引脚都要经历这个过程,致使芯片庞大、耗电增加。如果某些数据传输的环节能够直接在光域中进行,比如数据的缓存不必经过光电/电光转换,则传输速率将会极大提高,所以未来大型电子计算机的“光子化”也是一个重要的发展方向。而要发展光子计算机,高速全光缓存器是不可或缺的基本器件。

由于光不能停止,要使光信号缓存,首先想到的就是使光信号在导光介质中延迟一段时间,这种以传输延迟为基础的缓存器,可以称为传输延迟型光缓存器。对于这种类型的缓存器,选择延迟光信号的导光介质是缓存器的首要问题。光纤可以与现有的通信系统兼容,而且长度可以任意选择,所以是缓存器首选的介质。因此,光纤延迟线型全光缓存器就成为被研究得最广泛的一种。

对于任何一种导光介质,延迟时间可以表示为 $t = L/v_g$,其中 L 为光传输路径长度, v_g 是群速度,所以“光缓存”可以从减慢光的传播速度和延长介质长度两方面考虑。这样,光纤型全光缓存器又可分为两大类:一类是慢光型光纤全光缓存器^[1~8];一类是增加延迟线长度型光纤全光缓存器^[9~15]。后者也常常被直接称为延迟线型缓存器。本文研究的就是后一种缓存器。虽然理论上慢光可以用来制作缓存器,但是由于它的带宽延时乘积受限,不会大于材料的折射率,比如,对于石英光纤,二者的乘积不会大于 1.5。对于高速通信来说,其延迟量甚至低于 1 bit,用它来制作光缓存器,没有实际意义。慢光可以用来做时钟调整、比特同步等其他用途,但作为缓存器是不适宜的。目前,光纤延迟线型全光缓存器仍然是主流。

光纤延迟线型缓存器从结构上可以分为前向型和反馈环路型。

1) 前向型光纤缓存器

前向型光纤缓存器是以光信号经历不同长度的光纤段来调节延迟时间的,不具备读写功能,因此不是真正意义的缓存器。光纤段的调节依靠切换光开

关进行。最早的工作有基于延迟线+光开关的方案^[16]。2004年,Yeo等^[10]提出一种树状结构,通过开断每一个“树枝”中的光开关,可以获得不同的延时。我国杨爱英等^[11]对上述结构进行了改进,然而这两种结构的前向型光纤延迟线,都采用大量分立的以半导体光放大器(SOA)为基础的太赫兹光异步解复用器(TOAD)型光开关,开关速度在纳秒级,因此其最小的延迟时间单元不可能小于 1 ns。而且,TOAD 开关的基本要求是在连接 SOA 的光纤环路中,顺时针和逆时针的光信号不能在 SOA 中相遇,如果相遇就会产生诸如交叉增益调制(XGM)等串扰。所以这种结构的总延时虽然可以是单位延时的上千倍,但最大包长只能是 TOAD 环长的 1/2,不可能缓存更长的数据包。这表明这种结构的光延迟线,缓存容量非常有限。

为了改进许多分立 SOA 元件带来的不紧凑的问题,Wang等^[12]提出了用有源垂直耦合器(AVC)代替 SOA 光开关,实现缓存时间的调节。AVC 由两层 InP 波导组成,在波导的交叉点上,形成垂直的耦合器。受耦合机理的限制,开关的动作时间大约为 2 ns。虽然从原理上可以实现可变时间调节,但是,由于光每经历一次开关要带来近 20 dB 的损耗,这样就不得不在光纤环路中加入大量放大器,实际能够达到的延迟时间还是比较有限。另一个问题仍然是缓存容量比较小。

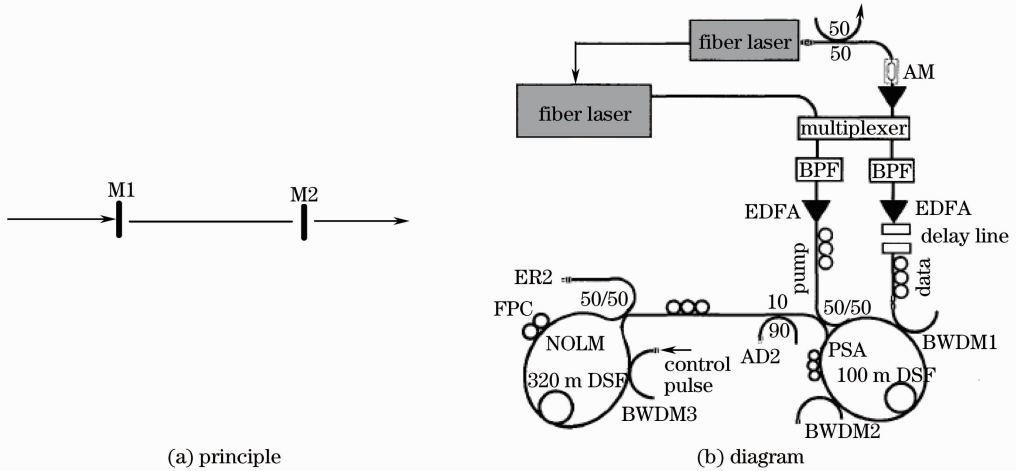
前向型光纤延迟线的优点是时间调节的范围大,但是缺点也很明显,主要有:1)由于没有读写机制,所以不能采用中断方式来控制缓存时间,必须事先设置好开关的动作顺序,交换的灵活性很差。作为一个缓存器,不可能预先知道一个数据包需要缓存的时间。当两个数据包竞争同一个端口的时候,存放于缓存器内的数据包 A,必须等待正在传输的那个数据包 B 发送完毕之后才可能被发送。而正在传输的数据包 B 的长度是随机的,所以等待时间(缓存时间)也不能确定。2)缓存容量很小,缓存深度也不高,光纤利用率低。比如,如果要缓存 1 个 10 Gb/s 的 64 Kbyte 的 IP 包(数据包的传输时间 $T=6.4 \mu\text{s}$),动态范围从 1 T 变化到 8000 T,则光纤的总长将达到 $1.2 \times 10^4 \text{ km}$,这是非常不实际的!3)很难适应可变包长的要求。

2) 反馈型光缓存器

反馈型光缓存器利用光开关和光纤环路构成,光开关首先将数据流引入环路,然后紧接着就关闭光开关并允许数据在环路中环行。需要读出的时

候,再次将开关切换到输出端,完成数据读出。通过控制光开关的切换时间便可调节数据包在光纤环内的环行时间,从而大大提高光纤的利用率。比如一种基于反射光纤[法布里-珀罗(FP)腔]加光开关的方案^[16],如图1所示。基本思想是在一根光纤的两端,分别加一个透射率(反射率)可调的镜片。当需要光信号引入时,可将M1调整到透光状态,待信号进入光纤后,M1立刻转换为全反射状态,M2此时也是全反射状态,于是光信号就在由两个全反射镜组成的FP腔中来回运动,被存储于光纤中。当需要读出的时候,只需将M2改成透光状态即可。切换光开关的方法很多,最常见的是非线性光环路镜

(NOLM)或 TOAD 等光开关[参见图 1(b)]。这类光开关的速度都可以到皮秒量级,因此适合全光缓存器使用,但也有一定问题,最基本的问题是不能使干涉的两路光在 SOA 中相遇,否则它们之间就会产生 XGM。这样,缓存容量最终取决于光开关 NOLM,TOAD 本身的环长,而不是取决于光开关外部的光纤长度。比如图 1 结构的 FP 腔缓存器,如果 M1 与 M2 由 NOLM 或者 TOAD 构成,那么其缓存容量并不取决于 M1 与 M2 之间的光纤长度,而是取决于作为光开关的 NOLM 或者 TOAD 自身的环长。



