

基于数字鉴相的色散测量实验研究

李 贇¹ 席丽霞¹ 张晓光¹ 唐先锋¹ 万 冬^{1,2}

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北京信息职业技术学院, 北京 100018

摘要 为了提高光纤中色散的测量精度和降低测量成本,提出了一套基于数字鉴相的色度色散的测量方案。采用低速率的模数转换器和全相位快速傅里叶变换的数字相位鉴别算法替代传统的模拟鉴相器件,利用粒子群优化算法对接收数据进行曲线拟合处理,实现了高精度的色散测量。数值分析了采样率、信噪比和快速傅里叶变换长度等因素对数字相位鉴别精度的影响,实验验证了测量系统的准确性。实验结果表明,对于不同长度的 G.652 光纤,在波长 1550 nm 处,累积色散测量不确定度小于 10 ps/nm,结果优于目前城域网环境下的商用色散测试仪的测量精度。

关键词 测量; 色散; 数字鉴相; 粒子群优化算法

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1004003

Experimental Research on Chromatic Dispersion Measurement Based on Digital Phase Detector

Li Yun¹ Xi Lixia¹ Zhang Xiaoguang¹ Tang Xianfeng¹ Wan Dong^{1,2}

¹State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

²Beijing Information Technology College, Beijing 100018, China

Abstract In order to improve chromatic dispersion (CD) measurement accuracy and reduce cost, a chromatic dispersion measurement method based on digital phase detector is proposed. The traditional analog phase detector is replaced by an analog to digital converter with low sampling rate and a digital phase detecting algorithm based on all phase fast Fourier transform (FFT), and a particle swarm optimization (PSO) algorithm is applied to the process of curve fitting. High accuracy chromatic dispersion measurement is achieved. The effects of sampling rate, signal noise ratio and FFT length on digital phase detection accuracy are also analyzed. Experiments on verifying the accuracy of the measurement system are carried out. Experiment results show that the accumulated chromatic dispersion uncertainty of G.652 fiber with different lengths at 1550 nm is less than 10 ps/nm, which is better than that of the commercial CD analyzer in metropolitan area network environment.

Key words measurement; chromatic dispersion; digital phase detection; particle swarm optimization algorithm

OCIS codes 120.7000; 060.2330; 060.2300; 060.2430

1 引 言

色散(CD)是光纤的固有特性之一,而光纤色散会造成信号的脉冲展宽、引起信号的码间串扰、导致误码率升高,从而限制通信系统的传输容量和最大中继传输距离。随着光纤通信系统的传输速率增加,色散对系

收稿日期: 2016-05-28; **收到修改稿日期:** 2016-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(61571057)、北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室基金(IPOC2015ZC04)

作者简介: 李 贇(1991—),男,硕士研究生,主要从事高速光通信光性能监测方面的研究。

E-mail: liyunhenu@163.com

导师简介: 席丽霞(1973—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事高速光通信系统方面的研究。

E-mail: xilixia@bupt.edu.cn(通信联系人)

统性能的影响显得愈发明显,因此为了适应通信系统不断增加的速率需求,提高色散测量的精度尤为重要。

目前光纤色散测量方法多种多样,主要有脉冲时延法^[1]、干涉法^[2-7]和调制相移法^[8-9]等。脉冲时延法通过测量不同波长光脉冲间的时延量来确定色散,然而脉冲的到达时间会因脉冲展宽而较难精准确定^[10],因此测量精度不高;干涉法是通过改变马赫-曾德尔干涉仪或者迈克耳孙干涉仪的参考臂长来进行时域干涉,得到干涉后的强度信息进而得到色散信息,其工作原理简单,但受限于参考臂的调节范围,所以该方法更适于短距离光纤的色散测量^[10];传统的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,但需要高成本的高精度鉴相器。

针对低成本鉴相器精度不高不能满足调制相移法色散测量精度的问题,本文提出了基于数字鉴相的色散测量方案,即采用采样速率较低的模数转换器(A/D)模块对光电探测器接收到的信号进行采样,然后用全相位快速傅里叶变换(FFT)相位测量法实现高精度的相移检测,再采用粒子群优化(PSO)算法对后续的数据进行处理,从而得到色散值。建立了相应的实验系统,并进行了相关实验验证。实验测得 1550 nm 处 100 km G.652 光纤的累积色散测量不确定度小于 10 ps/nm,结果优于目前城域网环境下的商用色散测试仪的测量精度。

