

基于 Sagnac 干涉仪的光纤非接触式瞬变信号测量技术*

陶沛琳, 王燕花, 任文华, 谭中伟, 延凤平, 简水生

(北京交通大学 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要:基于对 Sagnac 干涉仪在外界瞬变信号影响下响应特性的理论分析,提出了一种基于光纤 Sagnac 干涉仪的非接触式测量技术.针对陷波波形的特性,提出了相应的解调技术.实验结果表明,基于 Sagnac 干涉仪的非接触式测量技术不仅能识别瞬变信号,同时能实现对信号源的良好定位,相对定位准确度达到 1.5%.

关键词:Sagnac 干涉仪;瞬变信号;非接触;定位

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2009)08-2055-4

0 引言

自 1911 年萨格纳克发明 Sagnac 干涉仪结构以来,Sagnac 效应在工业、电力、国防科技等领域都得到了广泛的研究和应用^[1-3].近年来,基于 Sagnac 干涉仪的光纤传感器以其独特的零差干涉特性及极高的灵敏度^[4-6],成为光纤传感器研究中的热点.基于 Sagnac 干涉仪的光纤陀螺已经成功地应用于航空、航天等领域.本文构建的基于 Sagnac 干涉仪的光纤信号测量技术,不仅能置于固体表面测量瞬变信号,还能实现非接触式瞬变信号频率测量和定位.实验表明,该基 Sagnac 干涉仪的非接触式测量技术具有良好的频响特性.

1 原理

基于单模光纤 Sagnac 干涉仪的光纤传感器结构如图 1,由半导体激光器、3 dB 耦合器和环形器等部件构成.激光器发出的光经环形器进入 2 乘 2 耦合器 1 端口,通过耦合模理论分析可知^[7],在端口 3、4 形成两束相位差为 90°的相干光,分别作顺时针和逆时针传输,最终在 1 端口形成干涉输出,其表达式为

$$P_{out} = P_3 + P_4 + \sqrt{P_3 P_4} \cos(\Phi_3 - \Phi_4) \quad (1)$$

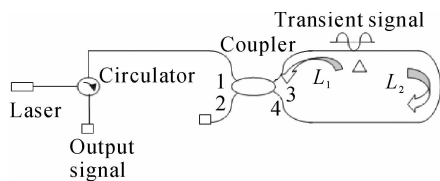


图 1 光纤 Sagnac 干涉仪结构
Fig. 1 Structure of optical fiber Sagnac interferometer

式中, P_{out} 为耦合器输出光功率, P_3 、 P_4 分别为耦合器 3、4 端口输出光在环内传输一周进入耦合器时的功率. Φ_3 、 Φ_4 分别为两束光循环一周进入耦合器时的相位.

设外部信号发生处到 3 端口距离为 L_1 ,到 4 端口距离为 L_2 , $L_1 + L_2 = L$.外部信号对光纤的扰动可通过为对耦合器内相干光相位的扰动结果进行测量^[6].

$$\text{令 } \Phi = \Phi_3 - \Phi_4$$

在信号作用的距离远远小于 Sagnac 环长度情况下^[4]

$$\Phi = \Delta\Phi + \Phi(t - \tau_1) - \Phi(t - \tau_2) \quad (2)$$

$$P_{out} = aP_0 [b + \cos(\Delta\Phi + \Phi(t - \tau_1) - \Phi(t - \tau_2))] \quad (3)$$

式中, $\Delta\Phi$ 为系统中引入的一些固定相位常量, $\varphi(t - \tau_1)$ 、 $\varphi(t - \tau_2)$ 分别为光沿顺时针和逆时针传输过程中由于外界波动,作用在光纤上的压力所产生的相位信号. τ_1 、 τ_2 分别为压力所致相位信号沿顺、逆时针传输距离 L_1 、 L_2 所用时间.

对于某种特定的耦合器, a 、 b 为固定常量.作用在 Sagnac 环上的压力所产生的相位信号可以表示为

$$\varphi(t) = \varphi_0 \sin(\omega_s t) \quad (4)$$

运用三角公式,可将式(3)改写为

$$P_{out} = aP_0 [b - \cos \Delta\Phi \cos [2\varphi_0 \sin \frac{\omega_s \Delta\tau}{2} \cos(\omega_s t - \frac{\omega_s \Delta\tau}{2})] - \sin(\Delta\Phi) \sin [2\varphi_0 \sin \frac{\omega_s \Delta\tau}{2} \cos(\omega_s t - \frac{\omega_s \Delta\tau}{2})] \quad (5)$$

式中, φ_0 为外界信号导致相位改变的幅值, c 为光在真空中的传播速度, $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 = n(L_1 - L_2)/c$.

