

文章编号: 1001-3806(2018)01-0001-04

## 基于脉冲位置调制系统的偏振模色散监测方案

王梓骁, 罗风光\*, 李斌, 胡杭听, 杨帅龙

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了实现对脉冲位置调制传输系统光纤信道中偏振模色散的动态监测, 提出了一种新型偏振膜色散监测方案, 并基于监测原理构建了数学模型。该方案基于单边带内不同偏振信号相位差实现, 具有结构简单、易于实现、成本低等优点。结果表明, 本方案可以实现对光信号的差分群延时与偏振态的动态监测, 即当差分群延时在 0ps ~ 100ps 范围内时, 可准确监测; 同时证实了其信号速率关系较小, 能够适应不同速率的系统, 且可对脉冲位置调制传输系统的偏振模色散进行实时动态监测。该方案是一个高效可行的偏振模色散监测方案。

**关键词:** 光通信; 偏振膜色散监测; 光纤信道; 单边带; 相位差

**中图分类号:** TN929.11

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.01.001

### Monitoring scheme of polarization mode dispersion based on pulse position modulation system

WANG Zixiao, LUO Fengguang, LI Bin, HU Hangting, YANG Shuailong

(School of Optoelectronic and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to monitor polarization mode dispersion (PMD) of the fiber communication channel in a pulse position modulation (PPM) transmission system dynamically, a novel PMD monitoring method was proposed based on single sideband polarization phase difference detection technology, and the mathematical model of the method was built in accordance with monitoring principle. The structure of the method was simple, so it can be realized easily at very low cost. The simulation results indicate that the method can realize dynamic PMD monitoring including differential group delay (DGD) and polarization state of output light, and the technique can monitor DGD accurately in the range of 0ps to 100ps. It is proved that the operation of proposed PMD monitor method is independent of data rates, which shows the proposed method can satisfy the need of real time PMD monitoring for PPM transmission systems. It indicates that the proposed method is feasible and effective for PMD monitoring.

**Key words:** optical communication; polarization mode dispersion monitoring; fiber communication channel; single sideband; phase difference

## 引言

信息时代的到来,使得人们对于高速通信系统的要求越来越迫切。光通信系统凭借其高速率、大容量、低损耗、抗干扰、保密性强和材料来源充足等优势,在通信领域得到广泛应用。然而在超高速光传输链路中,偏振模色散(polarization mode dispersion, PMD)效应极大地限制了系统性能<sup>[1]</sup>。传统的 PMD 监测方案

无法满足高速传输链路的要求<sup>[2]</sup>,因此光性能监测成为一个热点问题<sup>[3-6]</sup>。PMD 监测解决方案可以分为主动式和被动式<sup>[7]</sup>。被动式主要是采用特殊的传输方式和高级调制格式等方式,提高系统的 PMD 容限,以尽量降低 PMD 效应对系统性能的影响;但被动式方案难以起到良好的监测效果,故而研究者多采用主动式补偿方案。

由于 PMD 是随机变化的,并且对于环境变化十分敏感,因此必须进行动态补偿才能达到理想的效果。对实时的 PMD 动态监测的研究具有重要的意义。大多 PMD 补偿方案都是基于反馈调节以实现动态的补偿,这使得 PMD 补偿变得异常复杂。基于反馈调节补偿的 PMD 补偿方案主要有:频谱分析法、眼图法、相位差法、副载波导频法等<sup>[8-13]</sup>。频谱分析法分为单频法和频带法,前者不适用于传输速率较高的传输系统;后

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61471179; 61301226);国家八六三高技术研究发展计划资助项目(2015AA016904)

作者简介:王梓骁(1991-),男,硕士研究生,主要从事光通信网相关技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: fgluo@mail.hust.edu.cn

收稿日期:2017-03-24;收到修改稿日期:2017-04-01

者通用性差,升级困难。眼图法缺点是当信号的误比特率较低时,对差分群延时探测的灵敏度不足,难以适应高速链路下 PMD 监测的要求。相位差法监测范围较小,对较大的 PMD 或者较小的 PMD 难以进行有效监测。副载波调制法是基于性能最差的信道进行补偿,因此对于其它信道补偿效果难以保证。

