

文章编号: 0253-2239(2010)11-3159-05

偏振模耦合分布式光纤传感器的数值色散补偿

陈信伟 张红霞 贾大功 刘铁根 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 从理论和实验两个方面分析并验证了白光偏振耦合分布式保偏光纤传感器探测灵敏度与光纤双折射色散的关系。提出了一种色散补偿耦合强度的计算方法。该方法在忽略光传输中微弱损耗情况下,利用耦合点干涉包络面积在存在双折射色散情况下仍然保持不变这一特性,通过对干涉包络进行希尔伯特(Hilbert)包络提取和最小二乘非线性拟合得到干涉包络的面积,从而获得经过色散补偿后的偏振耦合强度值。实验结果表明,该色散补偿算法具有很高的准确性,尤其对短光纤,绝对偏差小于0.63 dB。

关键词 光纤光学;分布式光纤传感器;数值色散补偿;双折射色散;偏振模耦合

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3159

Numerical Dispersion Compensation for Polarization-Mode Coupling Distributed Fiber Sensors

Chen Xinwei Zhang Hongxia Jia Dagong Liu Tiegeng Zhang Yimo

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technical Science,

College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The influence of birefringence dispersion on the measurement sensitivity of polarization-mode coupling white light distributed polarization maintaining fiber sensor is analyzed and experimentally investigated. A numerical dispersion compensation algorithm is presented to calculate the coupling strength. The algorithm based on the interferogram envelope area is a constant though there exists the influence of birefringence dispersion on the fiber sensor and the algorithm ignores the optical intensity loss in propagation along the fiber. The interferogram envelope area can be obtained by the Hilbert envelope retrieval and nonlinear least square fitting, and then the polarization coupling strength can be obtained. The experimental result shows that the algorithm has a high accuracy, and the absolute deviation is less than 0.63 dB for short fibers.

Key words fiber optics; distribute fiber sensors; numerical dispersion compensation; birefringence dispersion; polarization-mode coupling

1 引 言

白光干涉法偏振耦合分布式保偏光纤传感器由于其高空间分辨率和宽动态范围而被广泛应用于应力、应变、温度、气体和位置传感^[1~3]。它能在单根光纤上实现分布式传感,光纤上的任何位置都可以

作为传感元。传感器利用光纤中传输的两个正交偏振模之间的干涉来检测外部扰动源的位置和大小^[4]。由于传感器采用宽带光源,光纤两正交偏振特征轴的传播常数及色度色散系数与波长是相关的,因此必须考虑双折射色散对测量结果的影响^[5]。

收稿日期: 2010-01-10; 收到修改稿日期: 2010-04-12

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327806)、国家自然科学基金(60377031)、天津市自然科学基金(095CYBJC01300)和教育部新教师博士点基金(200800561022)资助课题。

作者简介: 陈信伟(1982—),男,博士研究生,主要从事光纤传感和测试等方面的研究。E-mail: cxw553@tju.edu.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术、嵌入式图像检测技术和防伪检测技术等方面的研究。E-mail: tgliu@tju.edu.cn

近年来,保偏光纤双折射色散对保偏光纤器件和传感器的影响有一些报道^[6],但没有提出有效方法来补偿色散对测量结果的影响。

本文分析了保偏光纤双折射色散对传感器测量的影响,根据传统耦合强度的定义从理论上模拟了计算耦合强度与光纤双折射色散的关系,并通过实验加以验证。在此基础上,提出了一种能够消除双折射色散影响的数值补偿算法。该算法基于耦合点干涉包络面积在存在双折射色散情况下仍然保持不变的特点,通过对干涉包络进行希尔伯特(Hilbert)包络提取和最小二乘非线性拟合得到干涉包络的面积,再通过包络面积得到耦合强度的值。实验结果表明,该算法能消除光纤双折射色散给测量结果带来的影响,计算准确性高。

