

色散测量样机的设计与实验验证

续贝贝¹, 席丽霞^{1*}, 张晓光¹, 唐先锋¹, 张文博²

¹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;

²北京邮电大学理学院, 北京 100876

摘要 设计了基于调制相移法的色散测量样机,提高了色散测量的精度,降低了色散测量成本。设计了基于幅相检测芯片 AD8302 的双鉴相电路,实现了相位差的准确测量。应用最小二乘法对接收的数据进行拟合,得到了可靠的色散系数曲线。整体采用模块化的设计思想,使用基于芯片 F2812 的数字信号处理,实现了对各模块插板的控制,完成了数据的采集和处理,并在实验室虚拟仪器工程工作台(LabVIEW)开发平台完成界面设计。对样机的性能进行了实验验证,结果表明,对于不同长度的 G.652 光纤,在波长 1550 nm 处,累积色散测量的不确定度小于 10 ps/nm。

关键词 光通信; 调制相移法; 双鉴相电路; 数字信号处理; 最小二乘法; LabVIEW

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0206004

Design and Experimental Verification of Dispersion Measurement Prototype

Xu Beibei¹, Xi Lixia^{1*}, Zhang Xiaoguang¹, Tang Xianfeng¹, Zhang Wenbo²

¹State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing 100876, China;

²College of Sciences, University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract A dispersion measurement prototype is designed based on the modulation phase shift method, which improves the accuracy and reduces the cost of dispersion measurement. In addition, the dual phase discrimination circuit is designed based on the amplitude and phase detection chip AD8302 and the accurate measurement of phase difference is realized. The least square method is used to fit the received data and a reliable dispersion coefficient curve is obtained. The modular design is adopted as a whole. The digital signal processing based on chip F2812 is also used to accomplish the control to the board of each module as well as the collection and processing of data. The interface is designed on the LabVIEW development platform. The performance of the prototype is verified by experiments and the results show that the uncertainty of the cumulative dispersion measurement at wavelength of 1550 nm is less than 10 ps/nm for the G.652 fibers with different lengths.

Key words optical communications; modulation phase shift method; dual phase discrimination circuit; digital signal processing; least square method; LabVIEW

OCIS codes 060.2300; 060.2330; 060.2430

1 引 言

色散(CD)是衡量光纤质量的重要指标。当光信号在光纤内传输时,受色散影响,光信号随传输距离的增加而展宽,进而导致码间串扰的出现和通信系统误码率的增加,因此,为便于系统维护和升级,网络运营商需要实现光纤色散系数和光链路性能的在线检测,互联网公司数据中心互连光通信网络也

需要色散系数检测。对于光纤色散测量仪,只有少数国外公司可以生产,国内处于空白状态;国外设备价格昂贵,因此有必要降低成本,实现对色散测量仪样机的研制。

国际标准的光纤色散测量方法有 4 种:调制相移法^[1]、差分相移法^[2]、干涉测量法^[3-7]和时域法^[8]。干涉测量法是通过改变马赫-曾德尔干涉仪或者迈克耳孙干涉仪的参考臂的长度进行时域干涉,得到

收稿日期: 2018-06-06; 修回日期: 2018-08-06; 录用日期: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(61571057,61527820)

* E-mail: xilixia@bupt.edu.cn

干涉后的强度信息,进而得到色散信息,其工作原理简单,但受限参考臂的调节范围,所以这种方法更适合测量短距离的光纤^[9]。时域法通过测量不同波长光脉冲间的时延量来确定色散,计算复杂。调制相移法通过检测不同波长调制信号的相对相移来测量不同波长光信号的群时延,进而推导出光纤色散,具有测量精度高的特点。差分相移法使用双检测系统同时记录两个波长信号,可直接获得色散,但成本较高。

样机的设计需要尽可能地提高测量精度以及最大程度地降低用户成本。基于以上考虑,本文采用调制相移法实现对色散的测量。鉴相器选用幅相检测芯片[型号 AD8302,亚德诺半导体技术(上海)有限公司/ADI公司,中国],0°功分器、90°移相器和两个 AD8302 组成双鉴相电路,实现参考信号与接收信号相位差的测量,有效克服 AD8302 相位模糊问题;通过基于芯片 F2812(TMS320F2812,德州仪器公司,美国)的数字信号处理(DSP)来实现对各模块的控制以及相位差数据的采集;采用最小二乘法对后续的相位差数据进行处理,进而得到色散值与色散系数;将色散相关数据传入工控机中,采用 LabVIEW 开发平台进行界面设计,实现色散值以及色散系数曲线的显示。对样机进行实验验证,得到的测试结果较好。