2 原理分析

2.1 调制相移法测量色散原理

调制相移法通过对光信号进行强度调制,比较参考信号与测量信号的相位,在所需要的测试带宽内对激光器的波长进行扫描,得到相对相移随波长变化的曲线进而得到色散值。根据参考信号类型的不同,可以分为电参考信号和光参考信号,这里采用电参考信号。所采用的调制相移法测量色散的实验系统示意图如图 1 所示,图中信号发生器产生正弦电信号,正弦电信号通过外置调制器对窄带宽可调谐激光器的输出光进行强度调制。调制后的光信号通过待测光纤,经光电探测器检测出传输信号。用 A/D 模块对放大后的传输信号和参考信号同时进行采样,然后对采样后的信号进行相位鉴别、相位追踪及曲线拟合等数据处理。

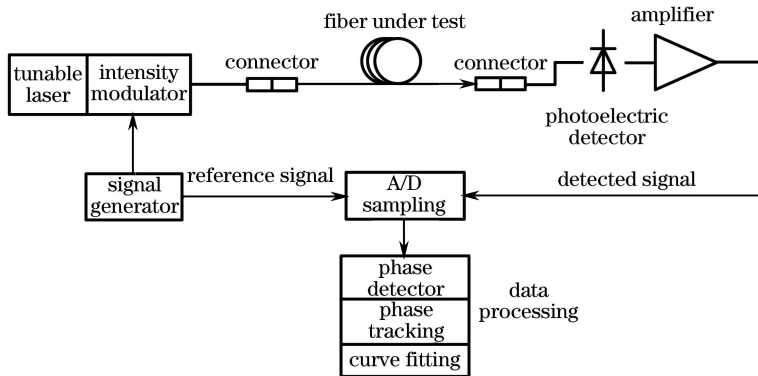


图 1 调制相移法测量色散实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system for CD measurement by the modulation phase shift method

调制相移法测量色散的原理如下^[8-9]:让强度调制器工作在功率曲线的线性区域,忽略噪声和调制信号初相位的影响,接收端光电探测器接收到的信号可近似表示为

$$U_{PD} = A \cos(2\pi f_m t + 2\pi f_m \tau_g), \quad (1)$$

式中 f_m 是调制频率, $\tau_g = \tau_g(\lambda)$ 是不同波长 λ 的光信号经过光纤产生的传输时延。接收信号相对参考信号的相移 $\Delta\phi = \phi(\lambda) - \phi(\lambda_{ref})$ 与群时延差的关系可以表示为

$$\Delta\tau_g(\lambda) = \frac{\phi(\lambda) - \phi(\lambda_{ref})}{360^\circ} \frac{1}{f_m}, \quad (2)$$

而色散系数 $D(\lambda)$ 与群时延差的关系满足

$$D(\lambda) = \frac{1}{L} \frac{d[\Delta\tau_g(\lambda)]}{d\lambda} = \frac{1}{360^\circ L f_m} \frac{d\phi(\lambda)}{d\lambda}, \quad (3)$$

式中 L 是待测光纤长度。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,因此参考信号的相位 $\phi(\lambda_{\text{ref}})$ 以及参考波长的选取对测量结果影响是有限的。

2.2 数字鉴相流程

要实现色散的精确测量,最关键的问题是接收信号与参考信号间相移的测量,但模拟鉴相器件要实现高精度的鉴相往往需要很高的成本。而数字鉴相算法能够较容易进行高精度的相位测量并消除相位模糊现象,并且在不同的色散测量环境,当信号的带宽发生变化时,数字鉴相只需改变现场可编程门阵列(FPGA)或者数字信号处理(DSP)等可编程器件的内部程序算法,因此数字鉴相算法的适用性强,硬件成本也低。可采用低速率的 A/D 采样和基于全相位快速傅里叶变换的数字相位鉴别算法来实现高精度的色散测量。

A/D 采样后的数据处理包括对 A/D 采样后的接收信号和参考信号进行相位鉴别、相位追踪和曲线拟合,流程图如图 2 所示。



图 2 数据处理流程图

Fig. 2 Flow chart of data processing

相位鉴别采用基于全相位 FFT 的相位测量法。全相位 FFT 具有“相位不变性”的特点^[11-15],此方法在非同步采样的情况下无需借助任何频谱校正措施即可精确测量出相位值,且减小了计算量。对于 A/D 采样后的序列信号 $x(n)$,其离散傅里叶变换(DFT)后的信号为 $X(k)$,二者的关系为^[11]

