

## 高非线性光纤中并行交叉相位调制的偏振模色散监测方法

刘 博,常俊德,忻向军

(北京邮电大学 电子工程学院 信息光电子与光通信国家重点实验室,北京 100876)

**摘 要:** 利用信号光和插入的连续泵浦光之间产生的交叉相位调制(XPM)效应,提出了一种基于并联的 XPM 效应来监测光相位调制信号的一阶偏振模色散(PMD)的新技术。泵浦光的光谱会随着信号光中 PMD 和色散(CD)的变化而发生变化,所以导致泵浦光的光功率发生变化,在并联的一个支路中抑制 PMD 的影响,利用并联的两路同一波段泵浦光功率的差值来进行监测。仿真结果显示,新的技术可以实现对 40 Gb/s 非归零差分四相移相键控(NRZ-DQPSK)光信号从 0~20 ps 的监测。在 20 ps 的监测范围内,新技术的动态范围大于 3 dB,可以用来进行准确的监测。对信号速率、色散、泵浦光功率和滤波器带宽对新技术的影响做了详细的研究。

**关键词:** 偏振模色散; 光性能监测; 交叉相位调制; 光功率差值

**中图分类号:** TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0934001

## Polarization mode dispersion monitoring utilizing parallel cross-phase modulation in a highly nonlinear fiber

Liu Bo, Chang Junde, Xin Xiangjun

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Electronic Engineering,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** A first-order Polarization Mode Dispersion (PMD) monitoring technique for phase-modulated optical signals was proposed utilizing the cross-phase modulation (XPM) effect between the input signal and the inserted continuous-wave probe in parallel connection. Because of accumulation of PMD, the XPM effect in nonlinear fiber leads to variation of pump phase. This can cause spectrum broadening resulting in variation of pump power. The technique can suppress the influence of PMD in one branch of the two signals in parallel connection. Then the difference of the two pump power at the same band was used to monitor PMD. The simulation shows that the technique can monitor PMD of 40-Gb/s non-return-to-zero differential quadrature phase-shift keying (NRZ-DQPSK) from 0–30 ps. The dynamic range over 3 dB can be used in accurate monitoring compared to existing methods. Study of the effect of signal rate, CD, pump power and filter bandwidth on the new technique was conducted in detail.

**Key words:** polarization mode dispersion; optical performance monitoring; the cross-phase modulation; difference of optical power

收稿日期:2016-01-05; 修订日期:2016-02-03

基金项目:国家自然科学基金(61425022,61522501,61307086,61475024,61275158,61201151,61275074,61372109)

作者简介:刘博(1987-),男,硕士生导师,博士,主要从事融合网络方面的研究。Email:bo@bupt.edu.cn

## 0 引言

光性能监测在未来的光通信系统中起着非常重要的作用<sup>[1]</sup>。未来的光网络注重的是网络的可重构性,如何实现实时动态的监测对网络中的补偿和均衡起着重要的作用<sup>[2]</sup>。

随着光纤通信系统中传输速率的不断提高,偏振膜色散(PMD)对传输系统性能的影响变得尤为突出,会导致光信号脉冲在传输过程中不断展宽而使系统的传输质量迅速恶化<sup>[3]</sup>,如何准确的监测 PMD 是实现实时动态的 PMD 补偿和提高传输质量的关键。在传统的电-光-电通信系统中,对 PMD 的监测技术主要集中在电域进行,监测的响应时间过长,无法满足高传输速率的要求<sup>[4]</sup>。现今监测技术主要要求有响应时间、监测范围、灵敏度和可靠性等<sup>[5]</sup>。

光信号的一些非线性效应由于响应时间快和产生效果明显等特性,如四波混频(FWM)、自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)等,已经被用于光信号的性能监测方面<sup>[6-7]</sup>。应用非线性效应进行监测主要体现在两个方面:一方面,利用光信号自身由于产生非线性效应而出现的效应进行监测,如自相位调制效应<sup>[8]</sup>;另一方面,利用探测信号与光信号产生非线性效应在探测信号上出现的效应进行监测,如四波混频<sup>[9]</sup>。在此基础上,文中提出了基于并联交叉相位调制效应的光域偏振膜色散监测方法,一方面要比单独一路利用 XPM 效应的监测的范围更大;另一方面,监测的灵敏度上有明显的提升,可以更加可靠的实现 PMD 的监测。

