

文章编号: 0258-7025(2008)08-1201-07

# 改进型双二进制归零码信号在标记交换系统中的新应用

邵宇丰 文双春 陈 林 余建军

(湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 提出以改进型双二进制归零码(MD-RZ)信号作为标记,分别采用差分相移键控非归零码(NRZ-DPSK)信号和差分正交相移键控非归零码(NRZ-DQPSK)信号作为载荷进行正交调制的新方案。然后提出了一种从标记信号中提取和恢复时钟的简单方案。比较了背对背系统中2.5 Gbit/s的 MD-RZ 标记叠加到10 Gbit/s的 NRZ-DPSK 载荷和20 Gbit/s的 NRZ-DQPSK 载荷上的频谱特性,证明了 MD-RZ 标记占空比越大,光分组信号的频带利用率越高。采用传统的二进制强度调制-直接检测(IM-DD)系统的接收机检测得到了背对背系统中不同占空比的2.5 Gbit/s MD-RZ 标记的眼图。结果表明,若采用色散补偿技术,两种光分组信号中的 MD-RZ 标记能够在长距离传输时克服接收端眼图的失真;当入纤功率值高于18 dBm时,占空比取值越大,MD-RZ 标记的眼开度代价具有越高的传输鲁棒性。

**关键词** 光通信;标记交换;改进型双二进制归零码;相位调制器;双臂马赫-曾德尔调制器

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083508.1201

## Additional Applications of Modified Duobinary Return-to-Zero Signal in the Label Switching Optical System

Shao Yufeng Wen Shuangchun Chen Lin Yu Jianjun

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** Two novel orthogonal modulation schemes, in which a modified duobinary return-to-zero (MD-RZ) signal was generated as a label for optical switching network, were proposed. In one scheme, a non-return-to-zero differential phase shift keying (NRZ-DPSK) signal was generated as a payload, while in another scheme, a non-return-to-zero differential quadrature phase shift keying (NRZ-DQPSK) format payload was introduced. A simple method, in which the clock was extracted and recovered from label signals, was adopted. The spectra of two optical packet signals in the back-to-back label switching systems with 2.5 Gbit/s label and 10 Gbit/s payload, respectively, are compared. It is shown that the optical packet signal with a larger duty cycle label has higher spectral efficiency. In the back-to-back system, 2.5 Gbit/s MD-RZ labels with different duty cycles can be directly measured by a conventional binary intensity modulation direct detection (IM-DD) receiver. The MD-RZ labels of two optical packet signals can avoid the eye diagram distortion for long-distance transmission if the dispersion can be compensated. When the input power is beyond 18 dBm, the eye-opening penalty of MD-RZ label with a larger duty cycle is more robust in the label-detecting path.

**Key words** optical communication; label switching; modified duobinary return-to-zero format; phase modulator; dual-arm Mach-Zehnder modulator

收稿日期:2007-09-02; 收到修改稿日期:2007-11-12

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划和高等学校博士学科点专项科研基金(20040532005)资助项目。

作者简介:邵宇丰(1977—),男,湖南人,博士研究生,主要从事光纤通信技术方面的研究。

E-mail: shaoyufeng2006@yahoo.com.cn

导师简介:文双春(1966—),男,湖南人,教授,博士生导师,主要从事光纤通信技术、非线性光学等方面的研究。

E-mail: scwen@hnu.cn

## 1 引 言

目前,数据通信业务量已经远远高于语音通信业务量,万维网、电子邮箱、视频会议、电子商务等网络业务的蓬勃发展和远程医疗、远程教育、虚拟游戏和视频点播等网络应用的不断涌现使得 IP 流量迅猛增长。光通信网络如何适应以数据业务为主体,网络业务分组化的发展趋势,如何加快降低单位传输成本的节奏,是当前光通信领域的研究重点之一,其解决方案主要有三种:第一种是在基于电路交换的光网络中,增加高效的数据业务封装和疏导功能;第二种是电路交换和分组交换的融合,逐步形成融合的网络;第三种是发展光分组交换网络。第三种方案是一个更彻底和更长远的解决办法<sup>[1~6]</sup>。作为一种极具发展前景的光分组交换方案,光标记交换(OLS)具有直接提取标记进行处理的特点,因此可以对数据分组中的信息载荷不进行处理而在光信号域直接转发,大大提高了数据分组的交换速度。目前提出的几种光标记交换方案中<sup>[7~11]</sup>,正交调制标记和载荷的方案因为具有高的频谱利用率而逐渐成为一个研究热点<sup>[12~17]</sup>。遗憾的是,上述方案中作为标记的光信号占空比不可调,因此建议选用改进型光双二进制归零码(MD-RZ)信号作为标记。这样考虑是因为它具有部分响应信号的特点(根据尼奎斯特(Nyquist)第二准则<sup>[18,19]</sup>),在理论上有很好的传输特性。主要表现为:1) 能增加光通信传输系统的色散容限和频带利用率<sup>[20,21]</sup>;2) MD-RZ 较归零码(RZ)、双二进制归零码(duobinary RZ)和交替相位归零码(AP-RZ)而言,能够更有效地克服单信道的自相位调制(SPM)以及密集波分复用(DWDM)传输系统的交叉相位调制(XPM)和四波混频的负面效应<sup>[22]</sup>。3) MD-RZ 定时信息丰富,可以采用常规的强度调制-直接检测(IM-DD)系统的接收机提取比特时钟。但这种信号也仅在光信号传输系统中被采用,未见其在光信号交换系统中的应用报道<sup>[23]</sup>。