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(\frac{-i2\pi nk}{N}\right) = A_k \exp(i\phi_k), \quad (4)$$

式中 N 是傅里叶变换的长度, k 是傅里叶变换后的频率点。考虑时延移位的循环周期性,序列的 DFT 的时延相位关系为

$$x(n)_N \Leftrightarrow X(k), \quad (5)$$

$$x(n-m)_N \Leftrightarrow \exp\left(\frac{-i2\pi km}{N}\right) X(k), \quad (6)$$

其中 m 是时间延迟, $x(n-m)_N$ 是循环移位后的序列。由(6)式可以看出时域的延迟 m 经 DFT 后转换到频域的相位 $\varphi = \frac{-i2\pi km}{N}$,则分别对 DFT 后的复数取角就会得到相应的相移信息。

相位追踪算法根据 $d\phi(\lambda)$ 的变化范围分为两步。1) 在主值区间内,通过判断补偿跳变后的 $\phi(\lambda) - \phi(\lambda_{\text{ref}})$ 的斜率来确定 $d\phi(\lambda)$ 是否大于 180° ;2) 判断 $d\phi(\lambda)$ 是否存在相位模糊情况。相位鉴别范围只能在主值区间 $(0^\circ, 360^\circ)$ 内,然而随着光纤长度 L 、调制频率 f_m 和波长间隔 $\Delta\lambda$ 的增加, $d\phi(\lambda)$ 会出现周期多值的相位模糊情况。针对色散测量环境中单模光纤类型有限且相对固定的特点,可以建立样本空间,并对 $d\phi(\lambda)$ 的大小进行预估。若光纤类型和长度已知,采用

$$\tau_g(\lambda) = \frac{S_0 L}{8} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right)^2 + \tau_0, \quad (7)$$

$$d\phi(\lambda) = 360^\circ f_m d\tau_g(\lambda) \quad (8)$$

进行预估^[16],其中 S_0 是光纤的零色散点斜率, λ_0 是零色散点波长, τ_0 是时间常数。对于固定的光纤类型,光纤的零色散波长 λ_0 和零色散点斜率 S_0 有相应的参考值。根据 $d\phi(\lambda)$ 的预估值可确定 $d\phi(\lambda)$ 位于第几个周期,从而消除相位模糊。

2.3 鉴相性能分析

由(3)式可得色散系数测量的相对误差传递为

$$\frac{\Delta D(\lambda)}{D(\lambda)} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta f_m}{f_m} + \frac{\Delta(d\phi)}{d\phi} + \frac{\Delta(d\lambda)}{d\lambda}. \quad (9)$$

将待测光纤长度 L 、调制频率 f_m 、相移增量 $d\phi$ 和波长间隔 $d\lambda$ 看作彼此相互独立的直接测量的量,可以看出由于 f_m 和 $d\lambda$ 稳定度较高且待测光纤长度 L 随温度变化不大,色散系数的误差主要来源是相移增量 $d\phi$,而

$d\phi$ 取决于相位鉴别的精度。

由于噪声及 A/D 采样速率的影响,相位鉴别会出现误差,以调制频率为 200 MHz 的信号为例,用 Matlab 仿真分析了在非同步采样的情况下,采样速率 f_s 、信噪比 R_{SN} 、FFT 长度 N 等因素对相位鉴别算法的影响,结果如图 3 所示。