2 原理分析

2.1 调制相移法测量色散原理

调制相移法的工作原理如图 1 所示,强度调制器对可调谐激光器输出的光信号进行强度调制,调制后载有信息的光信号通过待测光纤,在接收端通过光电探测器完成对传输信号的检测^[10]。参考信号为信号发生器产生的正弦信号。调制相移法使用模拟鉴相器完成对传输信号和参考信号相位的测量,最后完成对相位差的采集、相位追踪、曲线拟合等数据处理。

由图 1 可知,通过光纤的光信号在不同波长下产生的延迟可通过相位差来评估,调制信号相对参考信号的相移与群时延差的关系可以表示为

$$\Delta\tau = \frac{\phi_\lambda - \phi_{\text{ref}}}{360^\circ} \frac{1}{f_m}, \quad (1)$$

式中: f_m 为调制频率; ϕ_λ 为波长 λ 对应的相位值; ϕ_{ref} 为参考信号对应的相位值; $\Delta\tau$ 为群时延差。

根据色散系数 D_λ 的定义,可得色散系数为

$$D_\lambda = \frac{1}{L} \frac{d(\Delta\tau)}{d\lambda} = \frac{1}{360^\circ L f_m} \frac{d\phi_\lambda}{d\lambda}, \quad (2)$$

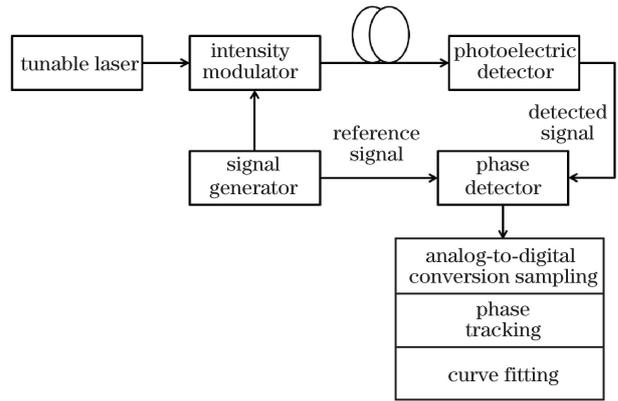


图 1 调制相移法的测量原理图

Fig. 1 Principle diagram of measurement by modulation phase shift method

式中 L 为待测光纤长度。可以看出:由于色散系数是由群时延差的导数而不是群时延差决定的^[11],因此可以忽略参考信号的相位 ϕ_{ref} 和参考波长的选取对测量结果的影响^[12-14]。

相位差的准确检测是实现色散准确测量的关键。因此自行设计了电桥结构的双鉴相电路并进行了后期的数据处理。

2.2 改进的 AD8302 鉴相电路

幅相检测芯片 AD8302 可以准确测量 2 个独立的射频信号的相位差。但该芯片的相位差响应曲线(图 4)在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 范围内存在相位模糊问题,即一个电压值对应两个相位角^[15-16]。

为解决上述相位模糊的问题,自主设计了双鉴相电路,它由一个 0°功分器、一个 90°移相器和两个 AD8302 组成,如图 2 所示。此方案在解决相位模糊问题的同时,扩大了相位测量范围,实现了 $-180^\circ \sim 360^\circ$ 相位差检测。

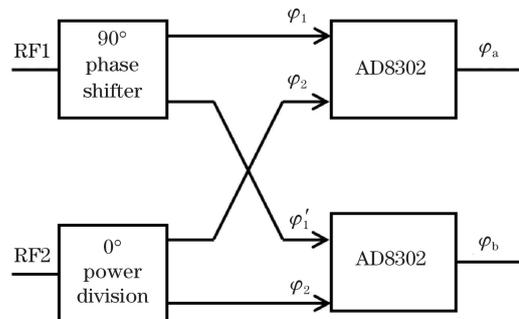


图 2 改进的电路设计图

Fig. 2 Design of improved circuit

根据图 2,第一路射频信号 RF1 通过一个 90°移相器分成两路相位差为 90°的信号 ϕ_1 和 ϕ_1' ,第二路射频信号 RF2 通过 0°功分器分成两路相位相等的信号 ϕ_2 。

