

文章编号: 1001-3806(2017)02-0169-05

基于射频信号 2 阶零功率的链路色散测量技术

贺 成, 罗风光*, 李斌

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

摘要: 为了适应高速率大色散光纤信道对链路色散的精确补偿要求, 研究并提出了一种基于射频信号 2 阶零功率点的信道色散测量方案。采用信号两边带的位相差来测量光纤链路中的色散值, 通过在发射端加载射频信号, 可以得到接收端射频信号功率大小随链路色散值的周期性变化关系, 从仿真光纤链路色散随射频信号频率的变化曲线获得接收端射频信号 2 阶零功率点位置。结果表明, 基于射频信号 2 阶零功率的信号测量方案色散测量误差可控制在 $\pm 10\text{ps/nm}$ 范围内。相较于 1 阶零功率点, 基于射频信号 2 阶零功率点信道色散测量方案可满足高速率、长距离大色散光纤信道对色散值的精确测量需求。

关键词: 光通信; 色散测量; 光纤信道; 射频信号; 2 阶零功率

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2017. 02. 004

Dispersion measuring technique based on second order lowest power of radio frequency signal

HE Cheng, LUO Fengguang, LI Bin

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

Abstract: In order to meet the need of precise compensation of chromatic dispersion in optical fiber link with long distance and high bit rate, channel dispersion measurement technique based on second order lowest power of radio frequency (RF) signal was studied and demonstrated. The chromatic dispersion in optical fiber link was measured by the phase difference between RF signals that loaded to two sidebands of spectrum. By loading RF signal on the transmitter, the periodic relationship between the power of RF signal in the receiver and optical fiber dispersion was obtained. The position of second lowest RF signal power was gotten by simulation of relationship curve between the power of RF signal in the receiver and optical fiber dispersion. The results show that, the dispersion measuring error in this system is in the range of $\pm 10\text{ps/nm}$. Comparing with the technique based on first order lowest power of RF signal, dispersion measuring technique based on second order lowest power of RF signal can satisfy the need of measuring large fiber dispersion for high chromatic dispersion value.

Key words: optical communication; dispersion measurement; fiber channel; radio frequency signal; second order lowest power

引言

信息社会的发展, 特别是物联网概念的构想对信号的传输速率与传输距离提出了更高的要求, 相应信道内的模内色散对信道内传输信号的影响进一步增大。在非归零码 (non-return to zero, NRZ) 传输格式下, 10Gbit/s 传输速率的光信号在 1550nm 信道内的容

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: 贺成 (1990-), 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: 2016-03-14; 收到修改稿日期: 2016-04-05

忍色散为 1250ps/nm, 40Gbit/s 传输速率信号的容忍色散为 65ps/nm, 而 100Gbit/s 信号则进一步减小到 10ps/nm^[1]。因此, 为了实现高速信号在长距离光纤信道中的传播, 需要精确测量信道内的色散, 以便实现进一步的色散补偿^[2-4]。

目前国内外已经提出了多种技术方法来实现信道内色散的测量^[5-16]。信道内色散测量的一般思路为探测与链路色散相关的物理量, 然后计算提取信道的色散信息。其中, 基于畸变非对称波阵面的色散测量技术已经被研究分析^[5], 该方案无需在发射端增加导频信号, 但需要复杂的时钟恢复系统与高速位相比较器, 增加了系统的复杂度以及设备成本。分析信号的频谱可以得到信道内的色散信息, 如基于单边带频谱相位差探测的色散测量技术^[6] 和基于双边带频谱相位差

探测的色散测量技术^[7],可实现光纤信道色散的在线实时测量,但只适用于幅度调制的传输系统中;另外,可利用光纤内的自相位效应和交叉相位效应来探测链路内的色散^[8-9],但该类测量方式与信号的调制格式以及速率相关。采用电域^[10-12]即基于数字信号处理(digital signal processing, DSP)的数字信号自相关频谱分析的色散测量方法可以利用成熟的 DSP 技术,设备成本较低,只是该算法的测量误差较大。

