

文章编号: 0253-2239(2009)03-0611-06

利用非线性光纤环镜 160 Gb/s 到 10 Gb/s 解时分复用

杨彦甫 娄采云* 赵晓凡 高以智 章恩耀

(清华大学电子工程系清华信息科学与技术国家实验室(筹), 集成光电子学国家联合重点实验室, 北京 100084)

摘要 研究了 160 Gb/s 光时分复用(OTDM)系统的解复用技术。针对 160 Gb/s 速率的特点, 对高非线性光纤(HNLF)的光纤环镜(NOLM)特性及解复用进行了数值仿真。计算了低信号光时间抖动下解复用误码特性对时钟与信号的走离及时钟功率的依赖关系。计算了三种走离值消光比随时钟功率增加的变化趋势并给出: 存在一个能获得最大的解复用窗口消光比、并能降低相邻信道串扰的合适的时钟功率范围。利用自制的基于电吸收调制器和压缩技术的超短光脉冲源建立了 160 Gb/s OTDM 实验系统, 测量了不同信号光功率下 NOLM 的消光比, 它基本不随信号增大而变化, 在信号功率为 7.3 dBm 时仍大于 23 dB。利用上述装置实现了无误码的 160 Gb/s 到 10 Gb/s 全光解复用。

关键词 光通信; 光时分复用; 160 Gb/s 解时分复用; 非线性光纤环镜; 交叉相位调制

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/COL20092903.0611

Demultiplexing from 160 Gb/s to 10 Gb/s Using Nonlinear Optical Loop Mirror

Yang Yanfu Lou Caiyun Zhao Xiaofan Gao Yizhi Zhang Enyao

(Tsinghua National Laboratory of Information Science and Technology, State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract All-optical demultiplexing of 10-Gb/s base-rate channels out of 160 Gb/s optical time-division-multiplexed (OTDM) data streams is demonstrated. The demultiplexer in 160 Gb/s OTDM system utilizes a highly nonlinear optical loop mirror(NOLM). The relation of bit-error-rate (BER) of a demultiplexing versus walk-off and clock power at different timing jitter of data signals is calculated. The extinction ratio of demultiplexing window versus clock power at different walk-off is investigated. There is a proper clock power range, which can achieve the maximal extinction ratio of demultiplexing and lower crosstalk of adjacent channels. Based on the developed ultra-short optical pulse source, the 160 Gb/s OTDM experimental system is demonstrated. For different signal powers, the extinction ratio changes little with signal power. When the data signal power is 7.3 dBm, the extinction ratio of window is over 23 dB. The time-division demultiplexing from 160 Gb/s to 10 Gb/s is achieved with error-free with nonlinear optical loop mirror structure including highly nonlinear fiber.

Key words optical communication; optical time division multiplexing; 160 Gb/s time division demultiplexing; nonlinear optical loop mirror; cross-phase modulation

1 引 言

提高单信道传输速率的技术与波分复用(WDM)技术一直是光传输领域发展的主流趋势。一般认为,单信道比特率提升 4 倍,光发射和接收机的价格仅需翻番。基于这样的判断,在过去十几年内,人们一直致力于提高单信道比特率。新一代

40 Gb/s 传输系统已经走向商用。由于光时分复用(OTDM)可在现有电子器件速率下进一步提高单信道速率,单信道 160 Gb/s 及更高速率的 OTDM 光通信的研究^[1~4]已成为国际上的热门课题。

160 Gb/s OTDM 系统的主要技术为超短光脉冲源和时分复用、时分解复用和帧时钟提取、信号调

收稿日期: 2008-09-28; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(60577033, 60736036)和国家 863 计划(2009AA01Z256)资助课题。

作者简介: 杨彦甫(1981—),男,博士,主要从事高速光通信系统及关键技术方面的研究。E-mail: yyf02@mails.thu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: loucy@ee.tsinghua.edu.cn