在文中提出了一种新的监测技术,将信号光分成并联的两路信号,将其中一路信号进行 PMD 抑制的处理,然后两路信号分别与泵浦光耦合一起输入高非线性光纤中。由于交叉相位调制效应,改变 CD 和 PMD 的大小会使泵浦光的光功率也发生变化,通过滤波器滤出产生 XPM 较强的波段,并用光功率计(PM)测其功率值,然后将两路功率值的差值用作监测 PMD。实验对 40 Gb/S 的 DQPSK 信号进行了研究,实现了信号的实时动态的监测,动态范围大于 3 dB 的监测范围可以达到 20 ps。文中对所提出新的监测技术的几个重要影响因素也进行了研究。仿真结果显示,新的技术可以用于更高速率光相位调制信号的性能监测。

## 1 原理与装置

### 1.1 原理

方程(1)和(2)是发生交叉相位调制时两个信号的耦合的非线性薛定谔方程。

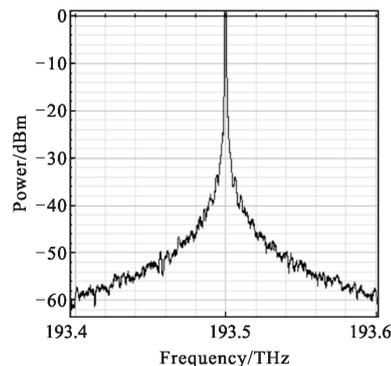
$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{\partial A_1}{\partial t} + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{\alpha_1}{2} A_1 = i\gamma_1(|A_1|^2 + 2|A_2|^2)A_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{\partial A_2}{\partial t} + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{\alpha_2}{2} A_2 = i\gamma_2(|A_2|^2 + 2|A_1|^2)A_2 \quad (2)$$

式中: $A_1$ 和 $A_2$ 分别表示信号光和泵浦光信号的脉冲振幅; $v_{g1}$ 和 $v_{g2}$ 代表群速度; $\beta_{21}$ 和 $\beta_{22}$ 代表群速度色散系数; $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 代表损耗系数; $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ 代表非线性参量。

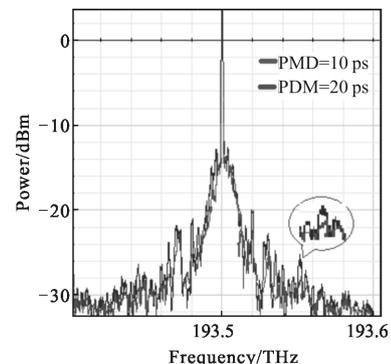
从两个方程中可以得出:当信号光的脉冲发生展宽时,信号光的脉冲宽度 $A_1$ 会发生变化,这会导致最终方程解中泵浦光的脉冲振幅 $A_2$ 发生改变。的监测方法充分的利用了这个振幅变化过程,将色散和偏振膜色散对信号光脉冲宽度的影响反映到泵浦光上,通过测量泵浦光的变化来实现偏振膜色散的监测。

图 1 展示了提出的对高速相位调制光信号监测



(a) 输入前的光谱图

(a) Spectrum before pump is injected in HNLF



(b) 输入后的光谱图

(b) Spectrum after pump is injected in HNLF

图 1 泵浦光输入 HNLF 前后的光谱图

Fig.1 Spectrum before and after pump is injected in HNLF

技术中所用到的基本依据。图 1(a)是泵浦光注入高非线性光纤之前的光谱,图 1(b)是从高非线性光纤输出的泵浦光光谱。从图(b)中可以看出,只改变PMD的大小时,在产生明显的 XPM 的波段,泵浦光的光功率发生明显的变化。

实验中,将 40 Gb/s NRZ-DQPSK 光信号均分成两路,其中的一路进行 PMD 抑制处理,然后两支路信号分别与相同的泵浦光一起注入到高非线性光纤中。由于信号光中 CD 和 PMD 的积累,在非线性光纤中产生交叉相位调制效应时会导致泵浦光的相位发生变化,从而引起泵浦光的光谱发生展宽,以至于泵浦光光功率发生变化。由于并联的两路信号采用了不同的处理方式,所以在 HNLF 的输出端相同的泵浦光波段处的光功率值不同,用两支路功率计测得的功率值的变化量(即差值)来进行监测。将有抑制 PMD 一路的功率值记为  $PM_1$ ,另一路功率值记为  $PM_2$ ,相对变化的光功率值为  $PM_2 - PM_1$ 。在实验的时候,在一定的范围内通过改变 PMD 的大小,可以看到  $PM_2 - PM_1$  值随 PMD 的增加发生有规律的变化,就用这种一定范围内的规律变化来监测 PMD。新的技术在监测过程中没有单纯的忽略掉 CD 的影响,而是尽量通过两路的差值来减小 CD 对监测技术的影响,这样可以大大提高新技术的实用性。

