

文章编号: 0253-2239(2010)01-0054-05

高速率差分相移键控信号的长距离传输实验

吴琳 刘亮 张帆* 陈章渊 徐安士

(北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 报道了高速率单信道非归零差分相移键控(NRZ-DPSK)调制信号的长距离光纤环路传输。光纤环路总长 414 km, 由 4 个放大段组成。每个放大段由标准单模光纤(SSMF)和色散补偿光纤(DCF)构成, 采用掺铒光纤放大器/分布式拉曼放大器(EDFA/DRA)混合放大。测量了 42.8 Gb/s 差分相移键控信号在环路传输 1, 2, 3 圈(414 km, 828 km 和 1242 km)后的光谱和眼图。在接收段使用单端检测的条件下, 给出了 DPSK 信号在背对背情况, 414 km 和 1242 km 传输后的误码率(BER)随接收机功率变化的曲线。DPSK 信号在 1242 km 传输后最低误码率可达 6.3×10^{-4} 。在使用增强型前向纠错(FEC)技术后, 能实现无误码传输。

关键词 光通信; 长距离传输; 差分相移键控; 标准单模光纤; 混合放大

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0054

Experimental Study of High-Speed Differential Phase-Shift Keying Signal Long-Haul Transmission

Wu Lin Liu Liang Zhang Fan Chen Zhangyuan Xu Anshi

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems & Networks, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The high-speed single-channel transmission of nonreturn-to-zero differential phase-shift keying (NRZ-DPSK) signal is demonstrated using fiber loop. The 414 km fiber loop is divided into four spans, which consist of standard single-mode fiber (SSMF) and dispersion compensation fiber (DCF), and erbium-doped fiber amplifier/distributed Raman amplifier (EDFA/PRA) are used for hybrid amplification. The optical spectrum and eye diagrams of 42.8 Gb/s DPSK signal are obtained after 414 km, 828 km and 1242 km transmission. The curves of bit error rate (BER) of the DPSK signal are given both in back-to-back configuration and after transmission using single-ended detection. The BER is 6.3×10^{-4} after 1242 km transmission, and the error-free transmission can be realized using enhanced forward error correction (FEC).

Key words optical communications; long-distance transmission; differential phase-shift keying(DPSK); standard single-mode fiber(SSMF); hybrid amplification

1 引言

近年来,随着大容量、长距离光纤通信技术的发展,许多新技术不断涌现。在这些技术当中,差分相移键控(DPSK)调制技术受到人们的重视^[1-6]。在

相同误码率(BER)要求下,使用双端接收的差分相移键控信号比起开关键控(OOK)信号,对于光信噪比(OSNR)的要求降低 3 dB;同时由于差分相移键控调制信号在每个比特周期都有功率,对于非线性

收稿日期: 2009-02-09; 收到修改稿日期: 2009-03-06

基金项目: 国家 863 计划(2006AA01Z253, 2006AA01Z261)、国家自然科学基金(60877045, 60736003)和国家教育部留学回国人员科研启动基金资助课题。

作者简介: 吴琳(1980—),男,博士研究生,主要从事高速光纤通信系统中调制格式方面的研究。

E-mail: wulin@pku.edu.cn

导师简介: 徐安士(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事波分复用自动光通信网络、高速大容量波分复用光纤通信系统、光因特网和光信号处理等方面的研究。E-mail: xas@ele.pku.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: fzhang@pku.edu.cn

容限也有提高^[7]。在近几年的高速大容量光通信系统实验中,越来越多地采用差分相移键控调制信号。在目前报道的 40 Gb/s 差分相移键控信号传输实验中,各种类型的传输光纤和放大方式均有采用,如采用标准单模光纤(SSMF)和掺铒光纤放大器/分布式拉曼放大器(EDFA/DRA)混合放大方式^[8]、SSMF和全拉曼放大方式^[9]、真波光纤维(Truewave fiber)和全拉曼放大方式^[10,11]以及大有效面积光纤和不同放大方式的组合^[12,13]。虽然真波光纤维、大有效面积光纤等新型光纤具有低色散或非线性系数小的优点,但考虑到现有商用 10 Gb/s 系统多使用标准单模光纤(ITU 标准 G. 652),从升级的角度出发,在标准单模光纤上进行 40 Gb/s 传输实验具有一定的经济意义。本文实现了 42.8 Gb/s 单信道非归零差分相移键控(NRZ-DPSK)信号的长距离光纤环路传输实验。在接收端采用单端检测,DPSK 信号在 1242 km 传输后最低误码率可达 6.3×10^{-4} 。