制和传输,其中光脉冲源和解复用是不能被电子技术代替的^[4]。160 Gb/s 及更高速率的解复用主要是利用基于半导体光放大器(SOA)、电吸收调制器(EAM)和高非线性光纤(HNLF)的全光开关来完成^[5~8]。随着 HNLF 的性能改善,诸如非线性系数的增高以及色散斜率的减小,大大减少了所需光纤的长度,使得数据信号和光时钟间因色散导致的走离减小,稳定性大大改善。所有这些都使得采用商用 HNLF 来实现 160 Gb/s 解复用变得相对简便。研究了基于 HNLF 的非线性光纤环境(NOLM)解复用的误码特性,分析了时钟光脉冲功率、信号与时钟间的走离、信号的抖动对解复用的影响。在此基础上利用自制的超短光脉冲源搭建了 16×10 Gb/s OTDM 实验系统^[9],优化了工作条件,使 HNLF-NOLM 开关窗的消光比在信号功率为 7.3 dBm 时大于 23 dB,采用该解复用器实现了无误码的 160 Gb/s 到 10 Gb/s 的全光解复用。

2 HNLF-NOLM 光开关特性的数值仿真

解复用开关窗的宽度小,则信道串扰弱,但在解复用过程中,由于开关窗口的有限宽度信号的时间抖动会转化为解复用脉冲的幅度起伏,增加解复用功率代价。宽的解复用窗口宽度具有较大的时间容限,但串扰严重。160 Gb/s 光通信系统的信号时隙为 6.25 ps,160 Gb/s 到 10 Gb/s 的解复用路数多,为了获得无误码的效果,必须研究信号抖动及解复用光开关的各个参数间关系。为此仿真研究了基于 HNLF-NOLM 的 160 Gb/s 解复用中各个工作参量对解复用性能的影响,为 OTDM 解复用实验条件的优化提供了依据。图 1 为模拟计算所采用的包含 HNLF-NOLM 解复用装置的光接收机模型。

HNLF-NOLM 解复用装置主要包含 2×2 的 3 dB 耦合器、用作非线性介质的 HNLF,以及波分复用器(WDM)三部分。在 NOLM 输出端,带通滤波器 BPF1 只允许信号通过。光放大器(EDFA)对滤出的解复用信号进行预放,其小信号增益为 45 dB,噪声系数为 4.1 dB,模拟中考虑了 EDFA 增益以及噪声随入射光功率的变化条件。放大的解复用信号经过 520 GHz 带宽的 BPF2 滤除带外 ASE 噪声。随后的可变光衰减器(ATT)用来将信号功率调节到 -22 dBm 的固定值,然后注入接收机。接收机由响应度为 1 A/W 的 PIN 光电探测器、3 dB 带宽为 8 GHz 的四阶 Butterworth 低通滤波器(LPF)构成。

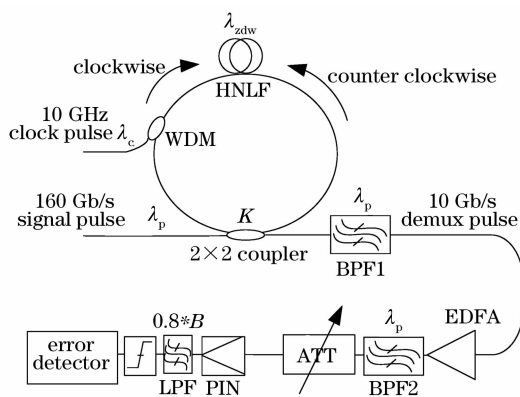


图 1 160 Gb/s HNLF-NOLM 解复用模拟计算的装置图
Fig. 1 Setup of 160 Gb/s demultiplexing simulation using highly nonlinear fiber-nonlinear optical loop mirror (HNLF-NOLM)