### 1.2 装置

图 2 展示了文中所提出的监测技术的实验装置。

40 Gb/s NRZ-DQPSK 的光信号采用双平行马赫增德尔调制器(DP-MZM)产生,连续激光器的中心频率为 193.3 THz,脉冲波形产生器(PPG)产生 20 Gb/s 的非归零(NRZ)的伪随机序列(PRBS)电信号,为 DP-MZM 提供数据和其反码数据信号,调制后的两路光信号以  $\pi/2$  的相移相加。CD 模拟采用不同长度的标准单模光纤(SMF)实现。PMD 模拟通过改变群时延来模拟一阶偏振模色散。自发辐射噪声(ASE)由掺铒光纤放大器(EDFA)和偏正控制器(PC)产生。经过滤波的光信号和放大后的泵浦光(中心频率  $f_p = 193.5$  THz)一起注入高非线性光纤(HNLF)。HNLF 的长度为 2 km,非线性参数和色散斜率分别为  $11.5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  和  $0.045 \text{ ps/nm}^2$ 。偏振膜抑制(PMD suppression)采用基于反馈信息的多个偏振控制模块级联抑制方法,通过光信号的偏振度去调整偏振控制器以实现 PMD 的抑制<sup>[10]</sup>。这里应该说明的是:该 PMD 补偿方法并不是一步直接完成的,而是通过循环回路去不断调整信号的偏振度来进行偏振模色散的补偿的,以达到实验中抑制 PMD 的目的。通过偏振度是无法准确的测量出信号偏振膜色散的值,所以文中监测方法的关键在于能够实时的监测出偏振膜色散的准确值。信号可调谐光滤波器(TOF)的作用是根据不同的信号速率( $v_b$ )去调整滤波器的中心频率。根据多次的实验和理论依据,交叉相位调制效应在泵浦光的  $f_p \pm 40 \text{ GHz}$  波段处对 PMD 的变化比较

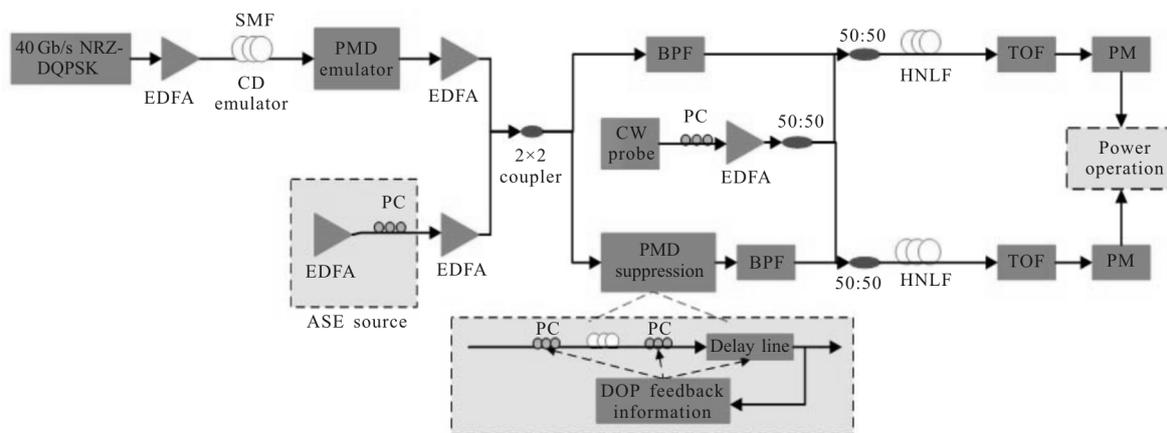


图 2 在 HNLF 中利用并联的 XPM 效应监测 PMD 的装置

Fig.2 PMD monitoring setup utilizing the XPM effect in parallel connection in HNLF

敏感,所以设置 TOF 的中心频率分别为  $f_p \pm v_b$ 。

## 2 结果与讨论

图 3 展示了对于速率分别为 20 Gb/s 和 40 Gb/s 的 DQPSK 光信号,TOF 中心频率分别为  $f_p - v_b$  和  $f_p + v_b$  时光功率值随 PMD 值的变化曲线。从图中可以看出,随着信号速率的改变,光功率值的变化范围和动态范围都会发生变化。对于同一速率的信号光,TOF 中心频率为  $f_p + v_b$  时滤出的泵浦光波段的功率变化比较稳定和平滑,并且具有较大的监测和动态范围,所以在实验时将 TOF 的中心频率设置为  $f_p + v_b$ 。

