

基于 M-Z 干涉结构的低频信号相位解调方法

林家锴, 衣文索

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘要:针对采用马赫-曾德尔(M-Z)干涉结构在低频信号解调时存在静态工作点不稳定和信号失真等问题,提出了一种基于 M-Z 干涉结构的低频信号解调方法。对干涉型检波系统相位调制的同时进行相位补偿,并对通过引入直流滤波器对传统相位生成载波方法进行了改进,应用软件仿真确定了最佳调制深度,搭建解调系统进行了低频声波信号的频率与幅度测试实验。实验结果表明:该方法可以成功解调出幅度为 2.5 rad、频率为 0.1 Hz 的低频信号,20 Hz 的信号频率的线性度高达 0.9995。

关键词:干涉型光纤检波器;相位生成载波;低频信号解调;外调制

中图分类号:TN247 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)04-0094-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Phase demodulation method of low frequency signal based on M-Z interference structure

LIN Jiakai, YI Wensuo

(College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problems of static working point instability and signal distortion when using Mach-Zehnder (M-Z) interference structure in low frequency signal demodulation, a low frequency signal demodulation method based on M-Z interference structure is proposed. Phase compensation is carried out while phase modulation of interferometric detection system, and the traditional phase generation carrier method is improved by introducing direct-current filter. The optimal modulation depth is determined by software simulation, and the demodulation system is built to test the frequency and amplitude of low-frequency acoustic signals. The experimental results show that this method can successfully demodulate the low frequency signal with amplitude of 2.5 rad and frequency of 0.1 Hz, and the linearity of the signal frequency of 20 Hz is as high as 0.9995.

Key words: interferometric fiber detector, phase generated carrier, low frequency signal demodulation, external modulation

0 引言

光纤与特定机械结构相结合的干涉型光纤检波器的原理是直接将被测物理量的变化转换为光相位的变化,比其它类型光纤检波器具备更高的信号响应灵敏度和更宽的频率响应范围^[1]。目前,成功应用的干涉型光纤检波结构主要分为 2 种:马赫-曾德尔(M-Z)

干涉结构和迈克尔逊干涉结构,两者的性能各有优势,在实际应用中都成功获取了不同震动类型时间的物理信息。然而,对低于 1 Hz 以下信号的检波结构的响应结果却少有报道。“低频”对人类社会活动具有潜在的危害,比如地震波信号、海底声波信号和低频电磁武器信号等^[2]都属于“低频”信号。因此,超低频信号相位的精准解调对于未来社会的发展具有重要意义。相位生成载波技术可以用来解调低频信号相位,其本质上是一种开环解调技术,通过所调制高频信号对待测信号的 2 次混频,获取与待测信号同频率、同相位的信号项。相位生成载波技术引入调制量的方案主要有内调制和外调制 2 种,与内调制方案的迈克尔逊检波结构系统相比,虽然应用外调制方案的 M-Z 检波结

收稿日期:2021-08-31。

基金项目:国家自然科学基金项目(61675035)资助。

作者简介:林家锴(1995—),男,吉林长春人,硕士,现就读于长春理工大学光电工程学院仪器科学与技术专业,主要从事光纤传感与微弱信号检测方面的研究工作,参与了国家安防、管道监测工程以及海底声波信号检测等项目的研究。



构系统是采用低频电控信号对系统工作点进行校正,但不需使用价格昂贵的可调谐激光器,消除了调制光源过程中所引入的寄生调幅^[3-4]。此外,根据后端解调方式的不同,还可以将相位解调方法分为微分交叉相乘解调与反正切解调。对于监测低频信号的干涉型系统而言,这 2 种解调方法也存在一定的缺陷:微分交叉相乘解调方法在其积分过程中的直流项很难通过高通滤波器直接滤除;而反正切解调方法的解调范围有限,在解调大幅度信号时会存在一定的失真^[5-6]。针对上述解调过程中存在的问题,本文提出一种基于 M-Z 干涉结构的低频信号相位解调方法。

1 基于 M-Z 干涉结构的低频信号相位解调方法理论分析

本文采用 M-Z 干涉仪对低频信号进行监测,只要同时解调出待测信号的频率和幅度,就验证了解调方法的实用性。

传统的相位生成载波技术是将待测信号与基频和二倍频信号同时混频,再通过微分交叉相乘或反正切的解调方法进行解调。在采用反正切解调方法进行解调时,其解调信号范围区间的条件较为严格,即使 M-Z 干涉仪工作在小信号状态下,也很容易因环境影响而造成解调信号的失真^[7-8]。

本文提出的基于 M-Z 干涉结构的低频信号相位解调方法部分流程图如图 1 所示。在相位调制的同时进行相位补偿,与后端解调形成闭环结构。通过在微分交叉相乘解调的前端引入直流滤波器,不仅可以解决本身存在直流漂移的问题,而且可以克服基频混频只适用于小幅度信号检测的局限性,同时还能避免低幅度、低频率补偿信号所引起的信号失真问题。