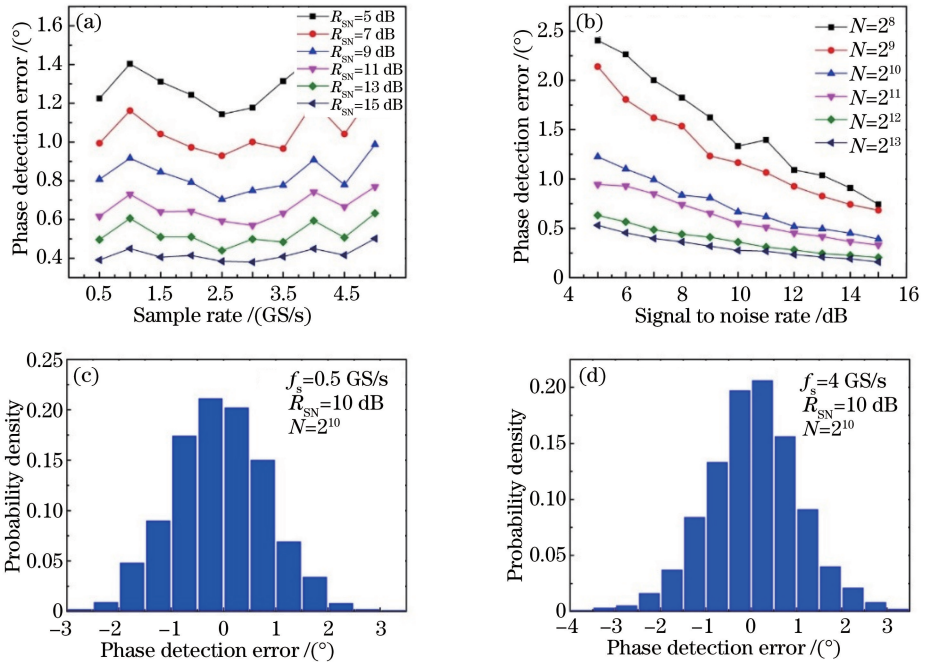


图 3 (a) 不同信噪比条件下相位鉴别误差随采样速率的变化曲线; (b) 不同 FFT 长度下相位鉴别误差随信噪比的变化曲线; (c) $f_s=0.5$ GS/s 时相位鉴别误差的概率分布; (d) $f_s=4$ GS/s 时相位鉴别误差的概率分布

Fig. 3 (a) Phase detection error as a function of sampling rate under different signal-to-noise ratios; (b) phase detection error as a function of signal-to-noise ratio under different FFT lengths; (c) probability density of phase detection error when $f_s=0.5$ GS/s; (d) probability density of phase detection error when $f_s=4$ GS/s

图 3(a) 是在 FFT 长度 $N=1024$ 、不同 R_{SN} 条件下,相位鉴别误差随采样速率的变化曲线。可以看出,在满足奈奎斯特采样率的条件下,采样速率 f_s 对相位鉴别性能基本无影响,低采样速率 f_s 也可以得到很好的鉴相性能,与频偏无关。这是由全相位 FFT 的“相位不变性”决定的,无论采样速率如何,全相位 FFT 测量的都是采样点的瞬间相位。因此只要对参考信号和接收信号用同样的采样速率,那么在参考端的初相和频偏引起的相位变化在全相位 FFT 测量的相位差中就可以抵消,从而该相位差反映的是时延带来的相位差。图 3(b) 是采样速率 $f_s=0.5$ GS/s、不同 FFT 长度 N 的情况下,相位鉴别误差随信噪比的变化。可以看出,随着 FFT 长度 N 和信噪比 R_{SN} 的增加,相位鉴别导致的误差会相应减小。图 3(c) 是 $R_{SN}=10$ dB、 $N=2^{10}$ 、 $f_s=0.5$ GS/s 的情况下,对两个相移固定的输入信号鉴别 1000 次后的相位鉴别误差的概率分布。图 3(d) 是 $R_{SN}=10$ dB、 $N=2^{10}$ 、 $f_s=4$ GS/s 的情况下,相位鉴别误差的概率分布。

综上,在较低的采样速率条件下,通过选择适当的 FFT 长度 N 既可以保证很好的相位鉴别性能又不会对 A/D 采样造成过高的要求。

2.4 曲线拟合

曲线拟合采用 PSO 算法,其基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解。即在多维空间中通过调节多个参数来寻找到全局最大值或者全局最小值^[17-20]。对于 G.652 光纤,根据 IEC 标准,色散系数 $D(\lambda)$ 可采用 3 阶 Sellmeier 多项式进行拟合,多项式表达式为

$$D(\lambda) = 2B \times \lambda - 2C \times \lambda^{-3}, \quad (10)$$

式中 B 和 C 是要拟合的系数。

PSO 算法对色散系数 $D(\lambda)$ 的拟合过程是在一定范围内寻找拟合参数 B 和 C 的最优解的过程。拟合的目标函数用数学公式表示为

$$\min_{(B,C)} [F(B,C)] = \min_{(B,C)} \left[\sum_{q=1}^Q |2B \times \lambda_q - 2C \times \lambda_q^{-3} - D_q(\lambda_q)|^2 \right], \quad (11)$$