信号光脉冲宽度为 2 ps,数据码长为 $2^{11} - 1$,复用的 160 Gb/s 信号通过 3 dB 耦合器后分成两束,分别沿顺时针和逆时针方向沿环传输。用作控制光的光时钟脉冲重复频率为 10 GHz、脉冲宽度为 2 ps,借助 WDM 进入环内单向传输。由于交叉相位调制效应,两个传输方向上的信号脉冲经一圈传输后具有相位差,在 3 dB 耦合器输出端发生干涉,信号的透过率由下式决定^[10]:

$$T(t) = 1 - 4K(1 - K)\cos^2[\Delta\phi(t)/2], \quad (1)$$

$$\Delta\phi(t) = \phi_{\text{cw}}(t) - \phi_{\text{ccw}}(t), \quad (2)$$

其中, K 为 3 dB 耦合器的功率分束比, $\Delta\phi$ 为顺时针和逆时针方向传输的信号光经过一圈传输后的相移差。当 $\Delta\phi(t)$ 的值为 π 时,透过率等于 1.0,也即 HNLF-NOLM 光开关透过率窗口处在完全开启的状态。本征消光比是 NOLM 光开关性能的一个重要指标,定义为当未有控制光注入时,调节环内偏振控制器(PC)所得最大透过率与最小透过率的比值,这个比值也即解复用窗口的消光比。仿真中 K 取实际值 0.47,对应的本征消光比为 24.4 dB。时钟脉冲经 WDM 进入 NOLM 后,在 HNLF 介质上通过交叉相位调制(XPM)效应使同向传输的顺时针信号产生非线性相移:

$$\phi_{\text{cw}}(t) = 2\gamma \int_0^L P_c(t, x) dx, \quad (3)$$

其中 γ 为 HNLF 的非线性系数, L 为 HNLF 长度, $P_c(t, x)$ 是时钟脉冲在光纤长度处的强度包络,这里采用了随信号移动的滞后时间坐标系。通过非线性薛定谔传输方程,可以数值计算得出 $P_c(t, x)$ 。显然,时钟和信号间的走离越大,所产生的非线性相移会越小。

同时,时钟脉冲也对反向传输的逆时针信号产生非线性相移,其大小由下式决定:

$$\phi_{\text{ccw}} = 2\gamma P_c^{\text{ave}} L, \quad (4)$$

可以看到,这个相移值仅与反向时钟脉冲的平均功率 P_c^{ave} 成正比。由于这一固定相移的存在,使得实际解复用窗口消光比要低于 NOLM 本征消光比。

在解复用窗口顶部为非理想平坦时,输入信号脉冲的时间抖动会转化为解复用脉冲的起伏,造成解复用性能恶化。仿真中,假定时间抖动服从正态分布,解复用后信号的相对强度噪声通过下式来表征^[11]:

$$\text{RIN}_{\text{NOLM}}(\tau) = \frac{V(\tau)}{M^2(\tau)}, \quad (5)$$

其中 $V(\tau)$ 和 $M(\tau)$ 分别为在时间抖动概率分布下,解复用后信号强度的方差和均值, τ 代表解复用窗口和信号脉冲间的相对位置。解复用窗口过窄,或者其顶部不够平坦,都会导致解复用后信号具有明显的相对强度噪声。

考虑到解复用信号中可能存在的码型效应会引起信号眼皮出现分裂,使用如下的普适误码率计算公式^[11]:

$$R_{\text{BE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \text{erfc}(Q_i), \quad (6)$$

其中 N 为码字长度,erfc 为误码函数,其定义为

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-t^2) dt, \quad (7)$$

(6)式中, Q_i 表示第 i 个码对应的 Q 值,其计算公式为

$$Q_i = \begin{cases} \frac{I_1 - I_D}{\sqrt{2}\sigma_1}, & \text{for "1" bit} \\ \frac{I_D - I_0}{\sqrt{2}\sigma_0}, & \text{for "0" bit} \end{cases} \quad (8)$$

其中 I_1 和 I_0 分别代表单个‘1’和‘0’比特在采样时刻对应的电平值, I_D 代表判决电平。判决时刻取在

眼睛张开最大处,判决电平为“1”码最低电平和“0”码最高电平的中间值。 σ_1, σ_0 对应于“1”码和“0”码的噪声均方根:

$$\sigma_j^2 = \sigma_{\text{si-sh}}^2 + \sigma_{\text{sg-sh}}^2 + \sigma_{\text{sg-sg}}^2 + \sigma_{\text{si-sg}}^2 + \sigma_{\text{th}}^2 + \sigma_{\text{RIN}_{\text{NOLM}}}^2, \quad (9)$$

