

# 多波长双二进制载波抑制归零码光分组产生方法研究

贺彬彬<sup>1</sup> 凌云<sup>1</sup> 廖丽丹<sup>1</sup> 申甦祺<sup>1</sup> 邱 昆<sup>1</sup> 郑 勉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 610054

<sup>2</sup>西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 637001

**摘要** 为了简化多波长光分组交换系统的发送端结构,提出了一种基于马赫-曾德尔延时干涉仪(MZDI)器件实现多波长双二进制载波抑制归零码(DCS-RZ)格式的光分组产生方法。该方法采用单个MZDI器件将波分复用(WDM)差分相移键控(DPSK)净荷信号转换成WDM DCS-RZ净荷信号,同时完成WDM非归零码(NRZ)标签与净荷信号的耦合,得到WDM DCS-RZ光分组信号。通过4×40 Gb/s DCS-RZ光分组信号产生、传输和分离仿真实验,验证了方法的可行性。仿真结果表明:240 km光纤传输后,净荷在经过法布里-珀罗(F-P)滤波器分离后接收灵敏度仅下降1.8 dB。

**关键词** 光通信;光分组交换;双二进制载波抑制;马赫-曾德尔延时干涉仪

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0406007

## Method of Multi-Wavelength Duobinary-Carrier-Suppressed-Return-to-Zero Optical Packets Generation

He Binbin<sup>1</sup> Ling Yun<sup>1</sup> Liao Lidan<sup>1</sup> Shen Suqi<sup>1</sup> Qiu Kun<sup>1</sup> Zheng Mian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Fiber Sensing and Communications of Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 637001, China

**Abstract** In order to simplify the transmitter structure of the multi-wavelength optical packets switching system, a method of multi-wavelength optical packets generation based on Mach-Zehnder delay interferometer (MZDI) is proposed. Only one MZDI is used to transform the payload format from wavelength division multiplexing (WDM) differential phase shift keying (DPSK) to WDM duobinary-carrier-suppressed-return-to-zero (DCS-RZ), meanwhile, couple the WDM non-return-to-zero (NRZ) label with the WDM payload and produce the WDM DCS-RZ optical packets at the output of MZDI. A simulation of 4×40 Gb/s DCS-RZ optical packets is generated, transmitted into fiber and then separated into the label and payload. Detection is performed to verify the feasibility of this method. The simulation results show that after 240 km fiber transmission, the power penalty of the payload after the separation using Fabry-Perot (F-P) filter is only 1.8 dB.

**Key words** optical communications; optical packets switching; duobinary carrier suppression; Mach-Zehnder delay interferometer

**OCIS codes** 060.2360; 060.2330; 230.7380

## 1 引言

随着光纤传输技术的发展,光纤传输速率不断提高,光网络中交换节点逐渐成为限制网络发展的瓶颈。光分组交换具有最小的交换粒度,是一种最理想的光交换形式。光分组由携带交换信息的标签和数据信息的净荷两部分组成。为了便于光标签信号的提取和更新,已提出了比特序列标签、光正交调制标签、副载波标签(SCM)、光码标签等光分组格式<sup>[1-3]</sup>。特别是采用非归零码(NRZ)调制标签和双二进制载波抑制归零

收稿日期: 2014-10-08; 收到修改稿日期: 2014-11-01

基金项目: 国家863计划(2012AA011304,2013AA011502)、国家自然科学基金(61101095,61271166)、西南石油大学青年基金(2012XJZ022)

作者简介: 贺彬彬(1992—),男,硕士研究生,主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: bbhe\_work@163.com

导师简介: 凌云(1979—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: yling@uestc.edu.cn

码(DCS-RZ)调制净荷的光分组格式(简称DCS-RZ光分组),它利用了调制信号频谱的互补特性,实现了标签和净荷在频域的复用,既提高了频谱利用率,又利于标签和净荷的分离<sup>[4-5]</sup>。

