

差分相移键控的非归零到归零格式转换研究

余文科^{1,2,3} 娄采云^{1,2,3} 邢燕飞^{1,2,3} 赵晓凡^{1,2,3} 陆丹^{1,2,3} 霍力^{1,2,3}

(¹ 清华信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084; ² 集成光电子国家重点实验室, 北京 100084; ³ 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 提出了一种全新的基于相位-强度混合调制和色散补偿的光差分相移键控(DPSK)信号的非归零(NRZ)到归零(RZ)格式转换器,理论分析了转换器参数对转换的影响,数值研究了恶化条件下的 10 Gb/s 的 NRZ-DPSK 到 RZ-DPSK 的格式转换。实验展示了 10 Gb/s 的 DPSK 信号格式转换及解调后的误码性能。计算结果表明,通过设计转换器参数可获得低占空比 RZ-DPSK 信号,且转换后信号质量较高。实验结果表明格式转换功率代价较低,转换后 RZ-DPSK 信号时间抖动较原 NRZ-DPSK 信号减小。该格式转换器还适合光四相差分相移键控(DQPSK)的非归零到归零格式转换及多波长操作。

关键词 光通信;格式转换器;相位-强度混合调制;差分相移键控

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0205002

Non-Return-to-Zero to Return-to-Zero Format Conversion for Differential Phase Shift Keying

Yu Wenke^{1,2,3} Lou Caiyun^{1,2,3} Xing Yanfei^{1,2,3} Zhao Xiaofan^{1,2,3} Lu Dan^{1,2,3} Huo Li^{1,2,3}

(¹ Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNLIST), Beijing 100084, China
² State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Beijing 100084, China
³ Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A novel non-return-to-zero (NRZ) to return-to-zero (RZ) format converter for differential phase shift keying (DPSK) signal is proposed based on phase-intensity hybrid modulation and dispersion compensation. Influence on the format conversion of the converter parameters is theoretically analyzed and format conversion of 10-Gb/s degraded DPSK signal is investigated through numerical simulation. Experimental 10-Gb/s NRZ-DPSK signal to RZ-DPSK signal conversion and the bit error rate (BER) performance of the demodulated signals have also been demonstrated. Calculation results show that low duty cycle RZ-DPSK signal with high quality can be obtained through designing the converter. Experimental results show that the power penalty of the conversion is low and the timing-jitter of the RZ-DPSK signal is lower than that of the NRZ-DPSK signal. The format converter can also be applicable to multi-wavelength and differential quadrature phase shift keying (DQPSK) operation.

Key words optical communications; format converter; phase-intensity hybrid modulation; differential phase shift keying

OCIS codes 060.2330; 070.4340; 230.0250

1 引言

随着高速大容量光纤通信技术的飞速发展,许多新技术不断涌现,其中光调制格式技术受到广泛关注。光差分相移键控(DPSK)由于具有良好的抗非线性及扰动性以及其采用平衡探测接收时所要求

光信噪比比开关键控(OOK)低 3 dB 等优点而在未来大容量长距离传输系统中具有潜在应用价值^[1~4]。目前关于波分复用(WDM)技术的 DPSK 信号传输实验已有大量报道^[5~7]。未来光网络中核心技术是 WDM 和光时分复用(OTDM)技术的结

收稿日期: 2010-08-23; **收到修改稿日期**: 2010-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(60736036, 61077055)、国家 863 计划(2009AA01Z256)、国家 973 计划(2011CB301700)和北京市优秀博士论文(YB20091000301)资助课题。

作者简介: 余文科(1985—),男,博士研究生,主要从事高速光信号处理等方面研究。E-mail: ywk07@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 娄采云(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统等方面的研究。

E-mail: loucy_ee@mail.tsinghua.edu.cn

合,在连结 WDM 与 OTDM 的光网络节点中非归零(NRZ)到归零(RZ)格式转换技术显得尤为重要。目前已报道的OOK的NRZ到RZ格式转换技术较多^[8~10],而NRZ-DPSK到RZ-DPSK的格式转换以及多通道的格式转换技术却较少报道。本文提出了一种基于相位-强度混合调制以及色散补偿的NRZ-DPSK到RZ-DPSK的格式转换器,通过仿真和实验展示了DPSK的格式转换。该转换器具有再定时功能,且能适应多通道以及适合光四相差分相移键控(DQPSK)操作等优点。