(9) 式中右侧各项分别代表散弹噪声、EDFA 中放大的自发辐射(ASE)引起散弹噪声、ASE-ASE 拍频噪声、信号-ASE 拍频噪声、电路中的热噪声、解复用引起的信号相对强度噪声。其中 $\sigma_{\text{si-sg}}^2$ 和 $\sigma_{\text{RIN}_{\text{NOLM}}}^2$ 值较大。

环内 HNLF 的参数如下:长度 L 为 1 km,非线性系数为 $8.4 / (\text{W} \cdot \text{km})$,零色散波长 λ_{zdw} 为 1555 nm,色散斜率为 $0.018 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。仿真中,时钟波长 λ_p 处在正常色散区的 1545 nm 附近,色散值为 $-0.18 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。

首先仿真分析在信号光的不同时间抖动参量下,误码(BER)特性对时钟与信号的走离及时钟功率的依赖关系。图 2(a)和图 2(b)分别为信号光时间抖动为 650 fs 和 300 fs 时的解复用信号误码率的等高线图,横坐标为时钟脉冲功率,纵坐标为时钟和信号之间的走离量,图中颜色越深的地方,解复用性能越好,误码率越低。很容易发现,在图 2 每幅图中央存在一块最佳区域,这时的时钟功率和走离均取适中值,所获误码率最低。在图 2(a)中,固定走离量的情形下,可以发现,当信号光脉冲与控制光脉冲的走离量小于 6 ps 时,误码率随着时钟功率增加,存在先降低后增高的明显趋势,因此存在一个获得最低误码率的适中时钟功率。但是走离量高于 9 ps 后,在仿真的范围内,随时钟功率的增加,误码率减小的趋势趋于饱和。而在图 2(b)的高图中的最佳参量区域往小的走离延伸,这是因为保证相同的 RIN_{NOLM} 前提下,小的信号时间抖动情形允许更小的走离值及相对应较窄的解复用窗口。

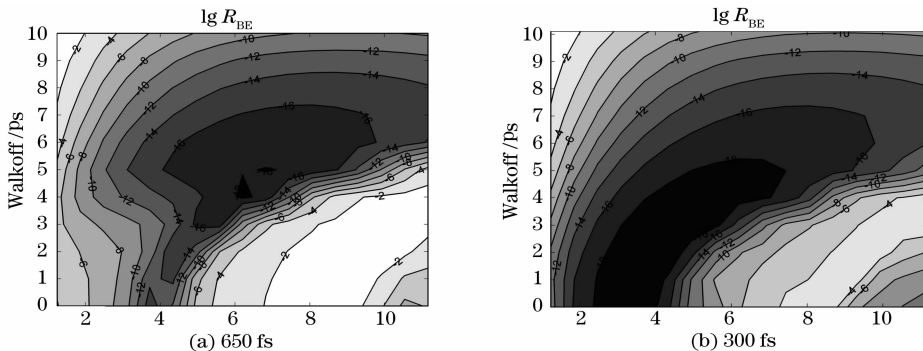


图 2 不同信号光时间抖动时,解复用误码对时钟光功率和走离的依赖关系

Fig. 2 BER performance versus clock power and walkoff under various timing jitter of signals

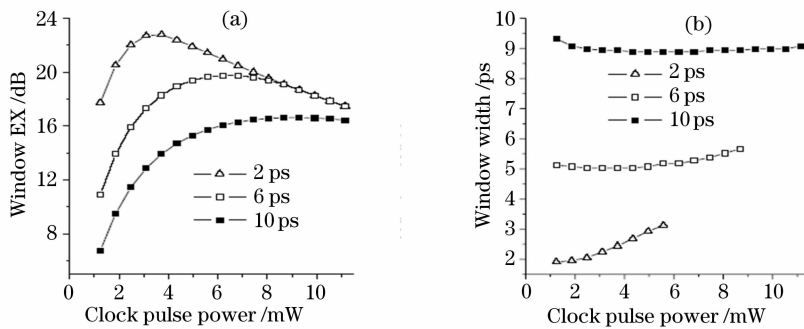


图 3 在 2 ps、6 ps、10 ps 走离参量下,解复用窗口的消光比(a)和宽度(b)随时钟功率的变化曲线

Fig. 3 Extinction ratio (a) and window width (b) versus clock power for 2 ps, 6 ps 10 ps walkoff