基于上述考虑,本文提出采用双臂马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)调制器(MZM)和一个电信号时延器产生可调占空比的 MD-RZ 信号作为标记,分别采用一个相位调制器产生光差分相移键控非归零码(NRZ-DPSK)信号和级联两个相位调制器产生光差分正交相移键控非归零码(NRZ-DQPSK)信号作为载荷进行正交调制的新方案。然后提出了一种从标记信号中提取和恢复时钟的简单方案,最后采用传统的二进制强度调制-直接检测(IM-DD)系统

的接收机完成了对不同占空比的 2.5 Gbit/s MD-RZ 标记的检测。因为该方案中的发送机和接收机配置简单,运行稳定,且发送机产生的 MD-RZ 标记占空比可调,接收机提取和恢复时钟的方法易于实现,所以能作为一种新的标记产生和接收方案,在未来的光标记交换网络中得到应用。

## 2 标记的产生及与载荷的正交调制

如图 1 所示,一个光标记交换网络至少需要三种类型的路由器进行数据分组交换:入口路由器(Ingress Router)、核心路由器(Core Router)和出口路由器(Egress Router)。其中,入口路由器负责标记和载荷的产生以及标记和载荷重组为数据分组,然后发送数据分组;核心路由器通过读取标记、擦除标记和替换标记来转发数据分组到正确的路由,除非需要下载和上传新的数据信息,通常核心路由器不对载荷进行处理;出口路由器负责检测标记和载荷以及分离标记和载荷,以提取应用需要的数据信息。考虑到在核心路由器只对标记进行光电转换和擦除重写,选择 MD-RZ 信号作为标记则能用传统常规的强度调制-直接检测系统的接收机对标记进行读取,这将降低核心路由器检测标记的复杂度,并且 MD-RZ 定时信息丰富,能提高核心路由器检测标记的精度。而选择调相信号作为载荷,主要是考虑到:1) 可以实现恒定包络或近似恒定包络的传输,能有效抑制信号在光纤中传输所受的非线性负面效应影响;2) 使用平衡接收机检测信号,与接收强度调制信号比较能提高 3 dB 的接收灵敏度<sup>[24,25]</sup>。基于以上原因,选择对低比特速率的 MD-RZ 标记和高比特速率的 NRZ-DPSK 载荷和 NRZ-DQPSK 载荷进行正交调制以产生新的光分组信号。

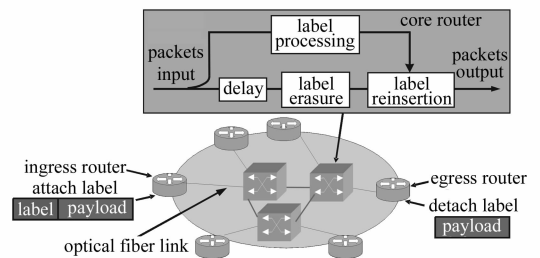


图 1 光标记交换网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical label switching network

MD-RZ 标记分别和 NRZ-DPSK 载荷及 NRZ-DQPSK 载荷进行正交调制以产生光分组信号的发

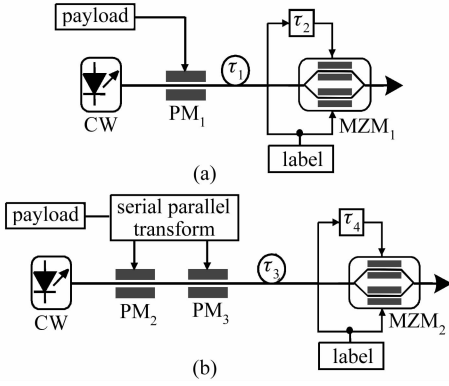


图 2 两类光分组信号的发送装置

Fig. 2 Transmitter configuration of two type optical packet signals

送装置如图 2(a), (b) 所示。图 2(a) 中经过预编码处理后的输入载荷比特流可表示为

$$P = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k q(t - kT), \quad c_k = 0, 1, \quad (1)$$