本文中采用的基于射频(radio frequency, RF)2 阶零功率点的信道色散测量技术可实现高速率、大色散光纤链路系统内色散的测量,色散测量误差可控制在 $\pm 10\text{ps/nm}$ 范围内。并且该技术需要的系统复杂度低、设备成本低,能够满足大部分工程实际应用的需求,预期可得到广泛应用。

1 工作原理

图 1 所示为基于射频信号 2 阶零功率点的信道色散测量工作原理图,射频信号频率为 f_{RF} 。由色散产生机制可知,光纤链路中的色散效应影响信号频谱的相位,并且调制光信号频谱上下双边带受到的作用不同。如图 1a 所示,入射端信号(中心频率为 λ_0)频谱两边带的位相相同,则边带频率 $\lambda_0 - f_{\text{RF}}$ 与频率 $\lambda_0 + f_{\text{RF}}$ 处幅度相同;经过光纤链路色散效应以后,如图 1b 所示,接收端信号频谱两边带的位相存在一个位相差 $\Delta\varphi_{\text{RF}}$ 。当 $\Delta\varphi_{\text{RF}} = (2m + 1)\pi$ ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$) 时,两边带频率 $\lambda_0 - f_{\text{RF}}$ 与 $\lambda_0 + f_{\text{RF}}$ 处的幅度恰好相反,此时接收端探测到的射频信号功率理论值为零,即射频信号的零功率点。因此,可以通过提取探测后射频信号功率谱来实现光纤链路中色散的测量。探测得到的射频信号功率与光纤链路色散的关系式如下所示^[17]:

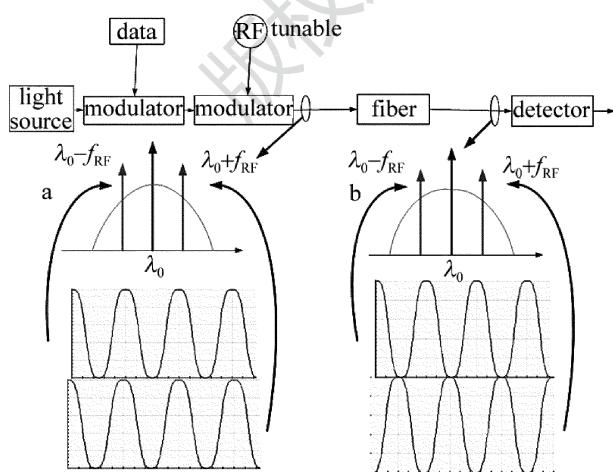


Fig. 1 Measurement principle of fiber dispersion based on second order lowest power of RF signal
a—with the same phase in transmitter b—with phase difference $\Delta\varphi_{\text{RF}}$ in receiver

$$P(f_{\text{RF}}) = P_0 k \cos\left(\frac{\pi f_{\text{RF}}^2 \lambda}{c} \times D\right) \quad (1)$$

式中, $P(f_{\text{RF}})$ 为探测到的射频的电信号功率, P_0 为零色散条件下探测到的射频信号峰值功率, k 为调制深度, f_{RF} 表示入射端加载的射频信号频率大小, λ 为光载波波长, c 为光速, D 为光纤链路累积色散。

分析(1)式可知,当信号两边带位相差 $\Delta\varphi_{\text{RF}} = \frac{\pi f_{\text{RF}}^2 \lambda}{c} \times D = (2m + 1)\pi$ 保持不变,接收端射频信号功率达到零功率点,有:

$$D = \frac{c \Delta\varphi_{\text{RF}}}{\pi f_{\text{RF}}^2 \lambda} \quad (2)$$

即零功率点处链路色散值与射频信号频率的平方成反比例关系,其中 $\Delta\varphi_{\text{RF}} = \pi$ 为射频信号的 1 阶零功率点; $\Delta\varphi_{\text{RF}} = 3\pi$ 为射频信号的 2 阶零功率点。在信号发送端加载可调谐的射频信号,由于包括被测量光纤链路中色散在内的其它量基本恒定,因此信号接收端测得的射频信号功率随频率 f_{RF} 的变化曲线可以获得,从而可以从曲线的零功率点(仿真实验中的极小值点)来获取光纤链路上的色散信息。