(a) principle

(b) diagram

图 1 FP 腔缓存器

Fig. 1 Buffer with FP cavity

可以把图 1 中间的那一段光纤去掉,而代之以一个 3×3 耦合器。这就是本课题组于 2003 年提出的具有巧妙结构的双环耦合全光缓存器(DLOB)。以 DLOB 为基础,提出了多种不同性能与结构的缓存器。本文将介绍在这方面的研究成果。在第 2 节介绍 DLOB 的基本原理。在第 3 节介绍以 DLOB 为基础的前向型全光缓存器,其动态范围从 25 ns 直到 250 μ s,是目前所知道的国际上最大的动态范围。为了适应波分复用系统的缓存需求,第 4 节专门针对多波长波分复用(WDM)数据进行缓存的问题进行了深入研究。在第 5 节提出了一种基于偏振的多级全光缓存器,并实现了多数据包的时序交换。

环的一段光纤,可将它用一个平行排列的 3×3 耦合器代替。这种简化结构可克服中段光纤的偏振不稳定问题,而缓存的信号主要在两个 NOLM 环中循环。这就是本课题组于 2003 年研究成功的基于平行排列的 3×3 耦合器的双环全光缓存器^[17~19],参见图 2。

2 基本缓存单元 DLOB

如前所述,对于图 1 所示的系统,该缓存器的延迟时间是由在 NOLM 环内的延迟时间与连接两个 NOLM 环的一段光纤决定,而 NOLM 环起到关键作用。既然如此,就没有必要保留连接两个 NOLM

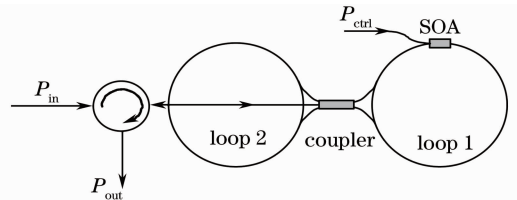


图 2 双环耦合全光缓存器

Fig. 2 All-optical buffer with dual-loop coupling

DLOB 不仅存储的是光信号,而且读写操作也是在另一光信号的控制下完成的。它由一个 3×3 光纤耦合器和连接在两侧端口的两个光纤反馈环构成,并以中间端口作为缓存器的输入与输出端口。在缓存器的右环 loop 1 中有一个半导体光放大器

SOA,并通过波分复用器 WDM 引入和导出控制光信号。工作原理为:当输入数据(信号光脉冲)从 3×3 耦合器中间端口的左侧输入时,平行排列的 3×3 耦合器将在右环 loop 1 中把它分成顺时针和逆时针的两束光,其中一束光经过 SOA 时在写控制脉冲光 P_{wr} 的作用下产生 π 相移,而另一束则没有。当这两束光返回到 3×3 耦合器时,由于存在了 π 相位差,干涉的结果将进入左环 loop 2。在 loop 2 中没有控制光作用,二者重新返回到右环 loop 1,并始终保持着 π 相位差,于是数据光信号始终存在于两个环之中。这就是存储效应。当需要读出的时候,只需向 SOA 注入读控制脉冲光 P_{read} ,使其中一束光再产生 π 的相位差,使二者的相位一致。于是信号光脉冲就从耦合器的中间端口的左侧输出。

由此可知,SOA 的交叉相位调制是缓存器读写过程的关键,但 SOA 的相移 $\Delta\varphi$ 与增益 G 直接相关,可表述为^[20]

$$\Delta\varphi = \frac{\alpha_\varphi}{2} \ln G, \quad (1)$$

式中 α_φ 是一个表征交叉相位调制性能的量,称为线宽增强因子。SOA 的增益是非线性的,存在增益饱和现象,增益 G 可以表示为^[20]

$$G = G_0 \exp\left[\left(1 - G\right) \frac{P_{in}}{P_s}\right], \quad (2)$$

式中 G_0 为小信号增益, P_s 为饱和功率。可见,向 SOA 中注入不同的光功率,可以得到不同的增益,从而产生不同的相位差 $\Delta\varphi$ 。这样,如果使得注入 SOA 的控制光在顺时针(CW)光与逆时针(CCW)光的功率不同,可以得到

$$G_{cw} = G_0 \exp\left[\left(1 - G_{cw}\right) \frac{P_{cw} + P_{c1}}{P_s}\right], \quad (3)$$

$$G_{ccw} = G_0 \exp\left[\left(1 - G_{ccw}\right) \frac{P_{ccw} + P_{c2}}{P_s}\right], \quad (4)$$

式中 P_{c1}, P_{c2} 为控制光在 CW 与 CCW 方向的数据包进入 SOA 时的功率,根据(1),(3)与(4)式可知,调节控制光的功率 P_{c1}, P_{c2} 可以实现对 $\Delta\varphi$ 的控制,这种方法称为光脉冲控制法。当注入控制光的高光平控制 CW 方向、低光平控制 CCW 方向的数据包时,称为正相光控;当注入控制光的低光平控制 CW 方向、高光平控制 CCW 方向的数据包时,称为反相光控。图 3 为实验实测的正相光控与反相光控的波形图^[21]。

图 4 给出反相光控的实验结果。实验中注入 SOA(Inphenix 公司)的电流为 110 mA,信号光波长为 1556.56 nm,输入的信号光功率为 550 μ W,控制

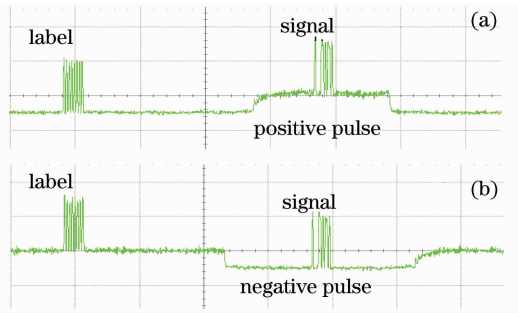


图 3 光控波形图。(a)正相光控;(b)反相光控

Fig. 3 Waveforms for optical pulse control. (a) Positive pulse control; (b) negative pulse control

光波长为 1553.8 nm,环长约 63 m。输入的光信号由光标记 (2 byte, 5555H) 和光信息 (2 byte, 435AH) 组成。信号格式由脉冲图样发生器 (PPG) 产生,经过外调制器马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 对 1556.56 nm 的信号进行调制,一个外部控制单元负责产生与 CW 方向的光信息 (435AH) 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 注入到 SOA 中,WDM2 作为滤波器去除环中控制光。光标记不在缓存器中存储,只作为光信号缓存时间的参考。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(写脉冲)功率大,使得进入缓存器的光功率很小,经过 5 圈后,输出的信号光几乎可与写入时的“漏光”功率相比拟。“漏光”是不可避免的,它产生的原因是 3×3 光耦合器中间端口输出的光功率的极小值不为零。而使用反相光脉冲控制法时,写脉冲功率小,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达到 200 μ W,30 圈后,信号开始劣化。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 μ W~2 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

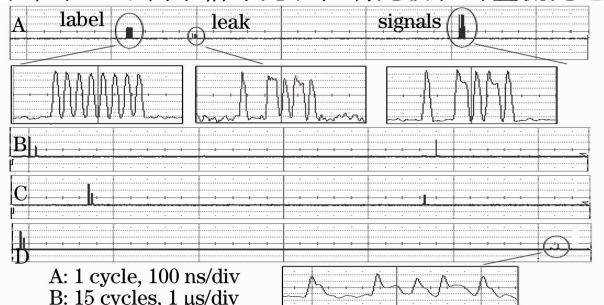


图 4 反相光控实验结果

Fig. 4 Experimental result of negative light pulse control

可以达到抑制噪声的作用^[22]。

为了增加缓存圈数,可利用 SOA 的放大作用对环内损耗进行补偿。当要 SOA 产生相位差时,环内 CW 与 CCW 的数据包不能在 SOA 中相遇,反过来,当把 SOA 当成放大器时,必须使两个方向的数据包在 SOA 中相遇,以便获得相同的增益,不会产生新的相位差。实际实验中,选择每 10 圈放大一次,放大后可以获得较好的信号质量。这个过程示于图 5。