式中  $c_k$  为发送端经过预编码处理后的输入数据序列,  $k$  为发送的伪随机信号的比特字长,  $q(t)$  为发送的脉冲波形 (发送的是非归零矩形脉冲),  $T = 1/R$  ( $R$  为码元的传送速率) 为码元时间宽度。设输入相位调制器 1 ( $PM_1$ ) 前端未经调制的载波信号光场为  $E_{in}(t) = |E_0| e^{j\omega_c t}$ , 其中  $|E_0|$  为光载波信号的场强,  $\omega_c$  为光载波信号的频率。那么, 经过相位调制器 1 后输出的信号光场为

$$E_{1,out}(t) = E_{in}(t) \exp(j\Delta\phi_1 c_k), \quad (2)$$

式中  $\Delta\phi_1 = \pi$  为相位偏移值, 相位调制器 1 的输出光信号为 NRZ-DPSK 载荷信号。图 2(b) 中经过预编码处理后的输入载荷信号比特流还需要进行串并变换, 分为两部分连续且速率相等的比特流。类似地, 经串并变换后的两路载荷信号比特流表达式都如 (1) 式所示, 同样, 相位调制器 2 ( $PM_2$ ) 的输出光信号为 NRZ-DPSK 载荷, 再将该信号输入相位调制器 3 ( $PM_3$ ) 后得到输出的信号光场为

$$E_{3,out}(t) = E_{2,out}(t) \exp(j\Delta\phi_2 d_k) = E_{in}(t) \exp\left[j\pi\left(c_k + \frac{d_k}{2}\right)\right], \quad (3)$$

式中  $c_k$  和  $d_k$  为经串并变换后的两路载荷信号比特流的输入数据序列,  $\Delta\phi_2 = \pi/2$  为相位偏移值,  $E_{2,out}(t)$  和  $E_{3,out}(t)$  分别为相位调制器 2 和相位调制器 3 的输出信号光场。从 (3) 式可以看出, 来自分布反馈激光器的连续光载波信号经过两个级联的相位调制器后, 输出光强恒定的 NRZ-DQPSK 载荷信号, 但其相位变化取决于  $c_k + \frac{1}{2}d_k$  的值, 四种可能

的相位取值为  $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ 。在这种串联调制方式中, 如果将两个调制器的顺序颠倒也是可行的。之所以不采用并联调制方式, 是因为串联调制方式产生 NRZ-DQPSK 载荷信号在结构配置上更简单<sup>[26]</sup>; 之所以不采用级联双臂 M-Z 调制器进行相位调制, 是因为串联调制方式对双臂 M-Z 调制器的失调比较敏感, 并且采用相位调制器不需要外加电路来设置直流偏置电压 (DC), 能够简化发送装置。

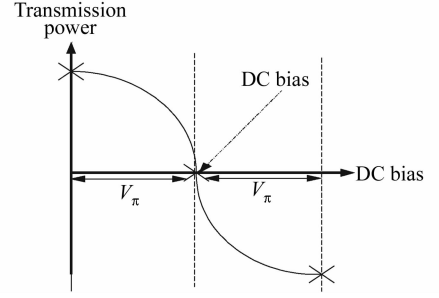


图 3 M-Z 双臂调制器的偏置

Fig. 3 Direct current (DC) bias of dual-arm M-Z modulator

MD-RZ 标记正交调制 NRZ-DPSK 载荷, NRZ-DQPSK 载荷的过程通过在相位调制器之后再级联一个双臂 M-Z 调制器实现。其中双臂 M-Z 调制器的偏置电压设为最小的光信号功率输出点 (当电射频信号关闭时), 其电压摆幅为  $2V_\pi$  ( $V_\pi$  为调制器开关电压或称半波电压), 如图 3 所示。图 2 中工作在双臂 M-Z 调制器中下臂的电信号时延器是时间可调器件, 在单位比特周期内调节时延 ( $\tau$ ) 可以产生不同占空比的 MD-RZ 光标记。因为双臂 M-Z 调制器两臂的输入信号电压初始值都为  $v(t)$ , 如果定义  $v(\tau) = v(t + \tau) - v(t)$ , 那么  $v(\tau)$  表征的是双臂 M-Z 调制器两臂信号的电压差异。图 2(a) 中双臂 MZM<sub>1</sub> 输出的信号光场可表示为

$$E_{MZM_1}(t) = \frac{1}{2} [E_{1,out}(t) + E_{1,out}(t - \tau)] = E_{1,out}(t) \cos \frac{\pi}{v_\pi} \left[ \frac{v(t + \tau) - v(t)}{2} \right] \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{v_\pi} \left[ \frac{v(t + \tau) + v(t)}{2} \right] \right\} = E_{in}(t) \cos \frac{\pi}{2v_\pi} v(\tau) \times \exp \left\{ j\pi \left[ \frac{v(\tau) + 2v(t)}{2v_\pi} + c_k \right] \right\}, \quad (4)$$

