

锯齿波 FMCW 光纤声传感器信号解调技术

李 闯¹,倪 明¹,张金权²,焦书浩²,赵 锋²,郭 戈²,杨依光²

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073;2. 中国石油天然气管道通信电力工程总公司,河北 廊坊 065000)

摘 要:讨论了锯齿波光源频率调制干涉型光纤声传感器的基本原理及数字化信号解调方案。对传感器信号及其频谱做了理论分析,给出了数字化信号解调流程。并通过实验分析了干涉信号的频谱特征,并在 10 kHz 锯齿波光源频率调制下,对 10 m 和 20 m 臂差的干涉仪并联进行信号解调。实验结果表明,该探测方案无需移频器件即可实现外差检测,改变干涉仪臂差即可实现频分复用,适用于远程,全光,复杂环境下的微弱声振动检测。

关键词:锯齿波;连续波调频;光纤传感器;外差检测

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A

Demodulation Technology of the Sawtooth-Wave Optical FMCW Fiber Acoustic Sensor

LI Chuang¹, NI Ming¹, ZHANG Jinqun², JIAO Shuhao², ZHAO Feng², GUO Ge², YANG Yiguang²

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. China Petroleum & Gas Pipeline Telecommunication & Electricity Engineering Corporation, Langfang 065000, China)

Abstract: The principle and architecture of an interferometric fiber acoustic sensor based on sawtooth-wave optical frequency-modulated continuous-wave are introduced. Firstly, the beat signal and its spectrum are theoretically analyzed, and a digital demodulation method is described. Secondly a corresponding experimental system is built to analyze the spectrum. Digital demodulation with 10 m and 20 m arm difference of interferometers is finished under 10 kHz sawtooth-wave optical frequency-modulated. The experimental results show that this sensor is a heterodyne interferometer but without frequency shifters and a frequency division multiplexing system can be easily got by changing the arm difference of interferometers. It can be used in all optical, long-distance faint acoustic vibration detection under complicated condition.

Key words: sawtooth-wave; frequency-modulated continuous-wave; fiber sensor; heterodyne detection

0 引言

连续波频率调制(FMCW)最早应用于雷达探测,20世纪80年代,该技术被成功引入光学领域。在光学探测中,连续波频率调制是指光源频率受到特定波形的连续调制。根据调制波形的不同可分为锯齿波 FMCW、三角波 FMCW 和正弦波 FMCW。其中锯齿波和三角波 FMCW 又称为线性连续波频率调制(LFMCW)^[1]。目前,利用 LFMCW 构成的外差干涉仪主要应用于位移测量^[2-3],而正弦波 FMCW 因为其较易实现,在光纤传感中有着广泛的应用,如光纤水听器相位载波(PGC)调制解调方案中,利用正弦波频率调制可有效抑制干涉信号相位衰落现象^[4-5]。

利用锯齿波 FMCW 技术构成的外差式干涉型声传感器,是利用传感信号和参考信号的时延产生

的拍频信号作为载波,待测声信号加载在该载波上的一种探测技术。该技术的优点有:

1) 干涉信号具有外差形式,具有外差解调的所有优点,但不需移频器件。

2) 可抑制干涉信号的相位衰落现象,相比正弦波调制的 PGC 解调方案信号处理更简单快速。

3) 只需改变干涉仪臂差(产生不同的时延)即可实现传感单元的频分复用,节约了光源成本。

目前,线性 FMCW 的困难主要是高性能频率调制光源的获得。随着半导体激光器性能的提高,线性 FMCW 在光纤传感中的应用会越来越广泛。本文对锯齿波 FMCW 干涉型声传感器的传感原理作了理论分析,并提出了数字化信号解调的方案,计算机仿真和实验室实验表明锯齿波 FMCW 干涉型声传感器适用于长距离复杂环境下的振动测量。