2 不同射频信号频率下信道色散的测量

基于射频信号 2 阶零功率点的信道色散测量系统如图 2 所示。发射端级联的马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder modulator, M-ZM)把射频信号加载到待测光纤链路中;然后,接收端的滤波器滤出射频信号并传输到功率计中进行功率测量。在 OPTISYSTEM 系统软件中,搭建了如图 2 所示的仿真实验系统。为了在不同射频信号频率下获取接收端射频信号功率随信道色散的变化曲线,具体仿真数据设置为:光源的中心波长为 1552.123 nm,光源发射功率为 0dBm,线宽为 10MHz; M-ZM 的消光比设置为 30dB, 系数为 -1;设置 3 种余弦射频信号,频率分别为 10GHz, 14.14GHz 和 20GHz;链路内掺铒光纤放大器(erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA)的放大增益为 15dB, 噪声系数为 4dB;单模光纤长度为 2km, 色散系数从 $0\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$ 变化到 $1700\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$, 色散系数的扫描步长为 $17\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$, 扫描 101 次;可调谐光滤波器的中心波长设定为 1552.123 nm, 插入损耗为 5dB, 应对不同的射频信号,光滤波器的 3dB 宽带分别设定为 25GHz, 35GHz 和 50GHz;光电探测器的响应宽带为 40GHz, 响应度设置为 0.85A/W , 暗电流为 2nA ;电带通滤波器的中心频率对应于射频信号频率,带宽为 10GHz。最终在功率计中可以测量得到射频信号的功率。

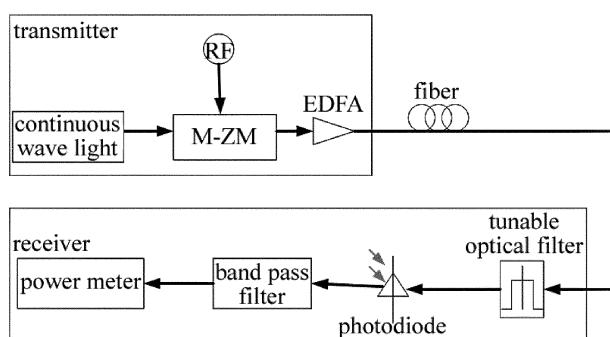


Fig. 2 Measurement system of fiber dispersion based on second order lowest power of RF signal

由仿真实验的数据结果,可以得到不同射频频率下探测到的射频信号功率随光纤链路色散值的变化曲线,如图3所示。探测到的射频信号功率随光纤链路色散呈周期性变化,且当链路色散引起信号上下边带相位差 $\Delta\varphi_{RF} = (2m + 1)\pi$ 时,接收端探测到的射频信号功率达到极小值,这与(1)式相一致;并且周期性大小与加载的射频频率大小有关,即射频频率越大,探测到的射频信号功率的变化周期越小。

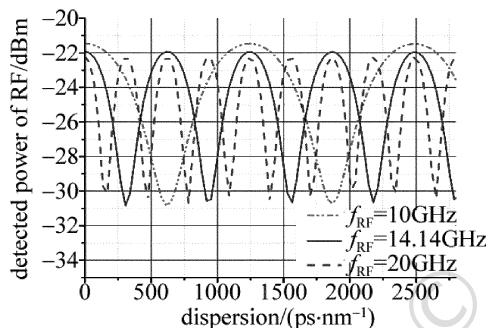


Fig. 3 The detected power of RF signal vs. dispersion value of optical fiber link under different RF f_{RF}

3种不同射频频率对应的1阶零功率点和2阶零功率点的色散值如表1所示。

Table 1 Dispersion value of first order and second order lowest power under different RF f_{RF}

f_{RF}/GHz	first order/(ps · nm ⁻¹)	second order/(ps · nm ⁻¹)
10	621	1863
14.14	311	934
20	153	460

当射频频率为10GHz时,1阶零功率点对应的色散值为621ps/nm,2阶零功率点对应的色散值则为1863ps/nm。

由(2)式可以得到链路色散值 D 与1阶零功率点处频率值之间的关系式为:

$$D = \left(\frac{10}{f_{01}}\right)^2 \times 621 \quad (3)$$

链路色散值与2阶零功率点处频率值之间的关系式为:

$$D = \left(\frac{10}{f_{02}}\right)^2 \times 1863 \quad (4)$$

由14.14GHz以及20GHz频率射频信号的色散值验证可知,(3)式和(4)式可用于求取光纤链路中的色散信息。光纤链路中的色散值随零功率点色散值的变化曲线如图4所示。

