

基于 Sagnac 干涉仪的光纤长度测量方法

郑祥亮, 孙权社, 韩 忠, 刘志明, 赵发财

中国电子科技集团公司第四十一研究所计量站, 山东 青岛 266555

摘要 新一代光纤传感系统对光纤长度测量精度的要求越来越高,因此提出了一种基于 Sagnac 干涉仪的光纤长度测量方法,介绍了该测量方法的基本原理和实验装置,并进行了不同长度光纤的测量实验,研究了光源偏振态和光纤扰动对测量结果的影响。结果表明,所提方法的测量精度可以达到厘米量级,测量范围可以达到 1~10 km。

关键词 光纤光学; 光纤长度; 干涉测量; 偏振态; 测量精度

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0106003

Fiber Length Measurement Method Based on Sagnac Interferometer

Zheng Xiangliang, Sun Quanshe, Han Zhong, Liu Zhiming, Zhao Facai

Measurement Station, The 41st Institute, China Electronics Technology Group Corporation
Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract The measurement accuracy requirement for fiber length is higher and higher in the new generation fiber sensing system. A fiber length measurement method based on Sagnac interferometer is proposed. The basic principle and the experimental setup of the proposed method are introduced. Experiments of fiber length measurement are conducted. The influences of polarization state of light source and fiber disturbance on measurement results are verified. Results show that the measurement accuracy of the proposed method can reach centimeter scale and the measurement range is from 1 km to 10 km.

Key words fiber optics; fiber length; interferometric measurement; polarization state; measurement accuracy

OCIS codes 060.2300; 060.2310; 060.2370

1 引 言

随着光纤传感技术的迅猛发展,对光纤长度测量精度的要求日益提高,常用的光时域反射计(OTDR)^[1-2]测量方法已经无法满足要求。同时,由于 OTDR 是基于光纤的散射原理对光纤长度进行测量,而光纤自身的散射信号较弱,因此 OTDR 对光源和探测器的要求较高,增加了系统的成本。改变光纤中的光波相位可测量光纤的长度,该方法经济有效且测量精度高。Sagnac 光纤干涉仪是一种基于 Sagnac 效应^[3-5]研制而成的光纤传感系统,广泛应用于光纤陀螺和光纤传感领域,但其在光纤长度测量方面的应用鲜有文献报道。本文研究了基于频移不对称 Sagnac 干涉仪的光纤长度测量方法,设计了相应的测量系统,该系统包括一个 Sagnac 干涉结构和一个声光移频器(AOM),通过 AOM 控制光波信号的频率变化量,从而实现 Sagnac 干涉仪中顺时针和逆时针光信号的干涉^[6-9]。本文阐述了光纤长度测量系统的工作原理,讨论了测量系统中影响测量精度的因素,并给出实验系统的测量结果及其与标准值的对比结果。

2 理论与方法

不同频率的光在同一光纤中传输时所产生的相位延迟是不同的,因此 Sagnac 干涉仪中的两束不同频率的光信号分别沿顺时针和逆时针传输后,两束光之间会产生相位差,进而在光纤耦合器的另一输入端发生干涉。利用光电探测器(O/E)将干涉信号提取出来,再根据干涉光路中的移频量和干涉条纹数计算被测光纤

收稿日期: 2016-06-29; **收到修改稿日期:** 2016-08-01

基金项目: 国防军工技术基础科研项目(J312013A002)