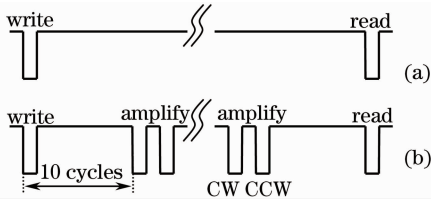


图 5 DLOB 的控制过程。(a)没有插入放大过程；
(b)插入放大过程

Fig. 5 Control process for DLOB. (a) Without amplification; (b) with amplification being inserted

实验的比特率为 2.488 Gb/s,包长为 200 bit,间隔 100 μ s 重复一次,光功率为 0.8 mW。控制光的高光平均 6.10 mW,低光平均 2 mW。图 6~8 分别为每隔 10 圈插入放大后记录的时域波形、波形图的细节与眼图。可以看出,缓存 50 圈后的消光比下降到约 6 dB,噪声幅值约 40 μ W,信噪比约 10 dB,误码率仍然低于 10^{-9} ;缓存 60 圈后的消光比下降到约 5 dB,噪声幅值约 60 μ W,信噪比约 6 dB,眼图的开度减小,开始出现误码。

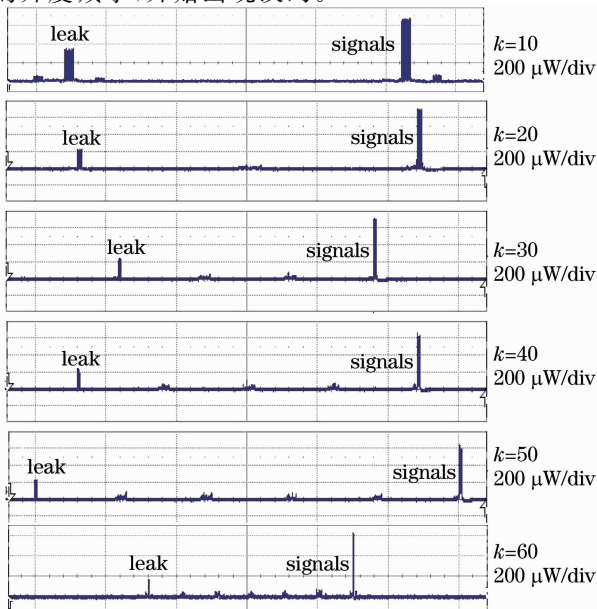


图 6 时域波形图

Fig. 6 Waveforms in time domain

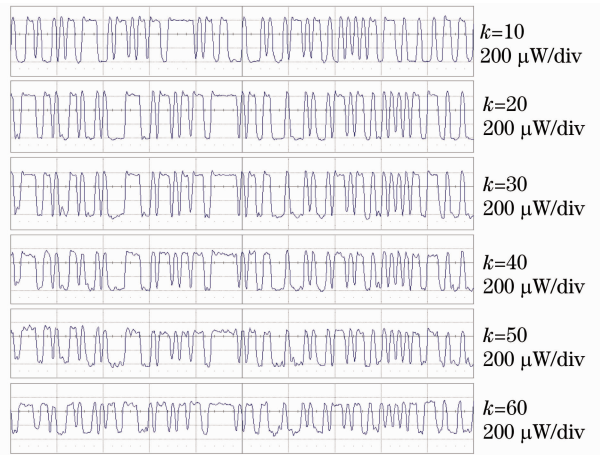


图 7 输出信号的细节图

Fig. 7 Detailed waveforms for output signals

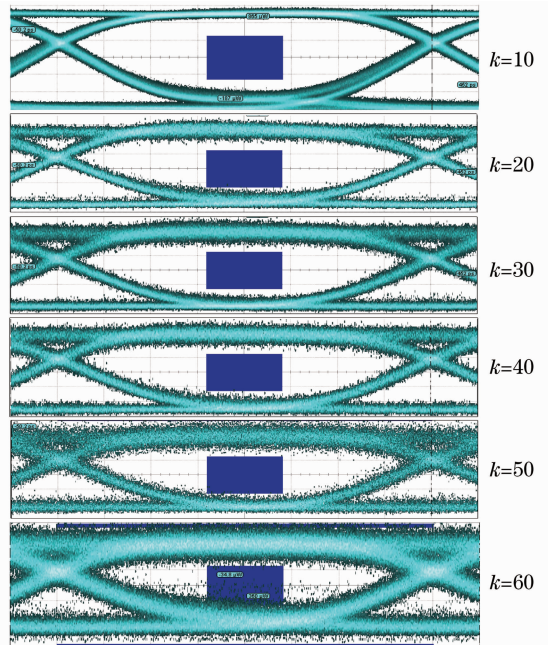


图 8 输出信号的眼图

Fig. 8 Eye diagrams of output signals

3 级联型大动态范围 DLOB 全光缓存器

为了提高缓存器的动态范围,仅仅单级 DLOB 是不够的。随着缓存时间的增加,圈数要成比例增加,这往往是非常困难的。一个解决的办法是将多个 DLOB 级联起来,用长光纤来满足长延时的要求,用短光纤来满足延时精确调整的要求。这样可以解决大的动态范围与精确控制延迟时间之间的矛盾。图 9 是一种多级级联的 DLOB 系统的结构^[23,24]。

在级联 DLOB 系统中,假定每个单级 DLOB 缓

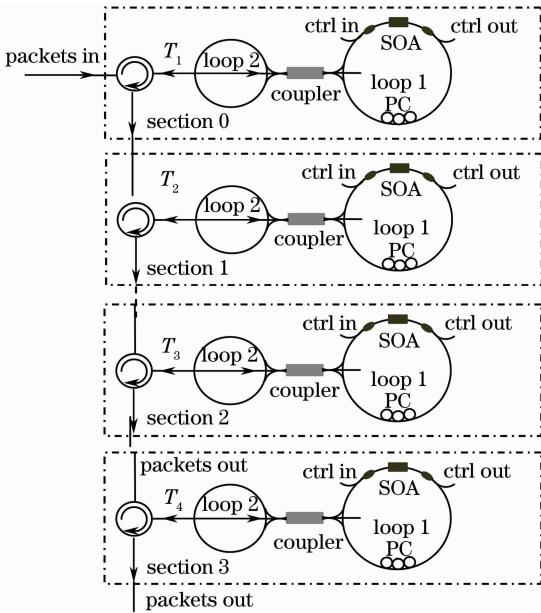


图 9 级联 DLOB 的基本结构

Fig. 9 Basic configuration for cascaded BLOB

存单元的单位缓存时间分别为 T_1, \dots, T_k , 数据包在各个缓存单元绕行的圈数分别为 n_1, \dots, n_k , 则总的缓存时间为

$$t_{\text{delay}} = T_1 n_1 + \dots + T_k n_k. \quad (5)$$

如果各个单元的延迟时间分别为 $T, 10T, \dots, 10^{k-1}T$, 数据包在各个环的缓存圈数被控制在 $0 \sim 9$ 之间变化, 就可以得到一个十进制的光缓存器。最小的环长决定缓存器调节延时的精细度(时间粒度), 受到还要在环中插入偏振控制器的限制, 最小的环长一般

在 5 m 左右。对于 4 级级联 DLOB 的系统, 动态可调的延迟范围达到 $1 \sim 9999 T$, 而延迟粒度小到 $5 \sim 25 \text{ ns}$, 可以同时实现小缓存粒度和大延迟范围, 同时具有相对小的物理尺寸, 具备实用化的基本条件。

实验系统如图 10 所示, 照片见图 11。缓存器由 DLOB0~DLOB3 等 4 个单元级联而成, 对应的光纤延迟线长度分别为约 5, 48, 530 和 4800 m, 可变延迟范围为 $25 \text{ ns} \sim 0.2455 \text{ ms}$, 延迟粒度为 25 ns 。控制光的波长为 1553.8 nm , 信号光的波长为 1556.56 nm 。信号光由连续激光器产生, 接到外调制器 MZI 的光输入端, 信号帧的格式由 PPG 产生, 并经过外调制器调制到光信号上, 比特率为 2.488 Gb/s 。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 公司)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。