假设两个信号的相位差为 45° 。上支路 AD8302 的输出电压为 135 mV。初步可判断信号相位差为 45° 或者 -45° 。由于上支路 $\varphi_a = \varphi_1 - \varphi_2$ ，下支路 $\varphi_b = \varphi'_1 - \varphi_2 = \varphi_1 + 90^\circ - \varphi_2$ ，如果相位差为 45° ，则下支路 AD8302 输出电压为 45 mV；如果相位差为 -45° ，则下支路 AD8302 输出电压为 135 mV。通过下支路 AD8302 的输出电压 45 mV，可得到两个信号的相位差为 45° 。

因此，综合两路鉴相，可以克服相位差模糊的问题，可在主值区间 $(0^\circ, 360^\circ)$ 内实现相位差的精确

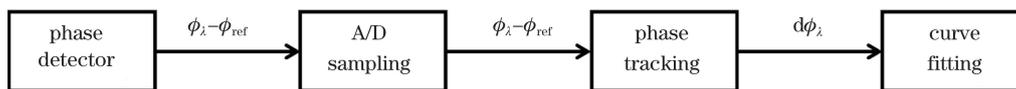


图 3 数据处理流程图

Fig. 3 Flow chart of data processing

当 $d\phi_\lambda \in (0^\circ, 360^\circ)$ 时，可以直接通过判断补偿跳变后 $\phi_\lambda - \phi_{ref}$ 的斜率来确定 $d\phi_\lambda$ 是否大于 180° ；当 $d\phi_\lambda$ 大于 360° ，可以采用预估 $d\phi_\lambda$ 的方法来解决周期性多值问题。在光纤类型和长度已知时，预估的群时延的表达式为

$$\tau_g = \frac{S_0 L}{8} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right)^2 + \tau_0, \quad (3)$$

$$d\phi_\lambda = 360^\circ f_m d\tau_g, \quad (4)$$

式中： S_0 为光纤的零色散点斜率； λ_0 为零色散点波长； τ_0 为时间常数。光纤类型确定的情况下，其零色散点波长 λ_0 和零色散点斜率 S_0 都有相应的参考值。因此，根据 $d\phi_\lambda$ 的预估值得确定 $d\phi_\lambda$ 位于第几个周期，从而消除相位模糊。

2.4 鉴相性能分析

(2)式中的 L 、 f_m 、相位差 $d\phi$ 和波长间隔 $d\lambda$ 均为彼此相互独立的直接测量量，则色散系数的误差传递公式为

$$\Delta D_\lambda = \left| \frac{\partial D_\lambda}{\partial L} \right| \Delta L + \left| \frac{\partial D_\lambda}{\partial f_m} \right| \Delta f_m + \left| \frac{\partial D_\lambda}{\partial (d\phi)} \right| \Delta (d\phi) + \left| \frac{\partial D_\lambda}{\partial (d\lambda)} \right| \Delta (d\lambda). \quad (5)$$

分析(5)式可知， L 、 f_m 和 $d\lambda$ 的稳定度较高，可以将其视为常量。因此色散系数误差的主要来源是相位差 $d\phi$ 。

对所使用的 AD8302 的鉴相精度进行验证，使用 AFG3000[美国泰克(Tektronix)公司，美国]产生两路同频率、同幅度、初始相位为 0° 的信号，在一定的等间隔下，相位差从 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 变化时绘制图 4 的曲线。