上述误码率随时钟功率的变化趋势,主要源自解复用窗口消光比(Window EX),图 3(a)给在三个典型走离值(2 ps、6 ps、10 ps)下,随时钟功率增加时的消光比变化趋势。当走离为 2 ps 时,随着时钟功率的增加,消光比先增高后降低。这是因为,当时钟功率较小时,通过 XPM 效应产生的非线性相移较小,不足以使得窗口完全开启,因此消光比较低;但是,当时钟脉冲在完全开启窗口后还继续增加功率,则使得反向固定非线性相移增大,进而导致解复用窗口基底水平增高,造成消光比的降低。所以,存在一个能获得最大的解复用窗口消光比,并能降低相邻信道串扰的合适的时钟功率。图 3(a)中给出 2 ps 走离下,获得最大消光比的时钟功率为 3.7 mW,当走离增大时,获得最佳光开关窗的时钟功率增加,走离为 10 ps 时,消光比随时钟功率增大而趋于饱和。从图 3(b)给出三个典型走离值下,解复用窗口宽度随时钟功率的变化可以解释随走离增加,光开关窗消光比的变化。随走离增大,窗口应该在整体上变宽。需要指出的是,在 2 ps 走离下随着时钟功率增加时出现窗口显著变宽的现象,这与(4-1)解复用窗口公式中透过率和非线性相移存在的传递函数有关;而当走离为 6 ps 和 10 ps 时,不同时钟功率下的解复用窗口宽度差别较小,是因为此时走离量为时钟宽度的好几倍,窗口宽度主要由走离值大小来决定。

图 4 给出以上三个时间抖动值下,误码率随走离增加的变化曲线。在 300 fs 时间抖动下,引起的因素几乎可以不计,所以随走离减小,串扰减弱,解复用误码率降低。而在 650 fs 时间抖动情形时,即使小的走离,引起的 RIN_{NOLM} 已比较明显,所以在性能权衡之后,在 4 ps 最佳走离下取得最小误码率。当抖动进一步增加到 1 ps 后,最佳走离需增大到 8 ps 才能获得最小误码率,其误码特性要比 650 fs

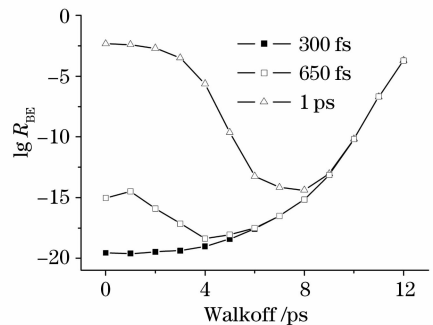


图 4 不同信号时间抖动参量下,解复用误码率随走离量的变化趋势

Fig. 4 BER versus the walkoff for different timing jitter of signals

情形相差较多。

因此,在一定的信号时间抖动下,需要优化 NOLM 解复用中的时钟功率和时钟和信号间的走离量,来权衡各种解复用因素并取得最佳的解复用性能。而且,信号的时间抖动越大,所需的优化走离将增加,并导致解复用性能恶化。

3 16×10 Gb/s OTDM 解时分复用实验

在 160 Gb/s 到 10 Gb/s 的解复用实验装置中,为了减小时钟的时间抖动,采用的脉冲光源由 EAM 直流光外调制的脉冲产生级、基于孤子效应的压缩级、基于自相位调制(SPM)谱展宽加滤波技术的整形级组成。利用两个光滤波器从 SPM 展宽的光谱中滤出波长为 1536 nm 和 1551 nm 的两列光脉冲分别用作光时钟和信号光,由电频谱测量它们的时间抖动为 210 fs^[8]。10 GHz 的信号光经铌酸锂调制器调制并经光时分复用后形成 160 Gb/s 信号光。

