

基于射频功率谱的偏振模色散监测技术

黄海丽 席丽霞 张晓光 赵东鹤 张霞

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 基于偏振模色散(PMD)监测是光性能监测(OPM)中的一项关键技术。提出一种利用射频(RF)功率谱中功率极小值对应的频率值监测链路中 PMD 的方法。通过在接收端级联一段具有较大差分群时延(DGD)的保偏光纤(PMF)以及一个偏振控制器(PC)来实现在 RF 谱低频区域内监测 PMD,并进行了相应的理论分析和数值仿真。结果表明,此方法可以实现对一阶偏振模色散的精确监测,监测误差在 ± 3 ps 以内,且不受光信噪比(OSNR)、色散(CD)和传输速率的影响,同时此方法适用于多种调制格式的不同信号的 PMD 监测。通过改变接收端 PMF 中 DGD 的大小,可以满足对 PMD 监测范围和灵敏度的不同要求。

关键词 光通信;偏振模色散监测;射频功率谱;差分群时延

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1106004

Polarization Mode Dispersion Monitoring Technique Based on Radio Frequency Power Spectrum

Huang Haili Xi Lixia Zhang Xiaoguang Zhao Donghe Zhang Xia

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

Abstract Polarization mode dispersion (PMD) is a key technology in optical performance monitoring (OPM). A PMD monitoring method based on measuring the frequency of the minimum power of radio-frequency (RF) spectrum is proposed. By cascading a polarization maintaining optical fiber (PMF) with large differential group delay (DGD) and a polarization controller (PC) at the receiver, the PMD can be monitored in low frequency of RF spectrum, and relevant theoretical analysis and numerical simulation are also proceeded. The results demonstrate that this method can monitor first order PMD precisely with low monitoring error in ± 3 ps. In addition, it is insensitive to the optical signal-to-noise ratio (OSNR), chromatic dispersion (CD) and transmission rate. Varying the DGD in the PMF at the receiver, this method has different monitoring ranges and sensitivities.

Key words optical communications; polarization mode dispersion monitoring; radio frequency power spectrum; differential group delay

OCIS codes 060.4510; 060.2300; 060.2420

1 引言

随着光纤通信系统传输速率的提高,偏振模色散(PMD)、色散(CD)和非线性等因素对系统性能的影响越来越明显,需要对这些参数进行实时动态的监测^[1-3],光性能监测技术(OPM)也就应运而生。由于 PMD 的随机特性,对其监测尤其困难,因

此,PMD 监测成为 OPM 技术中的难题之一。

目前已有的 PMD 监测技术有眼图分析^[4]、幅度直方图分析^[5-6]、异步延时抽头抽样技术^[7]、偏振度(DOP)测量^[2]、射频(RF)分析技术^[3]等。前三种技术是在电域通过一定算法对接收信号进行数字信号处理来获取 PMD 信息,但是这三种技术测量灵

收稿日期: 2013-05-17; 收到修改稿日期: 2013-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(61205065)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110005110014)、山东省自然科学基金(ZR2010FM043)

作者简介: 黄海丽(1991—),女,硕士研究生,主要从事光性能监测方面的研究。E-mail: huangl23hl@sina.com

导师简介: 席丽霞(1973—),女,博士,副教授,主要从事光通信系统信号损伤恢复方面的研究。

E-mail: xilixia@bupt.edu.cn(通信联系人)

灵敏度低并且对调制格式依赖性强;DOP 测量方法是通过测量接收端信号的 DOP 值来估计 PMD,该方法与信号的脉冲宽度密切相关而且监测范围相对较小;RF 分析技术需要事先通过学习得到不同 PMD 时信号对应的 RF 功率,随后根据监测到的功率值找出对应的 PMD,监测范围与信号传输速率和光信噪比(OSNR)有关,不适合灵活的光网络监测。

本文提出了一种通过分析 RF 谱中功率最小值所对应的频率位置来监测 PMD 的方法,并进行了理论分析和仿真实验。

2 基本原理

接收端光电转换后的 RF 功率谱密度可以表示为^[8]

$$P(f) = K(f)[1 - 4\gamma(1 - \gamma)\sin^2(\pi f \Delta\tau)] \times P_0(f), \quad (1)$$