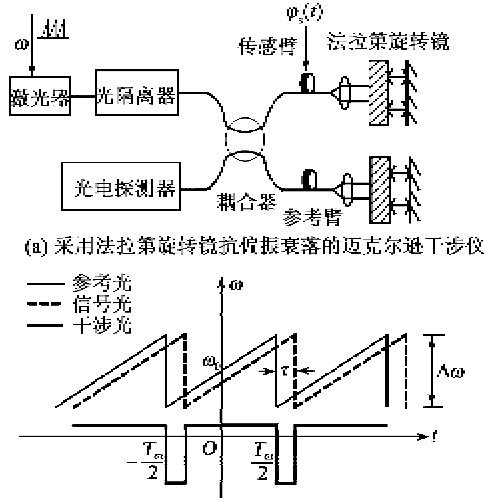
收稿日期:2011-12-16

作者简介:李闯(1987-),男,陕西西安人,硕士生,主要从事光纤传感的研究。

1 锯齿波 FMCW 干涉型光纤声传感器

1.1 锯齿波 FMCW 光纤传感原理

传感系统采用迈克尔逊干涉仪结构,利用法拉第旋转镜保持两束光干涉时偏振态一致,以避免偏振衰落现象。如图 1(a)所示,窄带激光器经锯齿波频率调制后,进入光隔离器,通过 3 dB 耦合器分束后分别进入传感臂和参考臂,传感臂受外界声信号的调制,两束光经末端反射镜反射进入耦合器干涉。



(a) 采用法拉第旋转镜抗偏振衰落的迈克尔逊干涉仪
(b) 锯齿波调制光源角频率及干涉信号拍频
图 1 锯齿波 FMCW 光纤声传感器结构图

在干涉仪输出端,干涉光强为

$$I = I_0 \{1 + V \cos[\varphi_m(t) + \varphi_s(t) + \varphi_n(t)]\} \quad (1)$$

式中: I_0 为干涉信号的平均光强; V 为干涉信号的可视度; $\varphi_m(t)$ 为调制光源产生的相位差; $\varphi_s(t)$ 为外界声信号作用于干涉仪产生的相位差; $\varphi_n(t)$ 为外界环境影响产生的相位差和初始相位差之和。

在锯齿波 FMCW 中,用锯齿波电压信号 $V = V_0 + (\Delta V / T_m)t$ 为调制光源,其中 V_0 为调制电压直流流量, ΔV 为调制电压峰峰值, T_m 为调制周期。在 1 个周期内,光源瞬时角频率为

$$\omega = \omega_0 + (\Delta\omega / T_m)t = \omega_0 + \alpha t \quad (2)$$

式中: ω_0 为光源中心频率; $\alpha = \Delta\omega / T_m$ 为光频调制幅度与调制周期的比值,即锯齿波调制光频的斜率。

如图 1(b)所示,信号臂和参考臂存在臂差,因而产生时延 $\tau = 2nl/c_0$,进而发生干涉产生拍频信号。因此, $\varphi(t) = \alpha\tau t + \omega_0\tau$,干涉信号为

$$I = I_0 \{1 + V \cos[\alpha\tau t + \varphi(t)]\} \quad (3)$$

式中 $\varphi(t) = \varphi_s + \varphi_n + \omega_0\tau$ 。对式(3)进行解调即可得到待测声信号 φ_s 。

1.2 锯齿波 FMCW 调制信号分析

1.1 节分析了一个调制周期中的干涉信号,整个时间轴上干涉信号^[1]为

$$I(\tau, t) = I_0 \left\{ 1 + \left[VT_m \cos(\alpha\tau t + \varphi(t)) \text{rect}_{T_m}(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_m) \right] \right\} = I_0 \left\{ 1 + \left[VT_m \cos(\omega_b t + \varphi(t)) \text{rect}_{T_m}(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_m) \right] \right\} \quad (4)$$

rect(t)函数定义为

$$\text{rect}_T(t) = \begin{cases} 1/T & |t| \leq T/2 \\ 0 & |t| > T/2 \end{cases} \quad (5)$$

$$I(\omega) = I_0 \left\{ 2\pi\delta(\omega) + \pi V \left\{ \text{sinc} \left[\frac{(\omega + \omega_b) T_m}{2} \right] e^{-j\varphi(t)} + \text{sinc} \left[\frac{(\omega - \omega_b) T_m}{2} \right] e^{-j\varphi(t)} \right\} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - m\omega_m) \right\} \quad (6)$$