2 理论分析

2.1 偏振耦合分布式保偏光纤传感器原理

白光干涉偏振耦合分布式保偏光纤传感器利用外界扰动引起保偏光纤发生偏振耦合,使得在一个偏振特征轴上传输的激发模的部分光将串扰至正交的另一特征轴上而形成耦合模。由于偏振模色散的存在,两模式在光纤出射端具有一定光程差,因此需通过迈克耳孙干涉仪补偿两模式间的光程差而得到干涉信号。

传感器原理图如图 1 所示,系统采用光谱分布为如下高斯型宽带 SLD 光源:

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta\omega} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\Delta\omega^2}\right], \quad (1)$$

式中 ω_0 为光谱中心频率, $\Delta\omega$ 为光谱半峰全宽, ω 为光波频率。

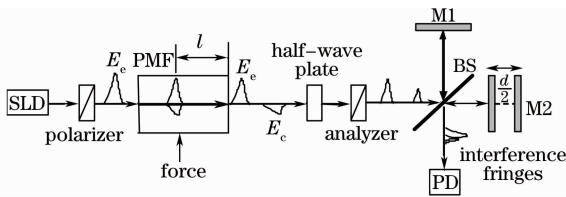


图 1 光纤传感器原理图

Fig. 1 Schematic of the fiber sensor

在不考虑光纤双折射色散情况下,探测器接收到的光强可表示为^[7]

$$I_{out} = I_0 \left\{ 1 + \exp\left[-\left(\frac{d}{L_{co}}\right)^2\right] \cos(k_0 d) + \sqrt{h - h^2} \exp\left(-\frac{L_{co}^2 d^2}{2}\right) \cos(\Delta\beta l - k_0 d) \right\}, \quad (2)$$

式中 I_0 为干涉直流分量, $\Delta\beta$ 为光纤两特征轴传播

常数差, L_{co} 为光源相干长度, d 为迈克耳孙干涉仪两臂光程差, k_0 为光在真空中传播常数, l 为耦合点距光纤出射端的长度, h 为耦合点耦合强度。 $I_0 \exp\left[-\left(\frac{d}{L_{co}}\right)^2\right] \cos(k_0 d)$ 为迈克耳孙干涉仪两臂平衡时的干涉包络光强分布,称为两激发模之间的主极大干涉。耦合模与激发模之间的干涉形成的耦合点干涉包络可表示为

$$I_c = I_0 \sqrt{h - h^2} \exp(-L_{co}^2 d^2 / 2) \cos(\Delta\beta l - k_0 d). \quad (3)$$

图 2 表示光纤中有一个耦合点的干涉图,由于干涉仪两臂光程差 d 便可对受力点进行定位。

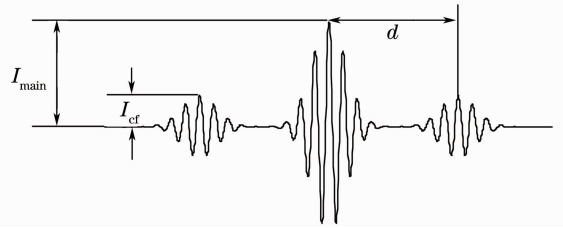


图 2 一个耦合点时输出干涉图

Fig. 2 Read out of the interferogram of one coupling point

目前,普遍采用的耦合强度计算方法为^[7]

$$h = 10 \lg(I_{cf} / I_{main})^2. \quad (4)$$

式中 I_{cf} 和 I_{main} 分别为耦合点干涉包络和主极大干涉包络的幅值。根据偏振耦合三段保偏光纤串接应力传感器的理论模型可建立耦合强度与光纤受力大小和方向的关系为^[6]

$$h = F^2 \sin^2 2\alpha \cdot \left\{ \frac{\sin\left[\pi \sqrt{1 + F^2 + 2F \cos 2\alpha} (l/L_{bo})\right]}{\sqrt{1 + F^2 + 2F \cos 2\alpha}} \right\}^2. \quad (5)$$