式中 Q 是用来拟合的数据点数。 (B,C) 是根据系数 B 和 C 随机初始化的二维粒子群。图 4 中, p_{best} 为 (B,C) 中第 j 个粒子的搜索过的最优位置 p_j 的最优值, g_{best} 为 (B,C) 中所有粒子搜索过的最优位置 g 的最优值。

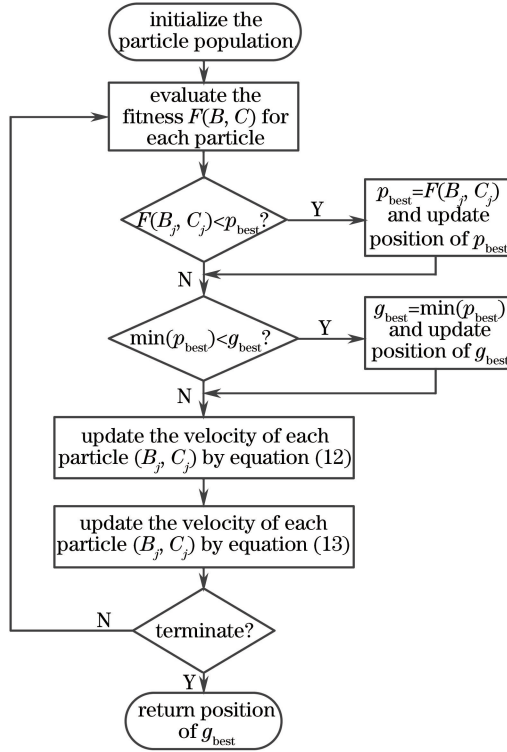


图 4 PSO 流程图

Fig. 4 Flow chart of PSO

粒子通过

$$V_j = \omega V_j + c_1 r_1 (p_j - B_j) + c_2 r_2 (g - B_j), \quad (12)$$

$$B_j = B_j + V_j \quad (13)$$

更新自己的速度和位置^[17], 式中 ω 是惯性因子, 通常为非负值, ω 值较大, 全局寻优能力强, 局部能力弱。 c_1 和 c_2 是学习因子。 r_1 和 r_2 是介于 $[0, 1]$ 之间的两个随机数。 $j = 1, 2, \dots, J$, 其中 J 是种群的规模, 一般为 $20 \sim 40$ 。对于参数 C 的求解, (12)式和(13)式同样适用。

3 实验结果及分析

实验时光源采用可调谐激光器(TLS150), 调制信号频率为 200 MHz, 调制器采用马赫-曾德尔强度调制器, A/D 采样使用示波器(MSO-X 3024A)的采样功能, 分别测量了 10.0, 50.2, 50.4, 60.2, 100.6 km 共 5 种不同长度标准单模光纤的色散值。其中损耗较大的光纤采用了掺铒光纤放大器(EDFA)进行中继放大, 使得接收端示波器能够采到较为清晰的波形。可调谐激光器调谐步长 $\Delta\lambda = 2$ nm, 示波器的采样率为 4 GS/s。图 5 给出了 100.6 km 光纤的测量结果, 波长扫描范围从 1532 nm 到 1564 nm。图 5(a)给出了示波器采样后测量的相移及消除跳变后的相移随波长的变化曲线, 通过消除跳变后的相移斜率为负可以很容易判断出 $d\phi(\lambda)$ 在 $(180^\circ, 360^\circ)$ 范围内; 图 5(b)是消除相位模糊后的相移增量 $d[\phi(\lambda) - \phi(\lambda_{\text{ref}})]$ 的测量值与估计值随波长的变化曲线, 可以看出相移增量的测量值与估计值有很高的一致性; 图 5(c)是不同波长色散系数 $D(\lambda)$ 的测量值与按照 3 阶 Sellmeier 多项式的拟合值的对比曲线, 可以看出在测量点数为 17 个的情况下, 色散系数的拟合值与测量值基本重合; 图 5(d)是采用粒子群优化算法按照 Sellmeier 多项式对同一组测量数据拟

合 100 次的两个拟合参数 B 和 C 的变化情况, B 和 C 的值变化不大。从图 5(c) 和 (d) 的 PSO 拟合结果可以看出实验方案的准确度与稳定性很好。