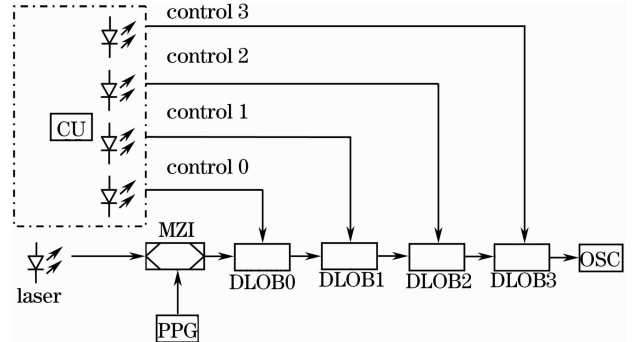


图 10 实验系统

Fig. 10 Experimental system

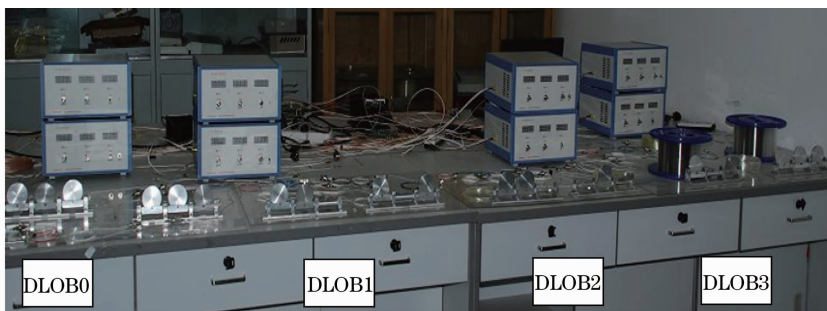


图 11 实验系统中的缓存部分

Fig. 11 Buffer units in the experimental system

由于第一级缓存单元的环长仅 5 m, 缓存的包长被限制在几个字节, 无法观测输出信号的眼图。同样, 实验时达到缓存器的数据包由标记和净负荷两部分组成, 标记为 5555H, 净负荷为 E113H, 间隔 0.5 ms 重新发送一次, 标记不在缓存器中存储, 只作为缓存圈数的参考。图 12(a)~(c) 分别为 OSC 记录的数据包经过第 1 级缓存单元缓存 9 圈, 第 1,

2 级缓存单元各缓存 9 圈, 第 1, 2, 3 级缓存单元各缓存 9 圈的时域图形, 图 13 则记录了 4 级缓存单元各缓存 9 圈后缓存器输出的时域波形、波形细节、“漏光”、标记等相关信息。由图 12 可以看出, 净负荷经过第一级缓存 9 圈后, 功率可以达到 $700 \mu\text{W}$, 码“1”的前沿变陡, 写入时的“漏光”不到 $200 \mu\text{W}$, 标记经过右环后直接输出并被压缩到约 $450 \mu\text{W}$ 。经

过1,2两级各缓存9圈后,净负荷的功率有所减少,约 $640 \mu\text{W}$,码“1”顶部继续变陡,出现了两个“漏光”,第二级的“漏光”约 $200 \mu\text{W}$,标记功率被压缩到约 $360 \mu\text{W}$ 。经过1,2,3级各缓存9圈后,净负荷下降到不足 $600 \mu\text{W}$,噪声增加且输出波形的底部有明显的起伏,“1”码继续变尖锐,由于第3级的环长达到 530 m ,受光纤色散的影响,缓存9圈后信号的底部明显展宽,出现了第三个“漏光”,功率约 $200 \mu\text{W}$,标记被压缩到约 $300 \mu\text{W}$ 。由图13可以看出,净负荷的功率可以达到 $550 \mu\text{W}$,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净负荷功率的 $1/3$,但不会影响接收机对该数据包的判决,通过改善 3×3 耦合器的对称性或准确调节控制光的功率,漏光的功率可以进一步被压缩。从4级各9圈缓存后输出波形的细节图可以看出,信号的波形可以被清楚地区分,信噪比约 11 dB ,净负荷功率高出“漏光”幅值的2倍,接收机能够区分出来。实验结果已经验证了经过4级DLOB的缓存可以实现 $1 \sim 9999$ 个基本延迟

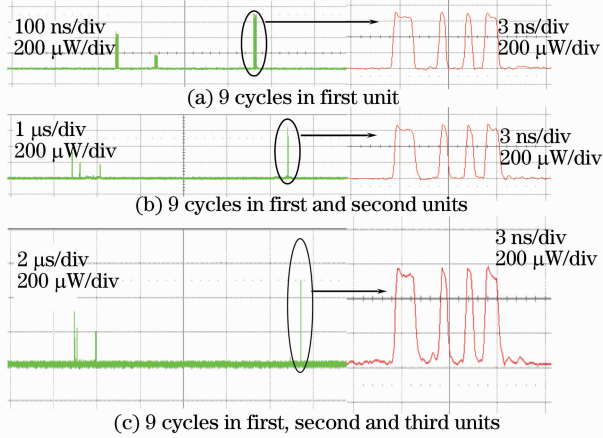


图12 实验得到的时域波形

Fig. 12 Waveforms of time domain in experimental system

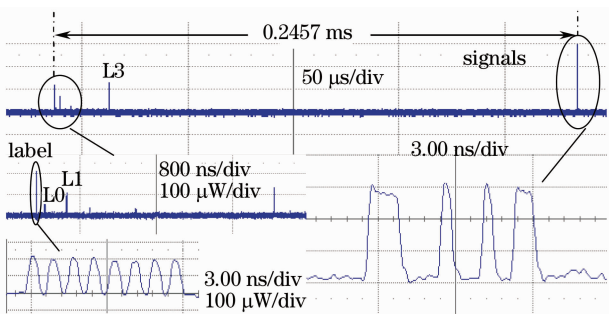


图13 四级缓存后的实验结果

Fig. 13 Experimental results after buffered by 4-cascade DLOB

单元的大动态范围的可调延迟,是目前国内外光缓存器实验系统达到的最大可调的延迟动态范围。图14与图15为仅后三级缓存单元缓存后的实验结果与细节,这时数据包的长度可以长一些,而且可以进行误码率(BER)测试。测试的结果见图16。

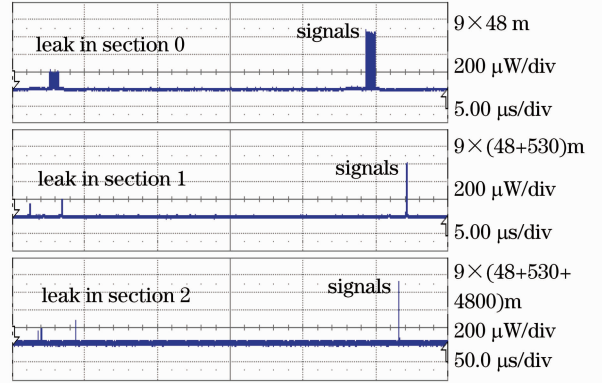


图14 缓存器输出的时域波形

Fig. 14 Waveforms from cascaded DLOB in time domain

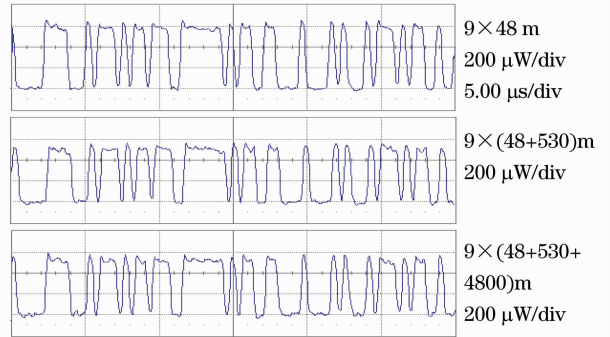


图15 输出信号的波形细节

Fig. 15 Detailed waveforms for output signals

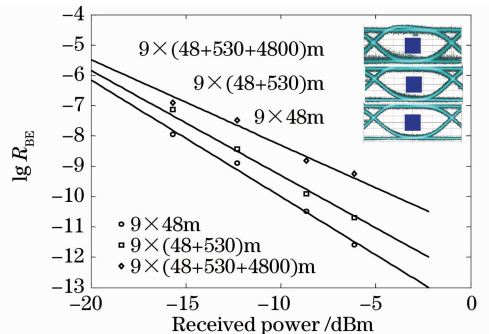


图16 输出信号的误码率

Fig. 16 BER performance of the cascaded DLOB

4 DWDM 多波长缓存器

以往无论是延迟线型缓存器还是慢光型缓存器主要都是针对单波长信号的,但是随着密集波分复用(DWDM)技术的成熟,高速多波长信号的缓存也是必须研究的课题之一。本文提出在现有的 DLOB