对于 3 dB 耦合器 $\Delta\Phi = \pi/2$, $a = 1/2$, $b = 1$,假设微小扰动时,即 φ_0 很小,式(5)可写成^[4]

$$P_{out} \approx \frac{1}{2} P_0 [1 - 2\varphi_0 \sin \frac{\omega_s \Delta\tau}{2}] \cos(\omega_s t - \frac{\omega_s \Delta\tau}{2}) \quad (6)$$

式中, $\sin(\omega_s \Delta\tau/2)$ 是由外界震动所决定的函数,且

* 国家自然科学基金(60607001,60707007)和国家高技术研究发展计划(2007AA01Z258)资助
Tel:010-51683834 Email:06120248@bjtu.edu.cn
收稿日期:2008-11-05 修回日期:2009-02-13

不随传输过程中时间的变化. 通过检测输出功率的陷波点就可以得到外界震动位置^[9]

$$f = \frac{cN}{n(L-2L_1)} \Rightarrow L_1 = \frac{1}{2} \left(L - \frac{Nc}{nf} \right) \quad (N=0,1,2,\dots,m) \quad (7)$$

式中, f 为 N 对应的陷波点频率, n 为所用传感光纤折射率.

2 实验结果

本文构建的基于 Sagnac 干涉仪的光纤非接触式瞬变信号测量系统结构如图 2, 由半导体激光器、3 dB 耦合器、环形器、采集卡、硬件解调系统、软件解调系统以及终端显示设备构成. 对于单模光纤环, 1 端口输出为两个同相位同幅度光叠加之和; 2 端口在无外界振动情况下, 输出光功率为两束幅值相等、相位相差 π 的光相干结果, 因此输出为 0^[10]. 为避免影响对干涉情况的判定, 采用环形器测量从 1 端口输出的信号. 在距离 3 端口处放置瞬变信号源, 分别将 L_1 两端各 8 厘米处贴在独立的两个支架上, 使中间段悬空.

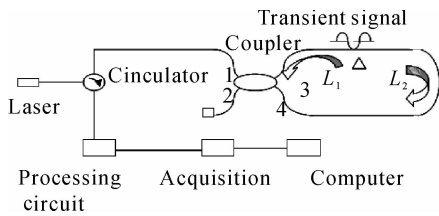


图 2 基于 Sagnac 干涉仪的瞬变信号测量结构
Fig. 2 Structure of optical fiber measuring technology based on Sagnac interferometer

采用软硬件结合的信号处理方式, 在电路处理部分, 对采集到的信号进行隔直放大. 隔直可以有效滤除信号中直流部分; 受激光器输出功率的限制, 补偿放大功能, 能很好地提高测量的准确性. 在软件处理部分, 采用 NI 公司的 LABVIEW 虚拟仪器软件以及 MATLAB 软件, 基于对 NI 采集卡内部函数的调用, 实现采集卡的信号采集、读取、处理以及存贮功能. 软件处理部分如图 3.

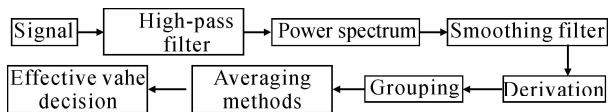
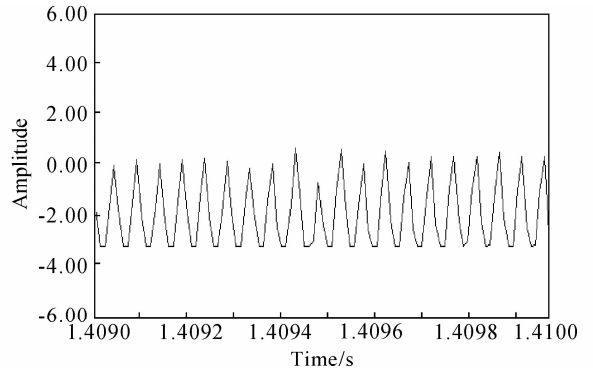