测量。

然而，两路信号的相位差可能会有超过 360° 的情况，这将导致周期性多值的相位模糊问题^[17]。因此，需要对相位进行追踪，有效识别周期性多值的情况。

2.3 相位追踪

信号经过 AD8302 鉴相电路完成对相位差的测量。使用 DSP 中的 AD 模块采集相位差数据，对采集到的数据完成相位追踪和曲线拟合，流程图如图 3 所示。

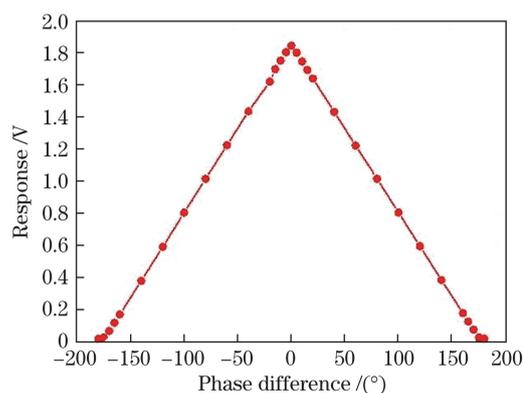


图 4 AD8302 的相位差响应曲线

Fig. 4 Phase difference response of AD8302

与 AD8302 理论的相位差曲线相比，误差小于 0.5° 。

综上所述：对于 100.4 km 的 G.652 光纤，在其调制频率为 200 MHz 的情况下，其色散系数的误差传递小于 0.03。

2.5 曲线拟合

采用最小二乘法进行曲线拟合，其基本思想是：最小化每个数据点到拟合点的垂直偏差平方和来计算最佳拟合线。数学原理如下^[11-12]。

对于一组给定的数据 $\{(x_i, y_i), (i=1, 2, \dots, m)\}$ ，若拟合曲线模型为 $y=f(x)$ ，则第 i 个误差的距离为 $f(x_i) - y_i$ ，所有点的平方和为 $\sum_1^m [f(x_i) - y_i]^2$ ，最小化 $\sum_1^m [f(x_i) - y_i]^2$ 可求得对应的参数，进而得到拟合曲线 $y=f(x)$ 。

对于 G.652 光纤，根据国际电工委员会(IEC)标准，色散系数 D_λ 可采用 3 项 Sellmeier 多项式进

行拟合,多项式可表示为

$$D_\lambda = 2B \times \lambda - 2C \times \lambda^{-3}, \quad (6)$$

式中 B 和 C 为拟合系数。

利用最小二乘法进行曲线拟合时,采用的目标函数为

$$\min_{(B,C)} (|2B \times \lambda_n - 2C \times \lambda_n^{-3} - D_{\lambda_n}|^2). \quad (7)$$

通过最小误差平方和可以检验曲线拟合性能,经实验验证,最小二乘法对该曲线拟合的最小误差平方和较小,拟合结果稳定。

3 样机设计

3.1 样机的总体设计

样机采用模块化的设计思想,便于升级和功能扩展。系统整体设计框图如图 5 所示。

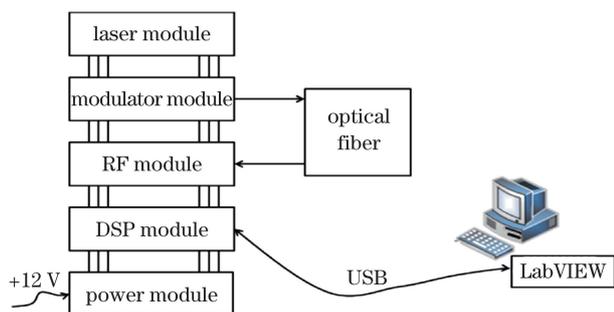


图 5 系统整体设计框图

Fig. 5 Block diagram of overall system design

对各模块分别进行硬件电路设计,将最终的色散数据信号通过串口送到工控机,工控机采用 LabVIEW 开发平台显示图形界面和数据。

3.2 样机的 LabVIEW 界面设计

采用 LabVIEW 平台设计样机的界面并显示色散系数曲线图,也可以通过输入波长得到相应的色散值。

4 样机测试验证

选取 20.2, 40.4, 50.2, 70.4, 100.4 km 5 种不同长度的标准单模光纤,使用样机进行色散值的测量验证。

选取 50.2 km 标准单模光纤验证结果进行分析,图 6 给出 C 波段和 L 波段分开测量时,AD8302 采集的相移及消除跳变后的相移随波长的变化。

根据图 6,在 C 波段和 L 波段测量中,通过消除跳变后的相移斜率均为正,则 $d\phi_\lambda$ 的值在 $(0^\circ, 180^\circ)$ 范围内。

消除相位模糊后,可以进一步得到相移增量的

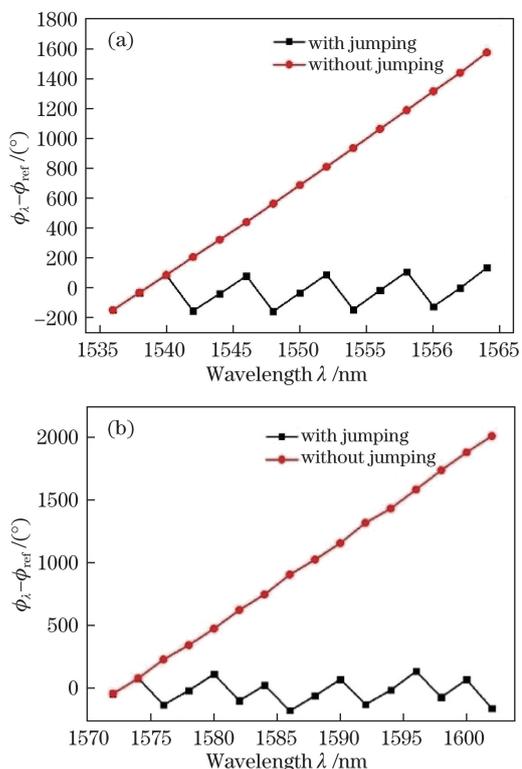


图 6 不同波段下相移随波长的变化。
(a) C 波段; (b) L 波段

Fig. 6 Phase shift versus wavelength under different bands.

