文章编号: 0253-2239(2010)09-2524-05

基于光纤中四波混频效应光逻辑门的信号 同步提取与擦除

罗 旋1 江 阳1 于晋龙2 胡 林1 吴 波2 文江洪1 李玉金1

摘要 设计并演示了一种新型的光信号全光提取与擦除方案。将两个时域上同步,强度反相的矩形光脉冲作为控制信号,通过光纤中四波混频效应所形成的逻辑门(与门和非门),可以对一段时隙上的光数据进行同步的提取和擦除。对 10~Gb/s 非归零信号的仿真和实验验证了方案的可行性。方案可在更高速率的系统下工作,并对波长和码型透明。

关键词 光纤通信;四波混频;光逻辑门;光分/插复用

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103009.2524

Simultaneous Optical Signal Dropping and Cleaning by Utilizing Four-Wave Mixing Effects Based Optical Logic Gate in Optical Fiber

Luo Xuan¹ Jiang Yang¹ Yu Jinlong² Hu Lin¹ Wu Bo² Wen Jianghong¹ Li Yujin¹

Laboratory for Photoelectric Technology and Application , School of Sciences , Guizhou University , Guiyang , Guizhou 550025 , China

² Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A simultaneous optical signal dropping and cleaning scheme is presented by utilizing four-wave mixing effects based optical logic gate (AND and NOT) in optical fiber. Two synchronized square pulse control signals with inverted intensity, coupled with data stream, produce four-wave mixing effects to implement dropping and cleaning functions. Simulation and experimental results are successfully demonstrated with nonreturn to zero (NRZ) data at 10 Gb/s. The proposal may work at higher bit rate with transparence for operation wavelength and data format.

Key words optical fiber communication; four-wave mixing; optical logic gate, optical add-drop multiplexing

1 引 言

近年来,随着人们对信息需求的日益增长和各种新业务的不断涌现,特别是 IP 业务的迅猛崛起,导致全球信息量呈级数形式增长,通信业务已开始由传统的电话数据业务转向高速 IP 数据和多媒体为代表的宽带业务,对现有的通信网路提出了越来越高的要求,提升现有网络容量已刻不容缓。

为了升级网络容量,有两个关键问题需要解决,一是网络中的信号传输速率;二是网络节点处的数据交换和分配速率。目前,报道的单纤传输速率已可达到 Tb/s 数量级^[1],因此,传输部分已不是制约网络发展的主要因素。但是,在网络节点处的数据处理还存在较大的问题。传统的网络交换还采用电交换方式,需要经历光-电-光的转换。尽管电交换

收稿日期: 2009-12-01; 收到修改稿日期: 2010-01-07

基金项目:贵州省优秀科技教育人才省长基金[(2009)98]、贵州省国际科技合作项目[(2009)700102]和贵州大学引进人才项目[(2008)010]资助课题。

作者简介: 罗 旋(1984—),男,硕士研究生,主要从事高速光纤通信系统方面的研究。E-mail: luoxuan0204@163.com

导师简介: 江 阳(1975—),男,博士,副教授,主要从事高速光纤通信系统和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com(通信联系人)

器件已有很大的发展,但是由于电子器件自身的原因,在节点上数据的分配和交换处理速度将无法满足未来通信的要求,产生了通信网中的"电子瓶颈"现象。

为解决这种矛盾,采用全光信号处理技术是未来通信网络发展的一个方向。在光时分复用(OTDM)网络中,节点处对数据进行动态地提取和擦除是一种重要功能,可以实现全光分/插复用(OADM)、标签交换(Label switching)等操作。已有很多研究者对这一问题进行了大量研究,例如可以采用超快非线性干涉仪(UNI)^[2]、萨尼亚克干涉仪(Sagnac interferometer)结构^[3]、半导体光放大器的马赫-曾德尔干涉仪结构(MZI-SOA)^[4,5]等对光信号进行处理,完成信号的提取和擦除。这一类方案大都利用了半导体光放大器(SOA)中的非线性效应,具有低功率消耗和可集成等优点,但是往往局限于处理归零(RZ)码信号,系统结构比较复杂,噪声较大。除了基于 SOA 的方案,利用光纤中的非