式(6)为干涉信号频率域表达式,由式(6)可看出,干涉信号频谱由调制频率的一系列倍频分量构成,且这些倍频分量受到 sinc 函数调制,待测声信号则作为边频加载在这些倍频分量两侧。

1) 当 $\omega_b = k\omega_m$ 时(其中 k 为 m 的 1 个取值), $k\omega_m$ 分量最大,且 sinc 函数零点间隔为 ω_m ,因此,此时干涉信号是单频的,这是最理想的情况。但 ω_b 受到干涉仪臂差、光源调制频率及调制深度的影响,理想情况很难实现。

2) 当 $\omega_b \neq k\omega_m$, 但很接近时,干涉信号会出现 ω_m 信号的一系列倍频分量,且幅度受 sinc 函数调

式(4)中 $\omega_b = \alpha\tau = \frac{nl}{c_0} \cdot \frac{\Delta\omega}{T_m}$ 为拍频信号的角频率。

声信号是小信号,对式(4)作傅里叶变换,可近似为

制,频率为 $k\omega_m$ 的分量幅值最大,称此频率为该干涉信号的主频。

3) 对干涉信号作中心频率为 $k\omega_m$ 的带通滤波,则干涉信号为

$$I(\tau, t) = I_0 \{1 + V \cos[k\omega_m t + \varphi(t)]\} \quad (7)$$

采用一定的信号处理技术,即可得待测信号 $\varphi_s(t)$ 。综上分析可看出,使用不同臂差的干涉仪即可获得不同主频的干涉信号,因此,与传统意义上使用不同中心频率的光源实现频分复用的系统相比,设计不同臂差的干涉仪组阵可实现频分复用,且节约了成本。同时,由式(7)可看出,干涉信号为外差信号,具有信号解调简单,系统动态范围大的特点,

且不需移频器件。

2 数字化信号解调方案

对式(7)进行锁相解调即可得到 $\varphi_s(t)$,但锁相过程中需对工作点进行严格控制。利用正交混频的方法可准确获得待测信号^[5],其数字化信号解调流程如图2所示。

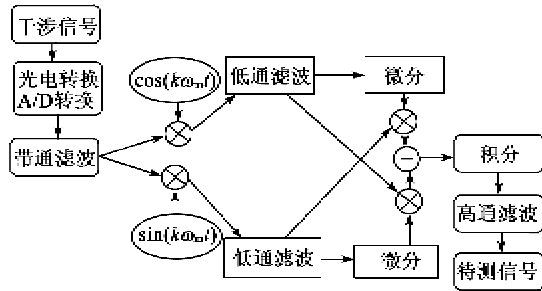


图2 锯齿波 FMCW 信号解调流程

式(7)为带通滤波后的干涉信号表达式,将其分别乘以 $\cos(k\omega_m t)$ 和 $\sin(k\omega_m t)$ 可得

$$I(\tau, t) = I_0 \cos(k\omega_m t) + \frac{I_0 V}{2} \{ \cos[2k\omega_m t + \varphi(t)] + \cos \varphi(t) \} \quad (8)$$

$$I(\tau, t) = I_0 \sin(k\omega_m t) + \frac{I_0 V}{2} \{ \sin[2k\omega_m t + \varphi(t)] - \sin \varphi(t) \} \quad (9)$$

对式(8)、(9)分别进行低通滤波,滤除 $k\omega_m$ 及其倍频后信号的表达式为

$$\frac{I_0 V}{2} \cos \varphi(t) \quad (10)$$

$$-\frac{I_0 V}{2} \sin \varphi(t) \quad (11)$$

分别对式(10)、(11)微分:

$$-\frac{I_0 V}{2} \sin \varphi(t) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (12)$$

$$-\frac{I_0 V}{2} \cos \varphi(t) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (13)$$

式(11)×式(12)-式(10)×式(13)得

$$\frac{(I_0 V)^2}{4} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (14)$$

对式(14)求积分即可得到 $\varphi(t)$,再经过高通滤波得到定标后的待测信号 $\varphi_s(t)$ 。

3 实验结果

3.1 影响干涉信号主频的因素

由第1.2节干涉信号分析可知,干涉信号主频受到光源调制频率,调制深度及干涉仪臂差的影响。实验中,光源为半导体激光器,干涉仪为臂差20 m的Michelson干涉仪,光源调制频率5 kHz,试验系