式中 $P_0(f)$ 为发射端信号所对应的射频谱密度, γ 和 $\Delta\tau$ 分别为光信号在两个偏振主态(PSPs)方向上的分光比和差分群时延(DGD), $K(f)$ 反映了 CD 对功率谱的影响,在幅度调制(AM)和相位调制(PM)信号中 $K(f)$ 分别为^[9]

$$K_{AM}(f) \propto m^2 \cos^2(\pi D_{total} \lambda^2 f^2 / c), \quad (2)$$

$$K_{PM}(f) \propto J_0^2(A) J_1^2(A) \sin^2(\pi D_{total} \lambda^2 f^2 / c), \quad (3)$$

式中 D_{total} 为信号中的总色散, λ 为工作波长, c 为真空中光速, m 和 A 分别为 AM 和 PM 信号的调制深度, J_0 、 J_1 分别为零阶和一阶第一类贝塞尔函数。

由(1)式可以看到,信号 RF 谱分布与 CD 和 PMD 密切相关。在 $f = (2n + 1)/(2 \times \Delta\tau)$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) 处,RF 功率具有极小值,特别是 $\gamma = 0.5$ 时,极小值为 0,因此可以通过测量 RF 功率最小值所对应的频率来监测信号中的 DGD。选取 $f = 1/(2 \times \Delta\tau)$ 为本方法监测 PMD 所需的频率,记为 f_{PMD} 。然而,由(1)~(3)式可知,CD 同样会导致 RF 功率出现极小值。如果 CD 和 PMD 导致的 RF 功率极小值所对应的频率相互交叉在一起,将无法正确测出 PMD 值。因此需要把两者 RF 功率极小值所对应的频率范围区分开来。若链路中的 CD 取值范围为 $100 \sim 10000$ ps/nm,计算可知其导致的 RF 功率极小值的频率范围为 $35.3 \sim 2.5$ GHz。为了保证 PMD 的正确监测和节约成本,采用 $0 \sim 2$ GHz 的 RF 谱监测范围,此时监测的 DGD 要高达 250 ps 以上,但是链路中的 DGD 一般为几十皮秒。为此在接收端的 PMD 监测模块中级联一段具有较大 DGD 的保偏光纤(PMF)^[10],使 f_{PMD} 处于监测频率范围之内,如图 1 所示。

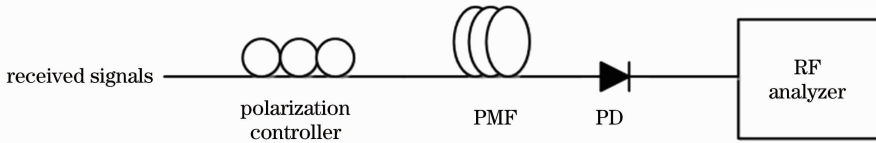


图 1 PMD 监测模型

Fig. 1 PMD monitoring module

设光纤链路中的 DGD 为 $\Delta\tau_{monitored}$, $\Delta\tau_{monitored} = 1/(2 \times f_{PMD})$, PMF 中 DGD 为 $\Delta\tau_{PMF}$, 级联后总 DGD 为 $\Delta\tau_{total}$ 。根据级联双折射光纤数值模型^[11], 可以得到

$$\Delta\tau_{total}^2 = \Delta\tau_{PMF}^2 + \Delta\tau_{monitored}^2 + 2\Delta\tau_{PMF} \Delta\tau_{monitored} \cos \varphi, \quad (4)$$

式中 φ 为两偏振主态之间的夹角,调节偏振控制器可以改变其大小^[12],从而改变 $\Delta\tau_{total}$ 的值,使得接收信号 RF 谱中 f_{PMD} 的位置发生改变。当 f_{PMD} 达到最大值 f_{PMD}^{max} 时, $\Delta\tau_{total}$ 的值达到最小,即

$$\Delta\tau_{total}^{min} = \Delta\tau_{PMF} - \Delta\tau_{monitored}. \quad (5)$$

同理,对应最小值 f_{PMD}^{min} , $\Delta\tau_{total}$ 达到最大值,即

$$\Delta\tau_{total}^{max} = \Delta\tau_{PMF} + \Delta\tau_{monitored}. \quad (6)$$