线性效应,也能构成一类全光纤结构的全光逻辑或全光信号处理系统^[6~9]。一般来讲,虽然使用光纤中的非线性效应往往需要较大的光功率,长光纤也带来了系统体积大的不利因素,但是光纤中的非线性效应具有更高的响应速度,可以处理更高速率的信号,处理带宽也更大,并且还具备结构简单和低噪声的优势,因此也是一种理想的选择。

本文设计并演示了一种利用光纤中的四波混频 (FWM)效应实现全光信号的同步提取和擦除方案。该系统利用光纤中的 FWM 实现开关操作,可实现 OADM、或应用在标签交换中头文件的动态提取和擦除。对 10 Gb/s 非归零(NRZ)信号的模拟仿真和实验均表明了方案的可行性,并且该方案可以直接在更高速率下工作,对数据调制格式没有限制。

2 工作原理及仿真

在单抽运(简并)的参变过程中,当抽运光和信号光在光纤中传输时,耦合方程[10~13]为

$$\frac{\mathrm{d}A_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}z} = \mathrm{i}\gamma \left\{ \left[|A_{\mathrm{p}}|^2 + 2\left(|A_{\mathrm{s}}|^2 + |A_{\mathrm{i}}|^2 \right) \right] A_{\mathrm{p}} + 2A_{\mathrm{s}}A_{\mathrm{i}}A_{\mathrm{p}}^* \exp\left(\mathrm{i}\Delta\beta z\right) \right\},\tag{1}$$

$$\frac{dA_{s}}{dz} = i\gamma \{ [|A_{s}|^{2} + 2(|A_{p}|^{2} + |A_{i}|^{2})]A_{s} + A_{i}^{*}A_{p}^{2} \exp(-i\Delta\beta z) \},$$
(2)

$$\frac{\mathrm{d}A_{i}}{\mathrm{d}z} = i\gamma \{ [|A_{i}|^{2} + 2(|A_{p}|^{2} + |A_{s}|^{2})]A_{i} + A_{s}^{*} A_{p}^{2} \exp(-i\Delta\beta z) \},$$
(3)

式中 $A_{\rm p}$, $A_{\rm i}$, $A_{\rm s}$, 分别为抽运, 闲频和信号光光场, $\Delta\beta = -2\pi c S(\lambda_{\rm p} - \lambda_{\rm o})(\lambda_{\rm p} - \lambda_{\rm s})^2/\lambda_{\rm o}^2$, $\lambda_{\rm o}$, $\lambda_{\rm p}$, $\lambda_{\rm s}$ 分别为光纤的零色散波长, 抽运光波长和信号光波长, S 为光纤的色散斜率。

假定抽运功率远大于信号功率,并考虑抽运功率没有损耗时,信号场 $A_s(z)$ 和闲频场 $A_i(z)$ 的线性耦合方程为

$$\begin{split} \frac{\mathrm{d}A_{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}z} &= 2\mathrm{i}\gamma P_{\mathrm{p}}A_{\mathrm{s}} + \mathrm{i}\gamma P_{\mathrm{p}}\mathrm{exp}(\mathrm{i}\,\kappa z)A_{\mathrm{i}}^{*} \\ \frac{\mathrm{d}A_{\mathrm{i}}}{\mathrm{d}z} &= 2\mathrm{i}\gamma P_{\mathrm{p}}A_{\mathrm{i}} + \mathrm{i}\gamma P_{\mathrm{p}}\mathrm{exp}(\mathrm{i}\,\kappa z)A_{\mathrm{s}}^{*} \;, \end{split} \tag{4}$$

式中 P_p 表示抽运功率, γ 为非线性系数。 κ 定义为 $\kappa = 2\gamma P_p - \Delta\beta, \tag{5}$

对(4)求解可得

$$A_{i}(L) =$$

$$\left[\frac{\mathrm{i}\gamma P_{\mathrm{p}}}{g}\mathrm{sinh}(gL)\right]\sqrt{P_{\mathrm{s,in}}}(\mathrm{i}\gamma P_{\mathrm{p}}L)\left(-\mathrm{i}\frac{\Delta\beta L}{2}\right),\qquad(6)$$

$$A_{\mathrm{s}}(L) = \left[\cosh(gL) + \left(\frac{2\mathrm{i}\gamma P_{\mathrm{p}} - \mathrm{i}\,\frac{\kappa}{2}}{g}\right) \sinh(gL)\right] \times$$

$$\sqrt{P_{\rm s,in}} (i\gamma P_P L) \left(-i\frac{\Delta\beta L}{2}\right),$$
 (7)