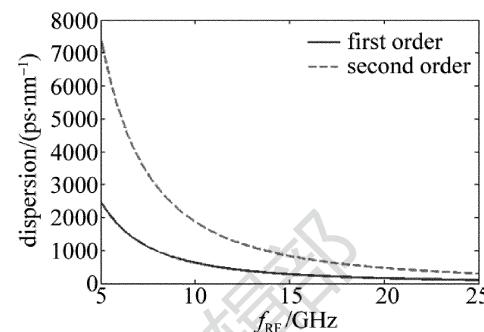


Fig. 4 Dispersion value of optical fiber link vs. f_{RF} under first order and second order lowest power of RF signal in the receiver

3 实验仿真与误差分析

扫描射频信号获取光纤链路色散信息的实验仿真首先确定光纤链路中2阶(或者1阶)零功率点处的频率 f_{02} (或者 f_{01}),然后根据(4)式或(3)式来计算链路中的色散大小,具体实验仿真系统如图2所示。仿真数据为:光源的中心波长为1552.123nm,光源发射功率为3dBm,线宽为10MHz;M-ZM的消光比为30dB,系数为-1;射频信号频率从5GHz变化到20GHz,频率扫描步长为60MHz;链路EDFA增益系数为30dB,噪声系数为6dB;单模光纤长度的色散系数为 $17\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}$,损耗大小为0.2dB/km,长度设定为20km到120km,步长为10km,即仿真色散变化范围为340ps/nm~2040ps/nm,色散扫描步长为170ps/nm;可调谐光滤波器的中心波长设定为1552.123nm,插入损耗为5dB,3dB宽带设定为30GHz;光电探测器的响应宽带为30GHz,响应度设置为0.85A/W,暗电流为2nA;电带通滤波器的中心频率对应于射频频率,带宽为4GHz。

当光纤内模内色散值等于340ps/nm时,由图4可

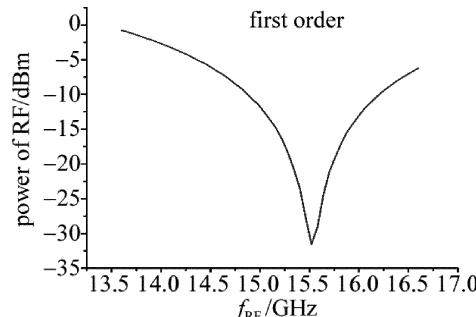


Fig. 5 Power of RF signal vs. f_{RF} under $D = 340\text{ps}/\text{nm}$

以大致估算出 1 阶零功率点所在射频频率位置, 即实验中导频频率的具体扫描范围可以设置为 13.6GHz ~ 16.6GHz; 2 阶零功率点所在射频信号频率则大于 20GHz, 不在扫描范围内。具体实验结果如图 5 所示, 则可以求出 1 阶零功率点 $f_{01} \approx 13.52\text{GHz}$ 。

当单模光纤内模内色散值为 510ps/nm 时, 由图 4 可以大致估算出射频信号 1 阶和 2 阶零功率点所在射频频率位置, 即实验中射频频率的具体扫描范围可以设置为 9GHz ~ 12GHz 和 17GHz ~ 20GHz。实验仿真结果如图 6a 和图 6b 所示, 则可求出 $f_{01} \approx 11.04\text{GHz}$ 和 $f_{02} \approx 19.16\text{GHz}$ 。