在加入直流滤波器的解调方法中,干涉信号通过低通滤波后滤除了待测信号的直流分量 A ,经过低通滤波器后可以表示为 $BJ_0(C)\cos\varphi(t)$ 。其中, $\varphi(t)$ 为待测信号相位, B 为干涉信号幅度, C 表示相位调制深度, $J_0(C)$ 表示 C 的第 n 阶贝塞尔函数。另外一路与基频混频再通过低通滤波后可以表示为 $-GBJ_1(C)\sin\varphi(t)$,

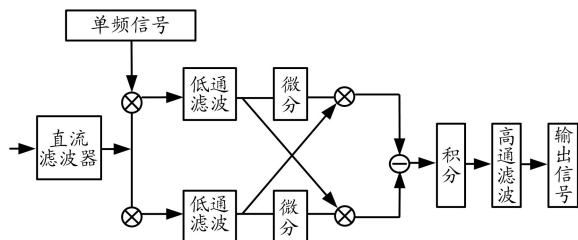


图 1 基于 M-Z 干涉结构的低频信号相位解调方法解调部分流程图

其中 G 代表基频信号幅度。最后,通过微分交叉相乘与高通滤波后得到 $GB^2DJ_0(C)J_1(C)\cos\omega_s t$,从而实现待测信号的解调。其中, D 为待测信号幅值, $\omega_s t$ 表示最终解调信号的频率。

2 相位调制深度的选取

基于 M-Z 干涉结构的低频信号相位解调方法是在基频混频微分交叉相乘解调方式的基础上,通过直流滤波器的引入,实现对不同幅度信号的解调。此种方式既简化了解调系统的复杂程度,又不会对其它模块的静态工作点产生影响。依据原始微分解调方法,在 $d[J_0(C) \cdot J_1(C)]/dC=0$ 、 $J_0(C) \cdot J_1(C)$ 为最大值时,具备最理想的解调结果。通过仿真软件得出最佳的相位调制深度,解调结果如图 2 所示。可以看出,当调制深度 $C=1.11$ 时,有 $d[J_0(C) \cdot J_1(C)]/dC=0$ 、 $J_0(C) \cdot J_1(C)$ 为最大值,此时最符合解调算法的运算需求,能够完整地解调出待测信号。因此,在解调方案的测试实验中相位调制深度选取 1.11。

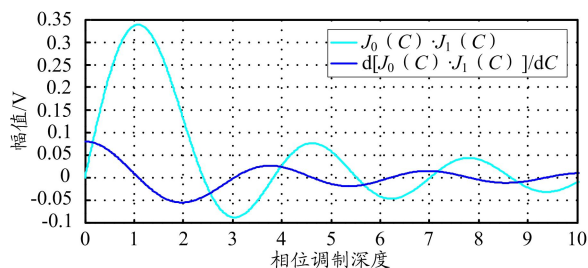


图 2 $J_0(C) \cdot J_1(C)$ 及其导数随调制深度 C 的变化曲线

3 实验方案与数据分析

3.1 实验方案设计

为验证所提方法的性能,本文在选取最佳相位调制深度后,对该方法进行实验测试。搭建的基于 M-Z 干涉结构的光纤检波解调系统如图 3 所示。1550 nm 激光器发出的光先后经过光纤隔离器和 1×2 耦合器,分 2 路进入干涉仪的参考臂和传感臂,最后在末端耦合器进行干涉,干涉后的光相位信号通过 PIN 光电探测器转换为光强信号,由数据采集卡进行采集,最后将信号由改进基频混频解调模块进行处理。模拟地震波信号直接作用于检波器结构体,将结构体固定于振动平台上并由其产生一定幅度和频率的地震波信号。在干涉仪的干涉臂和参考臂分别加入压电陶瓷 1(PZT1)和 PZT2 进行相位调制和初始相位差补偿,干涉仪输出信号的直流电平决定了对 PZT2 驱动反馈电压的大小,从而形成闭环解调结构。为了实现更好的解调效

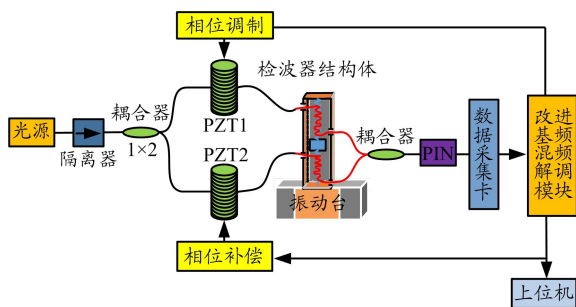


图3 基于 M-Z 干涉结构的光纤检波解调系统

果, 必须保持调制信号与干涉信号的时间一致性。最后通过上位机软件显示出解调后的信号波形。

3.2 低频信号相位解调实验

在调制光纤检波系统解调实验中, 由于本文所搭建的解调系统是通过外调制生成载波信号, 所以调制深度 C 与 PZT 对光纤所产生的形变有着密切的关系。为了获取更好的信号调制效果, 测试实验时通过机械敷绕方式对 PZT 进行光纤的缠绕。设置调制信号的频率为 5 kHz, 单倍频混频信号与调制信号同时产生, 频率同样为 5 kHz。M-Z 芯轴型结构体竖直放置于振动台上, 设置振动台输出信号频率为 0.1 Hz, 信号幅值为 1.5 V。