类似地, 可以推出图 2(b) 中双臂 MZM<sub>2</sub> 输出的信号光场为

$$E_{MZM_2} = E_{in}(t) \cos \frac{\pi}{2v_\pi} v(\tau) \times$$

$$\exp\left\{j\pi\left[\frac{v(\tau) + 2v(t)}{2v_\pi} + c_k + \frac{d_k}{2}\right]\right\}, \quad (5)$$

此外,为了保持经相位调制后的载荷和经幅度调制后的标记严格同步,要在相位调制器 1 和双臂 M-Z 调制器 1 之间加一根光延时线。光延时线的时间延迟值和电信号时延器的时间延迟值设为相等 ( $\tau_1 = \tau_2$ ), 否则 MD-RZ 标记的幅度和 NRZ-DPSK 载荷的相位不能完成严格的正交调制。同样,也要在相位调制器 3 和双臂 M-Z 调制器 2 之间加一根光延时线,以保证  $\tau_3 = \tau_4$ 。图 4 即为对 MD-RZ 标记和 NRZ-DPSK 载荷, NRZ-DQPSK 载荷进行正交调制的示意图。最后,从双臂 M-Z 调制器 1 和双臂 M-Z 调制器 2 输出的是经过正交调制形成的光分组信号。如果定义消光比为发送信号“1”码时的光功率与发送信号“0”码时的光功率之比值,那么信号  $v(t + \tau)$  和  $v(t)$  的幅度不能太小,否则产生的 MD-RZ 标记不能归零,从而导致消光比的值很小,不利于标记的传输和检测。

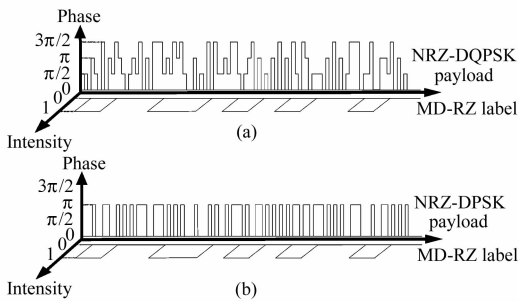


图 4 MD-RZ 标记和两种调相载荷的正交调制

Fig. 4 Orthogonal modulation of MD-RZ label and two type phase modulation payload

### 3 标记的解调及时钟恢复

接收两种光分组信号并进行正交解调的过程如图 5 所示。其中图 5(a) 为解调 MD-RZ 标记和 NRZ-DPSK 载荷的示意图,图 5(b) 为解调 MD-RZ 标记和 NRZ-DQPSK 载荷的示意图。因为 MD-RZ 标记从电信号域来看虽是三电平信号,但是从信号功率来看却是两电平信号,所以接收时可以与强度调制-直接检测系统的接收机兼容,不但操作简便,而且不会使接收机灵敏度劣化<sup>[23]</sup>,所以在图 5 中,MD-RZ 标记只需采用一个光电检测二极管即可实现信号接收。NRZ-DPSK 载荷需要一个上臂有 1 比特延时的干涉仪来完成信号接收, NRZ-DQPSK 载荷则需要一个上臂有 2 比特延时且下臂分别有  $\pm\pi/4$  相移的干涉仪来完成信号接收。不同的是,