2 实验装置

环路传输实验装置如图 1 所示,4 路 10.7 Gb/s 的信号脉冲由脉冲发生器生成,经由复用器复用为 42.8 Gb/s 的单路电信号,送入 DPSK 信号光发射机(SHF5003)。冗余的 7% 带宽是为了模拟前向纠错码(FEC)的使用。DPSK 发射机主要由铷酸锂马赫-曾德尔调制器(偏压设置为传输曲线的零点处)构成,输入的直流光经由预编码后的电信号的调制,

生成波长为 1549.91 nm 的 42.8 Gb/s NRZ-DPSK 光信号。DPSK 信号由 EDFA 1 放大后,经过光开关 a 和 3 dB 光耦合器进入光纤环路。光纤环路的工作方式由光纤环路控制器来选择。环路控制器输出的电信号 SW1 和 SW2 用来控制光开关 a, b 的通断,确定光信号在光纤环路中的时间长度和运行圈数。光纤环路总长 414 km,由 4 个放大段组成。每个放大段由标准单模光纤 G. 652 和色散补偿光纤构成,单模光纤的色散由色散补偿光纤完全补偿。4 个放大段中单模光纤的长度分别为 96,106,106 和 106 km。单模光纤的损耗由 EDFA 和反向抽运 DRA 提供的增益补偿,色散补偿光纤的损耗由反向抽运 DRA 补偿。EDFA2 提供的增益用来补偿带通滤波器、光开关 b 和 3 dB 光开关耦合器的插损,以保证环路中每一圈的信号入纤功率相同。入环的信号功率为 1 dBm,在此入纤功率下能够得到较好的传输性能。环路中的带通滤波器(3 dB 带宽 1.5 nm)用来滤除传输中累积的噪声。环路输出的 NRZ-DPSK 信号首先用 EDFA 3 放大,经过 40 Gb/s 波分解复用器(DEMUX)滤除噪声,再由马赫-曾德尔延迟干涉仪(MZDI)进行解调。由于采用单端检测,DPSK 信号经过 MZDI 延迟 1 bit 周期后与原信号相加,解调成为双二进制(DB)信号^[14],进入光接收机进行误码检测。环路控制器输出 GATE 信号给误码仪、光谱分析仪或数字通信分析仪,用以确定第几圈的光信号被测量。

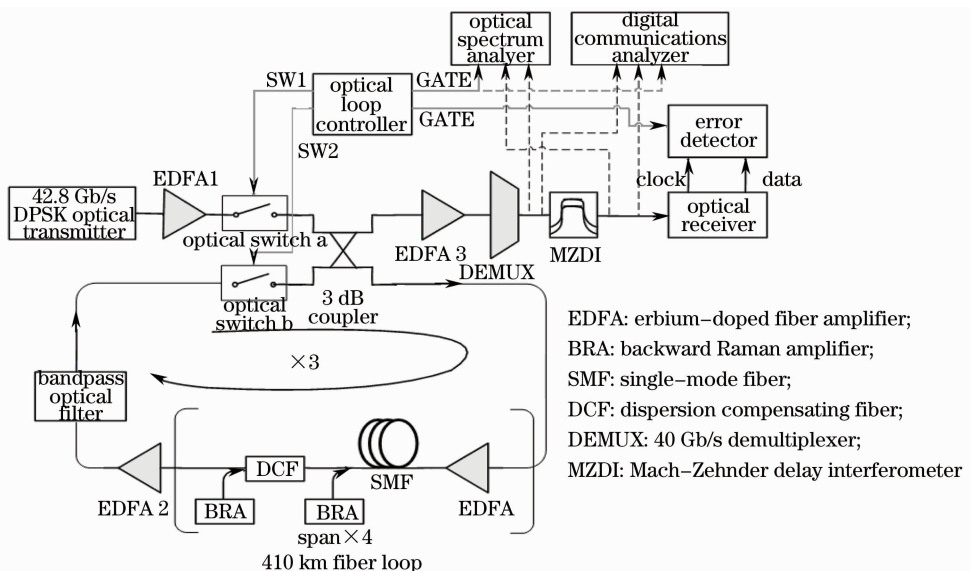


图 1 单信道 NRZ-DPSK 信号光纤环路传输系统框图

Fig. 1 Experimental setup of single-channel NRZ-DPSK signal transmission system using fiber recirculating loop