本文中研究的主要目的是进行链路 PMD 实时监测,以此给动态补偿提供补偿<sup>[14-15]</sup>依据。因此作者提出了一种基于单边带频谱内不同偏振信号相位差的 PMD 监测方案,针对脉冲位置调制 (pulse position modulation, PPM) 系统的 1 阶 PMD 进行实时监测。仿真结果表明,该方案对于 PMD 的实时监测,受链路速率的影响较小,适应性较好,且该方案结构简单、对器件性能要求低、监测范围相对较广、能有效降低 PMD 实时监测的成本。

### 1 PMD 监测原理

图 1 为 PMD 对可调谐激光器<sup>[16]</sup>产生的光信号的脉冲影响示意图。PMD 会造成不同偏振信号间的时延,进而使脉冲展宽,最终降低系统传输性能。在高速通信系统中,1 阶 PMD 效应是造成的传输性能劣化的主要原因,因此本文中针对 1 阶 PMD 效应的监测提出了一种有效的方案。PMD 效应对信号的影响主要是改变信号的相位值,通常情况下,会用光纤中不同偏振信号的群时延差来表示光纤中 PMD 的大小,即差分群延时 (differential group delay, DGD)。基于单边带频谱内不同偏振信号相位差的 PMD 监测方案,其原理为通过计算不同偏振光信号的相位差值,以实现 PMD 监测的目的。

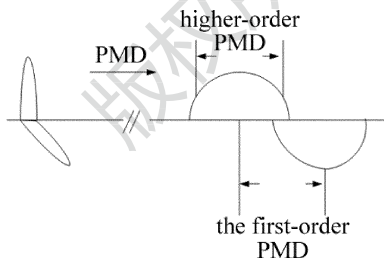


Fig. 1 The impact of PMD on optical signal

本文中所提出的监测系统原理如图 2 所示。首先通过马赫-曾德尔调制器将产生的 PPM 调制信号调制到光载波上,然后使用 PMD 模拟器对信号加载 DGD,以模拟 PMD 对信号的影响。再通过偏振分离器 (polarizing beam splitter, PBS) 分离出快轴 (F 轴)、慢轴 (S 轴) 的光信号,使信号被探测器接收。探测器输出的电信号最终被分成两路,分别与 I 路和 Q 路的本振射频信号混频,并通过低通滤波器 (low-pass filter, LPF)

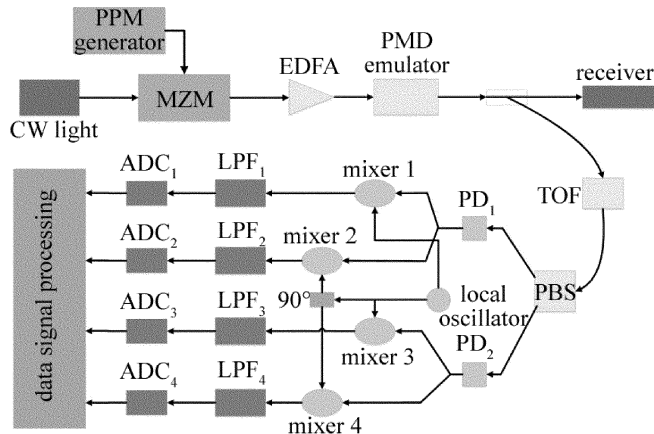


Fig. 2 PMD monitoring system for PPM signal

滤出下混频信号,最后经模数转换 (analog to digital converter, ADC) 后,将采样数据输入数字信号处理 (digital signal processing, DSP)。通过 DSP 对信号进行处理,最终计算出 F 轴偏振信号与 S 轴偏振信号的相位差  $\Delta\varphi$ 。由于系统的 DGD 与  $\Delta\varphi$  线性相关,因此,最终可以实现对 PMD 的监测。

由 PMD 效应所造成的不同偏振方向信号的相位差  $\Delta\varphi$  为<sup>[1]</sup>:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_S - \Delta\varphi_F = \arctan\left(\frac{I_{QS}}{I_{IS}}\right) - \arctan\left(\frac{I_{QE}}{I_{FE}}\right) \quad (1)$$

式中,  $\Delta\varphi_S$  是慢轴信号与载波间的相位差,  $\Delta\varphi_F$  是快轴信号与载波间的相位差,  $I_{IS}$  是 S 轴电信号与 I 路本振射频信号混频后信号的幅值,  $I_{QS}$  是 S 轴电信号与 Q 路本振射频信号混频后信号的幅值,  $I_{FE}$  是 F 轴电信号与 I 路本振射频信号混频后信号的幅值,  $I_{QE}$  是 F 轴电信号与 Q 路本振射频信号混频后信号的幅值。