(5)式和(6)式联立可以解得

$$\Delta\tau_{monitored} = (\Delta\tau_{total}^{max} - \Delta\tau_{total}^{min})/2, \quad (7)$$

$$\Delta\tau_{PMF} = (\Delta\tau_{total}^{max} + \Delta\tau_{total}^{min})/2. \quad (8)$$

因此,本方法可以监测出链路中的一阶 PMD,并且同时可以监测出 $\Delta\tau_{PMF}$ 。本监测 PMD 的方法只与 RF 谱中功率极小值所对应的频率有关,而噪声、比特率与调制格式并不影响 RF 谱中 f_{PMD} 的位置,所以监测不受噪声、比特率与调制格式的影响。

3 验证系统框图

搭建如图 2 所示的仿真系统,以验证监测方案的有效性。信号的传输速率有 10、20、40、100 Gb/s,调制格式有开关键控(OOK)、差分相移键控(DPSK)、差分四相相移键控(DQPSK)。掺铒光纤放大器(EDFA)提供放大自发辐射(ASE)噪声源,通过可调衰减器(VOA)改变 ASE 噪声输出功率以改变 OSNR。偏振控制器用来控制信号的偏振态以 45°

进入 PMD 模拟器, 对应信号受 PMD 损伤最严重的情况。CD 模拟器用于验证不同 CD 情况下对 PMD

监测结果的影响。PMD 监测模块详见图 1 所示。

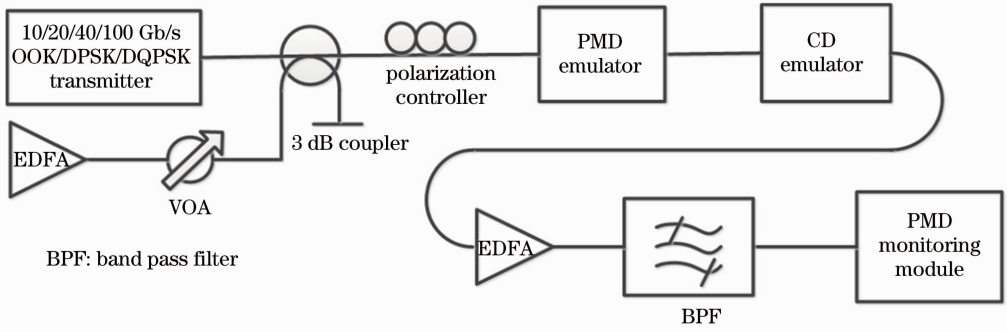


图 2 PMD 监测系统框图

Fig. 2 Diagram of PMD monitoring module

4 结果与分析

4.1 RF 功率谱

选取 OSNR 为 18 dB 的 40 Gb/s DQPSK 信号, 经 PMD 模拟器后进入 PMD 监测模块, 其中 PMF 的 DGD 为 380 ps, PMD 模拟器的 DGD 为 50 ps。调节

PMD 监测模块中的偏振控制器, 得到 f_{PMD} 对应最大值和最小值时的 RF 谱, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出 $f_{\text{PMD}}^{\text{max}}$ 和 $f_{\text{PMD}}^{\text{min}}$ 分别为 1.516 GHz 和 1.167 GHz, 根据(7)式和(8)式可计算出 $\Delta\tau_{\text{monitored}} = 49.3 \text{ ps}$, $\Delta\tau_{\text{PMF}} = 379.1 \text{ ps}$, 可见本方法用于 DGD 监测的误差很小。