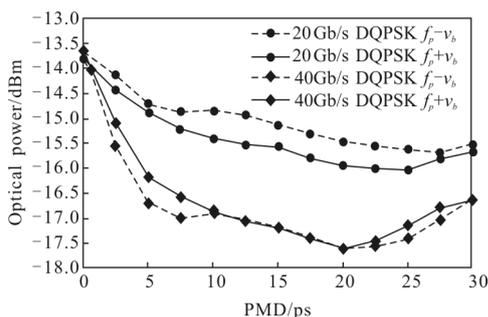


图 3 TOF 中心频率分别为  $f_p - v_b$  和  $f_p + v_b$  时的光功率值随 PMD 值的变化

Fig.3 Pump power varies with PMD value when center frequency of TOF is  $f_p - v_b$  and  $f_p + v_b$

图 4 展示了在同一调制格式下,速率分别为 20 Gb/s、40 Gb/s 和 80 Gb/s 时相对变化的光功率值随 PMD 变化的映射关系。实验装置上,在只改变信号速率时,TOF 的中心频率  $f_p + v_b$  也会随之变化,滤波带宽仍然设置为 15 GHz。从图中可以看出,光信号的

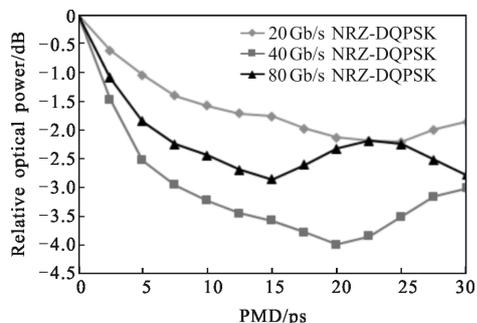


图 4 同一调制格式下,对于不同速率的光信号,新的 PMD 监测技术的监测范围和动态范围

Fig.4 Monitoring range and the dynamic range of new PMD monitoring technique for signals of different rates at the same modulation format

速率过低时,新的监测技术的动态范围小于 3 dB,不利于 PMD 的监测;同时随着光信号的速率的提高,新的监测技术的监测范围和动态范围都会逐渐减小。然而从图中可以看出,新的技术对于更高速率的相位调制信号是有潜力的。

图 5 展示了在泵浦光功率分别为 2 dBm、5 dBm 和 10 dBm 时,相对变化的功率值随 PMD 的变化曲线。每次实验时,EDFA 都保持同样的放大参数,使得注入 HNLf 的光功率值维持在 12 dBm。对于 XPM 效应,在增强泵浦光功率时,产生的 XPM 效应会加强。从图中可以看出,泵浦光功率太小时产生的 XPM 效应不明显,使得功率的变化范围过小,不利于监测。随着泵浦功率逐渐接近信号功率,功率的变化范围会有所增大,但是提高泵浦功率所付出的成本和对装置的要求过高。综合考虑,在实验时将泵浦光功率设置在 5 dBm。

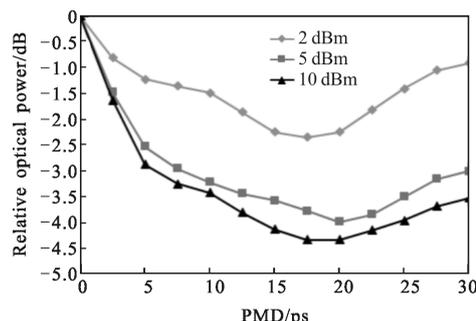


图 5 改变注入 HNLf 的泵浦光功率时,新的 PMD 监测技术的监测范围和动态范围

Fig.5 Monitoring range and dynamic range of the new PMD monitoring technique when optical power of input HNLf changes

图 6 展示了在 TOF 的滤波带宽分别 10 GHz、

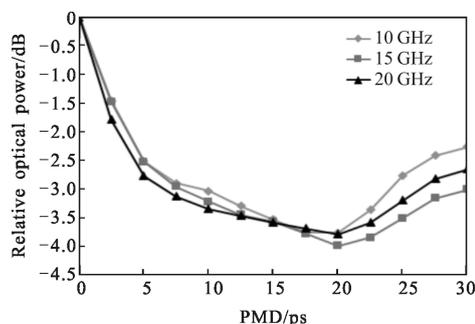


图 6 改变 TOF 的滤波带宽时,新的 PMD 监测技术的监测范围和动态范围

Fig.6 Monitoring range and dynamic range of the new PMD monitoring technique when filter bandwidth of TOF changes