作者简介: 郑祥亮(1987—),男,硕士,助理工程师,主要从事光通信与传感等方面研究。E-mail: eiqd@ei41.com

的长度值,测量原理示意图如图 1 所示。

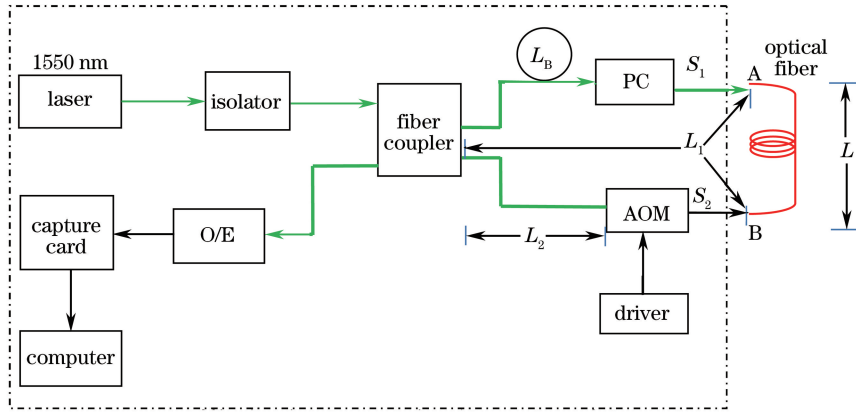


图 1 基于 Sagnac 干涉仪的光纤长度测量示意图

Fig. 1 Diagram of fiber length measurement based on Sagnac interferometer

当两路信号 I_1 和 I_2 满足稳定干涉条件时,探测器得到的干涉信号可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta \langle \cos \sigma \rangle, \quad (1)$$

式中 θ 为两相干信号的夹角, σ 为两信号在干涉点的相位差。 σ 为空间位置 P 的函数,与时间无关,即 $\langle \cos \sigma \rangle = \cos \sigma(P)$, 因此(1)式可简化为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta \cos \sigma(P). \quad (2)$$

干涉场中满足 $\cos \sigma(P) = 1$ 的位置,其光强可取得极大值

$$I_{\text{Max}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta, \quad (3)$$

反之,干涉场中满足 $\cos \sigma(P) = -1$ 的位置,其光强可取得极小值

$$I_{\text{Min}} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta. \quad (4)$$

为反映干涉条纹亮暗对比的清晰程度,引入干涉条纹的衬比度来进行衡量。衬比度可表示为

$$V = \frac{I_{\text{Max}} - I_{\text{Min}}}{I_{\text{Max}} + I_{\text{Min}}}. \quad (5)$$

将(3)、(4)式代入(5)式中可得

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \cos \theta = \frac{2\sqrt{m}}{1+m} \cos \theta, \quad (6)$$

式中 m 为参与干涉的两束光的光强比, $m = I_1/I_2$ 。

光信号被 2×2 光纤耦合器均分为两束光 S_1 和 S_2 , S_1 沿顺时针方向传播, S_2 沿逆时针方向传播。声光移频器的作用是使经过它的光产生频移 f 。假设光经过声光移频器之前的波长和频率分别为 λ 和 ν , 发生频移后的波长和频率变为 λ' 和 ν' , 两束光 S_1 和 S_2 的相位延迟分别为

$$\theta_1 = 2\pi n L_1 / \lambda + 2\pi n L / \lambda' + 2\pi n L_2 / \lambda', \quad (7)$$

$$\theta_2 = 2\pi n L_2 / \lambda + 2\pi n L / \lambda' + 2\pi n L_1 / \lambda', \quad (8)$$

式中 n 为光纤的群折射率; L 为被测光纤的长度; L_1 为连接光纤的总长度,即耦合器与 A 点之间的光纤长度加上耦合器与 B 点之间的光纤长度; L_2 为耦合器与声光移频器之间的光纤长度。

由(6)~(8)式可得,干涉模型^[10]为

$$V = \frac{2\sqrt{m}}{1+m} \cos(\theta_2 - \theta_1) = \frac{2\sqrt{m}}{1+m} \cos \left[\frac{2\pi n f (L + L_0)}{c} \right], \quad (9)$$

式中 $L_0 = L_1 - L_2$, c 为真空中的光速。光路确定后 m 为定值,当 $\theta_2 - \theta_1 = 2N\pi$ (N 为干涉条纹的周期数) 时, V 最大,此时干涉条纹的衬比度最大,得到的干涉条纹也最清晰。干涉条纹衬比度最大时满足

$$\frac{2\pi n (f_{k+N} - f_k) (L + L_0)}{c} = 2N\pi. \quad (10)$$

此时,通过(10)式可以推算出被测光纤的长度为

$$L = \frac{Nc}{n(f_{k+N} - f_k)} - L_0. \quad (11)$$

为方便得到干涉条纹的周期数 N ,在读取干涉条纹中对应的 f_k 和 f_{k+N} 时,应分别选取最小值点作为判断依据。例如, f_k 为对应第 1 个周期的最小值点对应的频率, f_{k+N} 为对应第 $N+1$ 个周期的最小值点对应的频率。通过参考光纤法^[11-12]将影响因子 L_0 排除,即将已知标准长度 L_B 的光纤加入该装置中,利用该装置得到被测光纤的长度 L ,再利用公式 $L_0 = L - L_B$ 得到未知常数 L_0 。