通常DCS-RZ调制通过差分编码和低通滤波过程实现,为了产生多波长通道的DCS-RZ光分组,需要为各波长通道配置独立的DCS-RZ调制器,导致器件数目多,系统庞大<sup>[6]</sup>。针对该问题,本文提出了一种基于马赫-曾德尔延时干涉仪(MZDI)的多波长DCS-RZ光分组产生方法,利用MZDI同时实现了多波长DCS-RZ调制格式的转换和NRZ标签的耦合,简化了光分组产生结构。

## 2 原理与结构

### 2.1 基本原理

MZDI具有光滤波器的特性,两输入端口的滤波函数互补。对于如图1所示上下臂延迟时间为 $T_b$ 的MZDI,各输入端口的对应传递函数为

$$H(f) = \begin{cases} \sin \pi(f-f_c)T_b, & \text{A port input} \\ \cos \pi(f-f_c)T_b, & \text{B port input} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f_c$ 为滤波中心频率,是 $1/T_b$ 的整数倍。C输出端对于A端口输入具有以 $f_c$ 为中心的周期高通滤波特性;而对B端口输入则具有周期低通滤波特性。

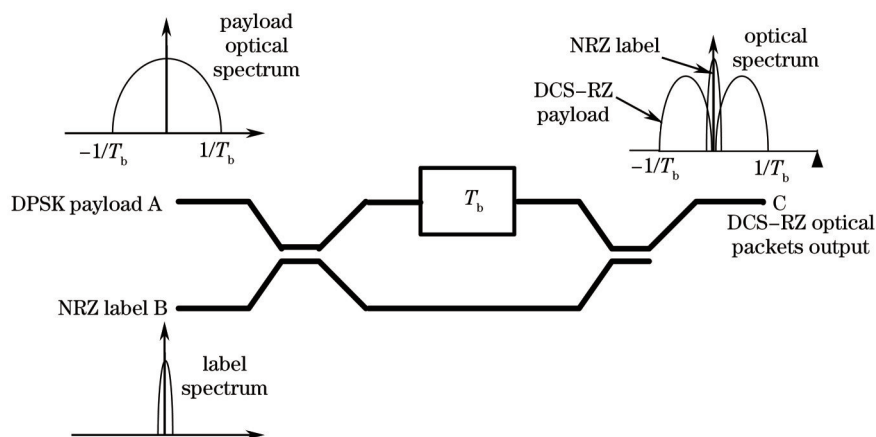


图1 基于MZDI的光分组产生原理

Fig.1 Principle of optical packet generation based on MZDI

选取光波中心频率为 $f_c$ ,当A端口输入差分移相键控(DPSK)调制信号(速率 $R_b = 1/T_b$ )时,由于MZDI的滤波特性,输出端口将得到DCS-RZ调制信号<sup>[7]</sup>。当B端口输入信号速率远低于 $1/T_b$ 的NRZ调制信号时,即信号的带宽远小于低通滤波带宽时,信号将透明地从C端口输出。鉴于以上特性,由A端口输入速率 $R_b$ 的DPSK调制的净荷信号,同时由B端口输入低速NRZ调制的标签信号,将输出得到DCS-RZ光分组,如图1所示。

### 2.2 系统结构

根据采用MZDI产生DCS-RZ分组的基本原理,利用MZDI的周期滤波特性,设计的多波长光分组产生结构如图2所示。由多波长激光器产生的以 $f_c$ 为中心、波长频率间隔为 $2/T_b$ 的多波长连续光分别经过分光比为 $\alpha:1$ 的光分支器后,输入DPSK净荷产生部分和NRZ标签产生部分。采用DPSK调制器和强度调制器分别实现各波长净荷和标签信号的调制,采用阵列波导光栅(AWG)分别完成标签和净荷多波长信号的波分复用,最后采用一个MZDI进行DCSRZ净荷的转换和标签信号的耦合。由于MZDI具有周期滤波的特性,可保证各波长通道独立地完成净荷调制格式的转换和标签的耦合。

