

基于 EFPI 地声传感器的信号解调算法

田培廷,赵英亮,王黎明*,吴博,徐亮

(中北大学 信息探测与处理技术研究所,太原 030051)

摘要:地声主要为频率集中在 0~20 Hz 的次声波,对传感器灵敏度、精确度及频响特性具有较高要求,合理的信号解调方法是传感器研究的关键。提出了双波长单通道正交解调算法,根据光的干涉原理对基于非本征法布里-珀罗干涉(EFPI)地声传感器进行了敏感机理的理论分析,明确了传感器在工作时需满足在线性区域的要求,利用 Matlab 软件进行仿真分析,结果表明:该算法避免了外界环境造成的腔长变化对输出结果的干扰,可准确解调出原始信号,印证了该解调方法的可行性。

关键词:法布里-珀罗腔;地声传感器;正交解调法

中图分类号:TN911.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)11-0020-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.11.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Signal demodulation algorithm based on EFPI geoaoustic sensor

TIAN Peiting, ZHAO Yingliang, WANG Liming*, WU Bo, XU Liang

(Institute of information detection and processing technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The geoaoustic is mainly infrasonic wave whose frequency is concentrated in 0~20 Hz, which has high requirements on the sensitivity, accuracy and frequency response characteristics of the sensor, reasonable signal demodulation method is the key of sensor research. A dual wavelength single channel quadrature demodulation method is proposed. According to the interference principle of light, the sensitive mechanism of the extrinsic geoaoustic sensor based on extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI) is theoretically analyzed, it makes clear that the sensor needs to meet the requirements in the linear region when working, and the simulation analysis is carried out by using Matlab software. The simulation results show that the algorithm can avoid the influence of external environment on the output results, and can accurately demodulate the original signal, which proves the feasibility of the demodulation method.

Key words: Fabri-Perot cavity; geoaoustic sensor; orthogonal demodulation method

0 引言

未来信息化作战中,电子武器的投入使用和强电磁干扰,使得北斗、GPS 等导航系统失灵,传统通信方式难以发挥作用。地声传播由于其信道为土壤层,且具有屏蔽电子武器干扰的优势,低频地声具有近场穿透能力、信息可靠、易于提取和接收的特点^[1]。若利用可控震源发送地声信号及利用地声传感器进行信号采集和后续处理^[2],搭建地声通信系统,可有效解决

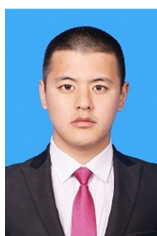
航失灵、雷达迷茫和通信中断等问题。

地声通信系统必不可少的是高精度、高灵敏度地声传感器的支持。光纤式声传感器具有光纤灵敏度高、抗干扰性强、耐高温耐腐蚀和传输损耗低的特点,使其在强电磁干扰环境中拥有不可替代性^[3-4]。但是,强度型光纤声传感器对光源的功率稳定性要求很高,由于其测量精度和灵敏度偏低,不能满足一些高精度、大范围测量的应用需求^[5];波长调制型声传感器很难使低频声波与光纤光栅耦合,温度串扰的问题也给这类声传感器的使用带来很大的局限性^[6]。

相位调制型光纤传感器由于高灵敏度和高分辨率,适用于各种不同场合。其中,基于法布里-珀罗(F-P)干涉(EFPI)结构的声传感器结构简单,可以通过设计不同结构、选择不同材料及不同敏感薄膜应对不同的场景需要。但目前的法珀式声传感器的研究还不够

收稿日期:2020-05-25。

作者简介:田培廷(1995—),男,山西孝义人,中北大学信息与通信工程学院信息与通信工程专业,硕士研究生。主要研究方向为信息通信工程、图像处理与信息反演,参与了山西省高平市天然气管道沉降监测项目,曾获得第十四届兆易创新杯华北赛区技术赛省二等奖。