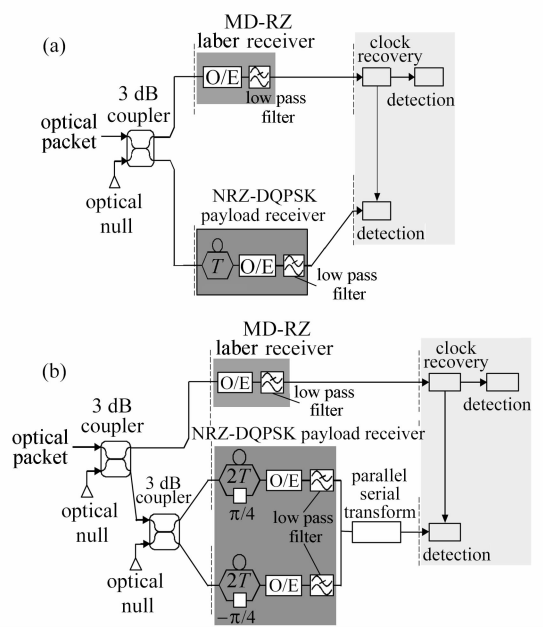


图 5 两种光分组信号的解调及检测

Fig. 5 Demodulation and detection of two type optical packet signals

解调后的两路 NRZ-DQPSK 载荷还需要进行并串变换,将检测的两部分连续且速率相等的比特流合并恢复为初始载荷信息。

解调后的标记和载荷通常具有不同的比特速率,而实际中却需要提取比特时钟来正确地对标记和载荷进行抽样判决以恢复传输的信息。因为载荷是采用调相码型,在光纤中调相信号的传输是恒定包络或近似恒定包络的传输。如果从载荷中提取比特时钟,需将相位信息转变为强度信息,实现起来较为复杂,尤其是当载荷中的相位信息连续时,提取比特时钟更加困难。而标记是采用 MD-RZ 型进行强度调制的,相邻光信号脉冲之间的光功率能恢复到零,定时信息丰富。尤其是标记信息数据序列为  $\{\dots 1, 1, 1 \dots\}$  时,若采用光二进制和光双二进制调制方式,产生的标记将具有连续的相位,这使接收机难以获取比特时钟(尤其是在码元过渡时间较长时),但如果采用改进型光双二进制调制方式,产生的标记在光信号域具有“0”和“ $\pi$ ”的连续交替相位,能提高接收机提取比特时钟的精度<sup>[23]</sup>。此外,解调后标记的比特速率低于载荷的比特速率,也降低了提取比特时钟的难度。所以,本方案提出采用检测到标记的比特时钟来同时恢复标记和载荷的比特时钟。值得注意的是,载荷的比特速率是标记的几倍,那么一个比特周期内载荷的时钟信号宽度就是一个比特周期内标记时钟信号宽度的几分之一。

## 4 结果及分析

建立如图2和图5所示的光分组信号的发送和接收系统模型。设连续波(CW)激光器的工作波长为1550 nm,输出功率为10 dBm。图2中标记电信号和载荷电信号源都产生字长为 $2^{30}-1$ 的伪随机二进制序列,分别发送2.5 Gbit/s和10 Gbit/s的数据信号。在图2中,载荷信息流经过预编码处理后,经过相位调制分别得到10 Gbit/s的NRZ-DPSK载荷和20 Gbit/s的NRZ-DQPSK载荷。2.5 Gbit/s的标记信息流经过预编码处理后,经电耦合器分为两部分完全相同的比特流。工作在双臂M-Z调制器1和2前的电延时器是时间可调器件,通过调节它使 $\tau_2$ 或者 $\tau_4$ 在一个标记比特周期内取不同的值,可以得到不同占空比的MD-RZ标记。此时输入两个双臂M-Z调制器的光载波是带有相位变化的连续光信号,因此在双臂M-Z调制器1的输出端口产生的是以2.5 Gbit/s的MD-RZ标记调制光强度,以10 Gbit/s的NRZ-DPSK载荷调制光相位的正交光分组信号,在双臂M-Z调制器2的输出端口产生的是以2.5 Gbit/s的MD-RZ标记调制光强度,以20 Gbit/s的NRZ-DQPSK载荷调制光相位的正交光分组信号。如果调节电延时器使时间延迟值 $\tau_2$ 或者 $\tau_4$ 增大,那么MD-RZ标记的占空比会随之增加。图6(a)所示为MD-RZ标记正交调制NRZ-DPSK载荷的光分组信号的频谱图,图6(b)所示为