## 3 仿真验证

### 3.1 仿真系统

利用多波长DCS-RZ光分组的周期频谱特性,在交换结点可以先用梳状光滤波器分离多波长标签与净

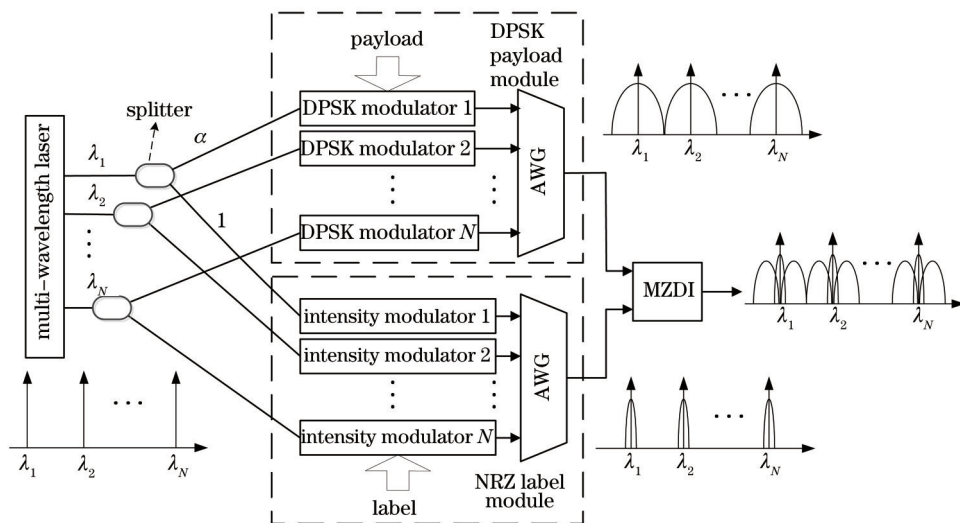


图2 多波长光分组产生结构

Fig.2 Structure of multi-wavelength optical packets generation

荷,后将分离的多波长标签与净荷分别通过 AWG 来解复用出各波长通道,并进行后续的光交换处理。图3是一个简单的交换结构原理示意图, $M$ 路光纤每路输入有 $N$ 个波长的DCS-RZ光分组信号,每路信号经过一个具有合适带宽且有2个互补的滤波输出端口的梳状滤波器后分离出标签与净荷信号,之后标签与净荷都经过一个AWG解复用为 $N$ 个波长通道。将每个波长通道的标签进行处理后输入到对应的波长平面的控制模块内,由控制模块来控制该波长平面内的光交换模块,控制模块同时控制新标签的产生。经过交换后的净荷信号耦合新标签后,重新通过AWG复用为 $M$ 路多波长DCS-RZ光分组信号输出。