*通信作者:王黎明(E-mail: 510267611@qq.com)。

成熟,未达到可实用化的需求。需要较为系统的理论及合理的信号解调方法^[7-8]。

本文在对光纤非本征 EFPI 地声传感器的结构原理和敏感机理分析的基础上,提出一种双波长单通道的正交解调算法。

1 光纤 EFPI 地声传感器原理

光纤 EFPI 地声传感器的原理结构如图 1 所示,由敏感薄膜和光纤端面构成 F-P 腔。

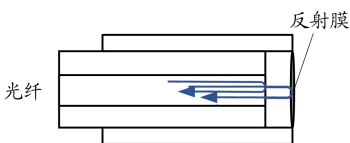


图 1 EFPI 传感结构原理图

入射光分别在光纤端面和反射膜片处分别产生 2 次反射。由外界地声信号作用引起的敏感薄膜的振动,导致了 F-P 腔的腔长变化,从而引起第二次反射光的相位变化。2 束反射光发生干涉后,通过对干涉后信号的分析,解调出被测信号。

设 I_1 、 I_2 分别为第一次和第二次入射光的光强,根据光的干涉原理,由传感头返回进入探测器的光强可以表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\varphi_0 + \varphi(t)] \quad (1)$$

其中, φ_0 表示 2 次反射光的初始相位差,由 F-P 腔静止状态下 2 束光的初始光程差导致,即与 F-P 腔的腔长有关; $\varphi(t)$ 表示外界信号作用下薄膜振动引起的相位差变化。设 F-P 腔的腔长为 L ,入射光波长为 λ , n 为空气的折射率,设薄膜发生形变的大小为 Δd ,则:

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \frac{4\pi n L}{\lambda} \\ \varphi(t) &= \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda} \end{aligned} \quad (2)$$

输出光强可表示为:

$$\begin{aligned} I &= A + B \cos\left[\frac{4\pi n(L + \Delta d)}{\lambda}\right] = \\ &= A + B \left[\cos\left(\frac{4\pi n L}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{4\pi n \Delta d}{\lambda}\right) - \right. \\ &\quad \left. \sin\left(\frac{4\pi n L}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{4\pi n \Delta d}{\lambda}\right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, A 与 B 为常量, A 为光强的无干涉成分,与相位差无关; B 为发生干涉的成分, $B \cos\left(\frac{4\pi n(L + \Delta d)}{\lambda}\right)$ 由外界信号引起,通过检测反射光功率的变化解调出外界信号。EFPI 传感器敏感机理如图 2 所示。

由图 2 可以看出,在靠近正交积分点的区域,反射功率的变化与外界信号作用导致的相位变化成线

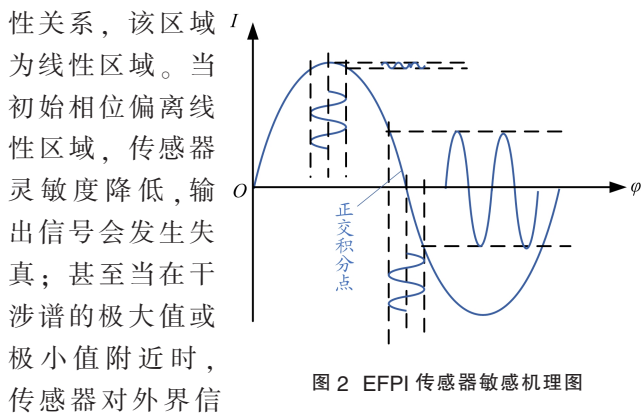


图 2 EFPI 传感器敏感机理图

性关系,该区域为线性区域。当初始相位偏离线性区域,传感器灵敏度降低,输出信号会发生失真;甚至当在干涉谱的极大值或极小值附近时,传感器对外界信号的微小变化失去感应作用^[9]。因此,需通过设计合理的信号解调方式,使传感器工作在线性区域。由于 F-P 腔腔长无法实现精确控制,一般通过调节入射光波长来使传感器工作在线性区域。

令式(3)满足:

$$\begin{aligned} \frac{4\pi n L}{\lambda} &= k\pi + \frac{\pi}{2} \\ \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda} &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, k 为整数,由此计算得出传感器的工作波长为

$$\lambda = \frac{4nL}{k+0.5}, \text{代入式(3)可得:}$$

$$I = A - (-1)^{k+1} \frac{4\pi n B}{\lambda} \cdot \Delta d \quad (5)$$

同时,传感器工作时,外界信号引起的相位变化需满足:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda} \leq \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