统结构如图1(a)所示,但暂无声信号 $\varphi_s(t)$ 。调节调制电压峰峰值为96 mV时,5 kHz主频能量最大,改变调制电压峰峰值,观察干涉信号主频的变化,如图3所示。

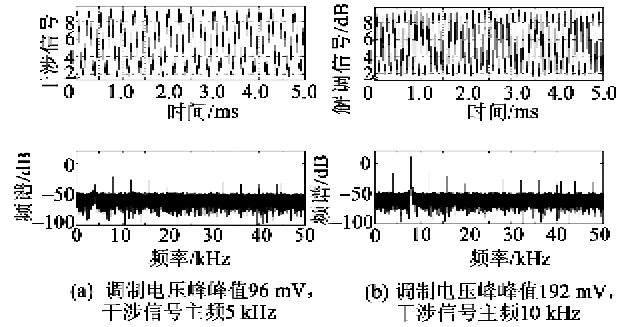


图3 调制深度对干涉信号主频的影响

由图3可看出,干涉信号频谱由调制频率的一系列谐振分量组成,并存在一个能量最大的主频。实验中,电压峰-峰值 $V_{pp} = 96$ mV时,干涉信号主频能量高出旁边次主频32 dB, $V_{pp} = 192$ mV时,高出26 dB,调制深度增大到6倍时,高出20 dB。实验中改变干涉仪臂差会有相似结果,这是锯齿波调制干涉型传感器频分复用的基础。同时,实验发现主频向高频方向移动时,次主频能量会逐渐加大,在频分复用系统中,这会使传感器之间串扰增大。这主要是由于 ω_b 和 $k\omega_m$ 之间存在差别造成的,通过精确控制干涉仪臂差可改善该问题。

3.2 信号解调

3.2.1 单个传感器信号解调

实验系统不变,将传感臂中的一段光纤缠绕在压电陶瓷环上,对其加500 Hz正弦调制电压用以模拟振动信号。光源频率调制频率10 kHz,干涉信号及解调出信号如图4所示。

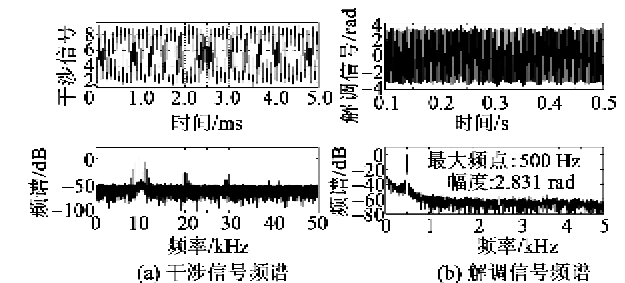


图4 干涉信号及解调信号的频谱

由图4(a)可看出,光源调制频率10 kHz,调制电压峰-峰值96 mV,干涉信号主频变为10 kHz,待测声信号作为边频携带在调制频率及其倍频分量上,主频能量最大,其他谐振能量都低于主频30 dB,图4(b)为解调出的500 Hz待测声信号及频谱。解

调信号与 PZT 调制信号相关度高达 0.995 5。多次解调实验证明该解调方法稳定、高效。

3.2.2 双传感器并联信号解调

光源及调制频率不变,将 10 m 臂差干涉仪与 20 m 臂差干涉仪并联进行实验,实验系统结构图如图 5 所示。图中,光源调制频率为 10 kHz, S1、S2 均为迈克尔逊干涉仪,其干涉信号主频分别为 10 kHz 和 20 kHz。实验中,S1 加 500 Hz 信号,S2 不加信号。图 6 为干涉信号及解调信号。

