

文章编号: 0253-2239(2010)s100201

# 40 Gb/s 偏分复用差分四相移键控传输系统中新型电均衡技术的研究

林 密 张锦南 袁学光 张阳安 张明伦 黄永清

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 主要研究了利用接收机侧的电域均衡进行色散补偿的问题。相比其他均衡技术,最大似然序列估计(MLSE)均衡能够更好地减少由群速度色散、偏振模色散、光纤非线性等引起的功率代价。在 40 Gb/s 偏分复用归零差分四相移相键控(RZ-DQPSK)系统中,研究了基于传统 MLSE 均衡结合前馈式均衡(FFE)的新型均衡技术。实验结果表明,结合 FFE 的 MLSE 均衡有更高的色散容忍度,在没有任何光域补偿的条件下传输超过 280 km 依然可以保证误码率低于  $10^{-3}$ 。

**关键词** 光通信;电色散补偿;电均衡;前馈式均衡器;最大似然估计均衡

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201030.s100201

## A novel Electric Equalization in 40 Gb/s Pol-Mux RZ-DQPSK Transmission

Lin Mi Zhang Jinnan Yuan Xueguang Zhang Yangan Zhang Minglun Huang Yongqing

(Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** Investigation of the performance of electronic equalization applied to receiver in the optical communication systems is introduced. Compared with other digital equalizers, maximum likelihood sequence estimator (MLSE) equalizer seems to be the most promising candidate solution to mitigate impairments caused by chromatic dispersion (CD), polarization mode dispersion (PMD) and fiber's nonlinearity. The performance of a novel MLSE digital equalizer technology is analyzed and it is combined with feed-forward equalizer (FFE) receivers in optical 40 Gb/s polarization-multiplexed (Pol-Mux) RZ-DQPSK systems. The MLSE receiver combined with FFE technique can achieve a higher CD tolerance and a long haul transmission with 280 km without any optical dispersion compensation and meanwhile the bit error ratio (BER) of the receiver is less than  $10^{-3}$ .

**Key words** optical communications; electronic dispersion compensation (EDC); equalization; feed-forward equalizer (FFE); maximum likelihood sequence estimator (MLSE)

**OCIS codes** 060.4510; 060.5060; 070.4340

## 1 引 言

高速光传输系统受到多种损伤因素的影响,尤其是码间干扰(ISI)制约了光纤容量和传输距离的提高<sup>[1]</sup>。通过减少或补偿 ISI 是近年来光纤通信的重要研究方向。目前的数字调制格式中,差分四相

移相键控(DQPSK)调制具有非常窄的频谱宽度和较高的光谱利用率,还具有较大的色散(CD)容限、偏振模色散(PMD)容限和非线性容限<sup>[2,3]</sup>。通过使用平衡接收技术,接收灵敏度相比开关键控 OOK 调制能提高 3 dB。此外,归零(RZ)脉冲因其高接收

收稿日期: 2010-06-01; 收到修改稿日期: 2010-07-13

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z224)、高等学校学科创新引智计划(B07005)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0609)和北京邮电大学青年科研创新计划(2009RC0401)资助课题。

作者简介: 林 密(1985—),女,博士研究生,主要从事高速光通信方面的研究。E-mail:lmnice1985@gmail.com

导师简介: 黄永清(1963—),女,博士,教授,主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail:yqhuang@bupt.edu.cn

机灵敏度及较强的抗比特间串扰特性等优点,相比非归零(NRZ)调制具有一定的优势。在超大容量超长距离的光传输实验和系统中,归零差分四相移相键控(RZ-DQPSK)调制格式成为首选。因此,研究RZ-DQPSK调制格式的色散补偿有重要的意义。