式中 g 为增益因子, $g = \sqrt{-\gamma P_p \Delta \beta - \Delta \beta^2/4}$ 。 L 为 光纤长度。

由(6)式可知,在满足相位匹配的条件下,抽运光与信号光可以发生 FWM 效应,而信号光是否存在则决定了闲频光的有无,由此可以实现对光信号的全光波长开关操作。这种基于光纤中 FWM 的全光开关具有飞秒量级的响应速度,良好的噪声性能和很大的操作带宽(已报道的单抽运参变带宽近200 nm)^[11],根据这一特点,可以设计一个高速的全光信号提取与擦除系统。

原理如图 1 所示,两个在时域上同步且在强度上反相的光信号作控制光(抽运光)与一路数据信号光共同注入高非线性光纤(HNLF),两抽运光的波长分别为 λ_1 (控制信号 1)和 λ_2 (控制信号 2),信号光波长为 λ_3 。在满足相位匹配的条件下,两抽运光分别跟信号光发生 FWM,产生闲频光。在 pump1 为"1"的时隙跟信号光产生闲频光 λ_{11} ,在 pump2 为

"1"的时隙跟信号光产生闲频光 λ_{i2} 。用滤波器分别滤出这两路闲频光 λ_{i1} 和 λ_{i2} ,在 λ_{i1} 就可以获得对应时隙上从信号中提出的数据,同时在 λ_{i2} 上得到剩余的数据。

为了从原理上验证所设计方案的可行性,利用Optisystem7.0进行了系统仿真。为方便比较,将FWM发生前、后的光谱分别记录后画在一起,如图 2(a)所示。其中系统的码率为 10~Gb/s,光纤的非线性系数 $\gamma=9.74~W^{-1}\cdot km^{-1}$,信号光的波长为1550.8~nm,功率为 10~dBm,控制光的波长分别为1554.1~nm 和 1548.5~nm,功率分别为 20~dBm 和 18dBm,图 $(b)\sim(f)$ 为输入与输出的波形图。从仿

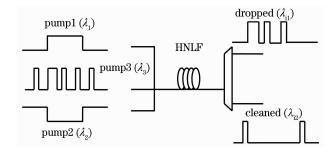


图 1 操作原理图

Fig. 1 Diagram of the operation principle 真结果可以看出,在光纤中控制信号与数据信号间产生明显的 FWM 效应,通过滤出相应的闲频光,可以很好地实现设想的结果。

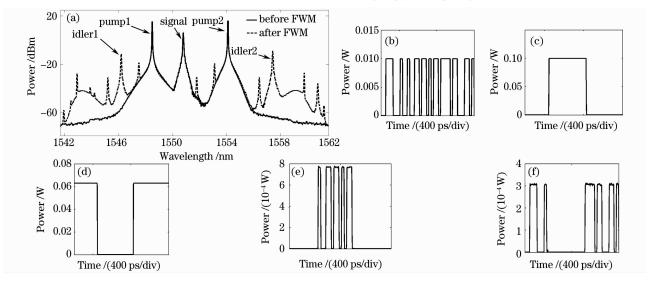


图 2 仿真结果。(a)发生四波混频前、后光谱图,(b)信号光时域图,(c)控制信号 1,(d)控制信号 2,(e)提取出信号时域图,(f)信号被擦除后的时域图

Fig. 2 Simulation results. (a) Optical spectrum before FWM and after FWM, (b) the original signal in time domain, (c) control signal 1, (d) control signal 2, (e) dropped signal in time domain, (f) cleaned signal in time domain