3 实验结果

3.1 光谱和眼图

分别测量了背对背情况下、环路传输 1, 2, 3 圈后的 NRZ-DPSK 信号及其经过 MZDI 解调后的信号光谱(光谱仪分辨率为 0.01 nm)和眼图。

3.1.1 背对背情况下的信号光谱和眼图

将传输的环路去掉, 发射机出来的 DPSK 信号经过 EDFA 放大、DEMUX 滤波之后的光谱和眼图如

图 2 所示。因为 DEMUX 的 3 dB 带宽为 0.65 nm, 所以滤波之后的 DPSK 信号光谱稍窄, 如图 2(a) 所示。但从图 2(b) 的 DPSK 眼图上可以看到信号并无畸变。DPSK 信号经 MZDI 解调后的信号光谱和眼图如图 2(c), (d) 所示, 信号消光比为 10.5 dB, 眼图信噪比为 7.2。从背对背情况的测试结果可以看出发射机、接收机以及 EDFA, DEMUX 等设备工作状态良好。

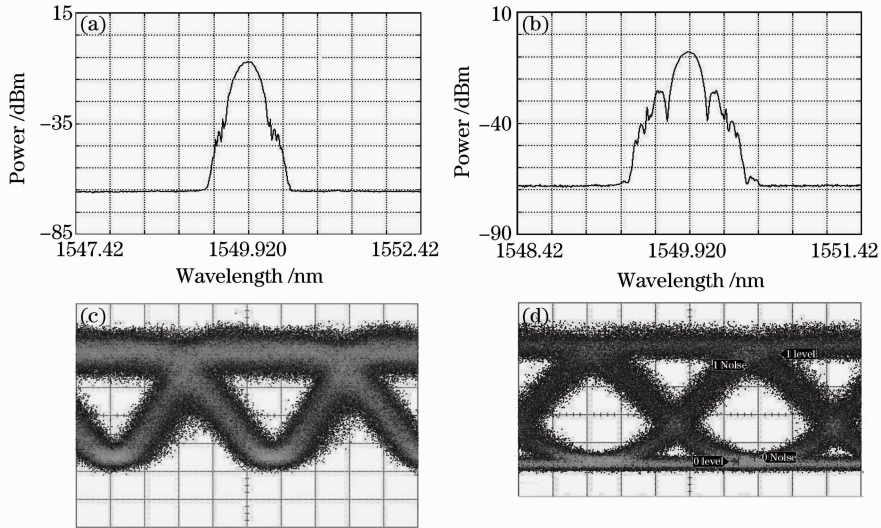


图 2 背对背情况下(经过 DEMUX)的光功率谱和眼图。(a)DPSK 光谱;(b)解调后的 DPSK 光谱;
(c)DPSK 眼图;(d)解调后的 DPSK 眼图

Fig. 2 Optical power spectrum and eye diagrams in back-to-back configuration using DEMUX. (a) DPSK spectrum;
(b) demodulated DPSK spectrum; (c) DPSK eye diagram; (d) demodulated DPSK eye diagram