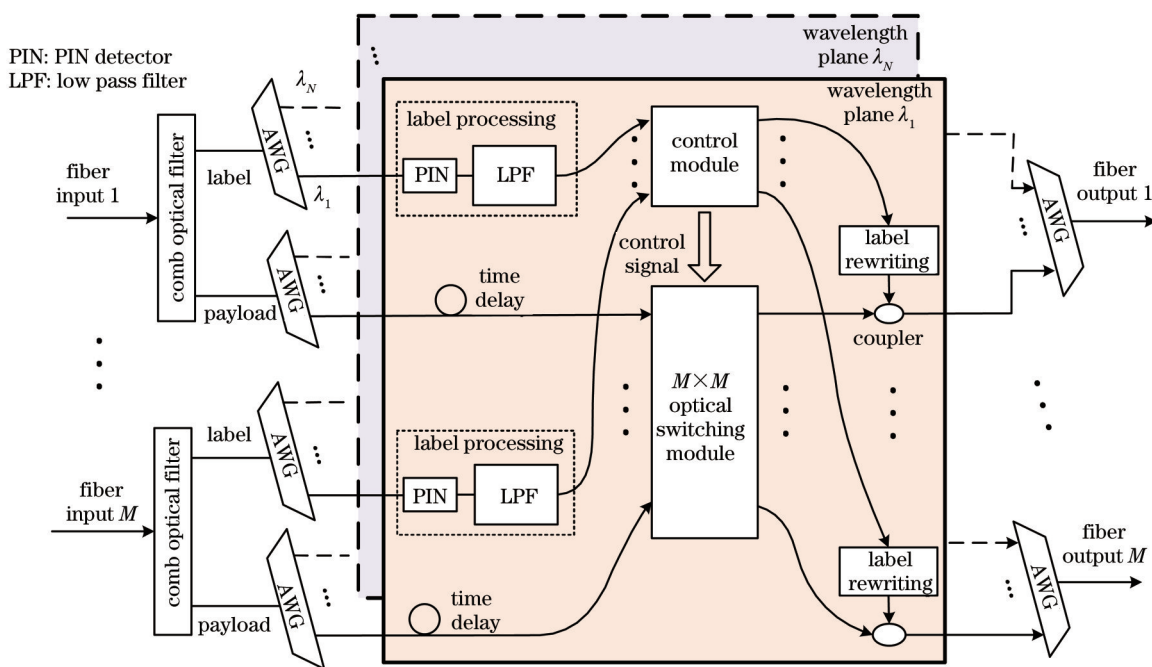


图3 DCS-RZ光分组 $M \times M$ 交换结构

Fig.3 Architecture of  $M \times M$  switching node for DCS-RZ optical packets

为了验证方案的可行性,在光通信仿真平台VPI TransmissionMaker上建立了4波长DCS-RZ光分组产生模块与传输系统,对光分组产生、传输以及光标签和净荷分离的性能进行研究。建立的仿真系统组成如图4所示,产生的4个波长的光分组(NRZ标签速率2.5 Gb/s,DCS-RZ净荷速率40 Gb/s)经由240 km标准单模光纤(SSMF)、掺铒光纤放大器(EDFA)和48 km色散补偿光纤(DCF)传输后,利用法布里-珀罗(F-P)光滤波器的

周期滤波特性<sup>[8]</sup>,分别由透射端和反射端分离出多波长通道的光标签信号和光净荷信号;采用AWG进行波分解复用,分离出各波长通道的光标签和光净荷信号;标签检测采用PIN探测器光电转换并由低通滤波器(LPF)滤除残留的高频净荷信号后接收;净荷经PIN探测后直接接收。