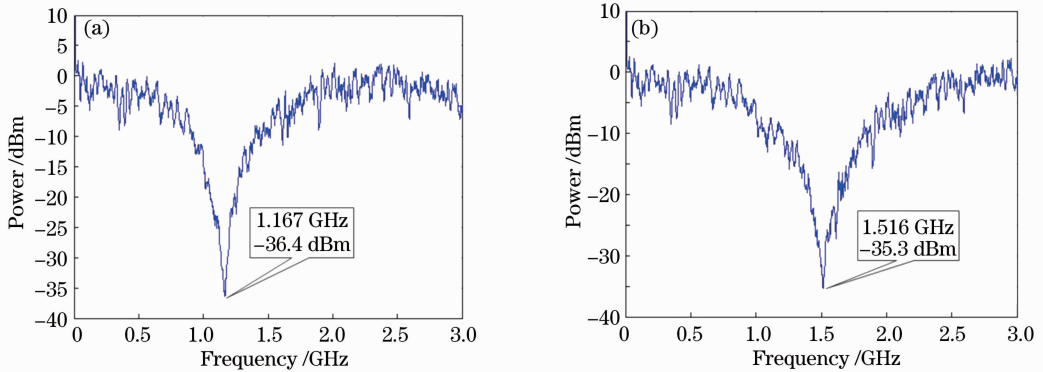


图 3 PMF 中 DGD 为 380 ps, 待测 DGD 为 50 ps 的信号 RF 谱。(a) 总 DGD 最大; (b) 总 DGD 最小

Fig. 3 RF spectra of the signal with the PMF's DGD of 380 ps and measured DGD of 50 ps. (a) Largest total DGD; (b) least total DGD

4.2 PMF 的 DGD 取值范围对监测结果的影响

为了避免 CD 和 PMD 的交叉影响, 需要选择合适的 RF 谱监测范围, 并通过级联一段 PMF 使得 f_{PMD} 在此范围内。PMF 光纤中 DGD 的大小直接决定了 PMD 的测量范围及灵敏度。

选取 RF 谱的监测范围为 0~2 GHz, 所对应的最大 f_{PMD} 要小于 2 GHz, 则总的 DGD 要大于 200 ps。若要监测到 $\Delta\tau_{\text{monitored}}$ 的 DGD, 那么 PMF 中 DGD 的最小值应取为 $200 \text{ ps} + \Delta\tau_{\text{monitored}}$ 。定义 $\Delta\tau_{\text{monitored}}$ 改变每秒 f_{PMD} 的改变值为 PMD 的监测灵敏度, 其在 $\Delta\tau_{\text{monitored}}$ 监测范围内的平均值为平均监测灵敏度。图 4(a) 为不同 $\Delta\tau_{\text{PMF}}$ 情况下 $\Delta\tau_{\text{monitored}}$ 监测范围与监测灵敏度的关系, 可以看出, $\Delta\tau_{\text{PMF}}$ 取值越大, 监

测范围越大, 但灵敏度随之减小。图 4(b) 分析了 $\Delta\tau_{\text{PMF}}$ 取值与监测范围和平均灵敏度的关系, 监测范围与 $\Delta\tau_{\text{PMF}}$ 成正比, 监测范围越大, 平均灵敏度越小。因此可以根据对监测范围和灵敏度的要求, 选取不同长度的 PMF。本文选取 $\Delta\tau_{\text{PMF}}$ 为 350 ps, 此时, 监测范围为 0~100 ps, 平均灵敏度约为 3.2 MHz/ps。

4.3 其他因素对 PMD 监测的影响

选取 $\Delta\tau_{\text{PMF}}$ 为 350 ps, 测量不同 CD、OSNR 及传输速率情况下 DQPSK 系统的 PMD 值, 结果分别如图 5~7 所示, 对 OOK、DPSK、DQPSK 三种不同调制格式下 PMD 的监测结果如图 8 所示, 并给出了不同影响因素下 $\Delta\tau_{\text{monitored}}$ 为 20 ps 和 80 ps 时信