如果相位变化超过 π 时,信号将失真。则:

$$\Delta d < \frac{\lambda}{8n} \quad (7)$$

外界信号由 $\frac{4\pi n B}{\lambda} \cdot \Delta d$ 体现。

2 双波长单通道正交解调算法

要使传感器工作在线性区域,由于精确控制腔长的方法难以实现,现阶段已提出多种解决办法,例如有源零差正交解调法和相位产生载波零差解调法。前者需要附加移相器作用于传感器的参考臂^[10],而移相器的加入会给传感器系统带来电磁干扰,而且 EFPI 传感器的干涉臂和参考臂重合在光纤上,因此该方法无法驱动移相器对参考臂进行单独调制。后者通过加载特定频率的大信号,使待测信号位于调制信号的边带上,该方法测量精度和线性度都比较好,但是对于产生高频率载波的可调激光器要求较高,外界环境对

光的偏振态影响较大,实用性较低^[11-12]。

本文提出一种双波长单通道正交解调算法,将波长不同的 2 束光分开后由单光纤经耦合器送入 F-P 腔,然后再通过密集波分复用器(DWDM)将 2 个波长的反射光分开并分别进行处理,其原理图如图 3 所示。

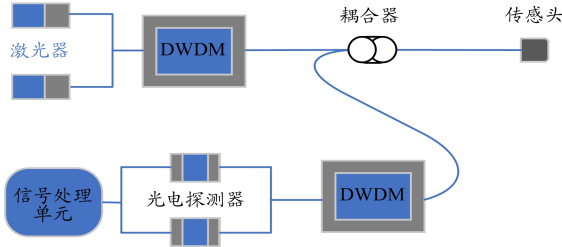


图 3 双波长单通道正交解调法原理图

由上节理论可知,经传感器反射回的 2 个波长的光强分别为:

$$\begin{aligned} I_1 &= A + B \cos \left(\frac{4\pi n L}{\lambda_1} + \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_1} \right) \\ I_2 &= A + B \sin \left(\frac{4\pi n L}{\lambda_1} + \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

为了能精确地解调出待测信号,需使 2 束初始光正交,初始相位需满足:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = k\pi + \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

即:

$$\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} = \frac{2k+1}{8nL} \quad (10)$$

光强最后以电压信号的形式体现,令 $V_1=I_1, V_2=I_2$, 其交流分量为:

$$\begin{aligned} V_{AC1} &= B \cos \left(\frac{4\pi n L}{\lambda_1} + \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_1} \right) \\ V_{AC2} &= B \sin \left(\frac{4\pi n L}{\lambda_1} + \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

对式(1)做以下运算:

$$\begin{aligned} V_{AC1} V'_{AC2} - V_{AC2} V'_{AC1} &= B \cdot \frac{4\pi n \Delta d'}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}} \times \\ \cos \left(\frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_1} - \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_2} \right) &\approx B \cdot \frac{4\pi n \Delta d'}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}} \end{aligned} \quad (12)$$

对式(12)做积分即可还原 Δd ,解调出待测信号。

在测量信号为微小信号时,外界信号对敏感薄膜造成的形变极小, $\Delta d \leq \lambda$, 则 $\cos \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda} = 1$, 式(8)可化简为:

$$\begin{aligned} I_1 &= A + B \cos \frac{4\pi n L}{\lambda_1} - B \sin \frac{4\pi n L}{\lambda_1} \cdot \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_1} \\ I_2 &= A + B \sin \frac{4\pi n L}{\lambda_1} + B \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_2} \cdot \cos \frac{4\pi n L}{\lambda_1} \end{aligned} \quad (13)$$

交流分量为:

$$\begin{aligned} V_{AC1} &= -B \sin \frac{4\pi n L}{\lambda_1} \cdot \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_1} \\ V_{AC2} &= B \frac{4\pi n \Delta d}{\lambda_2} \cdot \cos \frac{4\pi n L}{\lambda_1} \end{aligned} \quad (14)$$