3.1.2 环路传输后的 DPSK 信号光谱和眼图

为了比较经过不同的传输距离后 NRZ-DPSK 信号的变化, 测量了在环路中运行 1, 2, 3 圈(相应的

距离为 414, 828 和 1242 km) 的 DPSK 信号光谱和眼图, 如图 3 所示。

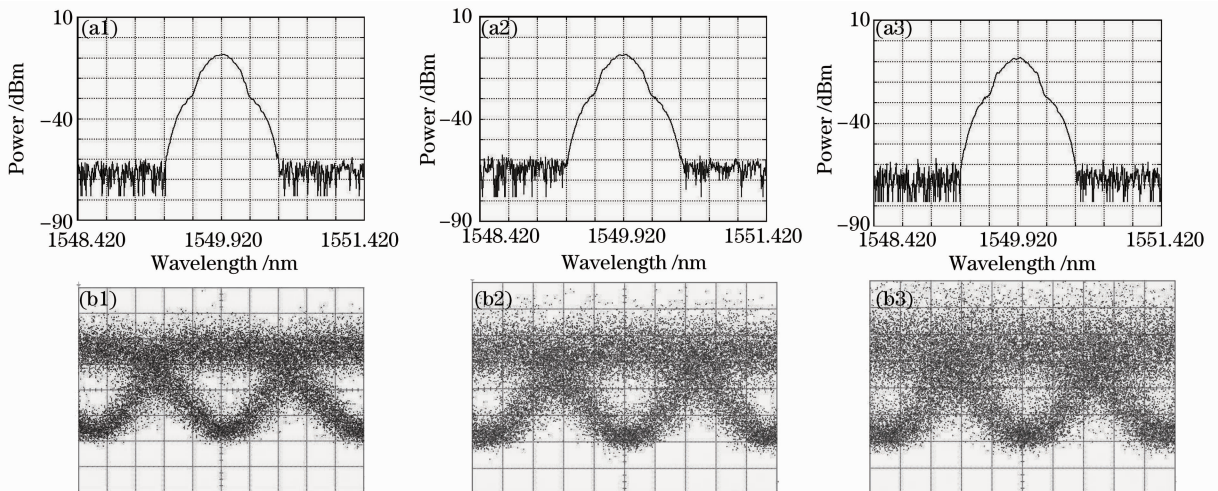


图 3 环路传输 1 圈(a1), 2 圈(a2), 3 圈(a3)后的 DPSK 光功率谱, (b1)~(b3)是对应的眼图

Fig. 3 Optical power spectrum of DPSK signals after one (a1), two (a2), three (a3) circulations of transmission,
(b1)~(b3) are the corresponding eye diagram

由于测量点的位置位于 DEMUX 之后, 所以得到的 DPSK 信号光谱比正常偏窄。由于 DEMUX 的光谱形状较陡峭, 滤除噪声性能较好, 所以在 DEMUX 通带范围之外的噪声已经被滤除。比较图 2(a) 和图 3(a1)~(a3), 可以看到经过传输后, DPSK 光谱的部分旁瓣被噪声淹没; 随着传输距离的增加, 光谱并没有发生较大的变化, 但从 DPSK

眼图可以看出噪声不断累积, 信号质量恶化。因为 DPSK 信号无法测得眼图信噪比和消光比等参数, 所以我们给出无测量数据的眼图。

3.1.3 解调后的 DPSK 信号光谱和眼图

传输后的 DPSK 信号经过 MZDI 解调, 得到的信号光谱和眼图如图 4 所示。

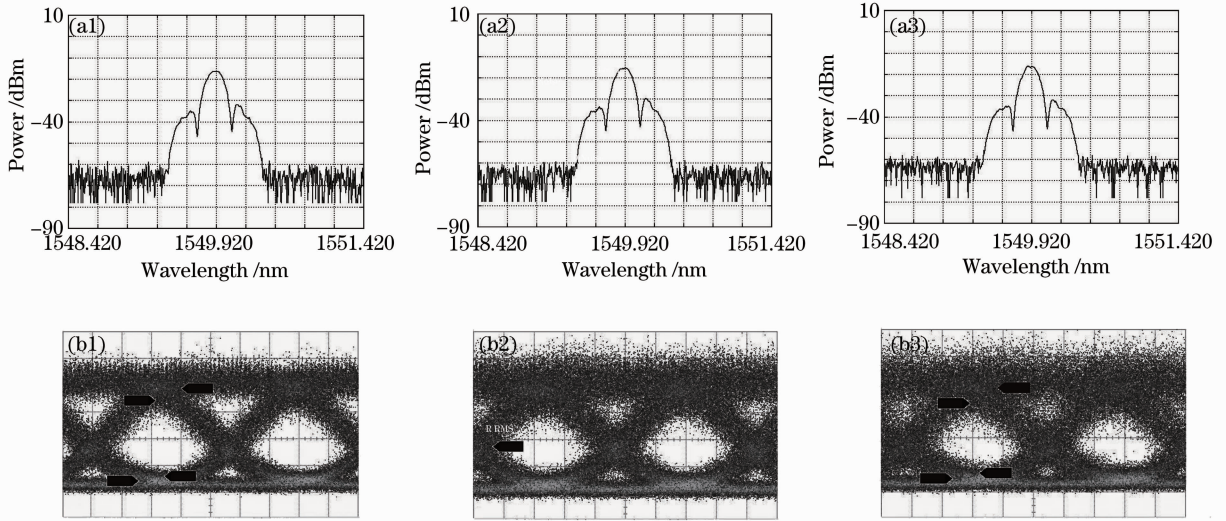


图 4 环路传输 1 圈(a1), 2 圈(a2), 3 圈(a3)后的解调后 DPSK 光功率谱, (b1)~(b3)是对应的眼图

Fig. 4 Optical power spectrum of the demodulated DPSK signals after one (a1), two (a2), three (a3) circulations of transmission, (b1)~(b3) are the corresponding eye diagram