2 转换原理及仿真分析

DPSK信号的格式转换器如图1中虚线框所示。转换器由相位-强度混合调制器和一段色散媒质组成。其中相位调制器(PM)和强度调制器(IM)之间引入一个微波移相器,类似装置曾被用来产生光频率梳和超短光脉冲源^[11,12]。转换器的工作原理如下:输入的NRZ-DPSK信号首先经过一个相位调制器,PM的调制作用使得输入信号获得了周期性的啁啾,而通过强度调制后可使NRZ-DPSK信号每比特周期中心部分具有近似线性的负/正啁啾,而两侧则对应为正/负啁啾且只能较低地透过强度调制器,其中调制器的驱动时钟频率需与输入NRZ-

DPSK信号速率一致,可通过光电振荡器等从信号中提取^[13]。信号通过相位-强度混合调制后经过一段色散媒质如色散补偿光纤(DCF)或者普通单模光纤(SMF),若适当控制DCF/SMF的长度,则信号可以分别得到线性的正/负啁啾补偿,那么信号中心部分得到压缩,即转换成RZ信号输出,由于DCF色散系数大,补偿时所需长度相对较短,本文仅研究利用DCF补偿负啁啾的格式转换器。基于上述工作原理,进行了10 Gb/s背靠背NRZ-DPSK信号格式转换仿真,仿真中输入信号中心波长为1545 nm,考虑码长为 $2^{11}-1$ 的伪随机差分码,转换器中DCF色散参数为 $-100 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,长度为260 m,PM

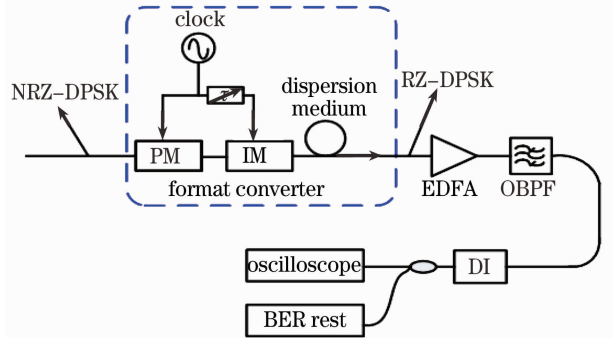


图1 基于相位-强度混合调制的格式转换器
Fig. 1 Format converter based on phase-intensity hybrid modulator

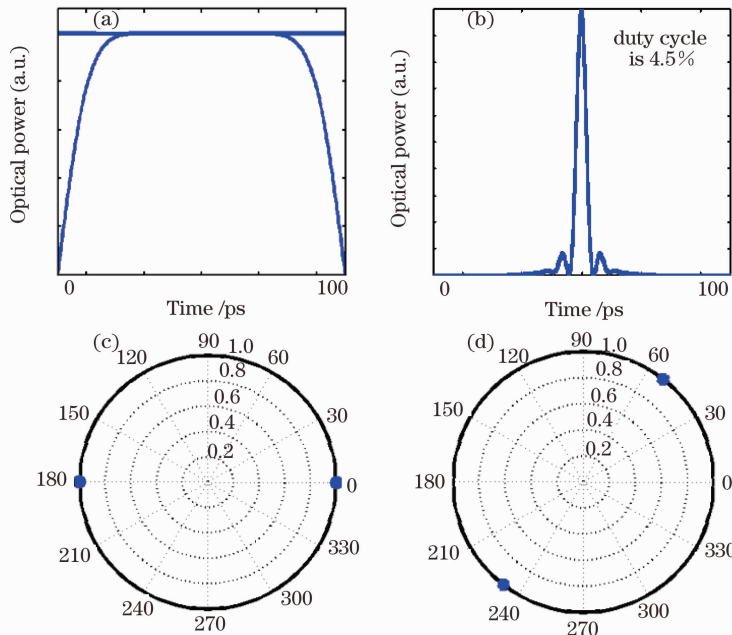


图2 信号眼图和星座图。(a) NRZ-DPSK眼图, (b)转换后RZ-DPSK眼图, (c)NRZ-DPSK星座图, (d)转换后RZ-DPSK星座图

Fig. 2 Eye diagrams and constellation diagrams. (a) NRZ-DPSK eye diagram, (b) converted RZ-DPSK eye diagram, (c)NRZ-DPSK constellation diagram, (d) converted RZ-DPSK constellation diagram