基础上实现多波长缓存^[25]。当多波长使用时,在 SOA 中将发生交叉增益调制、交叉相位调制以及交叉偏振调制等一系列非线性现象。因此,抑制这些非线性现象的发生是多波长并行缓存的关键。

SOA 中所有的非线性都来源于增益饱和现象,所以保持注入 SOA 的光功率恒定是问题的关键。遗憾的是,当多波长应用时,光功率的波动要比单波长时大得多。比如,8 波长应用时,如果 8 个波长都出现“1”,合成的功率就是 8,而当只有一个波长为“1”,而其他波长为“0”时,总功率为“1”。所以功率的波动

有 9 dB。为此,本文先将 8 波长信号通过一个 SOA,利用 SOA 小信号增益大、大信号增益小的特点,可将功率波动降低到 3 dB。然后再合理地选择工作点,可以实现 3 dB 波动下的缓存。最后,在解复用端,再次利用 SOA 恢复原有的信号。具体实验的 8 波长缓存系统见图 17。8 个波长分别为 $\lambda_1 = 1551.72 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1552.52 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 1553.33 \text{ nm}$, $\lambda_4 = 1554.13 \text{ nm}$, $\lambda_5 = 1555.75 \text{ nm}$, $\lambda_6 = 1556.56 \text{ nm}$, $\lambda_7 = 1557.36 \text{ nm}$, $\lambda_8 = 1558.17 \text{ nm}$ 。控制光波长为 $\lambda_c = 1554.94 \text{ nm}$ 。单波长速率分别为 2.5 和 10 Gb/s。

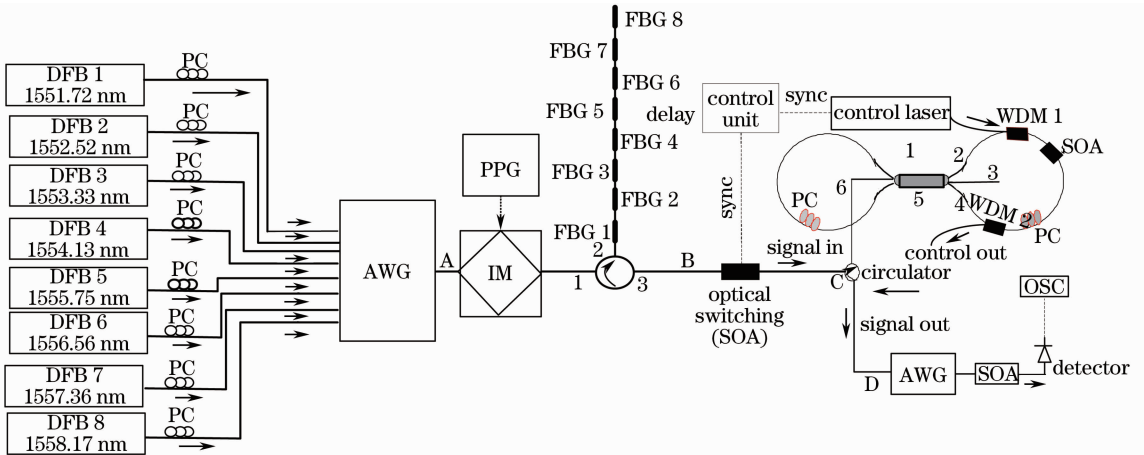


图 17 8 波长并行缓存实验系统图

Fig. 17 Experimental system for eight-wavelength parallel buffer

实验系统的原理为:8 个独立的 DFB 激光器产生 8 个波长的连续光,经过 2 只阵列波导光栅 (AWG) 会聚到一根光纤之中。然后由 2.5 或者 10 Gb/s 的脉冲图样发生器 PPG 产生一帧数据,经过铌酸锂外调制器对合成的 8 波长光进行调制。为了模拟 8 个数据包不同时到达的情况,将这相同编码的 8 个波长的数据包,通过一个环形器进入由 8 个光纤光栅串联而成的光栅组。这 8 个光栅的反射波长分别对准输入的 8 个波长,而它们的延迟时间却是随机布置的,所以当这 8 个波长的数据包返回

环形器时,它们在时间上随机的错开,于是就模拟了随机到达的 8 个数据包。图 18 是合成以后的数据包,可以看出,合成数据包的功率波动很大,达到 9 dB。这对于缓存是极不利的。为此,需要先对这个数据流进行功率均衡^[26]。具体方法是利用 SOA 的增益饱和特性,当 SOA 工作在饱和区时,输出功率的波动将远小于输入功率的波动。图 19 是通过 SOA 后合成的 8 波长数据流。为了使 SOA 充分饱和,必须加大输入功率,为此,在 SOA 前增加了一个 EDFA(图 19 未画出)。SOA 在这里既作为进入

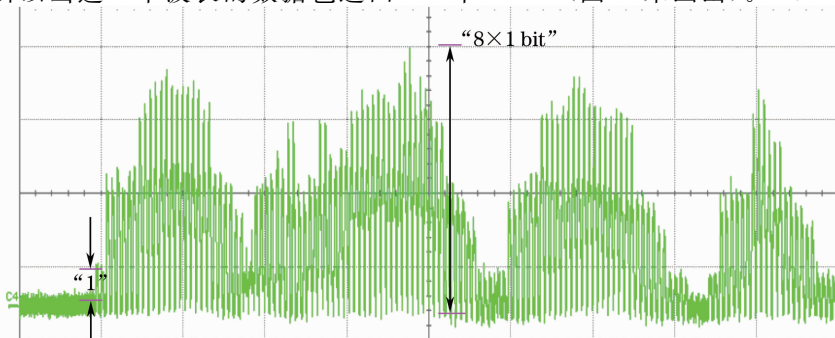


图 18 合成的 8 波长数据包

Fig. 18 Data packet combined with eight wavelengths

缓存的光开关,又作为功率均衡器件。图 19 是经过功率波动明显减小。
均衡后的 8 波长合成的数据流,由图可见,数据的功

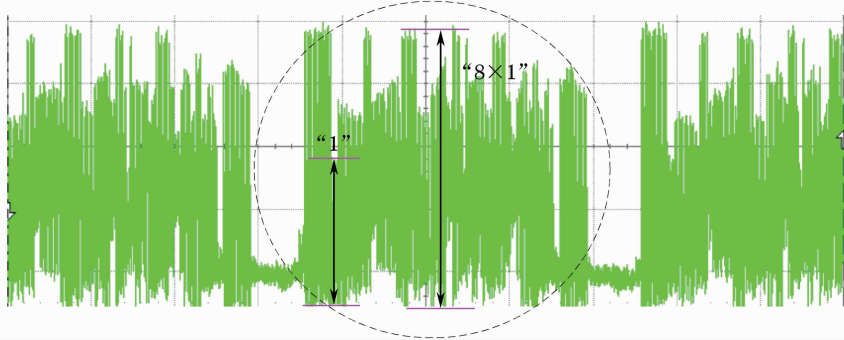


图 19 经过 SOA 进行功率均衡后的 8 波长数据流

Fig. 19 Data flow with eight wavelengths after power equalization

经过功率均衡后的数据流,进入 DLOB 缓存器进行缓存。从图 19 可以看出,尽管功率波动已经明显减小,但是仍然存在一定的功率波动。这是由于 SOA 的饱和曲线有一定斜率造成的,不可能做到绝对均衡。为此,仔细地调节 DLOB 中 SOA 的工作点是十分重要的。本文提出了一个在功率容忍度下最佳工作点的概念^[27,28],定义为:如果允许功率的波动为 ΔP (dB),由此引起的相位波动为 $\delta = |\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2|$,其中 $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 分别为有控制信号和无控制信号对应的相移,最佳工作点就定义为 δ 小于给定值的工作点(这里是 0.1 rad)。图 20 是理论计算并经由实验证实的工作点的情况。在本实验中约为 1.36 mW。