为了灵活地变化信号与时钟的波长,NOLM 中采用耦合器作合波器代替图 1 中的 WDM,与图 1

的差别仅是光功率增加 3 dB,实验装置如图 5。测得光开关窗的本征消光比随 160 Gb/s 数据信号光功率增加的变化趋势如图 6,可以看出随信号光功率的增加,NOLM 的本征消光比迅速下降,与前面分析的与由 3 dB 耦合器分光比 K 来决定的结论不同。这是因为前面的结论是假定信号功率较小以至由其产生的非线性相移可忽略不计的理想情况下得出的。而在实际的光通信传输系统中信号光不是小信号,并且实验中光信号与帧时钟的合波器为 3 dB 耦合器,采用 WDM 的差别是环内逆时针和顺时针信号光传输路径非对称。逆时针传输时,信号光先进入 HNLF,再经过 OC2;而顺时针信号光则先通过 OC2,能量减少一半后再进入 HNLF。因此,两个传输方向的信号光以 3 dB 的功率之差进入 HNLF 并获得不同的非线性相移,在 NOLM 输出端由于相移差导致信号光的自开关效应,随着数据信号光功率的增大这种效应变得非常明显。这就会导致 NOLM 不能处在良好的“关闭”状态,造成消光比降低。为此,在 HNLF 的对称位置放了一个

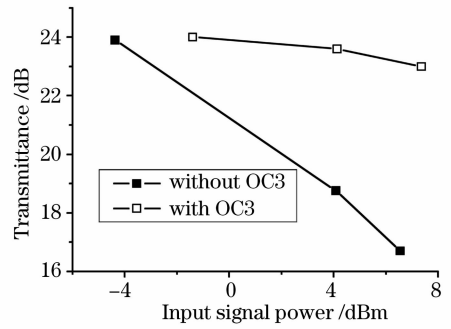


图 6 不同数据信号功率输入下的 NOLM 本征消光比的测量结果

Fig. 6 Extinction ratio measurement at different signal power

3 dB 耦合器 OC3,再次测量本征消光比在不同信号光功率下,基本不随数据信号光功率增加而降低,在 7.3 dBm 的高功率下仍为 23 dB。这将使得解复用后的各信道的信号能量较大。

图 7 所示为 160 Gb/s OTDM 解复用信号的误码曲线,以及复用和解复用信号的波形。由于光电探测器带宽有限,所以虽然图 7(b)电采样示波器显示的 160 Gb/s 眼图一片模糊,但这并不能显示真实的眼图轨迹。解复用后的眼图睁开明显,相邻信道串扰也得到相当的抑制。误码曲线显示实现了无误码解复用,但以 10^{-9} 为误码率标准时功率代价为 8 dB。存在以下原因造成功率代价较大:160 Gb/s 解复用实验中由于实验条件所限,时钟光脉冲放大后未使用宽带 BPF 滤波,使得时钟脉冲带外噪声分量未得到有效的抑制,这将导致解复用中时钟对信号光谱有交叠干扰,NOLM 解复用输出端的 BPF 带宽仅为 1.5 nm,小于数据信号的光谱宽度,滤波的数据信号展宽也会增加一定的功率代价。

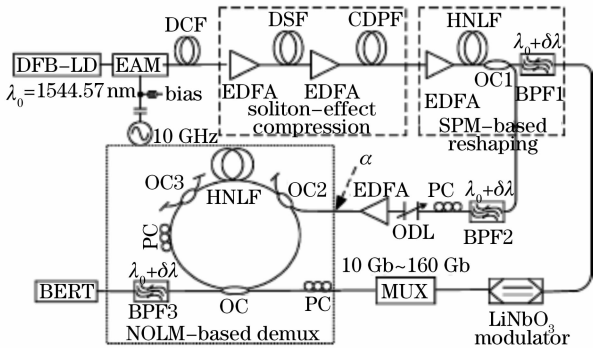
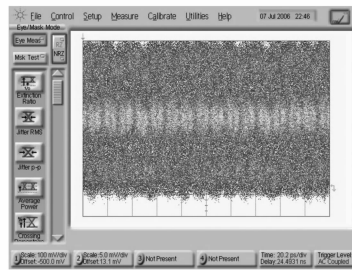
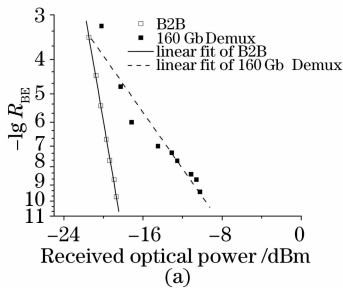
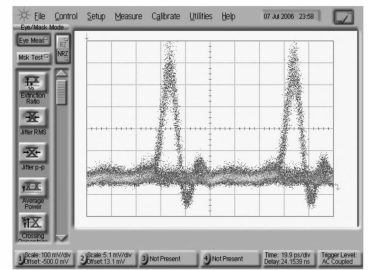


