

文章编号: 0258-7025(2007)01-0074-04

光纤传输系统中基于相位预调制的信号整形

陈 新, 吴克瑛, 马晓红, 张汉一, 周炳琨

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 利用相位预调制技术解决高速长距离光纤传输系统中面临的接收灵敏度降低和色散容限问题。通过在发射端对非归零(NRZ)的光信号进行比特同步相位预调制,使非归零码在传输过程中得到波形重整,演变为归零(RZ)的波形,从而提高眼图开启度。实验观测了普通非归零码和相位预调制的非归零码在不同相位调制深度和色散下的光谱、眼图和功率代价。10 Gb/s的传输结果表明,链路色散绝对值小于1000 ps/nm时,施加相位预调制的非归零信号功率代价小于1 dB,比普通非归零信号具有更高的接收灵敏度和更低的色散功率代价。因此,基于相位预调制的信号整形技术可减轻系统对光信噪比和色散管理的要求,延长传输距离。

关键词 光通信;调制格式;相位调制;群速度色散;眼图开启度

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Signal Shaping Based on Phase Pre-Modulation in Fiber Transmission Systems

CHEN Xin, WU Ke-ying, MA Xiao-hong, ZHANG Han-yi, ZHOU Bing-kun

(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract Phase pre-modulation is investigated to overcome the impacts of sensitivity reduction and chromatic dispersion in high-speed and long-distance fiber transmission systems. The bit-synchronous phase pre-modulation imposed on non-return-to-zero (NRZ) signals at the transmitter can reshape the NRZ pulse to return-to-zero (RZ) waveform and hence improve the eye opening. Experiments are performed to measure the spectra, eye diagrams and power penalties of conventional NRZ signals and phase-pre-modulated NRZ signals under different modulation depth and dispersion. Results of 10 Gb/s transmission show that the phase-pre-modulated NRZ signals have a power penalty lower than 1 dB with the absolute value of link dispersion less than 1000 ps/nm, exhibiting higher sensitivity and lower dispersion-induced penalty than conventional NRZ signals. This modulation scheme relaxes the requirements to optical signal-to-noise ratio and dispersion management, extends the transmission distance and is easy to implement.

Key words optical communication; modulation format; phase modulation; group velocity dispersion; eye opening

1 引 言

随着光纤通信系统传输速率的提高,群速度色散成为系统性能的主要限制因素之一^[1]。长距离的光纤链路,一般采用色散补偿光纤(DCF)对色散进行补偿,但是色散补偿光纤通常具有一定误差,而且其色散斜率与传输光纤不能完全匹配,系统不可避免地存在一定的残余色散。光纤中的非线性效应在

高速率和长距离的传输条件下非常明显^[2],进一步加大了色散对系统性能的影响。此外,光放大器引入的放大自发辐射(ASE)噪声的累积,会带来接收灵敏度的恶化,影响系统性能。因此,为保证高速系统的可靠传输,必须增强系统对色散的抵抗能力,并提高系统的接收灵敏度。

调制格式是克服光纤传输中各种问题的有效手段^[3~5]。研究表明,对信号施加适当的预啁啾可以

收稿日期:2006-04-19;收到修改稿日期:2006-06-22

基金项目:国家自然科学基金(60432020,60520130298)资助项目。

作者简介:陈 新(1981—),女,湖南人,博士研究生,主要从事高速光纤传输和调制格式的研究。

E-mail:cx98@mails.thu.edu.cn

导师简介:周炳琨(1936—),男,四川人,中国科学院院士,教授,博士生导师,研究方向主要包括激光物理和器件、波分复用光网络等。E-mail:zbk-dee@tsinghua.edu.cn

补偿系统色散, 延长传输距离^[6~8]。预啾啾可以作用于归零(RZ)码, 也可作用于非归零(NRZ)码。当非归零码和归零码的上升下降时间相同时, 对非归零码实施啾啾, 得到的光谱比啾啾归零码的光谱要窄, 更利于在波分复用(WDM)系统中应用。而且, 目前大部分商用系统采用的调制格式均为非归零码, 当系统速率提高或距离延长时, 以非归零码为基础对调制格式进行改进较为方便。直接调制的激光器、电吸收调制器以及非对称的马赫-曾德尔调制器产生的啾啾都存在于光功率发生变化的区域, 这种情况下, 非归零码的啾啾只存在于光脉冲的边沿, 对于波形的改善能力有限。而利用相位调制器对非归零码施加比特同步的相位预调制, 使脉冲各个部分均产生一定啾啾, 可以对信号进行整形, 提高眼图开启度^[9]。进一步的仿真结果表明, 这种相位预调制可以降低系统的色散功率代价^[6]。