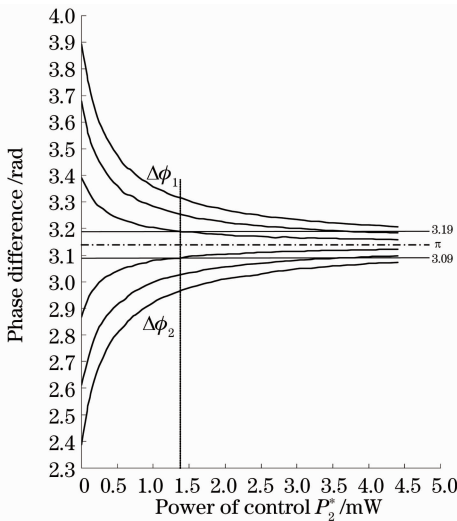


图 20 最佳工作点的确定

Fig. 20 Determination of optimum control power

经过缓存读出的多波长数据流,在解复用的时候,如果简单的直接解复用,其单波长信号的波动将会很大,所以需要解均衡,其原理与前述相同。

图 21 是缓存 1,2,3,5 圈后的波形图,图 22 是经过解均衡后的一路波长数据的细节。

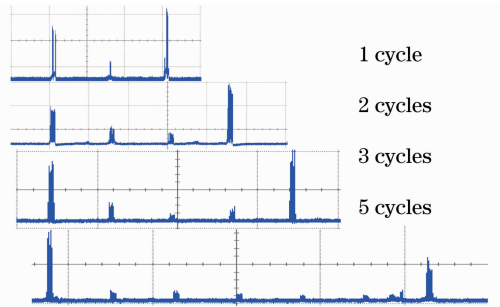


图 21 缓存 1,2,3,5 圈后的波形图

Fig. 21 Waveforms after buffering 1, 2, 3, 5 cycles

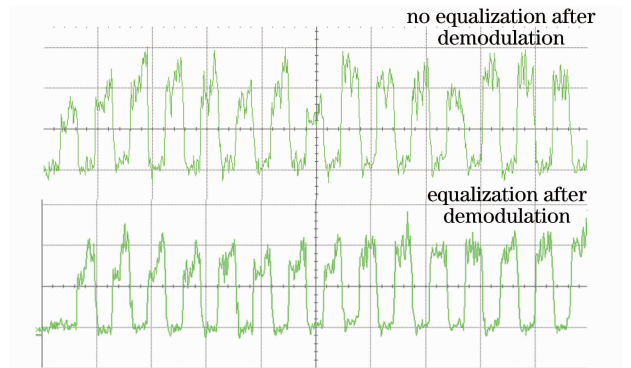


图 22 一路数据的细节

Fig. 22 Details of data for a single wavelength

图 23 是缓存 1,2,3,5 圈后的眼图,图 24 是实验系统的照片。

5 偏振型缓存器

尽管 DLOB 有效地解决了图 1 所示光缓存器中无用的中段光纤问题,结构相对比较紧凑,但是,为了保证顺时针光和逆时针光不在 loop 1 环的 SOA 中相遇(参见图 2),必须使 SOA 放置在偏离

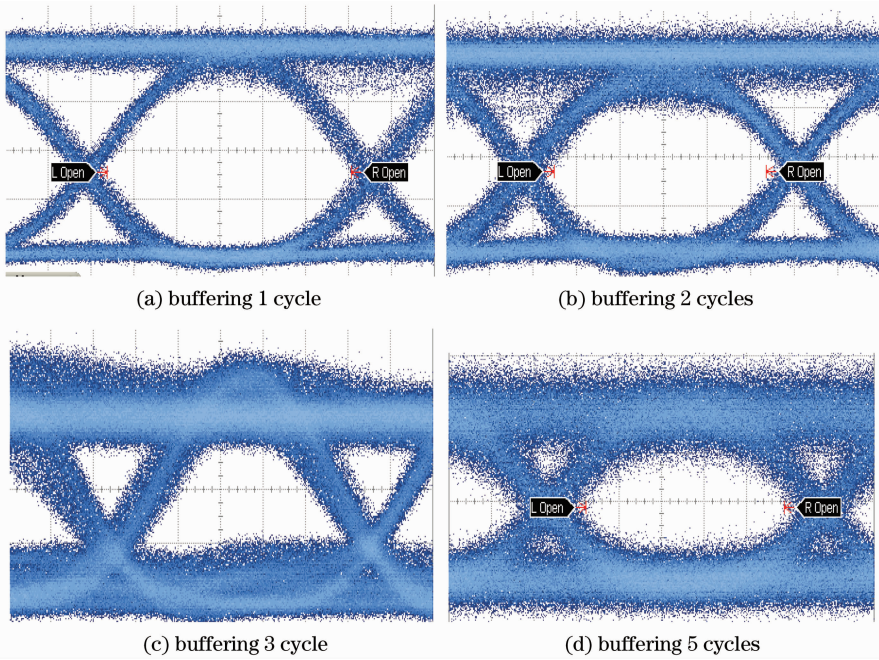


图 23 缓存 1,2,3,5 圈后的眼图

Fig. 23 Eye diagram after buffering 1,2,3,5 cycles



图 24 实验系统的照片

Fig. 24 Photo of experimental system

环长中心的位置,一般都放置在环长的 1/3 处。这使得光纤的利用率只有环长的 1/3,导致光纤利用率的降低。此外,当多个 DLOB 级联在一起并进行多个数据包缓存的时候,各个数据包之间必须留有很大的空隙(相当于单个数据包长的 2 倍)。这说明,利用多级 DLOB 来缓存多个连续的数据包是很困难的。为此,需要寻找新的缓存器结构,以便多数数据包缓存的时候,减小包与包之间的保护带。本文提出一种基于偏振控制原理的缓存器^[29],可以较好地解决这个问题,其原理参见图 25。当一个 X 偏振的数据包进入缓存器的偏振合束器时,进入 SOA 偏振控制器,如果该数据包不要求缓存,则它的偏振态(SOP)不改变,并透过偏振分束器输出。如果该数据包需要缓存,则通过 SOA 偏振控制器时,在控制信号的控制下偏转为 Y 方向,经过偏振分束器进入缓存数据的光纤,再重新返回偏振合束器,这时

SOA 不改变其偏振态,于是数据就在光纤环路中缓存。当需要读出的时候,再一次将偏振态恢复到 X 态,就可以从偏振分束器输出了。

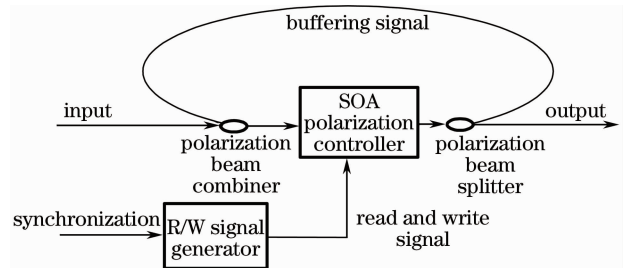


图 25 基于偏振控制的缓存器原理

Fig. 25 Principle of buffer based on the polarization control

但这种偏振型缓存器也存在一定的问题。首先,由于 SOA 偏振旋转和偏振相关增益是共存的,当调节偏振态时,增益变化也很大。其次,在缓存器的输入与输出端的两个偏振分束器,其偏振轴必须与 SOA 的偏振轴完全一致。而偏振分析仪只能检测末端的偏振态,不能测量中途的偏振态,这给偏振轴的对准带来了很大困难。第三,偏振旋转必须确保从一个线偏振态旋转到另一个正交的线偏振态,而不是变成椭圆偏振态。为克服这些困难,实际的实验系统见图 26。