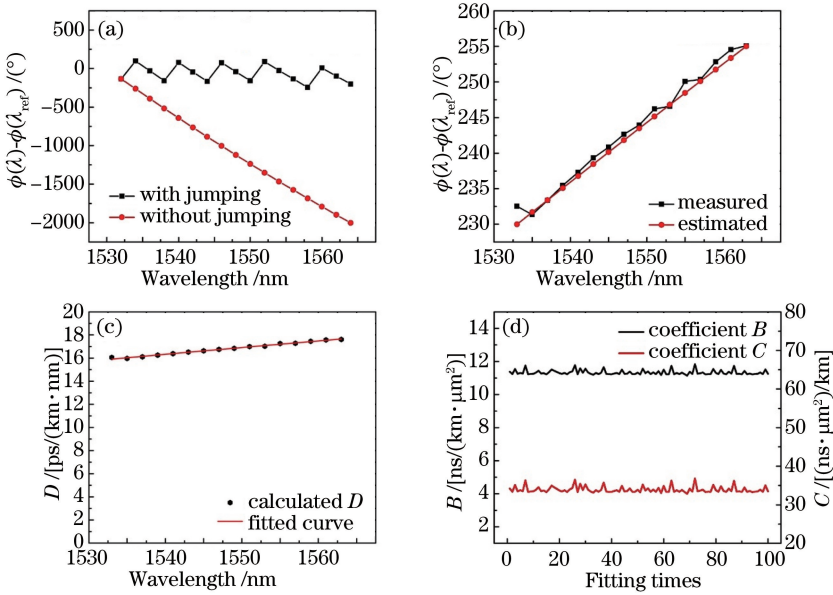


图 5 实验测量 100.6 km G.652 光纤色散的结果。(a) 测量的相移和消除跳变后的相移随波长的变化曲线; (b) 相移增量的测量值与估计值随波长的变化曲线; (c) 不同波长下色散系数的测量值与拟合值对比曲线; (d) 第 n 次拟合的参数 B 和 C

Fig. 5 Experiment results for 100.6 km G.652 fiber. (a) Phase shift with jumping and without jumping as a function of wavelength; (b) measured and estimated phase shift increment as a function of wavelength; (c) measured and fitted chromatic dispersion coefficient D for different wavelengths; (d) the n -th times fitted coefficients B and C

根据 ITUT G.652 标准, 对于 G.652 光纤, 在波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处, 色散系数 $D = 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。本课题组对长度为 100.6 km 的光纤进行了重复测量, 测量得 1550 nm 处的色散系数平均值为 $16.96 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 色散斜率为 $0.061 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 累积色散为 $1706.3 \text{ ps}/\text{nm}$, 方差为 $6.65 \text{ ps}^2/\text{nm}^2$ 。并对 5 种不同长度的光纤进行了多次测量, 得到了不同长度光纤的累积色散值, 结果如表 1 所示, 由此可得对应到 1550 nm 处 100 km 光纤的累积色散测量的标准差为 $2.58 \text{ ps}/\text{nm}$ 。

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

Parameter	value				
Fiber length /km	10	50.2	50.4	60.2	100.6
Fitted dispersion / (ps/nm)	164.9	855.1	850.8	1015.2	1706.3
Theoretical dispersion / (ps/nm)	170	853.4	856.8	1023.4	1710.2

目前城域网环境中, 商用色散测试仪 EXFO FTB-5700 给出的性能指标为: 1550 nm 处 100 km 光纤累积色散的测量不确定度为 $\pm 10 \text{ ps}/\text{nm}$, 显然改进后的方法的不确定度优于 $10 \text{ ps}/\text{nm}$ 。由表 1 也可以看出实验中测量的各个不同长度的光纤累积色散与理论值相差均小于 $10 \text{ ps}/\text{nm}$ 。