### 2 仿真实验与分析

基于 OPTISYSTEM 14 和 MATLAB 2014a 对本方案进行仿真。仿真系统首先通过脉冲位置调制信号产生器生成 PPM 信号,然后通过马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM) 将信号调制到光域上,产生调制光信号。调制光信号先通过掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 实现增益,以应对之后链路中的功率衰减,并掺入噪声。然后通过 PMD 模拟器加载不同的差分群延时值,模拟 PMD 对光信号的影响。之后光信号通过可调光滤波器,选取对应信道的单边带光谱。最后,可调光滤波器所滤出的光信号,通过 PBS 来实现不同偏振信号的分离。分离后不同偏振的信号分别与本振射频信号混频,通过 LPF 滤出下混频信号,最后将采样数据输入 MATLAB,计算出 F 轴偏振信号与 S 轴偏振信号的相位差  $\Delta\varphi$ 。

#### 2.1 10Gbit/s 传输链路的仿真实验

10Gbit/s 速率下仿真实验系统关键参量如下:连

续光源的中心频率设定为 193.1THz, 线宽为 10MHz, 发射功率为 3dBm; EDFA 增益设置为 20dB; 可调谐滤波器的半波带宽为 10GHz; 本振射频信号频率为 3GHz; 低通滤波器 3dB 截止频率为 10MHz; PMD 模拟器加载的色度色散为 85ps/nm, 并分别加载不同的 DGD。可以通过观测不同差分群延时下的 PPM 系统性能, 以及所测得的  $F$  轴与  $S$  轴信号的相位差来验证本方案的正确性。

图 3 为接收端在不同 DGD 值下的眼图。图 4 为不同 DGD 值对应的系统最大  $Q$  值曲线图。根据眼图可知, 系统传输性能随着 DGD 值的增大不断变差。当 DGD 值为 0ps 时, 眼图的眼开度很高, 表示此时系统传输性能良好。当 DGD 值不断增大后, 眼开度不断变小, 说明 PMD 效应对 PPM 信号性能的影响越来越强。根据  $Q$  值曲线图, 总体上看, 系统最大  $Q$  值随着 DGD 值的增大而减小, 且在 DGD 处于 15ps 至 30ps 间迅速下降; 随后  $Q$  值减小的速度放缓, 当 DGD 值为 60ps 时, 系统最大  $Q$  值降为 0, 此时的系统传输性能已经很差了。

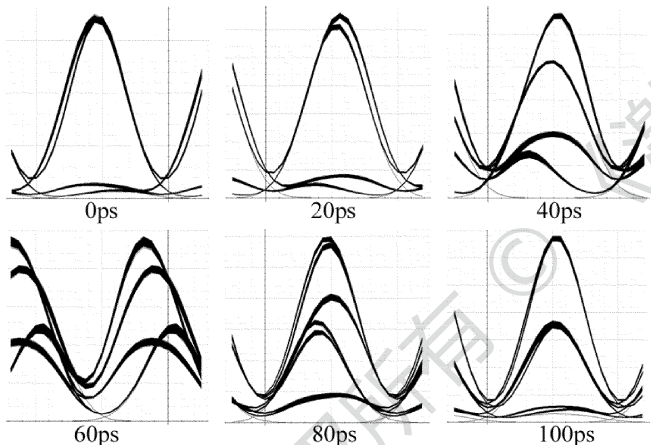


Fig. 3 Eye diagram of different DGD at the rate of 10Gbit/s

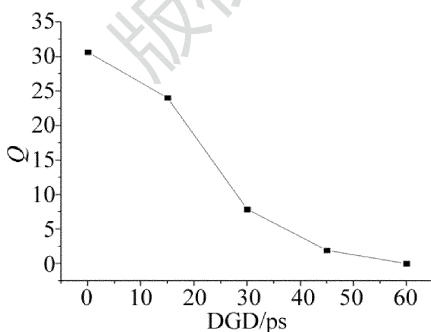


Fig. 4  $Q$  vs. DGD at the rate of 10Gbit/s

图 5 为不同 DGD 下  $F$  轴与  $S$  轴相位差  $\Delta\varphi$  绝对值的曲线。虽然相位差  $\Delta\varphi$  的符号反映的是  $F$  轴与  $S$  轴中哪个轴的信号滞后的情况, 但在实际应用中,  $F$  轴和  $S$  轴是难以分辨的。因此选取 PBS 的一个输出轴作为参考, 将其视作  $F$  轴, 并以此计算相位差, 取相位