在图 26 中,偏振控制器 PC2 与 PC3 共同确保偏振旋转处于庞加莱球的赤道上,其原理是基于本文提出的主态概念^[30,31]。参见图 27,当输入任意一

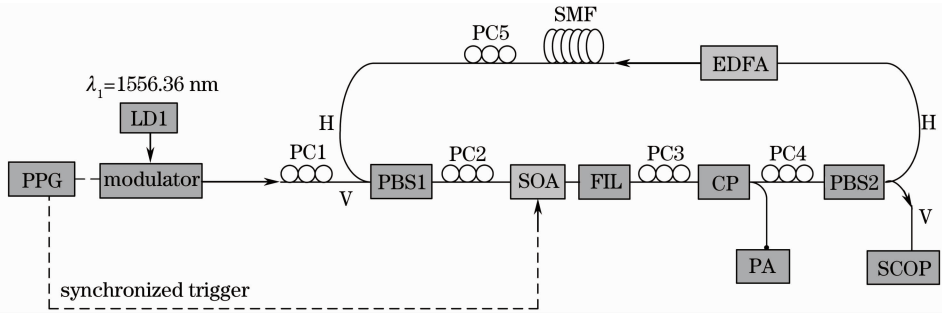


图 26 偏振缓存单元结构

Fig. 26 Structure of an element of polarization buffer

个偏振态时,调节 SOA 的控制电流,则输出偏振态在庞加莱球上画出一个圆[图 27(a)],然后通过调节 PC2 改变输入偏振态,使它落入圆内,再调节电流,将画出一个圆。依次反复进行,最后缩成一个

点,这就是偏振主态。然后调节 PC3,使主态移动到庞加莱球的北极[图 27(b)]。然后再调节 PC2,使偏振态移动到庞加莱球的赤道上。这时,再调节 SOA 的电流,就可以确保偏振态在赤道上旋转[图 27(c)]。

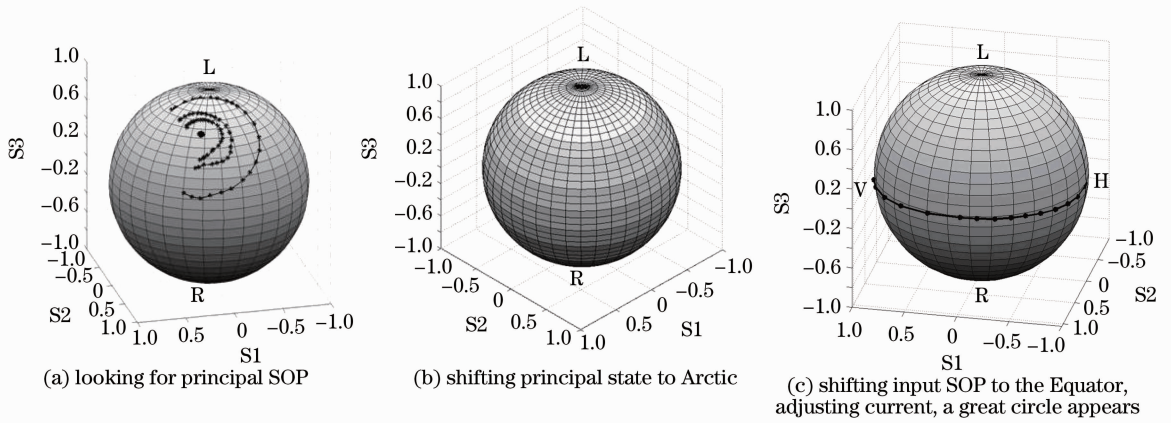


图 27 寻找主态的方法和保证偏振态在赤道上旋转

Fig. 27 Method of looking for principal SOP and guarantee the SOP rotating in the Equator

图 26 中,耦合器 CP 与 PC4 的引入,是为了利用偏振分析仪监视输出偏振态,在真正缓存的时候可以撤掉。掺铒光纤放大器(EDFA)是为了补偿光纤环路的功率损失。采取这些措施后,成功地实现了基于偏振控制原理的缓存器。图 28 是缓存的实验结果,图 29 是缓存后数据包的细节。

从图 29 可以看出,当缓存到 10 圈时,信号的质量尚可。图 30 是缓存器的照片。为了解决 SOA 中 3 种交叉增益调制与非线性偏振旋转共生带来的副作用,本文提出利用一种所谓增益透明(Gain transparency)的 SOA(GT-SOA)。其基本原理是,当 1310 nm 的 SOA 工作在 1550 nm 波长时,由于不处于 SOA 的跃迁能级上,因此处于透明状态,这时的非线性偏转不再受增益的影响,因此可以有效地克服增益变化所带来的副作用。然而,由于处在非放大波段,损耗相对比较大,在 17~20 dB,因此在其后要加一个放大器,结构见图 31。

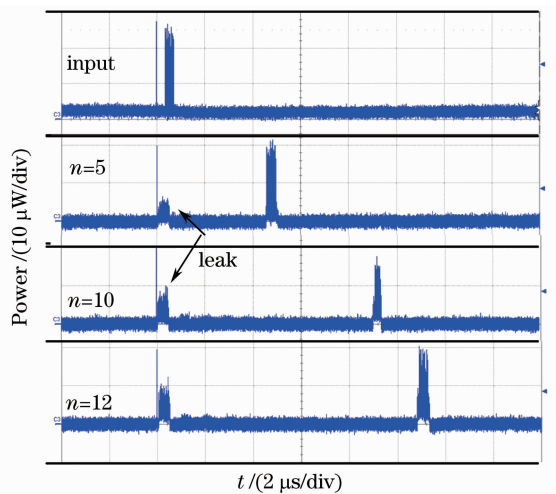


图 28 缓存的实验结果

Fig. 28 Experimental results of buffering

6 结 论

对于光纤延迟线型的全光缓存器进行了大量而

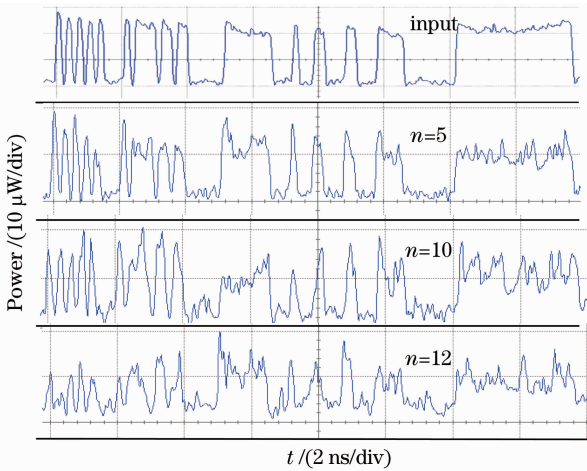


图 29 缓存后数据包的细节

Fig. 29 Details of data packet after buffering



图 30 两级级联的偏振型全光缓存器

Fig. 30 Two-stage all-optical buffer of polarization controlling

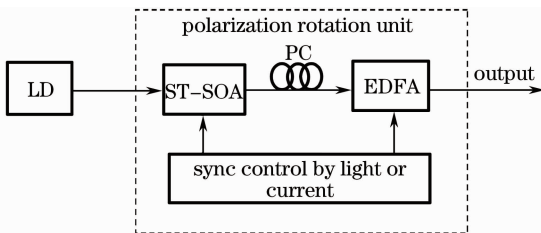


图 31 GT-SOA 加放大器的方案

Fig. 31 Scheme of GT-SOA cascaded EDFA

比较全面的研究,介绍了大动态范围、多波长、小保护带等多种结构的全光缓存器。虽然还可以构思出许多光纤型缓存器的变形结构,比如所谓堆栈式结构等,但是基本原理都是一样的,都是利用光在介质中的传输延时 $\tau=L/v$ 来实现缓存,继续从事这些变形研究本身意义并不大。