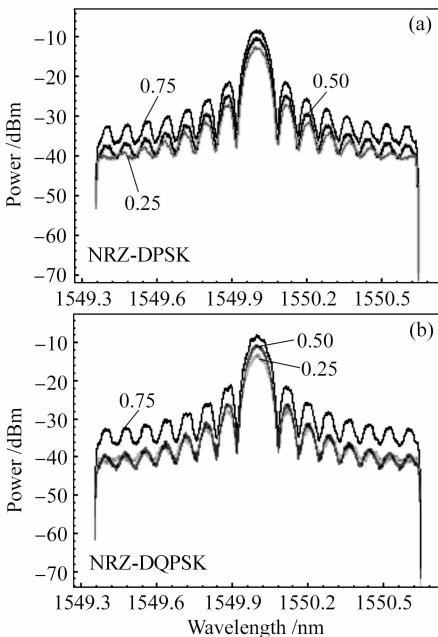


图6 两种光分组信号的频谱图

Fig. 6 Measured optical spectrum diagrams of two type optical packet signals

MD-RZ标记正交调制NRZ-DQPSK载荷的光分组信号的频谱图。不难看出,MD-RZ标记的占空比越大,光分组信号的峰值功率越高。当MD-RZ标记的占空比为0.25时,光分组信号的峰值功率小于连续波激光器的输出功率,其值小于10 dBm;当MD-RZ标记的占空比为0.75时,光分组信号的峰值功率大于连续波激光器的输出功率,其值大于10 dBm;当MD-RZ标记的占空比为0.5时,光分组信号的峰值功率等于连续波激光器的输出功率,其值恰好为10 dBm。并且,MD-RZ标记的占空比越大,光分组信号的频谱利用率越高,这在一定程度上可以增加掺铒光纤放大器(EDFA)增益带宽范围内的通信传输容量。但是标记的占空比增大会导致光分组信号的入纤功率增加,这将增强光分组信号在光纤中传输时受到的非线性负面效应,因此选择电延时器的时延值时应考虑设计系统的具体用途。

在背对背系统中,采用传统的二进制强度调制-直接检测系统的接收机对两种光分组信号中不同占空比的标记进行检测,分别得到眼图如图7所示。从图2可以看出,只要通过电信号时延器使 $\tau_2$ 或者 $\tau_4$ 在一个标记比特周期内取不同的值,就可以导致式(4)或者式(5)中输出信号光场的光强和相位变化,从而输出不同占空比和消光比的MD-RZ标记。图7中的(a),(b),(c)分别是MD-RZ标记正交调制NRZ-DPSK载荷时, $\tau_2$ 的值等于0.1 ns,0.2 ns,0.3 ns(即占空比分别为0.25,0.5,0.75)时检测到的标记眼图;图7中的(d),(e),(f)分别是MD-RZ标记正交调制NRZ-DQPSK载荷时, $\tau_4$ 的值等于0.1 ns,0.2 ns,0.3 ns(即占空比分别为0.25,0.5,0.75)时检测到的标记眼图。

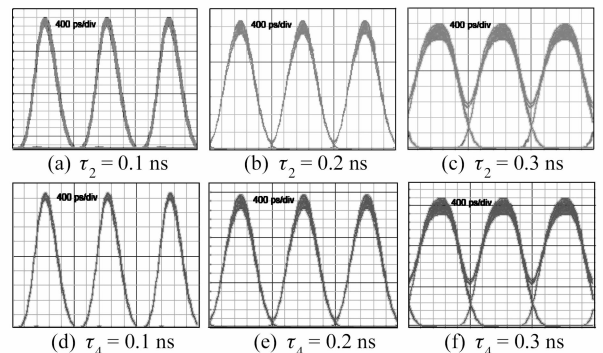


图7 检测两种光分组信号的标记眼图

Fig. 7 Measured label eye diagrams of two type optical packet signals

分别采用100 km的标准单模光纤(SMF,不进行色散补偿),以及连接一段17 km的色散补偿光纤

(SMF+DCF, 进行色散补偿)测得 MD-RZ 标记正交调制 NRZ-DPSK 载荷时入纤功率和标记的眼开度代价(EOP)的关系如图 8(a)所示,其中两种光纤的参数如表 1 所示。同样,测得 MD-RZ 标记正交调制 NRZ-DQPSK 载荷时入纤功率和标记的眼开度代价的关系如图 8(b)所示。不难看出,未经色散补偿时两种光分组信号传输 100 km 后标记的眼开度代价值要比经色散补偿后传输 117 km 后标记的眼开度代价值高。如果以 1 dB 的 EOP 值作为光信号传输质量的最大限制,当入纤功率高于 19 dBm 时,未经色散补偿两种光分组信号传输 100 km 后标记的眼开度代价值都超出了限制,而经色散补偿后传输 117 km 后标记的眼开度代价值还没有超过 0.6 dB。因此,为了使核心路由器和出口路由器能有效地检测标记,建议两种光分组信号在长距离传输时采用色散补偿技术。此外,不论 MD-RZ 是标记

正交调制 NRZ-DPSK 载荷,还是正交调制 NRZ-DQPSK 载荷,当入纤功率值高于 18 dBm 时,占空比取值越大,MD-RZ 标记的眼开度代价值越低。其原因是当入纤功率较高,而发送的两种光分组信号占空比取值较小时,在输出的光分组信号中,双臂 M-Z 调制器的直流偏置的输出功率值在总输出功率值中所占的比例相对越大,因此接收灵敏度会随之下降。当占空比取到最小值 0.25 时,消光比的值缩减到大约 4 dB,此时传统的二进制强度调制-直接检测系统的接收机检测光分组信号中 MD-RZ 标记的灵敏度非常低,对于接收方检测标记非常不利。所以在实际中,当入纤功率值高于 18 dBm 时,必须调节电信号时延器,输出占空比和消光比相对较高的光分组信号,以利于核心路由器和出口路由器完成对两种光分组信号中 MD-RZ 标记的检测。