在 40 Gb/s 以上系统中用电域均衡器实现电色散补偿技术在网络升级中极有价值。最大似然序列估计(MLSE)均衡器相比于其他均衡器复杂度高但是性能是最好的<sup>[4,5]</sup>。ISI 使得前后码元具有相关性,不再是独立的,MLSE 均衡器通过对码元序列作为一个整体来判决能够很好的消除 CD, PMD 和光纤克尔效应引起的 ISI,并且可以同步补偿多种失真<sup>[6,7]</sup>。

MLSE 均衡可以增加 ISI 相邻码的长度,增加维特比译码器中的状态数,进而增加准确度,减小误码,但是计算复杂度却与状态数成指数增加。本文针对偏分复用 RZ-DQPSK 的调制格式,提出了一种可在接收机中实现的新型均衡技术——MLSE 均衡

结合前馈式均衡(FFE)线性均衡的技术,并在 40 Gb/s 传输系统中与传统的 MLSE 均衡技术进行了比较。实验结果表明,MLSE 均衡器应用 FFE 后不仅具有较好的色散容忍度,还可以通过改变 FFE 的抽头数来降低 MLSE 均衡器中维特比译码器的实现复杂度。

## 2 系统平台

整个实验系统如图 1 所示。来自光源的连续光首先在马赫-曾德尔(M-Z)调制器中被 10 GHz 的正弦信号调制,得到占空比为 36% 的 RZ 脉冲。该信号通过另外一个 M-Z 调制器和一个调相器,分别进行  $\pi$  和  $\pi/2$  的相位调制,输出为 DQPSK 信号<sup>[8]</sup>。两路调制信号均为 10 Gb/s 的 NRZ 信号,它是由长度为  $2^{11}-1$  的伪随机序列信号发生器产生的。输出的 DQPSK 信号通过分束器分为两束,其中一束延迟 322 个符号后再经过偏振合束器合成为一路信号,实现偏分复用。

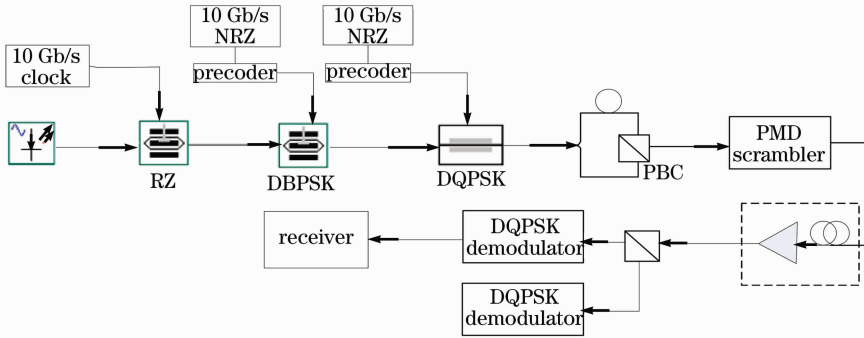


图 1 实验传输框图

Fig. 1 Experimental setup

在接收端,信号经过偏振分束器解偏分复用,然后经过一个带通滤波器,滤除掺铒光纤放大器(EDFA)带来的自发辐射噪声(ASE)。然后信号被一个 3 dB 光分路器分为两部分进行 DQPSK 解调。DQPSK 解调器主要由两个平行独立的 M-Z 干涉仪

和平衡接收器构成。两个干涉仪的下支路相位分别为  $+45^\circ$  和  $-45^\circ$ , 这样干涉仪的输出 DQPSK 的 I, Q 信号达到最理想状态。DQPSK 的解调器如图 2 所示。

平衡接收器出来的信号输入到接收机中,接收机包括一个前端滤波器,一个可变增益的放大器(AGC),一个 2 倍抽样速率的采样机,一个抽头数可选的 FFE 和一个状态数可选的 MLSE 均衡器。其中 MLSE 均衡器部分包括信道估计,模型建立和维特比译码器三个组成部分,具体结构框如图 3 所示。