式中 L_{bo} 为保偏光纤拍长, F 为应力大小, α 为应力方向。通过偏振耦合点耦合强度的大小便能得到光纤受力大小和力的方向。

2.2 双折射色散对传感器的影响

色散存在于利用迈克耳孙干涉仪的诸多测量中^[8,9]。一般情况下,保偏光纤中传输的两个模式的传播常数差 $\Delta\beta(\omega)$ 与波长是相关的, $\Delta\beta(\omega)$ 可展开成泰勒级数形式:

$$\Delta\beta(\omega) = \beta_x(\omega) - \beta_y(\omega) = \frac{\omega_0}{c} \Delta n + \frac{\omega - \omega_0}{c} \Delta N - \pi c \frac{(\omega - \omega_0)^2}{\omega_0^2} \Delta D. \quad (6)$$

式中 Δn 为相位双折射, ΔN 为群双折射, ΔD 为光纤的双折射色散,它可以表示为

$$\Delta D = d\tau/d\lambda = -[\omega_0^2 / (2\pi c)] (d^2 \Delta\beta / d^2 \omega)_0. \quad (7)$$

式中 τ 为光纤的偏振模色散(PMD), c 为光速。 ΔD 反映的是光纤中两正交偏振特征轴色度色散的差值与波长的依赖关系。

考虑光纤双折射色散的影响, 干涉仪输出光强可表示为

$$I_{\text{DS-out}} = (1/2) \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \{1 + \text{Re}\{\exp\{i[\Delta\beta(\omega)l - \omega d/c]\}\}\} d\omega =$$

$$I_0 \left\{ 1 + \exp\left[-\left(\frac{d}{L_{\text{co}}}\right)^2\right] \cos(k_0 d) + \frac{\sqrt{h-h^2}}{\sqrt{1+\eta^2}} \times \right.$$

$$\left. \exp\left[-\frac{1}{1+\eta^2} \frac{(\Delta Nl-d)^2}{2L_{\text{co}}^2}\right] \cos\left[-\frac{\eta}{1+\eta^2} \frac{(\Delta Nl-d)^2}{2L_{\text{co}}^2} + \frac{\omega_0}{c} (\Delta n \frac{1}{2} \arctan \eta)\right] \right\}. \quad (8)$$

式中 $\eta = (\Delta\lambda/\lambda_0)^2 \cdot 2\pi c(\Delta D)l$, $\Delta\lambda$ 和 λ_0 分别为光源光谱半峰全宽和光源中心波长。

将(8)式与(2)式对比可知, 在考虑光纤双折射色散情况下, 两激发模的主极大干涉包络的幅值保持不变, 但随着耦合点距光纤输出端长度的增加, 耦合点干涉包络的幅值将以 $(1+\eta^2)^{-1/4}$ 的速度衰减, 干涉包络宽度将以 $(1+\eta^2)^{1/2}$ 的速度展宽。根据上述耦合强度的定义, 计算耦合强度也将随着耦合点距光纤输出端长度的增加而降低, 图 3, 4 分别为计

算耦合强度衰减速度与包络展宽速度随光纤长度变化关系曲线。

从图中可以看到, 由于光纤双折射色散的存在, 按照上述耦合强度的计算方法将会使结果出现很大误差, 所以有必要对(4)式算法进行色散补偿。

3 数值色散补偿算法及结果

根据上面的分析可以看到, 虽然耦合点干涉包络随着耦合点距光纤出射端长度的增加而展宽, 导致干涉包络的幅值衰减。但是, 由(8)式可看出, 耦合点干涉包络的面积是不变的, 因此可以将耦合强度的定义表示为耦合点干涉包络的面积 S_{cf} 与两激发模干涉主极大包络的面积 S_{main} 的比值, 即

$$h = 10\lg(S_{\text{cf}}/S_{\text{main}})^2. \quad (9)$$

首先, 采用 Hilbert 变换对干涉包络进行提取。白光干涉包络可认为是受高斯型包络调制的余弦震荡信号, 因此可以利用(10)式对 Hilbert 变换得到的干涉包络进行高斯非线性最小二乘拟合, 得出白光干涉包络的数学表达式

$$f(x) = a \exp\left[-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right], \quad (10)$$