为了实现对低频信号的监测, 实验中设置高通滤波器的截止频率为 0.1 Hz、 $C=1.11$, 输出时域和频域上的解调结果如图 4 和图 5 所示。可以看出, 该方法成功解调出幅度为 2.5 rad、频率为 0.1 Hz 的待测信号, 几乎无失真地实现了对待测信号的解调。

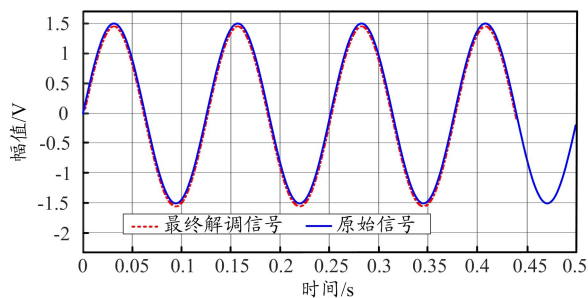
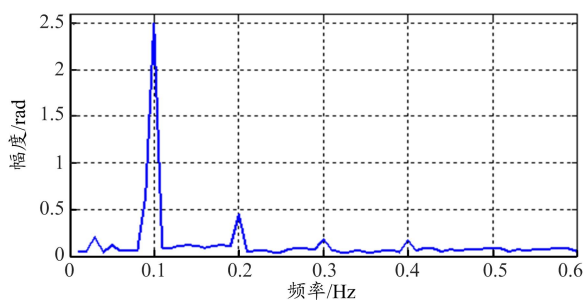
图4 当 $C=1.11$ 时的时域解调结果

图5 0.1 Hz 待测信号频域解调结果

为了验证解调系统对不同幅度信号的解调程度, 需要进一步测试同一频率、不同待测信号的幅度与相位输出电压的关系, 即解调系统线性度。首先, 在测试过程中将振动台置于平稳的木桌上, 避免因外界扰动引起的线性度测量误差, 控制振动台的输出信号频率为 20 Hz; 然后, 逐渐增加振动台的振动幅度, 并记录振动台往复位移每增加 0.5 cm 时所对应的输出电压幅值, 直至待测信号

表1 解调系统线性度测试数据

待测信号 幅度/cm	输出电压 幅值/V
0	0.021
0.5	0.445
1	0.867
1.5	1.290
2	1.716
2.5	2.141
3	2.566
3.5	2.990
4	3.413
4.5	3.838
5	4.260

最大幅度为 5 cm 为止, 解调系统线性度的测试数据如表 1 所示。可以看出, 待测信号幅度与输出电压幅值线性度良好。通过对测试数据进行线性度拟合计算获得的线性度相关系数高达 0.9995。

4 结束语

本文对采用基于 M-Z 干涉结构的低频信号解调方法进行理论分析和实验研究。首先, 选取了改进型方案的最佳相位调制深度为 1.11, 在对检波结构相位调制的同时进行相位补偿, 使其一直工作在最灵敏状态; 然后, 通过对传统解调方案的改进, 简化解调系统复杂度。实验结果表明, 所提解调方法可以同时解调出信号的大幅度和低频率, 并且对不同幅度的待测信号均具有良好的线性度, 验证了其良好的解调性能。

参考文献:

- [1] 王巍, 丁冬发, 夏君磊. 干涉型光纤传感用光电子器件技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 陈建冬. 基于光纤干涉法的海底地震检波器的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [3] 巩玲仙, 邵贵成, 田竹梅, 等. 基于压电陶瓷相位调制器的外调制相位生成载波法研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(5): 529-534.
- [4] CHEN J, CHANG T, YANG Y, et al. Ultra-low-frequency tri-component fiber optic interferometric accelerometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(20): 8367-8373.
- [5] 王林, 何俊, 李芳, 等. 用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 1-7.
- [6] 李阳, 苏晓星, 刘艳. 基于基频混频的相位生成载波法调制解调方法研究[J]. 光电子激光, 2012, 23(5): 933-938.
- [7] ZHANG S, CHEN Y, CHEN B, et al. A PGC-DCDM demodulation scheme insensitive to phase modulation depth and carrier phase delay in an EOM-based SPM interferometer[J]. Optics Communications, 2020, 474(20): 4009-4018.
- [8] KAMENEV O T, KULCHIN Y N, PETROV Y S, et al. Fiber-optic seismometer on the basis of Mach-Zehnder interferometer[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2016, 244: 133-137.