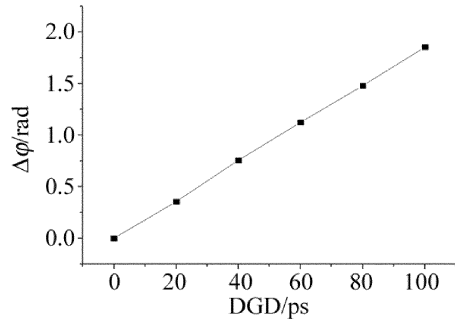


Fig. 5  $\Delta\varphi$  vs. DGD at the rate of 10Gbit/s

差  $\Delta\varphi$  的绝对值进行分析即可。前面对于 PMD 监测的原理分析提到了,  $\Delta\varphi$  与 DGD 线性相关。由图可知,  $\Delta\varphi$  的绝对值随着 DGD 的增大近似线性递增, 与理论相符。这表明, 本方案可以实现对 0ps ~ 100ps 范围内 PMD 的监测。

### 2.2 40Gbit/s 传输链路的仿真实验

40Gbit/s 速率下仿真实验系统的关键参量如下: 连续光源的中心频率设定为 193.1THz, 线宽为 10MHz, 发射功率为 3dBm; EDFA 增益设置为 20dB; 可调谐滤波器的半波带宽为 10GHz; 本振射频信号频率为 3GHz; 低通滤波器 3dB 截止频率为 10MHz; PMD 模拟器加载的色度色散为 10ps/nm, 并分别加载不同的 DGD。

图 6 为接收端在不同 DGD 值下的眼图。图 7 为不同 DGD 值对应的系统最大  $Q$  值曲线图。很明显,

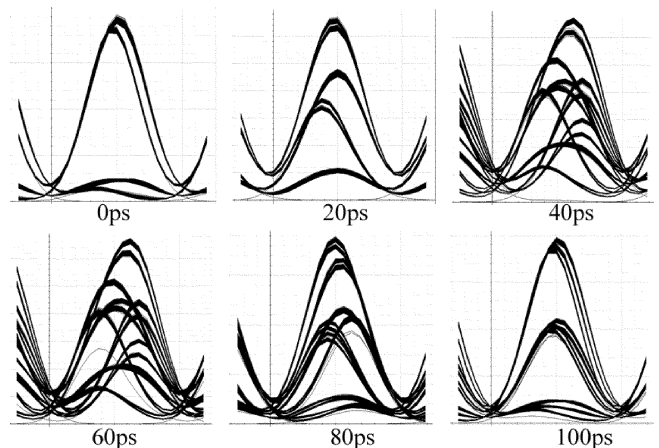


Fig. 6 Eye diagram of different DGD at the rate of 40Gbit/s

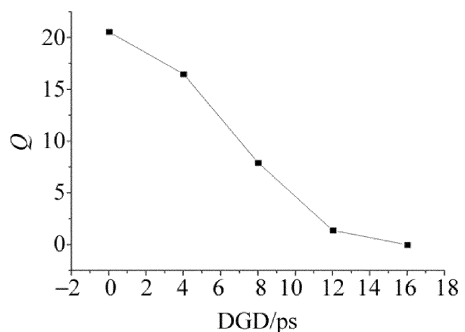


Fig. 7  $Q$  vs. DGD at the rate of 40Gbit/s

在相同 DGD 值下,40Gbit/s 系统眼图的品质均不如 10Gbit/s 系统,这表明在速率更高的条件下,PPM 信号传输性能更容易受色散的影响。由  $Q$  值曲线可知,40Gbit/s 链路的系统最大  $Q$  值始终随 DGD 的增大快速下降。当 DGD 为 16ps 时,系统最大  $Q$  值已降为 0。以上现象说明,40Gbit/s 传输链路的性能劣化速度要远远大于 10Gbit/s 传输链路。这是因为随着传输速率的增大,系统的色散容限会相应减小。

图 8 为不同 DGD 下  $F$  轴与  $S$  轴相位差  $\Delta\varphi$  绝对值的曲线。由图可知, $\Delta\varphi$  的绝对值随着 DGD 的增大几乎线性增加,其线性程度依然保持得较好。这说明本方案受 PPM 传输速率影响较小,适用性广,可以实现不同传输速率系统的 PMD 在线监测。