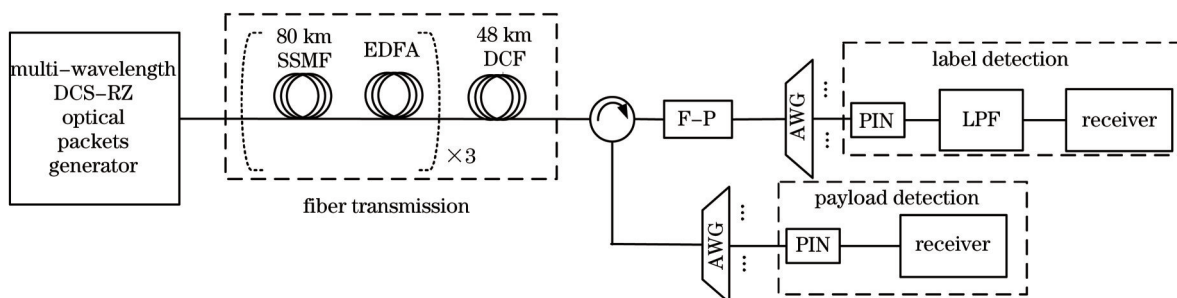


图4 仿真系统组成

Fig.4 Architecture of simulation system

仿真实验中所采用的主要参数如表1所示,表中FSR为自由光谱范围。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Laser average power /mW	5
DCS-RZ payload average power /dBm	-0.5
NRZ label average power /dBm	-6.5
Laser linewidth /kHz	100
AWG filter type、3 dB bandwidth /GHz	2 order Gauss filter、60
AWG extinction ratio /dB	40
AWG insertion loss /dB	6
F-P cavity 3 dB bandwidth /GHz	5.76
F-P cavity mirror reflectivity $r$	0.85
F-P cavity free spectral range /GHz	80
Type of LPF	4 order Bessel electric filter
LPF 3 dB bandwidth /GHz	2.5
Wavelength of 4 channels /nm	1551.08, 1551.72, 1552.36, 1553.00
SSMF attenuation loss /(dB/km)	0.25
SSMF dispersion /[ps/(nm·km)]	16
DCF attenuation loss /(dB/km)	0.5
DCF dispersion /[ps/(nm·km)]	-80
Circulator insertion loss /dB	6
Circulator port crosstalk /dB	40
EDFA gain /dB	20

### 3.2 结果与分析

系统产生的4×40 Gb/s波分复用(WDM)DCS-RZ光分组的光谱如图5(a)所示,标签与净荷频谱分布清晰,DCS-RZ净荷频谱具有载波抑制特性。采用F-P滤波器直接对产生的光分组进行标签和净荷分离,得到的第一和第二波长(1551.08 nm和1551.72 nm)通道的信号眼图如图5(b)和(c)所示,净荷和标签信号分别具有归零码和非归零码调制特征。

为了减小标签与净荷之间的串扰,对分组产生过程中标签和净荷的光功率分配进行了分析。定义分光比 $\alpha$ 为净荷与标签平均发射光功率的比值。如图6(a)所示,在接收端固定标签与净荷的接收光功率分别-23 dBm、-14 dBm情况下,随着 $\alpha$ 的增加,标签信号的误码率(BER,  $R_{BE}$ )线性增加;净荷的BER先快速下降,后变得平缓。

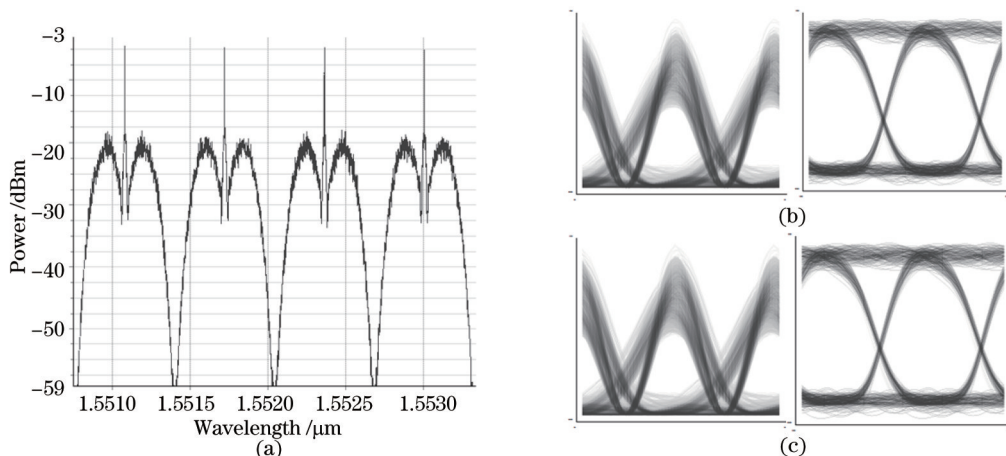


图 5 (a) 4 波长光分组信号光谱; (b) 第一波长通道的净荷(左)和标签(右)眼图; (c) 第二波长通道的净荷(左)和标签(右)眼图  
 Fig. 5 (a) Optical spectrum of 4 wavelengths optical packets; (b) eye diagrams of the payload (left) and label (right) in the first wavelength channel; (c) eye diagrams of the payload (left) and label (right) in the second wavelength channel