15 GHz 和 20 GHz 时, 相对变化的光功率值随 PMD 的变化曲线。从图中可以知道, 改变 TOF 的带宽对于新技术的影响不大, 监测范围在 20 ps 以内时没有明显的改变, 在监测范围在 20~30 ps 时会稍微的减小功率的变化范围, 该实验装置将 TOF 的滤波带宽设置在 15 GHz。

图 7 展示了在 CD 的值分别为 20 ps/nm、50 ps/nm 和 100 ps/nm 时, 相对变化的光功率值随 PMD 的变化曲线。对于相位调制信号, 在发生 XPM 效应时, CD 和 PMD 都会引起泵浦光的光谱展宽和功率变化, 所以对于不同的 CD 值有不同的监测结果。从图中可以看出, 当 CD 的值过大时, 由于 CD 所引起的展宽也会变大, 此时由于 PMD 所引起的变化通过 XPM 效应将表现的不明显。如图, 当 CD 为 100 ps/nm 时, 新的监测技术的监测范围为 0~15 ps, 动态范围为 2 dB。所以, 新的技术对于 CD 有一定的容忍度, CD 过大时将不利于信号性能的监测。

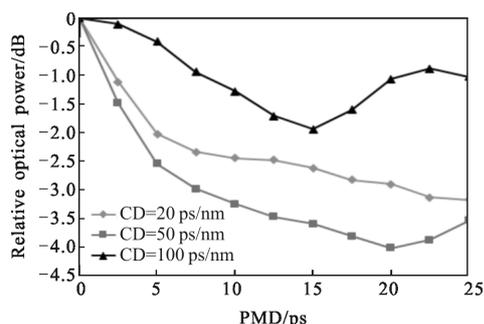


图 7 在不同 CD 值时, 新的 PMD 监测技术的监测范围和动态范围

Fig.7 Monitoring range and dynamic range of the new PMD monitoring technique when CD changes

### 3 结论

通过实验装置讨论和分析了所提出的新的 PMD 监测技术, 即一种基于并行的交叉相位调制效应来监测光相位调制信号的一阶偏振模色散(PMD)技术。新技术采用对两路不同处理方式所得到的光功率取差值的方法, 在实时动态监测 PMD 的同时, 将 CD 的影响也考虑在内, 提高了新技术的可实用性。新的技术对于 40 Gb/s NRZ-DQPSK 光信号, 可以实现 0~20 ps 的监测范围和大于 3 dB 的动态范围。监测的结果展示出了新的技术对于 80 Gb/s NRZ-

DQPSK 和更高速率的相位调制信号是有潜力的。

### 参考文献:

- [1] Pinart C, Cugini F, Filippo Cugini, et al. Challenges and requirements for introducing impairment-awareness into the management and control planes of ASON/GMPLS WDM networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44 (12): 76-85.
- [2] Tang J M, Alan Shore K, Lane P M. High-speed transmission of adaptively modulated optical OFDM signals over multimode fibers using directly modulated DFBs [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(1): 429-441.
- [3] R Shafiq, SenS Basak, Pritam Sen, et al. Analysis and simulation of polarization mode dispersion effects on high bit-rate fiber-optic transmission system [J]. *Electrical & Computer Engineering (ICECE)*, 2012: 43-46.
- [4] 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.
- [5] Grupp W. Monitoring requirements for optical transparent networks [C]// Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2006,10(1):3.
- [6] Betti S, Giaconi M. Analysis of the cross-phase modulation effect in WDM optical systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(1): 43-45.
- [7] Dewanjee A, Islam M S, Mehjabin S M, et al. Impact of cross-phase and self-phase modulation on the performance of a multispan WDM system [J]. *Communications (MICC)*, 20098(2):285-289.
- [8] Lu Guowei, Xie Chongjin, Yuen Chingkuet al. Enhanced PMD monitoring with frequency-resolved SOP rotation by self-phase modulation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(9): 2180-2182.
- [9] Huh J Y, Chung Y C. Simultaneous monitoring technique for OSNR and PMD based on four-wave mixing in SOA [C]// Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008,30(10): 1-3.
- [10] Hok Yong Pua, K Peddanarappagari, Zhu Benyuan, et al. An adaptive first-order polarization-mode dispersion compensation system aided by polarization scrambling: theory and demonstration [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(6): 832-841.