3 实验装置

实验装置主要包括光源、隔离器、AOM、偏振控制器(PC)、 2×2 光纤耦合器、驱动器、光电探测器、数据采集卡、被测光纤和计算机控制系统等。光源为分布式反馈(DFB)激光器(81663A,是德公司),波长为 1550 nm;隔离器为光纤隔离器(ISS-1550-FCUPC,Newport 公司),隔离度大于 50 dB,可避免光纤耦合器输入端反射光进入激光器;声光移频器(AMF-100-20-1550-2FP-X,Brimrose 公司)中的双通道驱动器可用来控制移频器的频率偏移,该移频器的中心频率为 100 MHz,带宽为 20 MHz;偏振控制器(MPC-201,GP 公司)用来控制光路中两路信号的偏振态,从而使干涉信号达到最佳的条纹对比度;光电探测器(1811-FC,Newport 公司)的带宽为 125 MHz;数据采集卡(9223,NI 公司)的采样位数为 16,采样率为 1 MSa/s。利用计算机软件处理采集的干涉信号,并计算光纤长度。

4 实验结果与分析

4.1 光纤最佳测量长度

选用不同长度的被测光纤验证测量系统。将实验装置的测量结果与 OTDR 的测量结果进行对比,分析得到实验装置测得的准确的光纤长度值。不同长度光纤的测量结果及其与标准长度值的差值 L_0 。如表 1 所示。

表 1 不同长度光纤的测量结果

Table 1 Measurement results of fibers with different lengths

Parameter	Measured value						
	Label 1	Label 2	Label 3	Label 4	Label 5	Label 6	Label 7
M_1	10.31	35.01	1027.11	3018.71	6268.32	10111.99	40232.05
M_2	10.31	35.22	1028.78	3018.36	6268.56	10111.86	40231.99
M_3	10.54	35.47	1026.68	3018.45	6268.88	10111.83	40230.48
M_4	10.37	36.31	1026.27	3018.52	6269.27	10111.87	40231.68
M_5	10.47	36.15	1027.00	3018.34	6268.88	10111.62	40231.82
M_6	10.47	35.86	1025.96	3018.62	6268.78	10111.57	40230.89
Average value	10.41	35.67	1026.97	3018.50	6268.78	10111.79	40231.49
L_0	0.36	15.57	8.17	8.16	8.58	8.49	6.99

光纤标号为 1~7 的标准长度值分别为 10.05, 20.10, 1018.80, 3010.34, 6260.23, 10103.56, 40224.56 m。实验中对不同长度的光纤进行了 6 次测量,对应的测量值分别为 $M_1 \sim M_6$ 。当被测光纤太长或者太短时,该实验装置都无法得到准确的光纤长度。装置的最佳测量范围为 1~10 km。

结合实验装置的测量原理对实验结果进行分析。由于两路光分别在 Sagnac 干涉仪中沿顺时针和逆时针传播时,经过被测光纤的频率不同,因此两种情况下的光经过被测光纤后的相位不同。如果被测光纤的长度很短,得到干涉条纹的个数会很少。当被测光纤长度为 10 m 时,干涉条纹图形如图 2 所示,得到的干涉条纹不足一个周期,此时无法准确得到干涉条纹中的两个最小值点。当被测光纤长度为 20 m 时,也无法得到光纤的准确长度值。当被测光纤长度为 40 km 时,得到的干涉条纹数过多,导致系统的测量误差较大(约为 1.27 m)。

4.2 光源偏振态对测量结果的影响

为验证光源偏振态^[13-14]对干涉信号的影响以及对光纤长度测量结果的影响,需要通过偏振控制器控制输出光的偏振态,使进入 Sagnac 环中光的偏振态发生变化,从而得到不同偏振态下对应的测量结果。不同