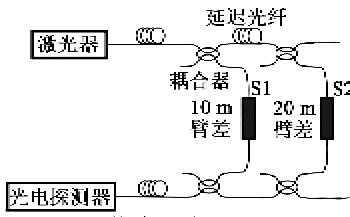


图 5 双传感器并联实验结构图

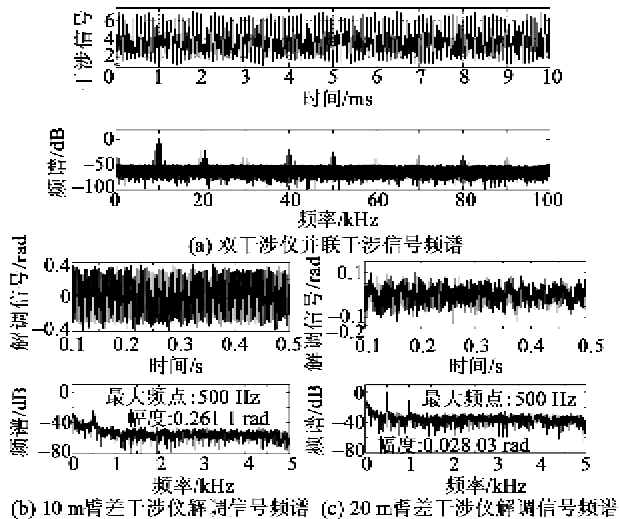


图 6 双干涉仪并联信号解调实验

从实验结果可得：

1) 双干涉仪并联后,干涉信号出现 2 个主频,分别对应不同臂差的干涉仪。实验中仅有 S1 加有 500 Hz 信号,但频谱图上,该 500 Hz 信号加载在所有调制频率倍频上,包括 S2 的主频,这会对 20 kHz 主频携带信号产生影响。

2) 图 6(b)、(c)是从 2 个主频处解调得到的信号。由图可看出,从 10 kHz 的载波处解调的信号是正确的,与 PZT 所加信号相关度为 0.98;从 20 kHz 处也解调出 500 Hz 的信号,但能量比从 10 kHz 处解调出的信号能量低 20 dB 左右,信号串扰较小。

S2 加 500 Hz 信号,S1 不加信号,则在 20 kHz

载波处可解调到正确的信号。信号的串扰仍存在,通过精确控制干涉仪臂差,对调制电压进行校正等方法可降低该串扰。

4 结束语

本文阐述了锯齿波 FMCW 干涉型光纤声传感器振动探测的原理,分析了干涉信号的特征,并讨论了数字化信号解调的方案。通过实验,验证了该传感器声振动传感的可行性。作为一种外差检测,该方案无需移频器件,可以实现远程无源检测,同时,改变干涉仪的臂差即可实现传感器的频分复用,与传统意义的频分复用系统相比,其降低了光源成本。但锯齿波 FMCW 对光源的要求苛刻,因为是相干检测,要求光源具有较大的相干长度,单模输出,锯齿波频率调制又要求光源必须具备线性频率调制性能,仿真表明,光源频率调制的非线性对解调结果的影响大,甚至不能解调出信号。随着高性能光源的出现,锯齿波 FMCW 干涉型光纤声传感器的应用会越来越广泛。

参考文献:

[1] ZHENG J. Optical frequency-modulated continuous-wave (FMCW) interferometry[M]. America, Springer, 2005:18-56.

[2] 田芊,李达成,张恩耀. 半导体激光器线性调频光纤位移测量仪的研究[J]. 中国激光, 1992, 19(9): 668-670. TIAN Qian, LI Dacheng, ZHANG Enyao. Study on optical fiber displacement gauge using frequency-modulated diode laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 1992, 19(9): 668-670.

[3] 吴义芳. 以半导体激光器线性频率调制为基础的距离测量[J]. 激光技术, 1999, 23(2): 113-115. WU Yifang. Distance measurement using a linear frequency modulation diode laser[J]. Laser Technology, 1999, 23(2): 113-115.

[4] 倪明. 光纤水听器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院, 2003.

[5] 倪明,熊水东,孟洲,等. 数字化相位载波解调方案在光纤水听器系统中的实现[J]. 应用声学, 2004, 23(6): 5-11. NI Ming, XIONG Shuidong, MENG Zhou, et al. Realization of digital demodulation of the phase generated-carrier technique in fiber optic hydrophone systems [J]. Applied Acoustics, 2004, 23(6): 5-11.

[6] 张楠. 大规模光纤水听器阵列光学外差及时分复用技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.