图 5 160 Gb/s OTDM 实验装置

Fig. 5 Setup of the 160 Gb/s OTDM experiment



(b)



(c)

图 7 160 Gb/s 到 10 Gb/s OTDM 解复用误码性能(a), 160 Gb/s 复用信号(b)及解复用的 10 Gb/s 信号眼图(c) (20 ps/div)

Fig. 7 BER measurement for demultiplexing to 10 Gb/s from 160 Gb/s signal(a), eye diagrams of multiplexing 160 Gb/s (b) and demultiplexing signal(c) (20 ps/div)

4 结 论

研究了基于 HNLf-NOLM 光开关窗特性, 仿真给出在一定信号时间抖动下, 需要优化时钟功率、信号与时钟间的走离来获得最佳性能; 时间抖动增大时, 最优的走离量增加, 但解复用性能恶化。搭建了 16×10 Gb/s OTDM 系统, 基于仿真结果选择器件及工作参数使得解复用光开关的消光比在信号功率为 7.3 dBm 时大于 23 dB, 实现了国内首个 160 Gb/s OTDM 解复用实验, 获得无误码解复用结果。

参 考 文 献

- 1 Esther Le Rouzic, Stéphane Gosselin. 160-Gb/s optical networking: A prospective techno-economical analysis [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(10): 3024
- 2 R. Ludwig, S. Weisser, C. Schmidt-Langhorst *et al.*. 160 Gb/s RZ-DPSK OTDM-transmission over 480 km using 160 km repeater spans and advanced forward-error-correction [C]. Proc. OFC '07, 2007, OWE4: 226~228
- 3 Mark D. Pelusi. Fiber-looped LiNbO₃ Mach-Zehnder modulator for 160 Gb/s optical time division demultiplexing and it's comparison to an electro-absorption modulator [C]. Proc. OFC '08, 2008, OMN4: 75~77
- 4 Hans-Georg Weber. Ultrahigh-speed OTDM-transmission technology [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4616~4627
- 5 E. Tangdiongga, Y. Liu, H. de Waardt *et al.*. 320-to-40-Gb/s demultiplexing using a single SOA assisted by an optical filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(8): 908~910
- 6 Weng Liangsheng, Wu Jian, Lin Jintong. Analysis of the performance of TOAD due to the frequency detuning of control and signal pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 656~661
- 7 温亮生, 伍 剑, 林金桐. 控制光和信号光频差对太赫兹光非对称解复用器性能的影响 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 656~661
- 7 Hitoshi Murai, Masatoshi Kagawa, Hiromi Tsuji *et al.*. EA-modulator-based optical time division multiplexing/demultiplexing techniques for 160-Gb/s optical signal transmission [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(1): 70~76
- 8 H. G. Weber, S. Ferber, M. Kroh *et al.*. Single channel 1.28 Tbit/s and 2.56 Tbit/s DQPSK transmission [C]. Proc. ECOC '05, 2005, Th4.1.2: 3~4
- 9 Yang Yanfu, Lou Caiyun, Gao Yizhi. Demonstration of a 16×10 -Gb/s OTDM system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 264~266
- 10 Uchiyama K, Morioka T, Kawanishi S *et al.*. Signal-to-noise ratio analysis of 100 Gb/s demultiplexing using nonlinear optical loop mirror [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(2): 194~201
- 11 Normatsu S, Maruoka M. Accurate Q-factor estimation of optically amplified systems in the presence of waveform distortions [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(1): 19~27