## 5 结 论

目前,双臂 M-Z 调制器在许多光通信领域得到应用<sup>[27~29]</sup>。比较了背对背系统中 2.5 Gbit/s 的 MD-RZ 标记叠加到 10 Gbit/s 的 NRZ-DPSK 载荷和 20 Gbit/s 的 NRZ-DQPSK 载荷上的频谱特性,证明了 MD-RZ 标记占空比越大,光分组信号的频带利用率越高。这在一定程度上可以增加掺铒光纤放大器增益带宽范围内的通信传输容量。但是标记的占空比增大会导致光分组信号的入纤功率增加,这将增强光分组信号在光纤中传输时受到的非线性负面效应。因此选择电延时器的时延值时应考虑设计系统的具体用途。用传统的二进制强度调制-直接检测系统的接收机检测后得到了背对背系统中不同占空比的 2.5 Gbit/s MD-RZ 标记的眼图。结果表明,若采用色散补偿技术,两种光分组信号中的 MD-RZ 标记能够在长距离传输时克服接收端眼图的失真;当入纤功率值高于 18 dBm 时,占空比取值越大,MD-RZ 标记的眼开度代价值越低。所以在实际中,必须调节电信号时延器,输出占空比和消光比相对较高的光分组信号,以利于核心路由器和出口路由器完成对两种光分组信号中 MD-RZ 标记的检测。

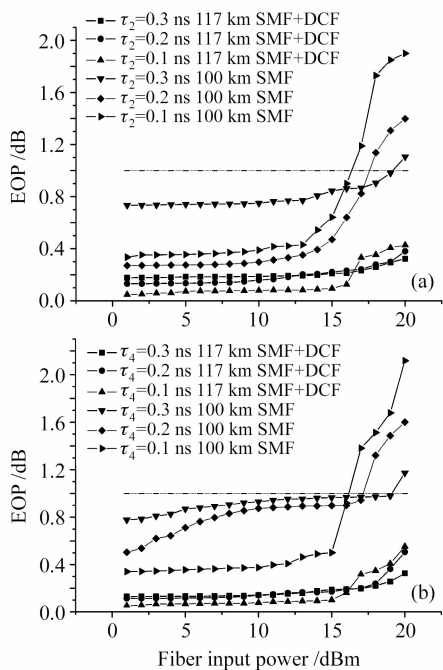


图 8 检测两种光分组信号的标记眼开度代价

Fig. 8 Measured label eye-opening penalty of two type optical packet signals. (a) NRZ-DPSK; (b) NRZ-DQPSK

表 1 两种光纤参数

Table 1 Parameters of two kinds of fibers

Fiber parameters	SMF	DCF
Length /km	100	17
Dispersion $D$ / (ps/(nm · km))	17	-100
Fiber loss / (dB/km)	0.2	0.5
Nonlinear coefficient $\gamma$ / (W · km) <sup>-1</sup>	2.6	10.4
Dispersion slope $dD/d\lambda$ / (ps/(nm <sup>2</sup> · km))	0.08	-0.3

## 参 考 文 献

- D. J. Blumenthal, B. Olsson, G. Rossi *et al.*. All-optical label swapping networks and technologies [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(12):2058~2075
- S. J. B. Yoo, X. Fei, Y. Bansal *et al.*. High-performance optical-label switching packet routers and smart edge routers for