3 实验结果及讨论

为了进一步验证所提出的方案,采用了如图 3 所示的实验系统,其中 ELC 为外腔激光器,PC 为偏振控制器,MZM 为马赫-曾德尔调制器,CLK 为时钟信号,PPG 为编码信号发生器,EDFA 为掺铒光纤放大器,DL 为光延迟线,OTF 为光可调谐滤波器。编码信号发生器(PPG)可以产生 1/16 分频时钟和一个伪随机码信号序列。在控制光部分,外腔激光器 ECL1 和 ELC2 分别输出波长为 1554.1 nm和 1548.5 nm的直流光,通过 1/16 分频时钟驱动LiNbO。马赫-曾德尔调制器调制,得到两路相同的周期性矩形波序列。这两路控制光信号被掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,进入波分复用器(WDM)。这里 WDM 的作用有两个:1)将两路控制信号在波

长上分开的同时滤掉由于 EDFA 放大而带来的自发辐射(ASE)噪声; 2)在 WDM 的两个输出通道上通过光延时线(DL 1)和偏振控制器(PC)使得两路控制信号被第二个 WDM 耦合后在时序上形成同步且强度反相的控制脉冲并让它们的偏振态与信号光相同。在数据信号产生部分, ELC3 输出波长为1550.8 nm 的直流光,经过调制后,产生一个码率为10 Gb/s,字长为 2^7-1 的伪随机码光信号序列,通过调节 DL 2,可以使数据信号与两路控制光在时序上同步。将三路光耦合后注入一段长度为500 m的 HNLF(光纤的零色散点在1545 nm, γ = 10 W $^{-1}$ km $^{-1}$),注入的控制信号1(1548.5 nm)、信号光(1550.8 nm)和控制信号2(1554.1 nm)的光功率分别为20,10 和18 dBm。在光纤中,控制光与

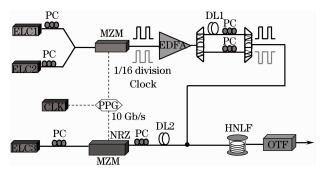


图 3 实验方案

Fig. 3 Experimental setup

数据光信号之间发生四波混频效应,并产生闲频光。 实验所测四波混频前、后的光谱图如图 4 所示。

在实验中,采用一个带宽为1nm的可调谐滤

波器分别滤出波长为 1546.3 nm 和 1557.3 nm 的 两个一阶闲频光,获得被提取和擦除后的数据信号, 相应的波形如图 5 所示。

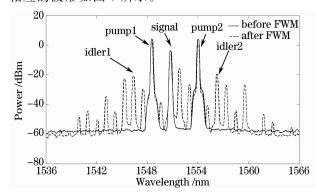


图 4 实验测得的光谱

Fig. 4 Measured optical spectrum

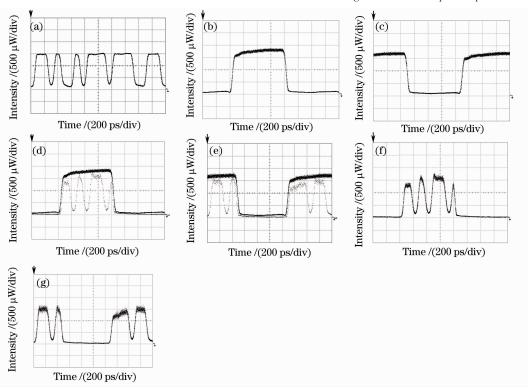


图 5 实验结果。(a)信号光序列,(b)控制信号 1,(c)控制信号 2,(d)控制信号 1 与被提取出的信号, (e)控制信号 2 与被擦除后信号,(f)提取出的光信号,(g)擦除后的光信号

Fig. 5 Experimental results. (a) train of the original signal, (b) control signal 1, (c) control signal 2, (d) control signal 1 with the dropped signal, (e) control signal 2 with the cleaned signal, (f) dropped signal, (g) cleaned signal

实验所得到的光谱与波形与前面的仿真结果符合得很好,但是实验结果中闲频光上的信号具有一定的"1"码噪声和一定的不平坦性,这些缺陷都来源于控制光信号。通过观察可以发现,控制光信号具有比较明显的"1"码噪声,而"0"码噪声较小,是由于控制光被 EDFA 放大时引入了 ASE 噪声和 ASE—信号拍噪声,在"0"码处没有 ASE—信号拍噪声;同