(a) C band; (b) L band

测量值与估计值随波长的变化,如图 7 所示。

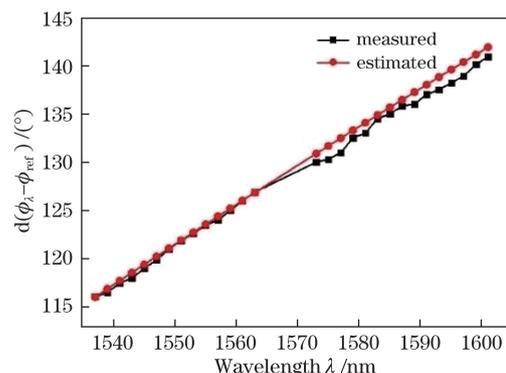


图 7 相移增量随波长的变化

Fig. 7 Phase shift increment versus wavelength

由图 7 可以看出相移增量的测量值与估计值具有较好的一致性。

由于样机的信号源频率为 200 MHz,波长间隔为 2 nm,可以得到不同波长下的色散系数值,如图 8 所示。

图 8 为不同波长色散系数的测量值与按照三项 Sellmeier 多项式的拟合值的对比,色散系数的拟合值与测量值基本重合,说明拟合的准确性较高。

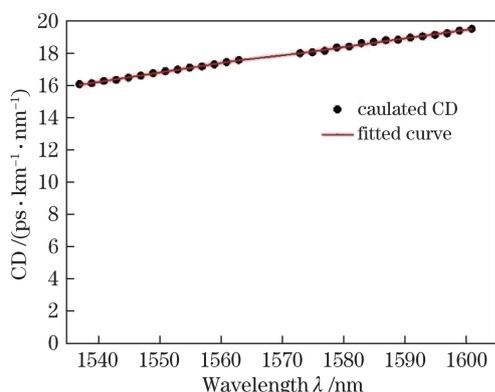


图 8 不同波长下色散系数的测量值与拟合曲线
Fig. 8 Measurement value and fitting curve of dispersion coefficient under different wavelengths

表 1 不同长度的 G.652 单模光纤的累积色散值

Table 1 Accumulated dispersion of G.652 single mode fibers with different lengths

Fiber length /km	20.2	40.4	50.2	70.4	100.4
Fitted dispersion /($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}$)	342.5	684.4	850.8	1192.5	1704.4
Theoretical dispersion /($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}$)	343.4	686.8	853.4	1196.8	1706.8
Dispersion of FTB-5700 /($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}$)	339.4	682.7	852.4	1194.9	1696.7

积色散值的测量不确定度为 ± 10 ps/nm, 显然, 改进后方法的测量精度优于商用的色散测试仪。

选取长度相同的多段光纤进行测量, 并将测量结果同商用的色散测试仪的进行比较, 结果如表 2 所示。

表 2 相同长度的 G.652 单模光纤的累积色散值

Table 2 Accumulated dispersion of G.652 single mode fibers with same length

Fiber length /km	Dispersion of prototype / ($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}$)	Dispersion of FTB-5700 / ($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}$)
50.2 (Fiber A)	850.8	848.4
50.2 (Fiber B)	850.6	848.1

显然, 从表 2 可以看出, 测量仪样机的测试结果相对稳定。

5 结 论

基于调制相移法的理论基础, 设计了色散测量样机并进行了实验验证。该样机采用一个 0° 功分器、一个 90° 移相器和两个 AD8302 组成双鉴相电路, 实现了 $0^\circ\sim 360^\circ$ 的相位准确测量, 同时应用最小二乘法对数据进行曲线拟合, 实现了光纤色散系数及累积色散值的精确测量; 采用模块化的设计, 便于升级和功能扩展; 使用 DSP 完成对各模块的控制,