图 3 软件处理部分
Fig. 3 Part of software processing

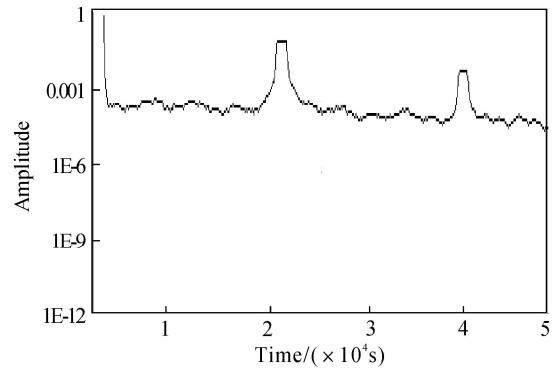
为准确确定陷波点位置, 本文采用一阶求导和均值去噪的思想, 利用陷波波形频谱斜率发生突变的特点, 对于波形中的小幅噪音, 通过平滑滤波减小斜率波动, 在保留包络特性的同时对包络曲线进行平滑以加强对斜率突变波段的辨别度. 以采样频率 100 kHz 提取信号信息, 每次读取 1 000 个数, 进

行滤波部分和功率谱转换后, 做一阶求导. 得到关于功率谱斜率的改变关系. 当斜率发生突变并且在较短区间内呈反向对称分布时, 可以认为该处为陷波频率点.

调节信号发生源, $L_1 = 200$ m, $L = 1\ 1000$ m, 使其瞬变信号输出频率为 20 kHz, 功率为 25 mW, 通过系统解调后的时域波形能明显辨别出外界振动频率. 在功率谱中能清晰地看出陷波图形.



(a) Time domain waveform



(b) Power spectrum

图 4 瞬变信号源为 20 KHz 时解调波形
Fig. 4 Demodulated signal when transient signal is 20 KHz

将每次读取 1 000 个数点作为一组, 1 097 组数据求导后的功率谱数据都显示在页面上, 如图 5. 很难直接分辨出斜率突变的位置.

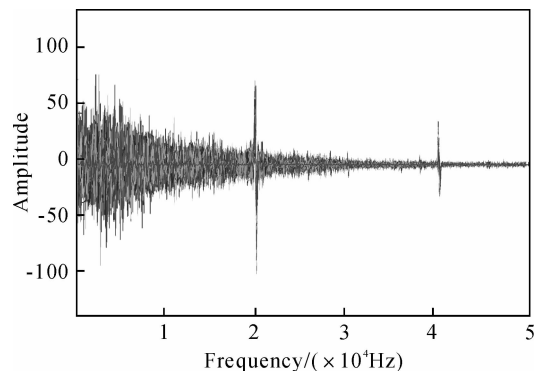


图 5 原始功率谱斜率

Fig. 5 Original power slop graph

为有效减小随机引入的系统噪音, 将 1097 组数据对应元素进行求和平均. 得到如图 6 所示结果.

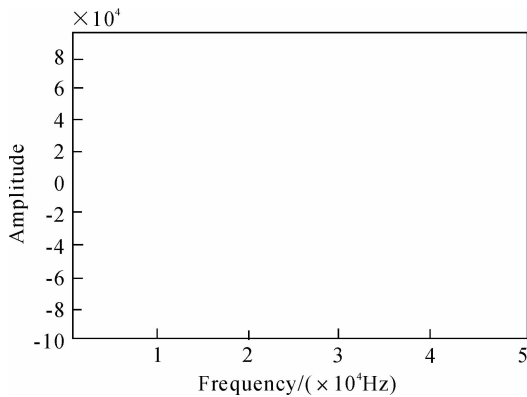


图 6 改善后的功率谱斜率

Fig. 6 Modified power slop graph

从图中可以明显看出在 20 K、40 K 处都有较大的斜率突变. 且相对于零点呈一定位移的对称分布. 对第一个突变区域求极大值、极小值, 得到频率点 f_{11}, f_{12} . 将区间 $\left[\frac{1}{2}(3f_1 - f), \frac{1}{2}(3f_2 - f)\right]$ 进行 n 的位移, n 取 1~2, 在新的区间里求极大、极小值 f_{n1}, f_{n2} , 如果

$$f_{n2} - f_{n1} \leq \frac{1}{2}(3f_{12} - f_{11}) - \frac{1}{2}(3f_{11} - f_{21}) \quad (8)$$

则可以认为 f_{n1} 为有效陷波点频率, 当 $N=1$ 时, 对应的陷波频率为

$$f = f_{11} + \frac{f_{21}}{2} \quad (9)$$

本次实验结果为 $N=1$ 时, $f=20.15$ kHz. 由式 (7) 可知, 测试得到的信号源距离 3 端口距离 $L_{10} = 365.5$ m.