确保每次输入数据通信分析仪的信号功率都在 0 左右, 这样测得的眼图信噪比等参数有比较意义。相比于背对背情况, 解调后的 DPSK 信号光谱在传输不同距离后并没有较大的变化, 只是左右旁瓣变得不对称, 这可能是由传输中的信号损伤和 MZDI 解调器的不稳定性造成的。同时可以看到信号的部分旁瓣已被噪声淹没。这从信号的眼图上更能体现出来: 噪声使得眼图开始模糊, 张开度减小, 图 4(b1)~(b3)中的眼图信噪比分别为 5.7, 4.7 和 4.3。不同传输距离后的消光比分别为 9.0, 8.8 和 8.5 dB, 其数值相差并不大, 这说明“1”电平与“0”电平对应的平均信号功率在不同传输距离后变化较小。抖动均方值(Jitter RMS)也较小, 说明自相位调制引起的时间抖动效应不明显。

3.2 误码率

为了提高传输性能和降低误码率, 在环路中使用了带通滤波器来滤除传输中累积的噪声, 但这样无法在接收端测量光信噪比(OSNR)。所以测试了背对背、环路传输 1 圈和 3 圈 3 种情况下的 NRZ-DPSK 信号误码率随接收机功率变化的曲线, 如图 5 所示。

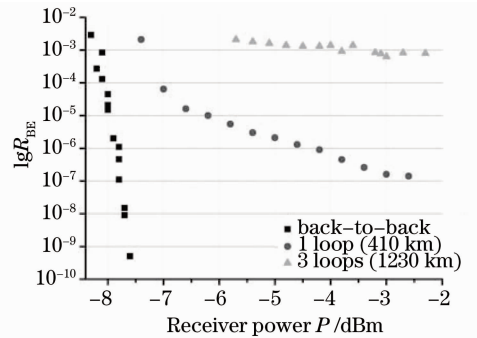


图 5 DPSK 信号误码率(R_{BE})与接收机功率关系

Fig. 5 BER performance of DPSK signal versus receiver power

在背对背情况下, 误码的产生主要是因为接收机存在噪声, 而接收机噪声相对于 DPSK 信号来说较小, 所以当接收机功率稍有提高时, 误码率便急剧下降。传输后的误码主要是由于 DPSK 信号本身在传输中质量不断恶化, 如非线性损伤, 累加的放大器自发辐射噪声等。所以当信号功率提高时, 传输后的误码率并不像背对背情况下那样变化, 如图 5 所示。环路传输 1 圈后, 随着接收机功率不断提高, 误码率缓慢下降, 但当功率上升到 -2.6 dBm 以上

时,误码仪出现同步失锁,无法测量误码率。在误码率为 1×10^{-4} 时,与背对背相比,功率代价约为 1 dB。当信号经过 3 圈环路(1242 km)之后,信号质量恶化更加严重,所以在较大的功率范围(约 2 dBm)内,误码率保持在 1×10^{-3} 左右,最低误码率可达 6.3×10^{-4} 。该误码率低于增强型前向纠错(FEC)技术的 BER 界限 2.0×10^{-3} ,这样,在使用增强型 FEC 技术时就能实现无误码传输^[15]。

在 1242 km 传输之后,误码率较大的原因可能为:1)不同于点对点传输系统,环路传输系统中偏振模色散(PMD)的均值随着环路圈数的增加而线性累积,其均值与环路圈数成正比。即本系统 1242 km(3 圈)传输中 PMD 的影响相当于 3690 km 点对点传输中的 PMD。如果采用点对点传输方式,或者在环路中加入扰偏器减缓 PMD 的环路累积效应,相信系统的性能将有进一步的改善。2)在环路中单模光纤的色散由色散补偿光纤完全补偿,这样非线性的效应较明显。如果改变链路中的色散图样,在发射端和接收端加入色散预补偿和后补偿,相信会降低误码率。3)由于实验条件所限,采用了 DPSK 信号的单端检测,这样便无法利用其双端检测时带来的降低 OSNR 要求的优点。如果采用双端检测,误码率会进一步降低。4)EDFA/DRA 混合放大方式带来的传输噪声比全拉曼放大方式要大,所以若采用全拉曼放大,系统性能将会提高。