式中 a 表示干涉包络的幅值, b 表示包络中心位置, c 为包络宽度。

干涉包络的面积就可表示为

$$S = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} a \exp\left[-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right] dx. \quad (11)$$

实验原理图如图 1 所示, 实验中被测光纤是一长为 510 m 的熊猫保偏光纤, 拍长为 2.6 mm, 偏振串音为 -37.25 dB。迈克耳孙干涉仪所用平移台导轨的分辨率为 100 nm, 光源为高斯型光谱分布的超辐射二极管(SLD)光源, 中心波长为 1328 nm, 光谱半峰全宽为 35.8 nm。待测光纤熔接到长度为 1m 的两根保

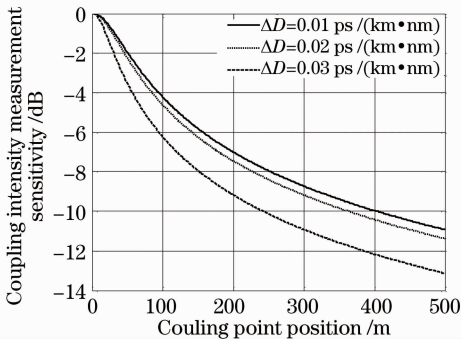


图 3 计算耦合强度与耦合点位置的关系

Fig. 3 Dependence of measurement sensitivity on coupling point position

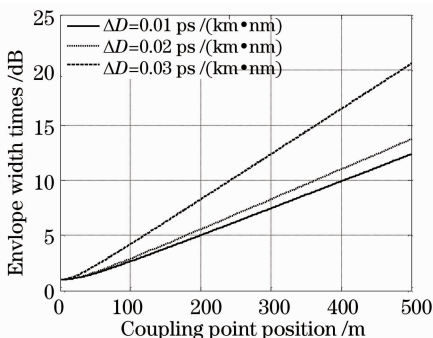


图 4 包络展宽速度与耦合点位置的关系

Fig. 4 Dependence of envelope widening on coupling point position

偏跳线上,保偏跳线通过适配器与光纤起偏器连接。由于起偏器和保偏跳线对轴不能完全准确,将激发两个模式在光纤中传输,因此光纤入射端处等同于一个固有耦合点。采用一可旋转的半波片可实现检偏器检偏角的任意调整。实验用 1m 的保偏跳线通过旋转半波片来测量 10 次跳线处的消光比,结果如表 1 所示。测量得到消光比平均值为 -20.72 dB,标准差为 0.042 dB。远大于光纤偏振串音,因此可以认为该耦合点耦合强度即为 -20.72 dB。

图 5(a)为该耦合点经过 310 m 光纤传输后的干涉包络,图 5(b)为干涉主极大干涉包络。通过非线性最小二乘拟合得到两包络曲线方程分别为

$$f_{\text{coupling}}(x) = 28.56 \exp \left[- \left(\frac{x - 1521}{517.74} \right)^2 \right], \quad (12)$$

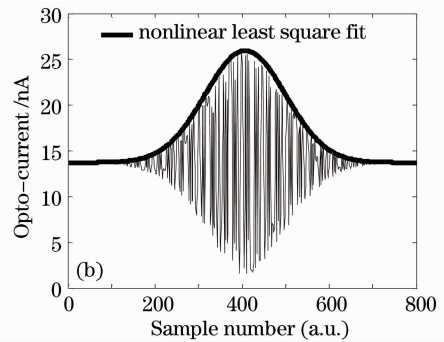
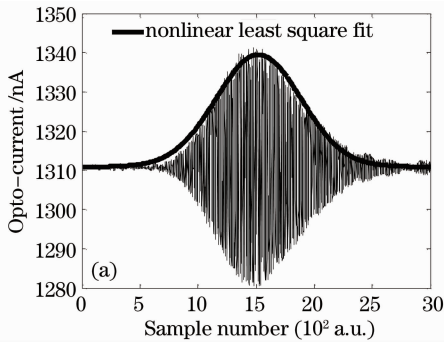