在实验过程中,将 DQPSK 解调后输出的一路信号输入到 20 G samples/s 的数字存储滤波器(DSO)TDS s6804B 做离线处理。DSO 输入端的模数转换在 5.5 GHz 时有效位为 3.6 bit 并且带宽为 8 GHz,这样的带宽非常接近 10 GHz 信号的最优滤

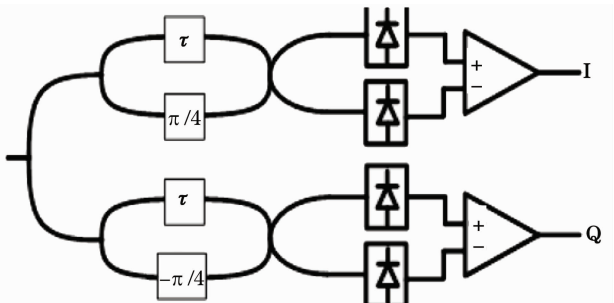


图 2 DQPSK 解调器

Fig. 2 DQPSK demodulation

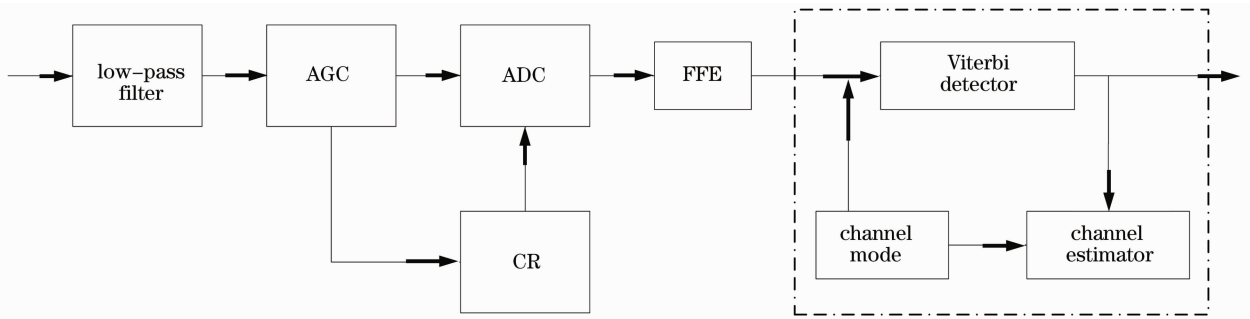


图 3 接收机结构框图

Fig. 3 Schematic diagram of receiver

波带宽。为了达到 2 samples/b 的要求,就需要 20 G samples/s 的速率去采样存储下来的信号,因此在时钟恢复上就需要用到数字滤波器和快速定时算法<sup>[9]</sup>。为了准确测试均衡器的性能,就需要发送大量的码元,要达到 95% 的精确度需要发送的码元数要比系统的误码率倒数高两个量级,这意味着要发送的码元数为  $10^5 \sim 10^7$ ,才能满足电均衡器的输出信号的误码率达到  $10^{-3} \sim 10^{-5}$ <sup>[10]</sup>。

### 3 结果分析

在实验中首先选用 4 态 MLSE 结合 4 抽头的 FFE,用示波器观察补偿前后的眼图,如图 4 所示。没有电均衡器时的眼图波形严重失真,而使用均衡器补偿后眼图重新睁开,信号失真得到明显地减轻。这说明了 MLSE 级联上 FFE 这种结构的均衡器可以对信号失真进行有效的补偿。