定义相对定位准确度为

$$D = \frac{L_{10} - L_1}{L} \quad (10)$$

本次实验相对定位准确度达到 1.5%. 实验结果表明, 利用基于 Sagnac 干涉仪的非接触式瞬变信号测量技术能在 1.5% 的相对测量准确度范围内准确定位.

4 结论

Sagnac 干涉仪的光纤传感器在外界信号测量和定位领域中具有极大潜力. 非接触式传感器相比与传统传感器, 具有安装方便、适用度广、可塑性高等优点. 本文理论分析了 Sagnac 干涉仪对于瞬变信号的响应特性, 并进行了实验验证. 实验结果表明, 基于 Sagnac 干涉仪的非接触式测量技术, 不仅具有

良好的频响特性, 同时, 利用功率谱一阶求导和均值去噪思想, 通过优化平滑滤波器阶数和对有效陷波频率的判定可以实现对瞬变信号的良好定位, 相对定位准确度达到 1.5%.

参考文献

- [1] ERIC U. Fiber-Optic acoustic sensor based on the sagnac interferometer [C]. *SPIE*, **1983**, (425):90-100.
- [2] TAN Jing, CHEN Wei-min, FU Yu-mei. A research on polarization effects in the single distributed optical fiber sensor based on Sagnac interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3):492-497.
谭靖, 陈伟民, 符欲梅. 基于 Sagnac 原理的单轴分布式光线传感系统偏振态分析. *光子学报*, 2007, **36**(3):492-497.
- [3] JANG T S, LEE S S, KWON B, *et al.* Noncontact detection of ultrasonic waves using fiber optic sagnac interferometer [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2002, **49**(6):767-775.
- [4] HOFFMAN P R, KUZYK M G. Position determination of an acoustic burst along a sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(2):494-498.
- [5] WU Chong-qing. Theory of optical waveguide [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, **2005**:190.
吴重庆, 光波导理论[M]. 北京:清华大学出版社, **2005**:190.
- [6] WANG Hui-yi, JIANG Xian-jin, ZHAO Chang-ming, *et al.* Optical fiber sensor [M]. Beijing: National Defense Industry Press, **2001**:20.
王惠义, 江先进, 赵长明, 等. 光纤传感器[M]. 北京:国防工业出版社, 2001:20.
- [7] CHEN De-sheng, HAO Hong-yun, XIAO Lin, *et al.* Optical fiber sensor for sound source location based on Sagnac interferometer [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, **17**(4):415-418.
陈德胜, 郝洪云, 肖灵, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的新型声源定位光纤传感器[J]. *光电子激光*, 2006, **17**(4):415-418.
- [8] SUN Wen-tao, HANG Li-jun, HU Shu-yang, *et al.* Influence of polarization controller on precision position of the leakage in optical fiber sensor systems. [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4):709-712.
孙文韬, 杭利军, 胡曙阳, 等. 偏振态对光纤传感系统检测泄露点灵敏度的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4):709-712.
- [9] WANG Ze-feng, HUANG Lei, LUO Hong, *et al.* Pseudo working-point control detection scheme for interferometric fiber-optic hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):39-41.
王泽峰, 黄磊, 罗洪, 等. 干涉型光线水听器伪工作点控制检测方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1):39-41.
- [10] LIN Wu-wen. Novel distributed fiber optic leak detection system [J]. *Opt Eng*, 2004, **43**(2):278-279

Noncontact Optical Fiber Measuring Technology for Transient Signal Based on Sagnac Interferometer

TAO Pei-lin, WANG Yan-hua, REN Wen-hua, TAN Zhong-wei, YAN Feng-ping, JIAN Shui-sheng

(1 Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC,

(2 Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on theoretical analysis of Sagnac interferometer, a noncontact optical fiber measuring technology is proposed. The related demodulation technique is developed in accordance with the characteristics of trap wave. The results show that, the noncontact optical fiber measuring technology based on Sagnac interferometer can realize the identification of transient signal, and realize the location of sound signal source according with the relative location precise of 1.5%.

Key words: Sagnac interferometer; Transient signal; Noncontact; Location



TAO Pei-lin is a Ph. D. degree candidate at Beijing Jiaotong University. Her research interest mainly focuses on optical fiber sensor and signal processing.