光纤延迟线型的全光缓存器的优点在于,它是串行存储,也就是说,可以不经串并变换直接将一个数据包存到一段光纤中去,当然也就不需要并串变换。因此,它具有结构简单、缓存效率高的优点。比如对于 40 Gb/s 的 1 m 长的光纤,可以存储 200 bit,按照空间尺度计算,每比特约 $60 \mu\text{m}^3$ 。尽管这个尺

度还是很大,与电子存储器相比还差几个数量级,但与其他光存储介质相比较,其存储密度已经很大了。光纤本身可以卷成很小的圈,直径 1 cm 的光纤圈已经能够实现。而且光纤的价格很低廉,与通信系统兼容性好。所以,目前还不能完全否定光纤作为存储介质的基本想法。

当前,延迟线型光纤缓存器难以走向实用的关键,还是复杂的开关与控制机制。廉价、小型集成化的光开关是它实用化的关键。比如,要构建一个 2×2 的具有 Pass 态和 Cross 态的光开关,就需要 4 个 1×1 的通断型光开关(比如 SOA),加之对于开关速率要求很高,所以成本太高。因此研制低价的集成化的高速光开关仍然是问题的关键。

其次,普通光纤本身是一种相位不稳定与偏振不稳定的传输介质,对于高速率的缓存器,还有色散等问题。为了解决偏振不稳定问题,可以采用保偏光纤。然而保偏光纤的色散问题还没有深入研究过。

第三,关于读写控制机制,如前所述,光控优于电控,但是光控需要增加一个控制光源或者波长变换器,甚至还需要加上光放大器,这些都是高成本器件。在一个完整的光纤缓存器中,光纤只占成本的 1% 都不到,其他都是辅助器件,但占成本的 99%。从降低成本的角度看,目前还是电控更实际一些。

这些基本问题已经引起了研究者的重视,已经从盲目追求指标向如何实用化方面考虑。目前光器件的成本已经下降了很多,在 20 世纪 80 年代,LED 的价格基本是 100 元/微瓦;而今天的分布式反馈(DFB)激光器的功率价格是 0.5 元/微瓦。随着大功率光纤激光器的出现,功率价格将进一步降低。SOA 的价格也在下降。采用光源共享式方案,组成缓存器阵列,可以降低成本。

光信息的存储与记忆一直是光信息技术的薄弱环节,与光信息检测、光信息传输和光信息显示等技术相比,远远不能与之匹配,光缓存器技术肯定要发展。这里,需要以战略的眼光,并从存储介质、光开关、读写机制等三个方面,做一些长远的考虑,开展一些基础研究,方可解决这个技术难题。

致谢 向参与本项目工作的傅松年、刘爱明、李亚捷、田昌勇、程木、王拥军、张立军、彭鹏、赵爽等同学,盛新志、王智等老师以及提供 SOA 的美国 Inphenix 公司等表示感谢。

参 考 文 献

- 1 C. Jáuregui Misas, P. Petropoulos, D. J. Richardson. Slowing of pulses to $c/10$ with subwatt power levels and low latency using Brillouin amplification in a bismuth-oxide optical fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 216~221
- 2 Y. Okawachi, J. E. Sharping, A. L. Gaeta *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[C]. 2005 Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO), 2005, **1-3**: 511~513
- 3 Zhaoming Zhu, Andrew M. C. Dawes, Daniel J. Gauthier. 15-GHz-bandwidth SBS slow light in optical fibers[C]. OFC, 2006. PDP1
- 4 L. L. Yi, L. Zhan, W. S. Hu *et al.*. Delay of broadband signals using slow light in stimulated Brillouin scattering with phase-modulated pump [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(5-8): 619~621
- 5 Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharping *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(15): 153902
- 6 Z. M. Zhu, A. M. C. Dawes, D. J. Gauthier *et al.*. Broadband SBS slow light in an optical fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 201~206
- 7 Z. M. Zhu, D. J. Gauthier. Nearly transparent SBS slow light in an optical fiber[J]. *Opt. Express.*, 2006, **14**(16): 7238~7245
- 8 D. J. Gauthier, Z. M. Zhu, R. W. Boyd. Stored light in an optical fiber via stimulated Brillouin scattering[J]. *Science*, 2007, **318**(5857): 1748~1750
- 9 I. Chlamtac, A. Fumagalli. Quadro-stars: high-performance optical WDM star networks[C]. GLOBECOM'91, 1991, **2**: 1224~1229
- 10 Y. K. Yeo, J. J. Yu, G. K. Chang. A dynamically reconfigurable folded-path time delay buffer for optical packet switching[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11): 2559~2561
- 11 Yang Aiyang, Sun Yuman. Dynamic Reconfigurable Multi-granularity Optical Buffer for All-Optical Switching Network[P]. China Patent, CN1633108, 2005.06.29
杨爱英, 孙雨南. 全光交换网动态可重构多粒度光缓存器[P]. 中国专利, CN1633108, 2005.06.29
- 12 Z. R. Wang, N. Chi, S. Y. 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
- 13 X. W. Li, L. M. Peng, J. P. Chen *et al.*. A novel fast programmable optical buffer with variable delays[C]. Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008, JThA41
- 14 M. S. Rasras, C. K. Madsen, M. A. Cappuzzo *et al.*. Integrated resonance-enhanced variable optical delay lines [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 834~836
- 15 J. Yang, N. K. Fontaine, Z. Pan *et al.*. Continuously tunable, wavelength-selective buffering in optical packet switching networks [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(9-12): 1030~1032
- 16 A. Agarwal, L. J. Wang, Y. K. Su *et al.*. All-optical loadable and erasable storage buffer based on parametric nonlinearity in fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(7): 2229~2238
- 17 Wu Chongqing, Fu Songnian, Dong Hui. Double Loop Coupling all Optical Buffer[P]. China Patent, ZL02153429.2, 2002
吴重庆, 付松年, 董 晖. 双环耦合全光缓存器[P]. 中国专利, ZL02153429.2, 2002
- 18 A. Liu, C. Wu, Y. Gong *et al.*. Subsystems-dual-loop optical buffer (DLOB) based on a 3×3 collinear fiber coupler[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(9): 2129~2131
- 19 A. M. Liu, C. Q. Wu, M. S. Lim *et al.*. Optical buffer configuration based on a 3×3 collinear fibre coupler [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(16): 1017~1019
- 20 Wu Chongqing. Introduction to Optical Communication [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008
吴重庆. 光通信导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008
- 21 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
- 22 Li Yajie, Wu Chongqing, Wang Yongjun *et al.*. The noise analysis of interferometer device based on SOA [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(3): 348~351
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噪声特性的分析[J]. 光学技术, 2007, **33**(3): 348~351
- 23 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
- 24 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[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 597~601
- 25 C. Tian, C. Wu, G. Sun *et al.*. 8×10 Gb/s data packets buffered in dual loop optical buffer (DLOB) [C]. *SPIE*, 2008, **7136**: 71360R
- 26 C. Tian, C. Wu, G. Sun *et al.*. Quality improvement of the dual-wavelength signals in DLOB via power equalization [J]. *Optoelectronics Letters*, 2008, **4**(5): 361~364
- 27 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
- 28 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**(5-8): 578~580
- 29 Cheng Mu, Wu Chongqing, Zhao Rui *et al.*. All-optical buffer based on polarization rotation in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1898~1902
程 木, 吴重庆, 赵 瑞等. 基于半导体光放大器偏振旋转的全光缓存器[J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 1898~1902
- 30 Sun Shiju, Wu Chongqing. All-optical switching based the nonlinear polarization rotation in SOA [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, **7**(6): 18~20
孙世菊, 吴重庆. 基于 SOA 偏振旋转光开关的性能研究[J]. 光学与光电技术, 2009, **7**(6): 18~20
- 31 Mu Cheng, Chongqing Wu, Hua Liu. Cascaded optical buffer based on nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifier[J]. *Chin. Phys. Lett.*, **25**(11): 4026~4029