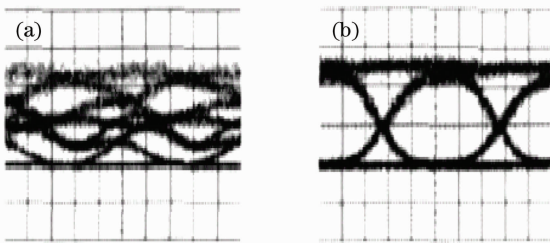


图 4 (a) 补偿前及(b)补偿后的眼图

Fig. 4 Eye diagram of (a) without compensation and (b) after compensation

首先设定系统光输入功率为 0 dBm,这样使得系统中的非线性效应最小化,从而可以忽略光纤非线性所造成的影响。图 5 是 4 态的 MLSE 均衡器结合不同抽头数的 FFE 传输 200 km 后的光信噪比(OSNR)-误码率(BER)  $n_{BER}$  的曲线图。首先观察最下面的曲线,在没有 FFE 时,经过 200 km 传输后的信号通过 4 态 MLSE 均衡器已经无法使误码率达到  $10^{-2}$  以下。级联上 FFE 后,误码率的性能得到

2 dB 以上的改善,而且可以随着抽头数的增加,误码率会越来越优化。当抽头数选取为 16 时,OSNR 达到 18 dB 对应的误码率已经低于  $10^{-4}$ 。

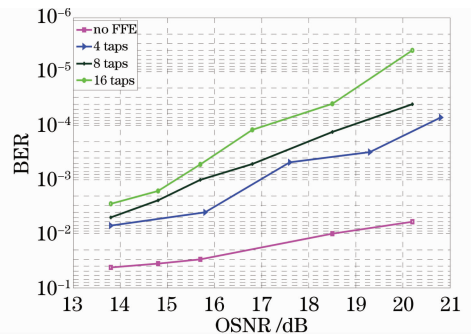


图 5 4 态的 MLSE 均衡器结合不同抽头数 FFE 传输 200 km 后的 OSNR-BER 的曲线

Fig. 5 OSNR-BER curves of different number of FFE taps for 4-state MLSE at 200 km

通过调整标准单模光纤和色散补偿光纤的长度使得系统中 CD 在 0~3600 ps/nm 范围内变化。同样在忽略光纤非线性条件下评估了均衡器对色度色散的补偿情况,其结果显示在图 6 中。显然,应用 FFE 后 MLSE 的性能有很大的提升。观察 4 态 MLSE 结合 4 抽头的 FFE 这条曲线,发现在对于没有偏振模色散时候 OSNR 仅仅需要达到 16 dB 就

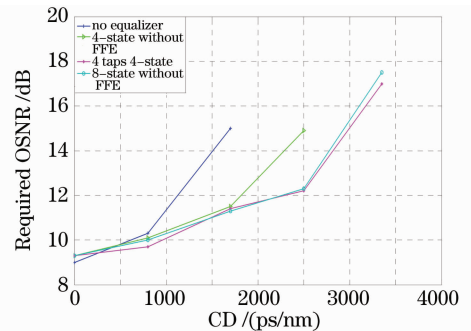


图 6 色散容忍度曲线

Fig. 6 OSNR at a function of chromatic dispersion to achieve a BER of  $10^{-3}$

可以对 3200 ps/nm 的色度色散进行补偿。另外,还可以发现 4 态 MLSE 结合 4 抽头的 FFE 和不带有 FFE 的 8 态 MLSE 的色散容忍度曲线在色度色散小于 3500 ps/nm 时几乎是一致的。

系统中没有任何补偿通过改变标准单模光纤长度,观察图 7 中均衡器对整个系统的失真和 ISI 的补偿情况。此时输入的光功率设定在 10 dBm,这样使得色度色散,偏振模色散,光纤的非线性等对信号损耗影响极其显著<sup>[11]</sup>。在图 6 中,选取了没有均衡器直接输出,不带 FFE 的 16 态 MLSE,以及结合 FFE 的 4 态 MLSE 和 16 态 MLSE 4 种情况进行比较。可以发现误码率在  $10^{-3}$  时,3 种均衡器的最大传输距离分别为 300,280 和 320 km 而没有均衡器直接输出下,误码率远大于  $10^{-3}$ 。