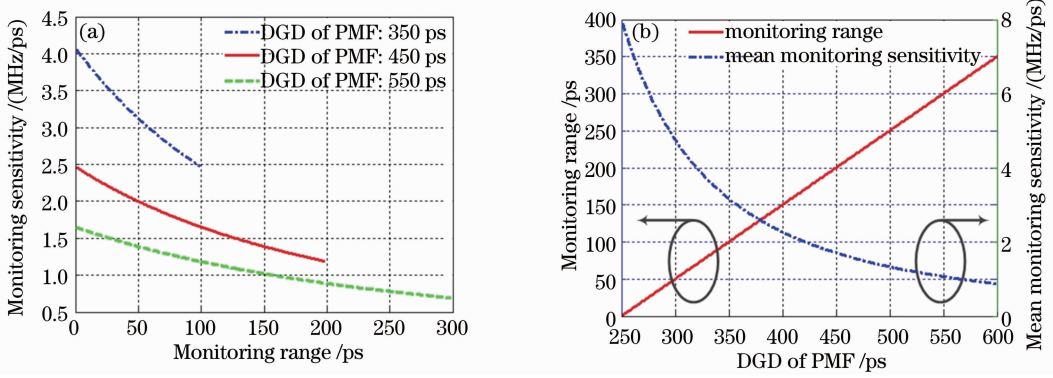


图 4 (a) PMF 中 DGD 为 350、450、550 ps 时 PMD 监测范围随监测灵敏度的变化；(b) DGD 监测范围和平均监测灵敏度随 PMF 中 DGD 的变化

Fig. 4 (a) Monitoring sensitivity versus monitoring range when DGDs of PMF are 350, 450, 550 ps, respectively; (b) DGD monitoring range and mean sensitivity versus DGD of PMF