根据国际电信联盟-电信标准部 (ITU-T) G.652 标准, 对于 G.652 光纤, 在波长 1550 nm 处, 色散系数为 17 ps/(nm·km), 色散斜率为 0.056 ps/($\text{nm}^2\cdot\text{km}$)。分析验证结果可知: 对长度为 50.2 km 的光纤进行多次测量, 色散系数平均值为 16.95 ps/(nm·km), 色散斜率为 0.059 ps/($\text{nm}^2\cdot\text{km}$), 累积色散值为 850.4 ps/nm, 方差为 5.89 ps²/nm²。

对 5 种不同长度的光纤进行了多次测量, 得到不同长度光纤的累积色散值, 结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 实验中测量的各个不同长度的光纤累积色散值与理论值相差均小于 10 ps/nm。目前的商用色散测试仪 (FTB-5700, EXFO 公司, 加拿大) 的性能指标为: 100 km 光纤在 1550 nm 处累

使之高效地工作; 各模块插板使用的元器件国产化程度高、易于维修替换, 降低了色散测量的成本。对样机进行验证, 得到 1550 nm 处 50.2 km 的 G.652 光纤的累积色散值的测量误差小于 10 ps/nm, 该结果与国外商用的色散测试仪的测量结果相近, 甚至更好。

参 考 文 献

- [1] Fortenberry R, Sorin W V, Hernday P. Improvement of group delay measurement accuracy using a two-frequency modulation phase-shift method [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(5): 736-738.
- [2] Niemi T, Uusimaa M, Ludvigsen H. Limitations of phase-shift method in measuring dense group delay ripple of fiber Bragg gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(12): 1334-1336.
- [3] Grósz T, Kovács A P, Kiss M, *et al.* Measurement of higher order chromatic dispersion in a photonic bandgap fiber: comparative study of spectral interferometric methods [J]. Applied Optics, 2014, 53(9): 1929-1937.
- [4] Hlubina P, Szpulak M, Ciprian D, *et al.* Measurement of the group dispersion of the fundamental mode of holey fiber by white-light spectral interferometry [J]. Optics Express, 2007, 15(18): 11073-11081.
- [5] Lee J Y, Kim D Y. Versatile chromatic dispersion measurement of a single mode fiber using spectral

- white light interferometry[J]. Optics Express, 2006, 14(24): 11608-11615.
- [6] Hlubina P, Ciprian D, Kadulová M. Measurement of chromatic dispersion of polarization modes in optical fibres using white-light spectral interferometry[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(4): 045302.
- [7] Galle M A, Mohammed W S, Qian L, *et al.* Single-arm three-wave interferometer for measuring dispersion of short lengths of fiber[J]. Optics Express, 2007, 15(25): 16896-16908.
- [8] Lu P, Ding H M, Mihailov S J. Direct measurement of the zero-dispersion wavelength of tapered fibres using broadband-light interferometry[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(8): 1631-1636.
- [9] Zong L J. Reliable chromatic dispersion measurement method for installed optical fibers[J]. Applied Optics, 2015, 54(26): 7973-7977.
- [10] Neumann N, Herschel R, Schuster T, *et al.* Dispersion estimation via vestigial sideband filtering using an optical delay line filter[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(2): 155-161.
- [11] Al-Asadi H A, Al-Mansoori M H, Hitam S, *et al.* Particle swarm optimization on threshold exponential gain of stimulated Brillouin scattering in single mode fibers[J]. Optics Express, 2011, 19(3): 1842-1853.
- [12] Lin J, Zhao H Y, Ma Y, *et al.* New hybrid genetic particle swarm optimization algorithm to design multi-zone binary filter[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10748-10758.
- [13] Zhang X G, Zhang J Z, Duan G Y, *et al.* An experiment for obtaining DOP ellipsoid using particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(6): 316-318.
- [14] Zhou Y, Zeng G J, Yu F H. Particle swarm optimization-based approach for optical finite impulse response filter design[J]. Applied Optics, 2003, 42(8): 1503-1507.
- [15] Liu J, Ma Y H. Design of magnitude and phase measuring system with high precision based on AD8302[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(2): 253-255.
- 刘静, 马彦恒. 基于 AD8302 的高精度幅相检测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(2): 253-255.
- [16] Zhou D. Design of high-precision phase difference detecting system based on DSP [D]. Xi'an: Xidian University, 2012: 25-38.
- 周笛. 基于 DSP 高精度相位差检测系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 25-38.
- [17] Li Y, Xi L X, Zhang X G, *et al.* Experimental research on chromatic dispersion measurement based on digital phase detector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1004003.
- 李赞, 席丽霞, 张晓光, 等. 基于数字鉴相的色散测量实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1004003.