对式(14)进行运算:

$$V_{out} = \sqrt{V_{AC1}^2 + V_{AC2}^2} = B \left| \frac{4\pi n \Delta d}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}} \right| \quad (15)$$

由此看出,最终得出的结果仅与待测信号有关,避免了腔长的变化对信号解调的影响,这样可以准确地解调出待测信号。

3 实验仿真

为验证单通道双波长正交解调算法的可行性,本文使用 Matlab 软件对该算法进行仿真分析。

设空气腔对光的折射率 $n=1$, F-P 腔的腔长 $L=1 \text{ mm}$, A、B 的系数设为 1, 波长 $\lambda_1=1550 \text{ nm}$, 设两初始光的相位差为 $\frac{3}{2}\pi$, 则波长 $\lambda_2=1550.901 \text{ nm}$ 。设待测地声信号为正弦波, 振幅 $a=100 \text{ nm}$, 频率 $f=20 \text{ Hz}$ 。频率分别为 20 Hz、15 Hz 时的仿真结果如图 4、图 5 所示。

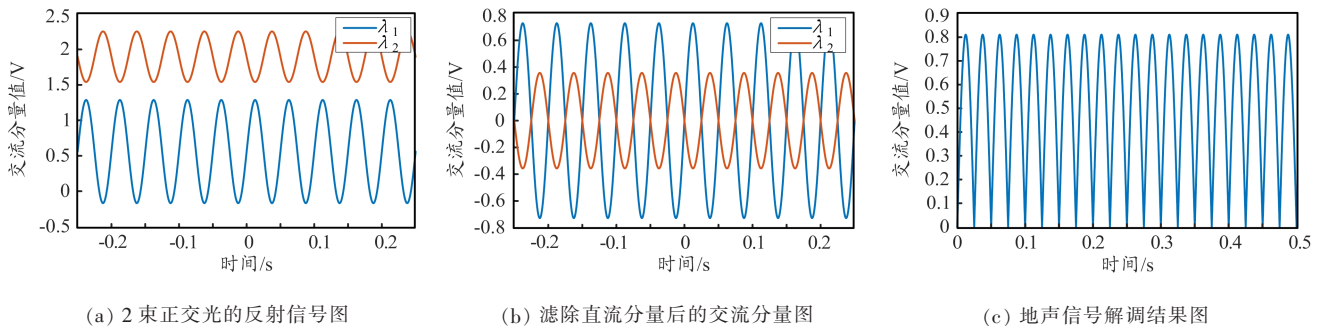


图 4 声波频率为 20 Hz 时的仿真结果

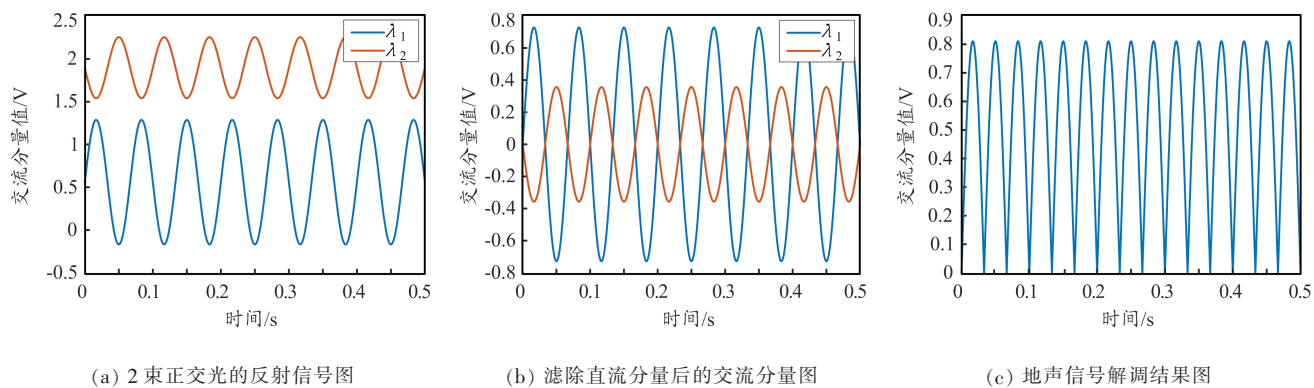


图5 声波频率为 15 Hz 时的仿真结果

从图 4 可以看出,2 束光的反射信号相位相反,信号的基线差别较大。对图 4(b)中信号的交流分量按式(15)作解调运算后,解调结果如图 4(c)所示,信号的波形出现畸变。改变声波频率为 15 Hz 并进行实验仿真,仿真结果如图 5 所示。由信号解调结果可以看出,信号皆出现部分畸变,这是由于式(15)中的绝对值项导致信号的负半部分出现翻转,需要采用去除绝对值项的相关算法去除影响。

在 0~20 Hz 的频率范围内的响应特性图如图 6 所示。图 6(a)中,纵坐标表示输出电压的峰峰值,在理想情况下,当输入电压的振幅一定时,频率的变化不会造成输出电压幅值的变化和信号的失真;在该频率范围内任选一个频率,输入电压幅值与输出电压幅值的响应如图 6(b)所示,输入电压与输出电压的幅值成线性关系,表明该信号解调方法在该频率范围内具有良好的线性度。

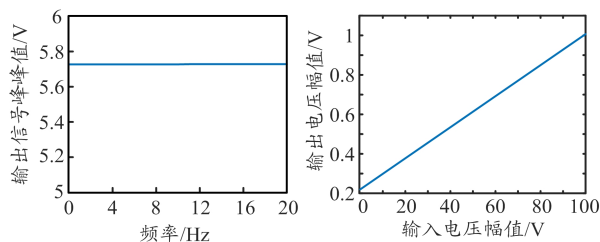


图6 响应特性图

4 结束语

本文提出了一种基于 F-P 腔的光纤传感器的信号解调算法。理论分析了算法原理,采用双波长单通道正交解调算法,解决了信号解调时需控制传感器工