4 结 论

对传统的调制相移法色散测量方案进行了改进, 采用基于全相位 FFT 的数字域鉴相和基于 PSO 的数据处理算法, 实现了色散的精确测量。通过对影响数字鉴相精度因素的仿真分析发现: 只要满足奈奎斯特采样速率的要求, 通过适当地选择 FFT 变换的长度 N , 依然能够在低 R_{SN} 的情况得到很高的相位测量精度, 即采用低成本低采样速率的 A/D 模块就可实现高精度的相位鉴别。实验得到 1550 nm 处 100 km G.652 光纤的累积色散测量不确定度小于 $10 \text{ ps}/\text{nm}$, 结果优于目前城域网环境下的商用色散测试仪 EXFO FTB-5700 的 $\pm 10 \text{ ps}$ 指标。该研究结果对城域网环境中低成本、高精度色散测试仪的研制有重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Neumann N, Herschel R, Schuster T, *et al.* Dispersion estimation via vestigial sideband filtering using an optical delay line filter[J]. *J Opt Commun Netw*, 2011, 3(2): 155-161.
- 2 Galle M A, Mohammed W, Qian L, *et al.* Single-arm three-wave interferometer for measuring dispersion of short lengths of fiber[J]. *Opt Express*, 2007, 15(25): 16896-16908.
- 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]. *Appl Opt*, 2014, 53(9): 1929-1937.
- 4 Hlubina P, Ciprian D, Kadulová M. Measurement of chromatic dispersion of polarization modes in optical fibres using white-light spectral interferometry[J]. *Meas Sci Technol*, 2010, 21(4): 045302.
- 5 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]. *Opt Express*, 2007, 15(18): 11073-11081.
- 6 Lee J Y, Kim D Y. Versatile chromatic dispersion measurement of a single mode fiber using spectral white light interferometry[J]. *Opt Express*, 2006, 14(24): 11608-11615.
- 7 Lu P, Ding H M, Mihailov S J. Direct measurement of the zero-dispersion wavelength of tapered fibres using broadband-light interferometry[J]. *Meas Sci Technol*, 2005, 16(8): 1631-1636.
- 8 Fortenberry R, Sorin W V, Hernday P. Improvement of group delay measurement accuracy using a two-frequency modulation phase-shift method[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(5): 736-738.
- 9 Niemi T, Uusimaa M, Ludvigsen H. Limitations of phase-shift method in measuring dense group delay ripple of fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(12): 1334-1336.
- 10 Zong L J. Reliable chromatic dispersion measurement method for installed optical fibers[J]. *Appl Opt*, 2015, 54(26): 7973-7977.
- 11 Wang Zhaohua, Huang Xiangdong, Yang Wei. The measuring phase method of all-phase FFT[J]. *World Sci-tech R & D*, 2007, 29(4): 28-32.
王兆华, 黄翔东, 杨 尉. 全相位 FFT 相位测量法[J]. *世界科技研究与发展*, 2007, 29(4): 28-32.
- 12 Huang Xiangdong, Wang Bo, Du Yubin, *et al.* Variance of all-phase FFT measuring phases and its Cramer-Rao lower bound[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2013, 28(2): 160-165.
黄翔东, 王 博, 杜宇彬, 等. 全相位 FFT 测相方差及其 Cramer-Rao 下限[J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(2): 160-165.
- 13 Huang Xiangdong, Wang Zhaohua. Anti-noise performance of all-phase FFT phase measuring method[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2011, 26(3): 286-291.
黄翔东, 王兆华. 全相位 FFT 相位测量法的抗噪性能[J]. *数据采集与处理*, 2011, 26(3): 286-291.
- 14 Qi Guoqing. Error analysis of frequency and phase estimations based on phase difference of segmented FFTs[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2003, 18(1): 7-11.
齐国清. 利用 FFT 相位差校正信号频率和初相估计的误差分析[J]. *数据采集与处理*, 2003, 18(1): 7-11.
- 15 Tan Siwei, Ren Zhiliang, Sun Changcun. Improvement of phase difference correcting spectrum method based on all-phase FFT[J]. *System Engineering and Electronics*, 2013, 35(1): 34-39.
谭思炜, 任志良, 孙常存. 全相位 FFT 相位差频谱校正法改进[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(1): 34-39.
- 16 Hui R Q, O'Sullivan M. *Fiber optic measurement techniques*[M]. Burlington: Academic Press, 2009: 401-403.
- 17 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]. *Opt Express*, 2011, 19(3): 1842-1853.
- 18 Lin J, Zhao H Y, Ma Y, *et al.* New hybrid genetic particle swarm optimization algorithm to design multi-zone binary filter[J]. *Opt Express*, 2016, 24(10): 10748-10758.
- 19 Zhang X G, Zhang J Z, Duan G Y, *et al.* An experiment for obtaining DOP ellipsoid using particle swarm optimization algorithm[J]. *Chin Opt Lett*, 2005, 3(6): 316-318.
- 20 Zhou Y, Zeng G J, Yu F H. Particle swarm optimization-based approach for optical finite impulse response filter design[J]. *Appl Opt*, 2003, 42(8): 1503-1507.