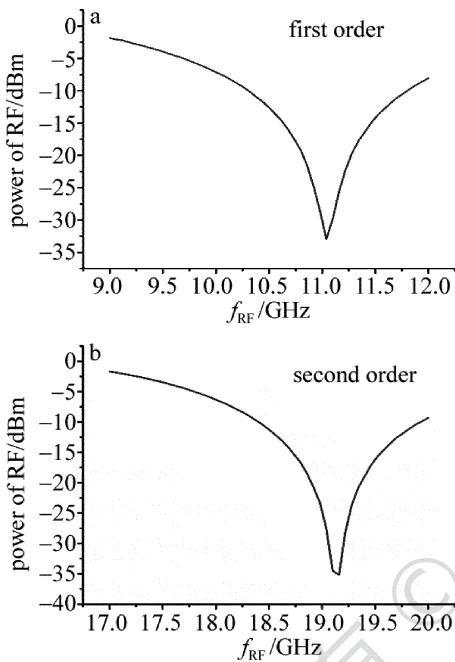


Fig. 6 Power of RF signal vs. f_{RF} under $D = 510\text{ps/nm}$

同理, 可测得不同链路色散下射频信号 1 阶零功率点对应的射频频率 f_{01} 和 2 阶零功率点对应的 f_{02} , 并

Table 2 Comparing of the calculated fiber dispersion vs. the actual fiber dispersion

actual value/ (ps · nm ⁻¹)	f_{01} / GHz	calculated value by equation (3)/ (ps · nm ⁻¹)	f_{02} / GHz	calculated value by equation (4)/ (ps · nm ⁻¹)
340	15.52	339.73	>20	
510	11.04	509.51	19.16	507.48
680	9.56	679.48	16.56	677.71
850	8.54	851.48	14.84	845.95
1020	7.8	1020.70	13.5	1022.22
1190	7.22	1191.29	12.5	1192.32
1360	6.74	1367.01	11.72	1356.30
1530	6.36	1535.24	11.06	1523.01
1700	6.02	1713.56	10.46	1702.74
1870	5.78	1858.81	9.98	1870.47
2040	5.54	2023.35	9.58	2029.93

可根据(3)式和(4)式估算出光纤链路中的色散, 如表 2 所示。

由表 2 中数据, 可以得到射频信号 1 阶零功率点和 2 阶零功率点测得色散值误差随链路中实际色散的变化曲线, 如图 7 中虚线所示。当链路实际色散较小时, 1 阶零功率点和 2 阶零功率点测得色散值误差都可以控制在 $\pm 1\text{ps/nm}$ 误差要求内; 但当链路色散较大 (1500ps/nm ~ 2000ps/nm) 时, 2 阶零功率点测得色散误差在 $\pm 10\text{ps/nm}$ 误差范围内, 1 阶零功率点测得色散误差则大于 $\pm 10\text{ps/nm}$ 。

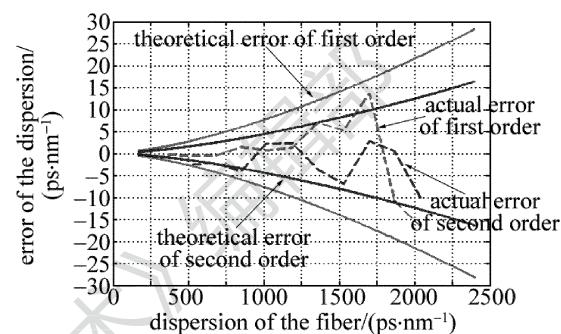


Fig. 7 Errors of dispersion measurement including the actual errors by simulation and the largest theoretical errors

经分析可知, 当链路色散较大时, 由射频频率扫描步长引起的色散误差为测量的主要误差。由(3)式和(4)式可知, 由射频频率扫描步长引起的最大可能色散误差为 $\Delta D = -\frac{200}{f_{01}^3} \times 621 \times \Delta f_1 = -\frac{200}{f_{02}^3} \times 1863 \times \Delta f_2$, 其中 $\Delta f_1 = \Delta f_2$ 等于 1/2 扫描步长, 即 $\pm 30\text{MHz}$ 。则扫描步长引起的最大可能色散误差如图 7 中实线所示。由图可知, 当测量误差等于 $\pm 10\text{ps/nm}$, 2 阶零功率点对应可测得的色散值为 1750ps/nm, 远大于 1 阶零功率点的 1250ps/nm。因此, 相较于 1 阶, 2 阶零功率点精确测量大色散系统内的色散信息, 以满足高速率信号的传输。