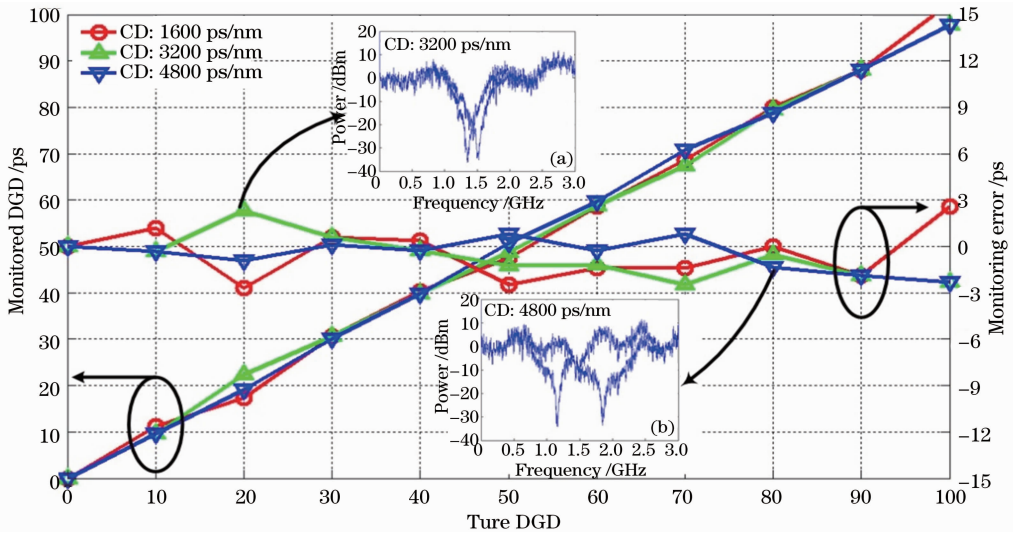


图 5 不同 CD 条件下的 DGD 监测结果和监测误差

Fig. 5 Monitored results and monitoring errors of DGD under different CDs

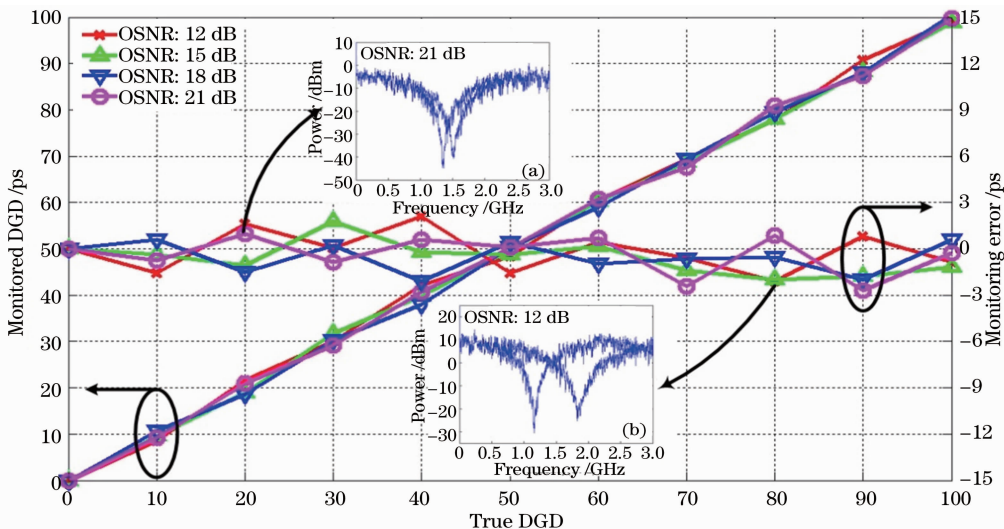


图 6 不同 OSNR 条件下的 DGD 监测结果和监测误差

Fig. 6 Monitored results and monitoring errors of DGD under different OSNRs

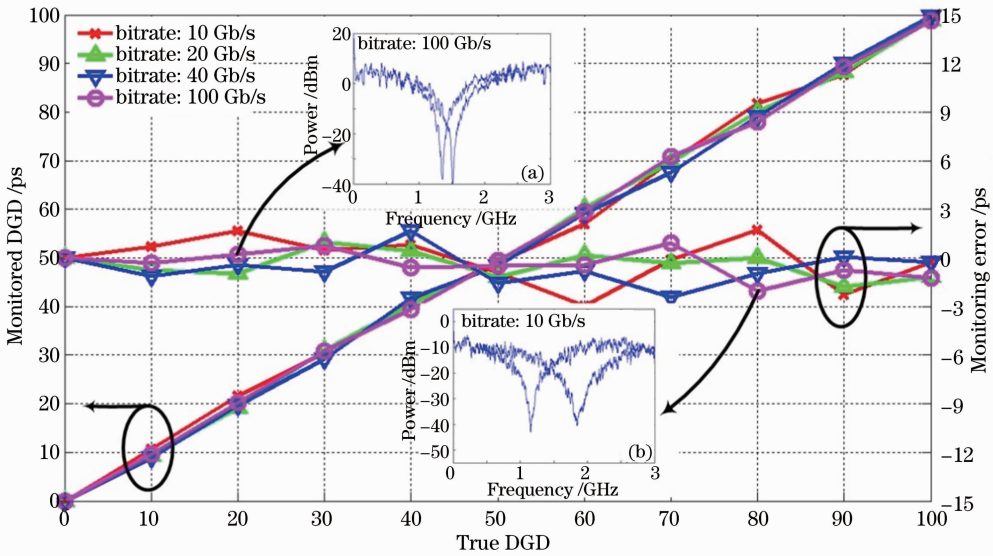


图 7 不同比特率条件下的 DGD 监测结果和监测误差

Fig. 7 Monitored results and monitoring errors of DGD under different bitrates

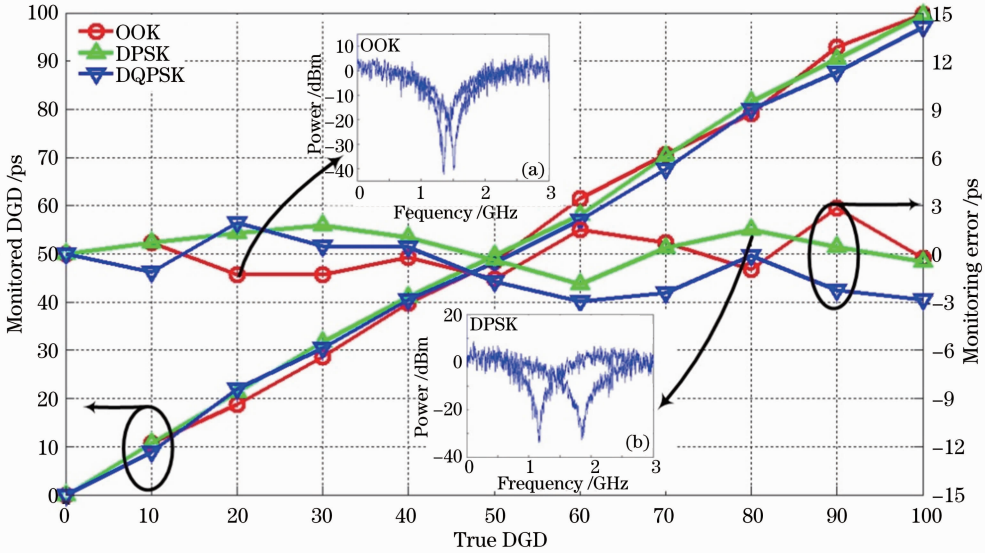


图 8 不同调制条件下的 DGD 监测结果和监测误差

Fig. 8 Monitored results and monitoring errors of DGD under different modulation formats