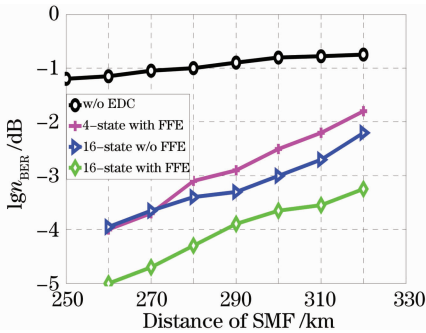


图 7 误码率和传输距离曲线

Fig. 7 BER measured as a function for transmission distance

## 4 结 论

结果表明,在 MLSE 均衡器之前应用 FFE 起到了非常显著的效果。这是因为 FFE 可以使得有色噪声转化为白噪声,同时它还可以滤除残余信道响应。因此在计算复杂程度相同的 16 态 MLSE 均衡器之前加上 FFE 这种结构的接收机相比没有 FFE 的接收机具有更好的性能。在 40 Gb/s 偏分复用 RZ-DQPSK 系统中,没有任何光域补偿传输超过 300 km 后结合 FFE 的接收机依然可以保证误码率低于  $10^{-3}$ ,这样再经过前向纠错码(FEC)可以让整个系统的误码率低于  $10^{-9}$ 。这充分证实了这种接收机可以很好地减小由 CD, PMD 以及光纤非线性

引起的信号损伤。另外结合 FFE 技术可以减少 MLSE 中维特比译码器的态数,降低计算的复杂度,更加便于实际硬件的实现。同样对于更高速率的系统例如 100 Gb/s 偏分复用的 DQPSK 中,结合 FFE 的 MLSE 均衡器也可以具有很好的色散补偿效果。

## 参 考 文 献

- G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics[M]. Jia Dongfang, Yu Xiahong et al. Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2002, 3~15
- G. P. Agrawal. 非线性光纤及其应用[M]. 贾东方, 余霞虹等译, 北京: 电子工业出版社, 2002, 3~15
- C. Wree, J. Leibrich, J. Eick et al.. Experimental investigation of receiver sensitivity of RZ-DQPSK modulation format using balanced detection[C]. OFC 2003. 2003, Paper ThE5
- Xu Wei, Duan Gaoyan, Zhang Xiaoguang 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, 张晓光 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
- Bernard Sklar. Digital Communications: Fundamentals and Applications [M]. Xu Pingping Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2002. 103~144
- 伯纳德. 数字通信: 原理及应用[M]. 徐平译. 北京: 电子工业出版社, 2002, 103~144
- John G. Proakis. Digital Communications [M]. Zhang Lijun, Zheng Baoyu Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2001, 431~508
- John G. Proakis. 数字通信[M]. 张力军, 郑宝玉等译. 北京: 电子工业出版社, 2001, 431~508
- Mohammad S. Alfiad, Fabian N. Hauske, Huug de Waardt et al.. Maximum-likelihood sequence estimation for optical phase-shift keyed modulation formats [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(20): 4583~4594
- Toscar E. Agazzi, Mario R. Hueda, Hugo S. Carrer. Maximum-like lihood sequence estimation in dispersive optical channels[J]. *JLT*, 2005, **23**(2): 749~762
- Weng Xuan, Zhang Xiaoguang, Xi Lixia et al.. Experimental research of adaptive PMD compensator for 20 Gb/s DQPSK system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 175~179
- 翁 轩, 张晓光, 席丽霞 等. 20 Gb/s 差分四相移键控系统偏振模色散自适应补偿实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 175~179
- M. Oerder. Digital filter and square timing recovery[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1988, **36**(5): 605~612
- Michel C. Jeruchim. Techniques for estimating the bit error rate in the simulation of digital communication systems[J]. *IEEE Journal on selected areas in Communications*, 1984, **2**(1): 153~170
- Xianming Zhu, Shiva Kumar, Srikanth Raghavan et al.. Nonlinear electronic dispersion compensation techniques for fiber-optic communication systems[C]. OFC 2008. 2008, Paper JWA56