4 结 论

提出了基于射频信号 2 阶零功率点的信道色散测量技术方案, 对其基本原理进行了分析。该方案采用信号两边带的位相差来测量光纤链路中的色散值, 通过在发射端加载射频信号, 可以得到接收端射频信号功率大小随链路色散值的周期性变化关系, 从而仿真获得接收端射频信号 2 阶零功率点位置光纤链路色散随射频信号频率的变化曲线。通过仿真实验发现, 链路色散很小时, 射频信号 1 阶零功率点和 2 阶零功率点两种方式测得的色散值与实际色散值的误差较小, 可控制在 1ps/nm 范围内; 但当链路色散较大时, 2 阶零功率点方案能够实现 1750ps/nm 色散的精确测量,

远大于2阶零功率点的1250ps/nm。因此基于射频信号2阶零功率点的信道色散测量技术更适用于精确测量大色散系统内的色散信息,以实现高速率信号在系统的传输和接收。

参 考 文 献

- [1] QUE L, YIN X. Analysis of dispersion tolerance in optical communication[J]. *Study of Optical Communications*, 2008, 150(6): 14-16 (in Chinese).
- [2] CAO X. Optimization of dispersion compensation in optical fiber communication systems[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(1): 101-104 (in Chinese).
- [3] GLENTIS G O, GEORGULAKIS K, ANGELOPOULOS K. Dispersion compensation of fiber links using pruned volterra equalizers [C]//Advanced Photonics 2015 OSA Technical Digest. New York, USA: Optical Society of America, 2015: JM3A.7.
- [4] ZHOU Zh Q, TANG Y L, XIE Ch J. Optimum schemes of dispersion compensation transmission systems using dispersion compensation fibers[J]. *Laser Technology*, 2000, 24(5): 265-269 (in Chinese).
- [5] KAWAKAMI H, YOSHIDA E, HUBOTA H, et al. Novel signed-chromatic dispersion monitoring technique based on asymmetric waveform distortion in DQPSK receiver[C]//Conference on Opto-electronics & Communications. New York, USA: IEEE, 2008: 1-2.
- [6] LI B, LUO F G, ZHOU W, et al. Chromatic dispersion measurement using single sideband spectrum phase difference detection for OOK signal link[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25583-25592.
- [7] LI B, LUO F G, TIAN M, et al. Fiber chromatic dispersion measurement by using a novel RF spectrum phase detection based on DSP [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(15): 3249-3253.
- [8] WESTBROOK P S, EGGLERON B J, RAYBON G, et al. Measurement of residual chromatic dispersion of a 40-Gb/s RZ signal via spectral broadening[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(3): 346-348.
- [9] VO T D, PELUSI M D, SCHRODER J, et al. Simultaneous multi-imperium monitoring of 640Gb/s signals using photonic chip based RF spectrum analyzer[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3938-3945.
- [10] SORIANO R A, HAUSKE F N, GONZALEZ N G, et al. Chromatic dispersion estimation in digital coherent receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(11): 1627-1637.
- [11] YAO S, ERIKSSON T A, FU S, et al. Fast and robust chromatic dispersion estimation based on temporal auto-correlation after digital spectrum superposition[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15418-15430.
- [12] WANG D, LU C, LAU A P T. Adaptive chromatic dispersion compensation for coherent communication systems using delay-tap sampling technique[J]. *Photonics Technology Letters*, 2011, 23(14): 1016-1018.
- [13] WANG Y, HU S, YAN L, et al. Chromatic dispersion and polarization mode dispersion monitoring for multi-level intensity and phase modulation systems[J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 14038-14043.
- [14] YU C, YANG J. CD and PMD monitoring based on RF spectrum analysis with optical filtering [C]//Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010 Asia. New York, USA: IEEE, 2010: 419-420.
- [15] RIBEIRO V, COSTA L, TEIXEIRA A, et al. Chromatic-dispersion-monitoring scheme using a Mach-Zehnder interferometer and *Q*-factor calculation[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, 2(1): 10-19.
- [16] HE F L, LIU M, DONG Ch P, et al. Research of dispersion characteristics of square-lattice all solid photonic bandgap fibers[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 90-92 (in Chinese).
- [17] LI B. Investigation of dispersion monitoring technology for ultra-high speed optical transmission link [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 1-116 (in Chinese).