作在线性区域的问题,对一般信号及特殊的小信号分别提出对应的算法,并对算法的有效性进行仿真分析。由仿真及理论分析结果表明:本文所提的解调算法避免了腔长不可精确控制对信号解调的影响,在 0~20 Hz 的频率范围内具有良好的线性响应,信号解调结果符合理想输出结果,为开发测量结果更准确、灵敏度更高的光纤光栅类传感器提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 庄其仁,张渭滨,龚冬梅,等.地震前兆地声信号的低频特征[J].华侨大学学报(自然科学版),1999(2):28-31.
- [2] 张留争,王鹏,王艳,等. VE464 电控箱体的通讯技术与可控震源高效采集方法应用[J].物探装备,2019,29(3):147-151.
- [3] 文家雄,陈伟. 次声传感器及次声检测技术探究[J]. 电子测试,2015(4):106-107.
- [4] 王巧云. 光纤法布里—珀罗声波传感器及其应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.
- [5] BING Y, DAE K, WOONG, et al. Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers[J]. Applied optics, 2003, 42(16): 3-6.
- [6] 刘文义,张文涛,李丽,等. 光纤传感技术——未来地震监测的发展方向[J]. 地震,2012,32(4):92-102.
- [7] 刘娟,丁克勤. 光纤声发射传感器的研究现状与展望[J]. 传感器与微系统,2010,29(9):5-7,11.
- [8] 王文华. 基于膜片形变的非本征法布里—珀罗干涉光纤低压传感器的研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [9] 程进,邹小平. 光纤法珀腔声传感器理论与仿真分析研究[J]. 传感技术学报,2018,31(11):1633-1640.
- [10] 江毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京:科学出版社,2009:95-136.
- [11] 王燕. 干涉型光纤传感器及 PGC 解调技术研究[D]. 天津:天津理工大学,2014.
- [12] MORADI H, HOSSEINIBALAM F, HASSANZADEH S. Simulation and experimental investigation about interferometric optical fiber acoustic sensor for sensitivity enhancement[J]. Measurement, 2019(137): 2-11.