的调制系数为 3π ，而强度调制器工作在线性区域。图 2(a)~(d) 分别为 NRZ-DPSK 信号和转换后 RZ-DPSK 信号的眼图与星座图。从星座图可知转换前后 DPSK 信号相对相位保持不变，从眼图可以得出，转换后 RZ-DPSK 信号占空比较低，约为 4.5%，且信号消光比较高，可复用到更高速率，但信号两翼存在较小的基座。这是由于补偿时存在较小的残余啁啾，通过增大相位调制系数及在转换器后插入合适带宽的滤波器可以有效抑制基座^[12]。由于转换器中需啁啾补偿，不同的相位调制系数需要引入不同长度的 DCF 以获得质量较高的 RZ-DPSK 信号。图 3 为数值研究转换器中相位调制系数与所需最佳 DCF 长度的关系以及对应情况下输出 RZ-DPSK 信号的占空比的结果。结果表明相位调制系数越高，所需最佳 DCF 长度越短，且对应的输出信号占空比越低，因此通过合理设计转换器参数可以获得不同占空比的 RZ-DPSK 信号。

为了研究格式转换器在噪声恶化情况下的转换性能，对 10Gb/s 随机幅度相位噪声恶化的 NRZ-DPSK

信号的格式转换进行了仿真研究，转换器中各参数与背靠背仿真中相同。图 4 分别为转换前后信号以及转换后信号经延迟干涉解调后的眼图以及转换前后星座图。结果表明对于恶化 NRZ-DPSK 信号的格式转换，转换器不引入额外的幅度相位噪声，且解调后信号质量仍然较高。

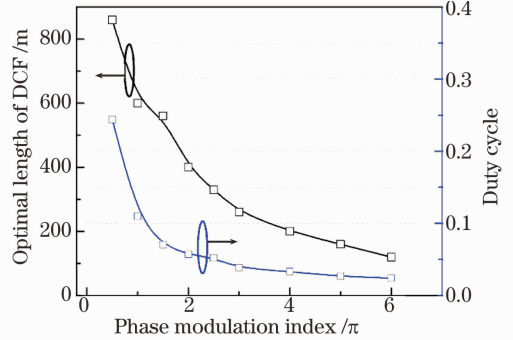


图 3 DCF 优化长度与相位调制系数的关系及对应 RZ-DPSK 信号的占空比

Fig. 3 Dependence of the optimal length of DCF on phase-modulation index and corresponding duty cycle of the RZ-DPSK signal

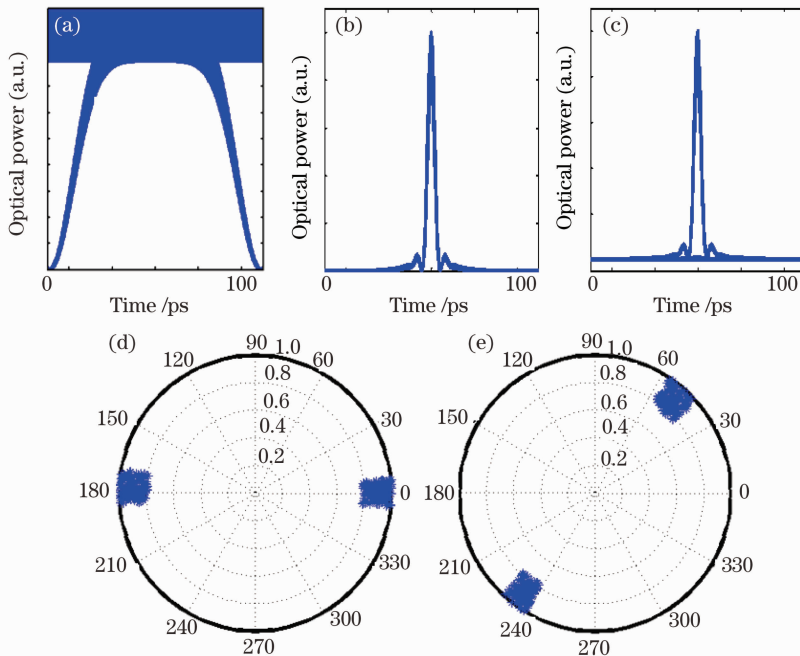


图 4 恶化后的信号眼图和星座图。(a) 恶化 NRZ-DPSK 眼图，(b) 转换后 RZ-DPSK 眼图，(c) 解调后 RZ-DPSK 眼图，(d) 恶化 NRZ-DPSK 星座图，(e) 转换后 RZ-DPSK 星座图