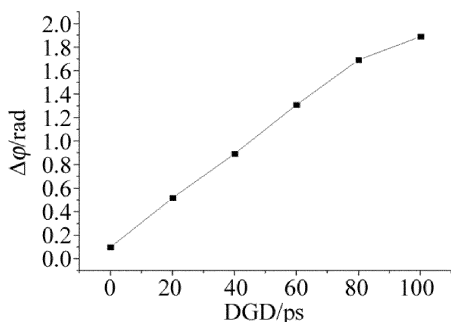


Fig. 8  $\Delta\varphi$  vs. DGD at the rate of 40Gbit/s

### 3 结 论

提出了针对 PPM 调制信号的偏振模色散监测方案,对其基本原理进行了分析,并进行了仿真验证与实验分析。该方案采用单边带频谱内两个偏置信号的位相差来测量光纤链路中的 PMD,可以实现范围在 0ps ~ 100ps 内的 PMD 监测。因为实际情况下,链路中的 PMD 不会无限累加,故本方案可以监测大部分情形下的 PMD,而且其实现过程相对简单,无需加载额外信号,对器件性能要求较低,测量结果受信号速率影响较小,适应性好。本方案能实现针对 PPM 系统的实时动态监测。

#### 参 考 文 献

[1] LI B. Investigation of dispersion monitoring technology for ultra-high speed optical transmission link [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 75-102 (in Chinese).  
 [2] ZHANG L, CHRISTEN L C, ZHANG B, *et al.* Polarization-mode dispersion monitoring for phase-modulated signals using DGD-generated interferometric filter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 150-152.

[3] DENG N, CHAN C K, CHEN L K. A hybrid OTDM scheme with enhanced demultiplexing performance [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(19):1454-1456.  
 [4] ZHAO J, CHEN L K, CHAN C K. A novel re-modulation scheme to achieve colorless high-speed WDM-PON with enhanced tolerance to chromatic dispersion and re-modulation misalignment [C]// Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. New York, USA: IEEE, 2007:1-3.  
 [5] LEE J H, YOSHIKANE N, TSURITANI T, *et al.* In-band OSNR monitoring technique based on link-by-link estimation for dynamic transparent optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(10):1217-1225.  
 [6] LEE J H, GUO H, TSURITANI T, *et al.* Field trial of all-optical networking controlled by intelligent control plane with assistance of optical performance monitors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(2):94-100.  
 [7] GRUPP W. Monitoring requirements for optical transparent networks [C]// Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference. New York, USA: IEEE, 2006:OWN5.  
 [8] FLORIDIA C, SIMÕES G C, FERES M M, *et al.* Simultaneous optical signal-to-noise ratio and differential group delay monitoring based on degree of polarization measurements in optical communications systems [J]. Applied Optics, 2012, 51(17):3957-3965.  
 [9] YANG J, YU C, CHENG L, *et al.* CD-insensitive PMD monitoring based on RF power measurement. [J]. Optics Express, 2011, 19(2):1354-1359.  
 [10] BUCHALI F, BAUMERT W, BULOW H, *et al.* A 40Gb/s eye monitor and its application to adaptive PMD compensation [C]// Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. New York, USA: IEEE, 2002:202-203.  
 [11] LI Z, LI G. In-line performance monitoring for RZ-DPSK signals using asynchronous amplitude histogram evaluation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(3):472-474.  
 [12] KOZICKI B, TAKUYA O, HIDEHIKO T. Optical performance monitoring of phase-modulated signals using asynchronous amplitude histogram analysis [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(10):1353-1361.  
 [13] JARGON J A, WU X, WILLNER A E. Optical performance monitoring by use of artificial neural networks trained with parameters derived from delay-tap asynchronous sampling [C]// Optical Fiber Communication—Includes Post Deadline Papers, 2009. New York, USA: IEEE, 2009:1-3.  
 [14] HE Ch, LUO F G, LI B. Dispersion measuring technique based on second order lowest power of radio frequency signal [J]. Laser Technology, 2017, 41(2):169-173 (in Chinese).  
 [15] CAO X. Optimization of dispersion compensation in optical fiber communication systems [J]. Laser Technology, 2014, 38(1):101-104 (in Chinese).  
 [16] HU J B, LI M P. Design of novel tunable semiconductor lasers in optical fiber communication systems [J]. Laser Technology, 2016, 40(2):280-283 (in Chinese).