- the next-generation internet [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2003, **21**(7):1041~1051
- 3 G. K. Chang, J. Yu. Multirate payload switching using a swappable optical carrier suppressed label in a packet switched DWDM optical network [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1):196~202
  - 4 T. Koonen, G. Morthier, J. Jennen *et al.*. Optical packet routing in Ip-over-WDM networks deploying two-level optical labeling [C]. *Proc. Eur. Conf. Optical Communication (ECOC)*, 2001, **4**:608~609
  - 5 D. J. Blumenthal, P. R. Prucnal, J. R. Sauer. Photonic packet switches: Architectures and experimental implementations [C]. *Proc. IEEE*, 1994, **82**(11):1650~1667
  - 6 L. Tancevski, S. Yegnanarayanan, G. Castanon *et al.*. Optical routing of asynchronous, variable length packets [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2000, **18**(10):2084~2093
  - 7 Y. M. Lin, W. I. Way, G. K. Chang. A novel optical label swapping technique using erasable optical single-sideband subcarrier label [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(8):1088~1090
  - 8 D. J. Blumenthal, B. E. Olsson, G. Rossi *et al.*. All-optical label swapping networks and technologies [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(12):2058~2075
  - 9 E. N. Lallas, N. Skarmoutsos, D. Syvridis. An optical FSK-based label coding technique for the realization of the all-optical label swapping [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(10):1472~1474
  - 10 N. Chi, B. Carlsson, P. V. Holm-Nielsen *et al.*. Dispersion management for two-level optically label signals in Ip-over-WDM networks [C]. *Proc. Eur. Conf. Optical Communication (ECOC)*, 2002, Paper 5.5.1
  - 11 J. J. Yu, G. K. Chang. A novel technique for optical label and payload generation and multiplexing using optical carrier suppression and separation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1):320~322
  - 12 J. Zhang, N. Chi, P. V. Holm-Nielsen *et al.*. A novel optical labeling scheme using a FSK modulated DFB laser integrated with an EA modulator [C]. *Proc. OFC*, 2003, (1):279~280
  - 13 N. Chi, B. Carlsson, J. Zhang *et al.*. Transmission performance of all-optically labeled packets using ASK/DPSK orthogonal modulation [C]. *LEOS'02*, 2002, MF3
  - 14 J. Zhang, P. V. Holm-Nielsen, N. Chi *et al.*. DC-balanced line encoding for optical labeling scheme using orthogonal modulation [C]. *Proc. OFC*, 2004, WF2
  - 15 W. Huang, C. Chan, L. Chen *et al.*. A bit-serial optical packet label-swapping scheme using DPSK encoded labels [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(11):1630~1632
  - 16 X. Liu, Y. Su, X. Wei *et al.*. Optical-label switching based on DPSK/ASK modulation format with balanced detection for DPSK payload [C]. *Proc. Eur. Conf. Optical Communication (ECOC)*, 2003, Tu4.4.3
  - 17 C. W. Chow, H. K. Tsang. Optical label encoding and swapping using half-bit delayed dark RZ payload and DPSK label [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**:5325~5330
  - 18 Zhou Jiongpan, Pang Qinhu, Xu Dawo *et al.*. *Communications Principles* [M]. Beijing: Beijing University of Posts & Telecommunication Press, 2005
  - 周炯槃, 庞沁华, 徐大我等. *通信原理* [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005
  - 19 Fan Changxin, Zhan Daoyong, Xu Binxiang *et al.*. *Communications Principles* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995
  - 樊昌信, 詹道庸, 徐炳祥等. *通信原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
  - 20 K. S. Cheng, J. Conradi. Reduction of pulse-to-pulse interaction using alternative RZ formats in 40 Gb/s systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1):98~100
  - 21 K. Yonenaga, Y. Miyamoto, H. Toba *et al.*. 320 Gbit/s WDM repeaterless transmission using fully encoded 40 Gbit/s optical duobinary channels with dispersion tolerance of 380 ps/nm [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(2):109~110
  - 22 J. J. Yu. Generation of modified duobinary RZ signals by using one single dual-arm LiNbO<sub>3</sub> modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10):1455~1457
  - 23 Shao Yufeng, Chen Lin, Wen Shuangchun *et al.*. Novel coding and decoding scheme for modified optical duobinary signal transmission [J]. *Journal on Communications*, 2007, **28**(2):58~63
  - 邵宇丰, 陈林, 文双春等. 新型改进光双二进制传输的编解码方案 [J]. *通信学报*, 2007, **28**(2):58~63
  - 24 A. Gnauck, P. Winzer. Optical phase-shift-keyed transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1):115~130
  - 25 G. Bosco, P. Poggiolini. Analysis of impact of receiver imperfections on performance of optical DQPSK systems [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(18):1147~1149
  - 26 O. Michael, F. Torsten. Comparison of different DQPSK transmitters with NRZ and RZ impulse shaping [C]. *IEEE/LEOS*, 2002, ThB2.7-8
  - 27 Zhang Huijian, Zuo Meng, Zhong Jinshun *et al.*. Study of two stage modulation formats in high-speed dense wavelength division multiplexing systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):815~819
  - 张慧剑, 左萌, 钟锦舜等. 高速密集波分复用系统中的二级调制格式研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):815~819
  - 28 Chen Yong, Cao Jihong, Chen Ting *et al.*. Optimal modulation formats for 2560 km optical transmission with low-power penalty [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):331~335
  - 陈勇, 曹继红, 陈婷等. 优化调制格式实现 2560 km 低代价无误码传输 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):331~335
  - 29 Shao Yufeng, Chen Lin, Wen Shuangchun *et al.*. A novel scheme for generation of optical dark return-to-zero label signals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1580~1584
  - 邵宇丰, 陈林, 文双春等. 产生暗归零码光标记信号的新方案 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1580~1584