Fig. 4 Degraded signal eye diagrams and constellation diagrams. (a) degraded NRZ-DPSK eye diagram, (b) converted RZ-DPSK eye diagram, (c) demodulated RZ-DPSK eye diagram, (d) degraded NRZ-DPSK constellation diagram, (e) converted RZ-DPSK constellation diagram

3 实验结果

为了进一步验证本方案的可行性，进行了

10 Gb/s 的 NRZ-DPSK 信号到 RZ-DPSK 信号的格式转换实验研究，实验方案如图 1 所示。实验中码

长为 $2^{31} - 1$ NRZ-DPSK 信号由激光通过一个马赫-曾德尔调制器调制产生,中心波长为 1543.42 nm, PM 的相位调制系数约为 1.2π ,而强度调制系数约为 0.22π ,DCF 长度约为 1.1 km,在输入中心波长附近色散系数约为 $-100 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,色散斜率约为 $0.22 \text{ ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$,损耗约为 $0.6 \text{ dB}/\text{km}$ 。转换信号经过掺铒光纤放大器(EDFA)和一个带宽约为 1.2 nm 的光带通滤波器(OBPF)后经过基于晶体的延迟干涉仪(DI)解调并通过示波器和误码仪进行监测,实验中采用单端检测测试误码。

图 5(a),(c)分别为转换前后 DPSK 信号眼图,图 5(b),(d)分别为转换前后通过 DI 解调的眼图。图 5(e),(f)为转换前后的一段波形图。实验中采用示波器测量转换前后的平均时间抖动,测得转换前信号平均时间抖动约为 8 ps ,而转换后信号的平均时间抖动减小到 2.3 ps ,说明该式转换器具有一定的再定

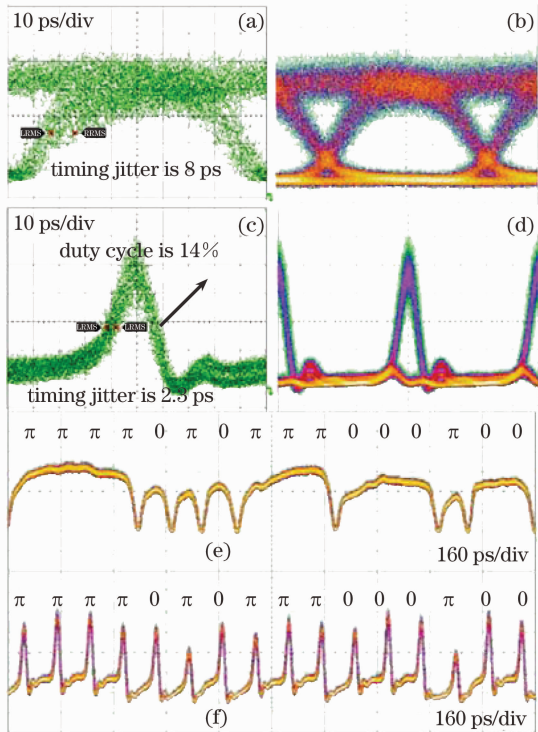


图 5 实验眼图和波形。(a) NRZ-DPSK 眼图,(b) 解调后 NRZ-DPSK 眼图,(c) RZ-DPSK 眼图,(d) 解调后 RZ-DPSK 眼图,(e) NRZ-DPSK 波形,(f) RZ-DPSK 信号波形

Fig. 5 Experimental results of eye diagrams and constellation diagrams. (a) NRZ-DPSK eye diagram, (b) demodulated NRZ-DPSK eye diagram, (c) RZ-DPSK eye diagram, (d) demodulated RZ-DPSK eye diagram, (e) NRZ-DPSK waveforms, (f) RZ-DPSK waveforms