本文对施加了比特同步相位预调制的10 Gb/s非归零码进行了实验研究, 并讨论了最优的相位调制深度与系统色散的关系。

2 原 理

由于相位预调制与色散相互作用, 可以改变非归零脉冲的波形, 对信号起到整形的作用, 因此, 将这种附加了相位预调制的非归零信号称为相位整形非归零(PS-NRZ)码。

图1(a)为相位整形非归零码的产生方法。直流光经过数据调制器变成比特速率为 B 的非归零

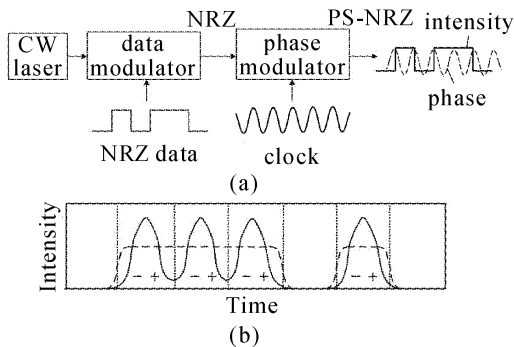


图 1

(a) 相位整形非归零码的产生; (b) 相位整形非归零码相位整形的原理示意图。虚线为传输前的波形, 实线为传输后的波形, “+”和“-”代表相对于比特中心的频率偏移

Fig. 1

(a) generation of phase-shaping NRZ (PS-NRZ); (b) principle of PS-NRZ. Dashed and solid lines denote waveforms of PS-NRZ before and after transmission, and “+” and “-” denote positive and negative frequency deviation

光信号, 然后经过相位调制器, 用一个频率为 f 的正弦时钟信号对非归零信号进行相位调制。令 $f = B$, 并适当调整时钟信号的幅度和延时, 即可得到相位整形非归零码。由于光信号的相位改变量与相位调制器的驱动电压成正比, 因此相位整形非归零码具有随时间正弦变化的相位。将相位变化的幅度(峰-峰值的一半)称为相位调制深度。调整时钟信号的延时, 使每个比特的前半部分和后半部分具有相反的相位变化斜率, 从而具有相反的瞬时频移(啾啾)。在啾啾和色散的共同作用下, 非归零的波形(虚线)将演变为归零(实线)的波形, 眼图开启度变大, 接收灵敏度也得到提高, 如图1(b)所示。其中, 比特前后部分的啾啾符号和啾啾量需要根据传输链路的具体状况, 尤其是链路的色散情况, 进行调整。

3 实验结果与分析

实验方案如图2所示。实验中采用与半导体激光器集成的电吸收调制器(EAM)产生10 Gb/s的光信号, 电吸收调制器在脉冲边沿引入了少量的啾啾。偏振控制器(PC)用于调整进入相位调制器(PM)的光的偏振态, 以获得最高的调制效率。相位调制器的驱动器具有可调的输出电压, 用于改变相位调制的深度; 移相器用于调节时钟信号和数据信号之间的时延。链路的色散量通过改变光纤长度来实现, 采用了普通单模光纤(SMF)和色散补偿光纤两种光纤。光纤前后各使用了一个掺铒光纤放大器(EDFA), 用于控制入纤功率, 以及补偿光纤损耗。

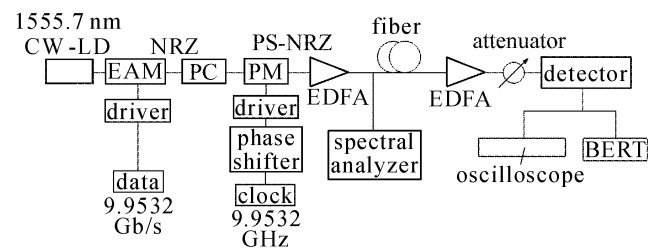


图 2 实验方案

Fig. 2 Experimental setup

EAM: electro-absorption modulator;