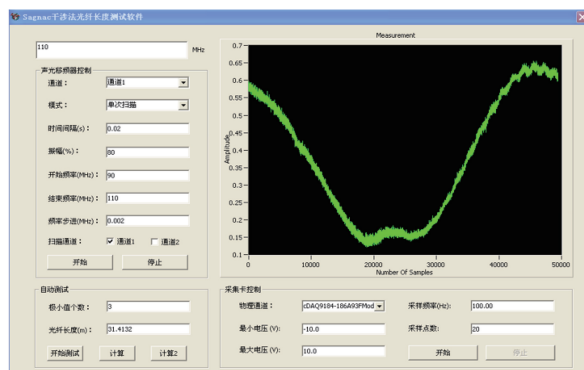


图 2 被测光纤长度为 10 m 时的干涉条纹

Fig. 2 Interference fringes of 10 m measured fiber

偏振状态下被测光纤的测量结果如表 2 所示。对每种偏振态测量 3 次(L1、L2、L3),每组测量都在温度为 21.4 °C 条件下进行。偏振控制器通过改变 4 个波片的位置来控制 Sagnac 环中光的偏振态,表 2 中数字 0, 2, 4 分别代表对应的波片转过了 0°、90°、180°,例如(2,2,4,4)即表示第 1 个波片和第 2 个波片旋转了 90°,第 3 个和第 4 个波片旋转了 180°。

表 2 不同偏振状态下被测光纤的测量结果

Table 2 Measurement results of measured fiber under different polarization states

Measurement label	Polarization state	Measurement length /m
L1		1026.58
L2	(0,0,4,4)	1027.62
L3		1026.79
L1		1026.89
L2	(2,2,4,4)	1026.76
L3		1026.69
L1		1026.90
L2	(4,4,0,0)	1026.48
L3		1026.38
L1		1027.00
L2	(4,4,2,2)	1026.90
L3		1026.69
L1		1026.89
L2	(4,0,4,0)	1026.69
L3		1027.22
L1		1025.94
L2	(4,2,4,2)	1026.27
L3		1027.53

由表 2 可知,在温度相同的情况下,光源的偏振态影响测量结果的稳定性。当波片位置为(2,2,4,4)时,可获得最佳的测量结果。

4.3 光纤扭动、扰动对测量结果的影响

扭转和扰动光路中连接的光纤跳线,得到的干涉条纹如图 3 所示。观察采集卡得到的干涉条纹,利用软件计算得到被测光纤的长度值。实验中,对长度为 108.80 m 的光纤进行测量,得到光纤长度的测量值为 1059.81 m,显然,光纤的扭转和扰动影响了光纤长度的测量结果。出现该现象的原因为:光纤受到扭转会产生几何效应和光弹效应,这两种效应都会引起光波偏振态的变化。几何效应表现为横向电场的偏振态会随着光纤的扭转角度发生相同角度的扭转,即几何效应使偏振面在电磁场(HE₁₁)奇模和偶模的本征方向发生旋转。光弹效应^[15-16]表现为光纤内部因扭转力的存在而产生弹性畸变场,导致折射率或介电常数发生改变。由于以上两种效应的作用,当光纤跳线受到扭转或者扰动时,Sagnac 干涉信号会发生很大变化,进而影响被

测光纤的测量值。

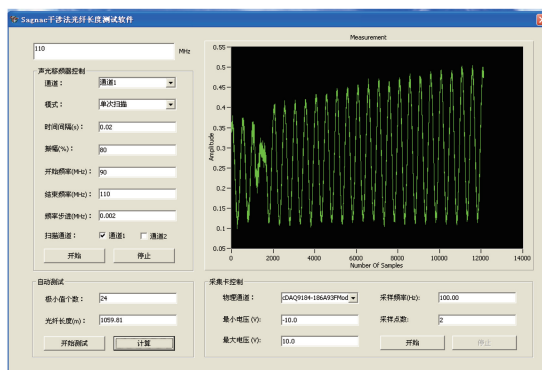


图 3 光纤受到扭转或扰动时的干涉图形

Fig. 3 Interference pattern when fiber is subjected to torsion or disturbance

5 结 论

提出了一种基于 Sagnac 干涉仪的光纤长度测量方法。通过对不同长度的被测光纤进行重复测量,得到基于 Sagnac 干涉仪的光纤长度测量系统的最佳测量范围为 1~10 km,且光纤长度的测量精度可达到厘米量级。通过控制入射光的偏振态,得到了系统的最佳偏振态对应的波片状态为(2,2,4,4),并且发现光纤受到扭转或扰动后会对实验结果造成影响。