时功能,从波形图可以看出转换后 RZ-DPSK 信号存在较明显的基座且占空比比数值计算时大。这是由于实验中马赫-曾德尔调制器驱动电压未达到 2 倍的半波电压以及 DCF 长度长于理论最佳长度所致。图 6 为实验中利用单端检测测得的误码特性曲线,纵坐标为误码率(BER, R_{BE})对数形式的负数,可以看出转换后信号可实现无误码,相对背靠背的 NRZ-DPSK 信号,转换功率代价仅为 0.2 dB 。

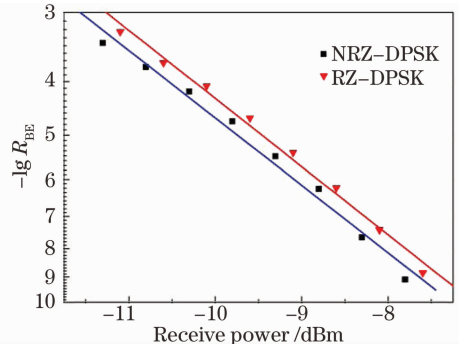


图 6 DPSK 信号误码率曲线

Fig. 6 BER performance of DPSK signal

4 结 论

提出了一种基于相位-强度混合调制和色散补偿光纤的 NRZ-DPSK 到 RZ-DPSK 信号格式转换器。数值研究了 $10 \text{ Gb}/\text{s}$ 背靠背和恶化 NRZ-DPSK 信号到 RZ-DPSK 信号的格式转换,并对 $10 \text{ Gb}/\text{s}$ 的格式转换进行了实验验证,结果表明格式转换器不引入额外噪声且有一定的再定时功能,转换后信号可以实现无误码且转换功率代价低。由于调制器对波长依赖性不高,且色散补偿光纤在 1550 nm 附近较大的波长范围内色散斜率较小,所以格式转换器也适合多波长操作。由于转换过程中相位调制信号的相对相位不发生改变,所以该装置也适合 DQPSK 信号的非归零到归零格式转换。

参 考 文 献

- 1 P. J. Winzer, R. J. Essiambre. Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4711~4728
- 2 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
- 3 C. Xu, X. Liu, X. Wei. Differential phase-shift keying for high spectral efficiency optical transmissions [J]. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(2): 281~293
- 4 W. Atia, R. S. Bondurant. Demonstration of return-to-zero signalling in both OOK and DPSK formats to improve receiver sensitivity in an optically preamplified receiver [C]. *In: Proc.*

- LEOS, San Francisco, CA, 1999. 224~225
- 5 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
- 6 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): 1779~1780
- 7 Wu Lin, Liu Liang, Zhang Fan *et al.*. Experimental study of high-speed differential phase-shift keying signal long-haul transmission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 54~58
吴琳, 刘亮, 张帆等. 高速率差分相移键控信号的长距离传输实验[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 54~58
- 8 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Multi-channel all-optical 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): 2962~2965
- 9 Yan Yumei, Yin lina, Zhou Yunfeng *et al.*. 10 Gbit/s all-optical non-return-to-zero to return-to-zero conversion based on terahertz optical asymmetric demultiplexer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1510~1514
闫玉梅, 尹丽娜, 周云峰等. 利用 TOAD 实现 10 Gbit/s 全光非归零码到归零码的转换[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1510~1514
- 10 Jian Wang, Junqiang Sun, Xinliang Zhang *et al.*. All-optical format conversions using periodically poled lithium niobate waveguides[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **45**(2): 195~205
- 11 M. Fujiwara, J. Kani, H. Suzuki *et al.*. Flattened optical multicarrier generation of 12.5 GHz spaced 256 channels based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(15): 967~968
- 12 Y. Takita, F. Futami, M. Doi *et al.*. Highly stable ultra-short pulse generation by filtering out flat optical frequency components [C]. *CLEO*, 2004: CTuN1
- 13 Huo Li, Dong Yi, Lou Caiyun *et al.*. Clock extraction using an optoelectronic oscillator from high-speed NRZ signal and NRZ-to-RZ format transformation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7): 981~983