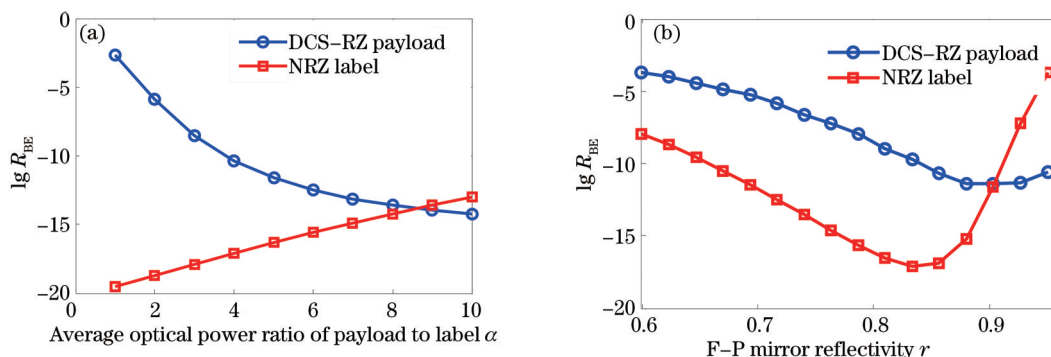


图 6 固定标签和净荷接收光功率分别为 -23 dBm 和 -14 dBm 时, 信号 BER 随(a)  $\alpha$  与(b) F-P 反射率  $r$  的关系  
 Fig.6 Relationship of signal BER with (a)  $\alpha$  and (b) F-P reflectivity  $r$  when the received optical powers of the label and payload are -23 dBm and -14 dBm

为了优化 F-P 滤波器分离标签与净荷的性能, 对 F-P 滤波器的镜面反射率  $r$  进行了分析。  $r$  决定了 F-P 滤波函数透射/反射率和带宽。 如图 6(b) 所示标签与净荷信号的 BER 具有相同的变化趋势, 且标签信号的 BER 在  $r=0.83$  取得最小值。 在后续传输测试中, 将选取  $\alpha=4$ ,  $r=0.85$  作为系统优化参数。

在传输测试中, 如图 4 所示, 采用 SSMF 传输, 传输线路分为三段, 每段由长度为 80 km 的 SSMF 和平均增益为 20 dB 的 EDFA 组成; 在接收前加上 48 km 的 DCF。 测试结果如图 7 所示, 传输后, 标签与净荷在 BER 取

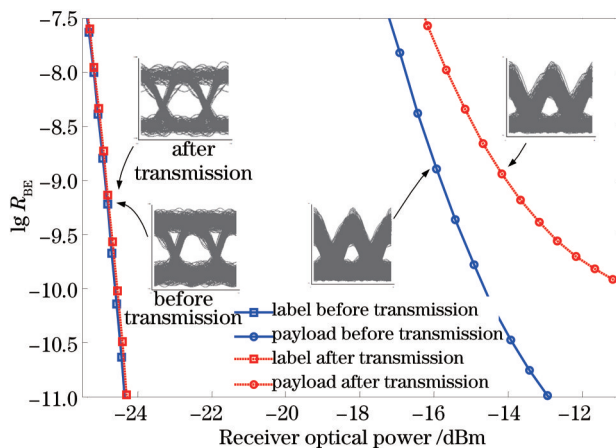


图 7 标签与净荷的 BER 曲线  
 Fig.7 BER performance of label and payload

$10^{-9}$  时,接收灵敏度分别为 $-24.8$  dBm 和 $-15.816$  dBm;同时发现,标签的 BER 曲线在传输前后接收灵敏度下降很小,而净荷传输后的接收灵敏度下降  $1.8$  dB。

为了研究 MZDI 结构的时延  $T_b$  偏差对系统的影响,对  $T_b=25$  ps 在  $\pm 5\%$  ( $23.75\sim 26.25$  ps) 范围内变化的系统性能进行了测试。在接收端接标签与净荷的收光功率分别为 $-25$  dBm 和 $-16.5$  dBm 的情况下,测得的净荷与标签 BER 随  $T_b$  的变化情况,如图 8 所示,标签信号随  $T_b$  的变化比净荷信号更明显,这是因为  $T_b$  的偏差导致 MZDI 传递函数相对于原先设计位置有偏离,而由于标签的带宽远比净荷的带宽窄,所以这个偏离对标签有更大的影响。图 8 中右边 4 幅眼图  $P_1, P_2, L_1, L_2$  分别对应左边误码率图形中  $P_1, P_2, L_1, L_2$  四点,显然,  $L_1, P_1$  眼图比  $L_2, P_2$  质量更差。