PC: polarization controller; PM: phase modulator

图3为实验中测得的非归零码和不同调制深度下相位整形非归零码的光谱(横坐标为 0.15 nm/div , 纵坐标为 5 dB/div)。可以看到, 经过相位调制后的非归零信号的光谱被展宽, 而且谱宽随着调制深度的增加而增加。需要注意的是, 对于波分复用系统, 过宽的频谱会引起信道间的串扰, 限

制谱效率的提高。因此,在实验中将相位调制深度限制在 60° 以下。

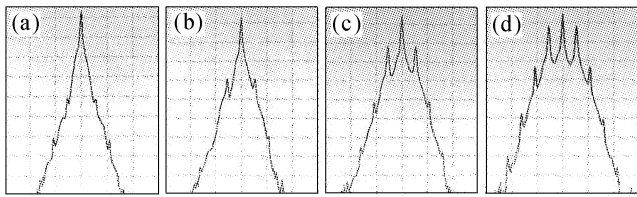


图3 非归零码(a)与相位整形非归零码相位调制深度分别为(b) 20° , (c) 40° , (d) 60° 的光谱图

Fig. 3 Spectra of NRZ (a) and PS-NRZ with phase modulation depth of 20° (b), 40° (c) and 60° (d)

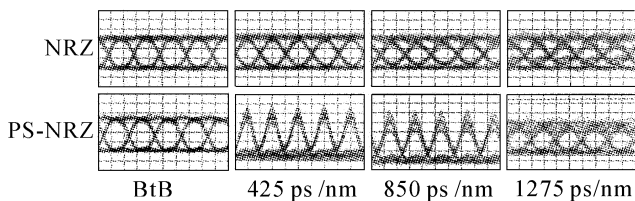


图4 不同色散下非归零码与相位整形非归零码的眼图
Fig. 4 Eye diagrams of NRZ and PS-NRZ at different dispersion

the phase modulation depth of PS-NRZ is 30°

图4为链路色散分别为 425 ps/nm , 850 ps/nm 和 1275 ps/nm 时,非归零码与相位整形非归零码的眼图。其中,相位整形非归零码的相位调制深度为 30° 。从眼图可以清楚地看到,非归零码的眼图开启度随着色散的增加而减小,使得接收灵敏度降低,导致较大的色散功率代价。而相位整形非归零码则表现出不同的变化趋势。当色散值小于 850 ps/nm 时,其波形出现归零特性;当色散进一步加大,相位预调制不足以抵消色散的影响,因而波形不再归零,但仍然保持了较清晰的眼图,明显优于非归零码。可见,相位整形非归零码具有更高的接收灵敏度,可以降低系统对光信噪比的要求。

为了对相位整形非归零码的性能进行定量的衡量,测量了不同色散值下非归零码和相位整形非归零码的功率代价,如图5所示,以误码率 $\text{BER} = 10^{-9}$ 为衡量标准。背靠背的情况下,非归零码和相位整形非归零码的灵敏度均为 -15.8 dBm 。曲线下标注的数字为实验中所采用的相位调制深度。根据不同的链路色散对其进行了优化,以得到最小的功率代价。可以看到,色散分别为正值和负值时,优化的相位调制深度具有相反的符号,说明时钟驱动信号具有相反的相位,从而使码元具有相反的啁啾分布,与相应的色散作用,使脉冲得到压缩。并且,