图 5 白光包络非线性最小二乘拟合。(a)耦合点干涉包络;(b)主极大干涉包络

Fig. 5 Nonlinear least square fit of white light interference envelope. (a) interferogram envelope of the coupling point; (b) interferogram envelope of the zero optical path difference

保持起偏器与保偏跳线连接不动,以确保该处耦合强度大小保持不变,在保偏跳线上熔接不同长度的光纤,通过上述数值色散补偿方法来计算耦合强度的大小。实验时采用时域^[10]和频域迈克耳孙干涉方法^[11,12]测量得到待测光纤的双折射色散值为 0.018 ps/(km·nm)。图 6 显示了根据原算法(4)式得到的实验结果和本文提出色散补偿算法(9)式得到的实验结果。

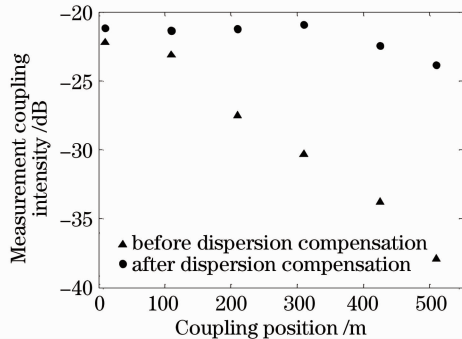


图 6 两种算法的计算结果

Fig. 6 Results of the two algorithms

$$f_{\text{main}}(x) = 1222.76 \exp \left[- \left(\frac{x - 407}{130.68} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

表 1 跳线耦合点处消光比测试数据

Table 1 Extinction ratio of the intrinsic coupling point

Measurement times	Extinction ratio /dB
1	-20.69
2	-20.81
3	-20.68
4	-20.68
5	-20.74
6	-20.74
7	-20.75
8	-20.74
9	-20.68
10	-20.72

从图 6 可以明显看到,在没有进行色散补偿情况下,计算耦合强度随耦合点位置距光纤出射端长度的增加而衰减,衰减趋势与理论模拟相吻合。采用色散补偿算法后,各光纤长度下的耦合强度值得到了很好的修正,且与该耦合点的实际耦合强度偏差很小。

实验时分别对长度为 10,110 和 310 m 的保偏光纤进行了 5 次测量,其测量结果、标准差及绝对误差如表 2 所示。

从表 2 可以看到,经色散补偿后,当光纤长度小于 310 m 时,测量误差小于 0.51 dB。耦合强度的测量值与实际耦合强度相比,绝对误差小于 0.63 dB,说明该算法具有更好的准确性。

从图 6 还可以看出,随着耦合点距光纤出射端长度的增加,经过补偿后的耦合强度值仍然有微弱的衰减,原因有以下三个方面:

1) 随着光纤长度的增加,光在传输过程中存在信号的衰减;

2) 迈克耳孙干涉仪两臂中的两个反射镜存在

表 2 各光纤长度下两种算法计算结果及误差

Table 2 Results and errors of the two algorithms at different fiber length

Measurement times	Measurement of coupling intensity /dB					
	Before dispersion compensation /m			After dispersion compensation /m		
	10	110	310	10	110	310
1	-22.20	-22.83	-30.21	-21.48	-20.57	-20.51
2	-21.88	-23.26	-30.50	-21.72	-21.73	-20.68
3	-22.54	-23.15	-29.77	-21.37	-21.19	-21.37
4	-22.08	-23.09	-30.46	-20.76	-21.84	-20.83
5	-22.32	-23.49	-30.47	-20.71	-21.43	-21.38
Mean /dB	-22.20	-23.16	-30.28	-21.21	-21.35	-20.95
Std /dB	0.25	0.24	0.31	0.45	0.51	0.40
Absolute error /dB	1.48	2.44	9.56	0.49	0.63	0.23