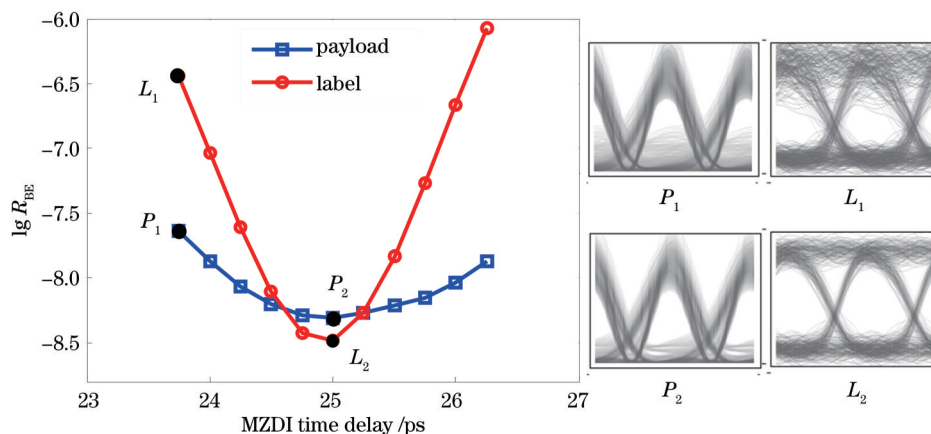


图 8 MZDI 时延  $T_b$  对净荷与标签 BER 和眼图的影响

Fig.8 Influence of MZDI time delay  $T_b$  to the BER and eye performance of diagrams and label

## 4 结 论

提出了一种产生多波长 DCS-RZ 光分组的方法,避免了为各波长通道分别进行 DCS-RZ 调制的过程,简化了系统发送端的结构。分析了方法的工作原理,通过仿真实验验证了方案的可行性,并对标签净荷分光比和 F-P 镜面反射率系统参数进行了优化,最后还分析了 MZDI 时延  $T_b$  对净荷与标签 BER 和眼图的影响。该方法对光分组交换系统进行扩展波长通道数目具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 N Wada, H Furukawa, T Miyazaki. Prototype 160-Gbit/s/port optical packet switch based on optical code label processing and related technologies [J]. J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(5): 1551-1559.
- 2 N Calabretta, P J Urban, D H Geuzebroek, *et al.*. All-optical label extractor/eraser for in-band labels and 160 Gb/s payload based on micro ring resonators [C]. Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, 2009: OWV4.
- 3 X Liu, X Wei, Y Su, *et al.*. Transmission of an ASK-labeled RZ-DPSK signal and label erasure using a saturated SOA [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(6): 1594-1596.
- 4 Ling Yun. Research on Optical Label Processing in Optical Packet Switching [D]. Chengdu: University of Electric Science and Technology, 2008.
- 5 Kun Qiu, Yun Ling. Novel optical packet with non-return-to-zero label and duobinary carrier-suppressed return-to-zero payload [J]. Chin Opt Lett, 2008, 6(2): 96-99.
- 6 Long Zhenghao, Xin Xiangjun, Zhou Rui, *et al.*. Applications of optical duobinary in optical carrier suppression and separation labeling [J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(7): 642-646.
- 7 Y Miyamoto, A Hirano, S Kuwahara, *et al.*. Novel modulation and detection for bandwidth-reduced RZ formats using duobinary-mode splitting in wideband PSK/ASK conversion [J]. J Lightwave Technol, 2002, 20(12): 2067-2078.
- 8 E Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. American Journal of Physics, 2000, 69(1): 79-87.

栏目编辑: 王晓琰