号的 RF 谱。可以看到,传输环境改变时,信号的 RF 谱也发生改变,但是这些因素对 f_{PMD} 的值并没有产生影响,因此 DGD 监测不受这些因素的影响,并且监测误差都在 ± 3 ps 内。

5 结 论

利用 RF 功率谱中功率最小值所对应的频率监测链路中偏振模色散,理论分析与仿真结果均表明该方法可以实现对一阶 PMD 的监测,监测误差在 ± 3 ps 以内,并且不受 CD、OSNR、传输速率及调制格式的影响。通过改变 PMF 中 DGD 的值,可以满足对 PMD 监测范围和灵敏度的要求。因此,该技

术可应用于灵活光网络中的 PMD 监测。

参 考 文 献

- 1 Chi Jianfeng, Li Tangjun, Jia Nan, *et al.*. High-precision chromatic dispersion management completes 160 Gb/s OTDM signal 100-km stable error-free transmission [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0105003.
- 2 池剑锋,李唐军,贾楠,等.高精度色散管理实现 160 Gb/s 光时分复用信号 100 km 稳定无码传输[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105003.
- 3 Claudio Florida, Glauco C C P Simões, Mariana M Feres, *et al.*. Simultaneous optical signal-to-noise ratio and differential group delay monitoring based on degree of polarization measurements in optical communications systems [J]. Appl Opt, 2012, 51(17): 3957-3965.
- 3 Jing Yang, Changyuan Yu, Linghao Cheng, *et al.*. CD-

- insensitive PMD monitoring based on RF power measurement [J]. *Opt Express*, 2011, 19(2): 1354–1359.
- 4 F Buchali, W Baumert, H Bulow, *et al.*. A 40 Gb/s eye monitor and its application to adaptive PMD compensation [C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 2002. 202–203.
- 5 Zhihong Li, Guifang Li. In-line performance monitoring for RZ-DPSK signals using asynchronous amplitude histogram evaluation [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(3): 472–474.
- 6 Bartłomiej Kozicki, Ohara Takuya, Takara Hidehiko, *et al.*. Optical performance monitoring of phase-modulated signals using asynchronous amplitude histogram analysis [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(10): 1353–1361.
- 7 Jeffrey A Jargon, Xiaoxia Wu, Alan E Willner, *et al.*. Optical performance monitoring by use of artificial neural networks trained with parameters derived from delay-tap asynchronous sampling [C]. *Optical Fiber Communication*, 2009. 1–3.
- 8 Ning Liu, Wende Zhong, Yangjing Wen, *et al.*. PMD and chirp effects suppression in RF tone-based chromatic dispersion monitoring [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(5): 673–675.
- 9 K J Park, C J Youn, J H Lee, *et al.*. Performance comparisons of chromatic dispersion-monitoring techniques using pilot tones [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(6): 873–875.
- 10 Jiang Nuan, Li Zhizhong, Yang Huayong, *et al.*. Birefringence analysis of polarization maintaining fiber and research on characteristic of all-fiber beat-length experimental systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0706003.
姜 暖, 李智忠, 杨华勇, 等. 保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法比对研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0706003.
- 11 M Wegmuller, S Demma, C Vinegoni, *et al.*. Emulator of first- and second-order polarization-mode dispersion [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(5): 630–632.
- 12 Zhang Qiye, Zhu Yong, Su Yang, *et al.*. Research on the polar blind zone of the fiber squeezer polarization controller [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506001.
张启业, 朱 勇, 苏 洋, 等. 光纤挤压型偏振控制器的“极地盲区”问题研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506001.

栏目编辑: 王晓球