参 考 文 献

- [1] Li Min. Application of optical cable monitoring system in power communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2008, 29: 64-67.
李 敏. 光缆监测系统在电力通信网中的应用[J]. 电力系统通信, 2008, 29: 64-67.
- [2] Yuan Guoliang. Principle of optical fiber communication[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
袁国良. 光纤通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [3] Bian Pang, Wu Yuan, Jia Bo, *et al.* Position determination of disturbance along a modified Sagnac interferometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(12): 2870-2874.
卞 庞, 吴 媛, 贾 波, 等. 基于改进型 Sagnac 干涉仪的扰动定位系统[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2870-2874.
- [4] Li Churui, Wang Chao, Xiao Qian. Novel fiber length measurement system based on fiber interferometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 415-419.
李楚瑞, 王 超, 肖 倩. 基于全光纤干涉的新型光纤长度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 415-419.
- [5] Shi Nuannuan, Gu Yiyang, Hu Jingjing, *et al.* Study of the tunable optical comb filter based on Sagnac interferometer loop[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0306001.
石暖暖, 谷一英, 胡晶晶, 等. 基于 Sagnac 环可调谐光梳状滤波器特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0306001.
- [6] Zu Peng, Xiang Wanghua, Bai Yangbo, *et al.* A novel fiber Sagnac magnetic field sensor based on magnetic fluid[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0806005.
祖 鹏, 向望华, 白扬博, 等. 一种新型的基于磁性液体的光纤 Sagnac 磁场传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0806005.
- [7] Wang Jufeng, Zhuang Linling, Liu Shiwei, *et al.* Fiber Bragg grating sensor demodulation technology with high stability by using Sagnac loop filter[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905004.
王巨锋, 庄琳玲, 刘士伟, 等. 基于光纤 Sagnac 环滤波器的高稳定光纤布拉格光栅传感解调技术[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905004.
- [8] Liu Lihui, Chen Shaohua, Zhao Qida, *et al.* Study on the automatic compensation of a Sagnac loop[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(9): 1663-1665.
刘丽辉, 陈少华, 赵启大, 等. Sagnac 滤波器的自动补偿[J]. 半导体学报, 2006, 27(9): 1663-1665.
- [9] Fang X. A variable-loop Sagnac interferometer for distributed impact sensing[J]. Journal of lightwave technology,

- 1996, 14(10): 2250-2254.
- [10] Cai Lüzhong, Wang Chengyan, Zhou Yufang. Optics[M]. Jinan: Shandong University Press, 2002: 124-128.
蔡履中, 王成彦, 周玉芳. 光学[M]. 济南: 山东大学出版社, 2002: 124-128.
- [11] Fang Yuwen, Lu Jingsan. Optical fiber length standard and optical time domain reflectometry (OTDR) verification device[J]. China Metrology, 1999(8): 44-45.
方毓文, 卢敬叁. 光纤长度标准和光时域反射计(OTDR)检定装置[J]. 中国计量, 1998(8): 44-45.
- [12] Wu Yongsheng. Evaluation of uncertainty of measurement of optical time domain reflect meter verification equipment [J]. Metrology & Measurement Technology, 2006, 26(2): 51-52.
武勇生. 光时域反射仪检定装置测量不确定度评定[J]. 计测技术, 2006, 26(2): 51-52.
- [13] Zhang Xiaoguang, Fang Guangqing, Zhao Xinyuan, *et al.* Experimental research of polarization stabilization in optical fiber communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 888-891.
张晓光, 方光青, 赵鑫媛, 等. 光纤中偏振稳定控制的实验研究[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 888-891.
- [14] Zhao Huan, Ma Haiqiang, Li Yaling, *et al.* Polarization control for optical fiber quantum cryptography[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2005, 11(2): 74-78.
赵 环, 马海强, 李亚玲, 等. 全光纤量子保密通信中的偏振控制[J]. 量子光学学报, 2005, 11(2): 74-78.
- [15] Peng Xingling, Zhang Hua, Li Yulong. Thermal stress and the associated photoelastic effect of the metal coated fiber loop[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106004.
彭星玲, 张 华, 李玉龙. 金属镀层光纤环的热应力及其引起的弹光效应[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106004.
- [16] Wang Zhongren, Yuan Shijian, Hu Lianxi, *et al.* Fundamentals of elasticity and plasticity [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 134-139.
王仲仁, 苑世剑, 胡连喜, 等. 弹性与塑性力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 134-139.