时,由于 PPG 所输出的分频时钟电压不平坦,使得调制所得到的控制门信号也不平坦。这种噪声和不平坦性通过 FWM 过程转移到了闲频光上,使所得的信号带有噪声和不平坦性。但是,通过仿真结果也可以看出,这些缺陷可以通过使用更高性能的器件给予消除。同时应该指出,为了获得足够的非线性效应,实验中使用了 500 m 的光纤和相对较大的

光信号功率。事实上,如果利用光子晶体光纤或特殊掺杂的高非线性光纤,可以进一步降低注入的光功率或减小光纤长度以获得更低的光功率要求和更小体积的系统。

4 结 论

设计并演示了一种全光纤结构的光信号同步提取与擦除方案。通过系统仿真和实验验证了所提方案的可行性。方案具有极高的响应速度,可以不受码率、码型限制并具有很大的操作带宽。系统结构比较简单,可以用于实现网络中的 OADM 和标签交换等功能,便于与光纤网络链接,具有很好的应用潜力。

参考文献

- 1 A. H. Gnauck, G. Charlet, P. Tran et al.. 25.6 Tb/s WDM Transmission of Polarization-Multiplexed RZ-DQPSK signals[J]. J. Lightwave Technol., 2008, 26(1): 79~84
- 2 C. Schubert, C. Schmidt, S. Ferber et al.. Error-free all-optical add-drop multiplexing at 160 Gbit/s[J]. Electron. Lett., 2003, 39: 1074~1076
- 3 S. Diez, R. Ludwig, H. G. Weber, Gain-transparent SOA-switch for high-bit rate OTDM add/drop multiplexing[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**: 60~62
- 4 Alessandro Marques de Melo, Sebastian Randel, Klaus Petermann, Mach-Zehnder interferometer-based high-speed OTDM add-drop multiplexing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(4): 1017~1026
- 5 Zhao Xiaofan, Pan Shilong, Yang Yanfu *et al.*. All-optical wavelength conversion based on semiconductor optical amplifier and delay interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 892~896

- 赵晓凡,潘时龙,杨彦甫等.基于半导体光放大器结合延迟干涉仪的全光波长转换[J].光学学报,2009,**29**(4):892~896
- 6 Jiang Yang, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. All optical multiwavelength conversion and data format conversion based on dual-pumped fiber optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6); 1051~1056
 - 江 阳,于晋龙,张爱旭等. 双抽运光纤光参变放大的全光多波长变换与码型转换[J]. 光学学报,2008, **28**(6): 1051~1056
- 7 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun et al.. Multi-channel alloptical non-return-to-zero to return-to-zero format converter based on fiber optical parametric amplifier[J]. Chinese J. Lasers, 2009, 36(11): 2962~2965
 - 韩丙辰,于晋龙,罗 俊等. 基于光纤光参量放大的多通道全光 非归零/归零码转换器 [J]. 中国激光, 2009, 36 (11): $2962\sim2965$
- 8 Jian wang, Qizhen Sun, Junqiang Sun *et al.*. Experimental demonstration on 40 Gbit/s all-optical multicasting logic XOR gate for NRZ-DPSK signals using four-wave mixing in highly nonlinear fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**: 2615~2619
- 9 D. M. F. Lai, C. H. Kwok, T. I. Yuk et al.. Picoosecond all-optical logic gates (XOR, OR, NOT, and AND) in a fiber optical parametric amplifier [C]. OFC 2008, 2008, 1~3
- 10 Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong et al.. transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 247~259
 - Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 247~259
- 11 Thomas Torounidis, Magnus Karlsson, Peter A. Andrekson, Fiber optical parametric amplifier pulse source theory and experiments [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4067~4068
- 12 Jonas Hansryd, Peter A. Andrekson, Mathias Westlund et al.. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications [J]. IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron., 2002, 8(3): 507~509
- 13 Minchen Ho, Katsumi Uesaka, Michel Marhic et al.. 200 nm bandwidth fiber optical amplifier combining parametric and raman gain[J]. J. Lightwave Technol., 2001, 19(7): 977~981