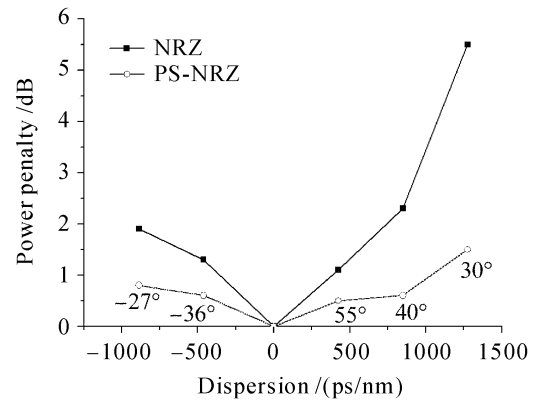


图5 非归零码与相位整形非归零码的功率代价随色散变化的曲线

Fig. 5 Dispersion dependence of power penalty of NRZ and PS-NRZ

链路的累积色散越大,优化的相位调制深度越小,与文献[6]中的分析和仿真结果一致。由于实验中采用的电吸收调制器存在少量残余啁啾,使得负色散点的最优相位调制深度略小于对应的正色散点。从功率代价曲线可以看出,对于不同的链路色散,相位整形非归零码均比非归零码具有更高的接收灵敏度,从而具有更小的功率代价。当链路色散的绝对值小于 1000 ps/nm 时,相位整形非归零信号的功率代价在 1 dB 以下。当色散上升到 1275 ps/nm 时,相位整形非归零码的功率代价为 1.5 dB 左右,远小于非归零信号的代价。而且,相位整形非归零码比非归零码的色散曲线更为平缓,表现出有良好的抗色散特性。需要说明的是,实验中,不同色散量对应的光纤长度和损耗不同,信号经掺铒光纤放大器放大后,产生的自发辐射噪声也有差别。因此,实验中测得的功率代价中除了色散引入的部分,还包含了少量自发辐射噪声导致的代价。但是,对于同一个色散点,非归零信号和相位整形非归零信号的噪声功率代价是相同的,不影响色散功率代价的比较。

相位整形非归零码的优良抗色散能力主要源于其发射端可调节的相位预调制,能与色散的作用相平衡,对于实际系统中复杂的链路状况和网络配置具有更强的适应性。例如在波分复用系统中,色散补偿光纤一般不能实现完全的色散斜率补偿,大部分信道具有或正或负的残余色散,在长距离传输时尤为明显。如果采用相位整形非归零码,可以对各个信道的相位调制器分别进行优化配置,最大限度地降低色散的影响。在链路状况未知的情况下,还可以根据传输性能(例如误码率)的测试结果来对发射端进行调整。另外,在系统的发射端进行相位预

调制, 无需改变链路配置, 实施简单方便。

4 结 论

实验研究了比特同步的相位预调制对信号的整型作用, 以及对非归零码传输性能的影响。10 Gb/s 的实验结果表明, 施加了比特同步相位预调制的非归零码比普通非归零码具有更高的接收灵敏度和更低的色散功率代价, 且最优的相位调制深度随链路色散的增加而减小。因此, 发射端的相位预调制可根据链路配置进行优化, 以获得最佳的传输性能。这种相位预调制方案可以减轻系统对光信噪比和色散管理的要求, 延长传输距离, 而且实施简单灵活, 便于对已有的非归零系统进行升级, 是一种较有前途的调制方案。在此基础上, 相位预调制信号的波形优化, 以及相位调制信号和数据信号之间的不同步对信号整型的影响, 均可作为进一步研究的内容。

参 考 文 献

- 1 M. I. Hayee, A. E. Willner. NRZ versus RZ in 10~40-Gb/s dispersion-managed WDM transmission systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8):991~993
- 2 Sun Xueming, Zhang Huijian, Zuo Meng *et al.*. Impacts of polarization mode dispersion and nonlinear effect on 40 Gbit/s dense wavelength division multiplexing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10):1363~1369
- 3 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
- 4 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
- 5 Yongcai Yang, Wolfgang Vogel. A novel modulation and direct detection scheme of optical phase shift keying [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3):128~130
- 6 Xin Chen, Bingkun Zhou, Hanyi Zhang *et al.*. Improvement of dispersion tolerance using phase-modulated NRZ signals in 40-Gb/s transmission systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1):37~39
- 7 Tomoki Saito, Naoya Henmi, Sadao Fujita *et al.*. Prechirp technique for dispersion compensation for a high-speed long-span transmission [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(1):74~76
- 8 A. I. Siahlo, L. K. Oxenløwe, K. S. Berg *et al.*. Using a phase modulator for improvement of the tolerance to second-order dispersion in a 160 Gb/s transmission system [C]. ECOC2003, Paper We 4. P. 105
- 9 N. S. Bergano, C. R. Davidson, F. Heismann. Bit-synchronous polarisation and phase modulation scheme for improving the performance of optical amplifier transmission systems [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(1):52~54