4 结 论

实现了 42.8 Gb/s 单通道非归零差分相移键控调制信号的 1242 km 环路传输实验。光纤环路由标准单模光纤 G. 652(总长 414 km)和色散补偿光纤构成,采用掺铒光纤放大器/分布式拉曼放大器混合放大方式。在 1242 km 传输后采用单端检测, NRZ-DPSK 信号误码率保持在 2×10^{-3} 以下,在使用增强型 FEC 技术时能实现无误码传输。

参 考 文 献

1 Xu Ming, Ji Jianhua. Phase jitter of multi-perturbations in

- differential phase-shift keying dispersion managed soliton system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 781~786
- 徐 铭, 吉建华. 差分相移键控色散管理孤子多扰动系统的相位抖动[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 781~786
- 2 Xu Wei, Duan Gaoyan, Fang Guangqin *et al.*. Analysis of polarization mode dispersion compensation performance for different modulation formats [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 226~232
- 许 玮, 段高燕, 方光青 等. 不同调制格式的偏振模色散补偿性能分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 226~232
- 3 He Jing, Liu Limin, Chen Lin *et al.*. Generation of advanced modulation formats based on Mach-Zehnder modulators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1185~1190
- 何 晶, 刘丽敏, 陈 林 等. 基于马赫-曾德尔调制器的先进调制格式的产生[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1185~1190
- 4 P. J. Winzer, René-Jean Essiambre. Advanced optical modulation formats[J]. *Proc. IEEE*, 2006, **94**(5): 952~985
- 5 C. Xu, X. Liu, X. Wei. Differential phase-shift keying for high spectral efficiency optical transmissions[J]. *J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2004, **10**(2): 281~293
- 6 G. Charlet, A. Klekamp. Optimum modulation format for high density and/or ultra long haul transmission at 40 Gb/s[C]. *In Proc. OFC*, 2006, OThI3
- 7 A. H. Gnauck, P. J. Winzer. Optical phase-shift-keyed transmission[J]. *J. Lightw. Technol.*, 2005, **23**(1): 115~130
- 8 A. H. Gnauck, X. Liu, X. Wei *et al.*. Comparison of modulation formats for 42.7 Gb/s single-channel transmission through 1980 km of SSMF[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 909~911
- 9 D. Z. Chen, T. J. Xia, G. Wellbrock *et al.*. New field trial distance record of 3040 km on wide reach WDM with 10 and 40 Gb/s transmission including OC-768 traffic without regeneration [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 28~37
- 10 A. Agarwal, S. Banerjee, D. F. Grosz *et al.*. Ultralong-haul transmission of 40 Gb/s RZ-DPSK in a 10/40 G hybrid system over 2500 km of NZ-DSF [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12): 1779~1781
- 11 B. Zhu, L. E. Nelson, S. Stulz *et al.*. High spectral density long-haul 40 Gb/s transmission using CSRZ-DPSK format[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 208~214
- 12 J. X. Cai, M. Nissov, W. Anderson *et al.*. Long-haul 40 Gb/s RZ-DPSK transmission with long repeater spacing[C]. *In Proc. OFC*, 2006, OFD3
- 13 J. X. Cai, D. G. Foursa, A. J. Lucero *et al.*. Long-haul 40 Gb/s RZ-DPSK transmission over 4,450 km with 150 km repeater spacing using raman assisted EDFAs[C]. *In Proc. OFC*, 2007, OWM3
- 14 D. Penninckx, H. Bissessur, P. Brindel *et al.*. Optical differential phase shift keying (DPSK) direct detection considered as a duobinary signal[C]. *In Proc. ECOC*, 2001, We. P. 40
- 15 M. Forzati, A. Berntson, J. Mårtensson. NRZ-OOK Transmission of 16×40 Gb/s over 2800 km SSMF using asynchronous phase modulation [C]. *In Proc. CLEO*, 2008, CThAA3