微小夹角也会引起干涉信号的对比度下降并最终导致耦合强度探测灵敏度降低^[13];

3) 随着光纤长度的增加,双折射色散对测量的影响将表现的很明显,它会使高斯型干涉包络出现拖尾现象,从而对最小二乘拟合带来误差。

4 结 论

分析了保偏光纤双折射色散对偏振模耦合分布式保偏光纤传感器的影响。理论模拟表明,由于光纤双折射色散的存在,耦合点距光纤出射端距离增大时,耦合点干涉包络的幅值将以 $(1 + \eta^2)^{-1/4}$ 速度衰减,干涉包络宽度将以 $(1 + \eta^2)^{1/2}$ 的速度展宽,实验结果也验证了这种趋势。在不对计算耦合强度进行色散补偿情况下,计算耦合强度也将随着光纤长度的增加而降低。将数值色散补偿用于耦合强度的计算中,实验结果表明,该方法有效地提高了耦合强度计算的准确性,当光纤长度小于 310 m 时,该算法的绝对误差小于 0.63 dB。

参 考 文 献

- 1 D. Donagic, M. Lesic. All-fiber quasi-distributed polarimetric temperature sensor [J]. *Opt. Express*, 2006, **14** (22): 10245~10254
- 2 Z. He, K. hotate. Dsitrubuted fiber-optic stress-location measurement by arbitrary shaping of optical coherence function [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(9): 1715~1723
- 3 S. Caron, C. Pare, P. Paradis *et al.*. Distributed fiber optics polarimetric chemical sensor[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**: 1075~1081
- 4 Zhou Xiaojun, Gong Junjie, Liu Yongzhi *et al.*. Analysis of

- white-light interference distributed optic fiber sensor by polarized modes coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 605~608
- 周晓军, 龚俊杰, 刘永智 等. 白光干涉偏振模耦合分布式光纤传感器分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 605~608
- 5 N. Shibata, A. Nakazono, Y. Inoue. Interference between two orthogonally polarized modes traversing a highly birefringent air-silica microstructure fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1244~1252
- 6 T. H. Xu, W. C. Jing, H. X. Zhang *et al.*. Influence of birefringence dispersion on a distributed stress sensor using birefringence optical fiber[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**: 83~89
- 7 W. Jing, Y. Zhang, G. Zhou *et al.*. Rotation angle optimization of the polarization eigenmodes for detection of weak mode coupling in birefringent waveguides[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(18): 972~977
- 8 P. Pavlicek, J. Soubusta. Measurement of the influence of dispersion on white-light interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 766~770
- 9 Ren Hongliang, Wang Jiuyang, Lou Liren *et al.*. Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using michelson interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 249~253
- 任洪亮, 王久扬, 楼立人 等. 利用迈克耳孙干涉仪测量波片相位延迟量和快轴方向[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 249~253
- 10 F. Tang, X. Z. Wang, Y. Zhang *et al.*. Distributed measurement of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(23): 3411~3413
- 11 Wang Sijia, Zhang Yuying, Hu Minglie *et al.*. Chromatic dispersion measurement of photonic crystal fibers using spectral interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 215~219
- 王思佳, 张玉颖, 胡明列 等. 频域干涉法测量光子晶体光纤的色散特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 215~219
- 12 Ting Zhang, Zhi Yang, Wei Zhao *et al.*. Dispersion measurement of Yb-doped fiber by a spectral interferometric technique[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(3): 262~265
- 13 H. Zhang, T. Xu, D. Jia *et al.*. Effects of angular misalignment in interferometric detection of distributed polarization coupling [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**: 1~5