

一种基于 3×3 耦合器的光纤相位解调算法

宋美杰¹, 于廷宽²

(1. 桂林航天工业学院 电子信息与自动化学院, 广西 桂林 541004; 2. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要:针对当前 3×3 耦合器相位解调算法的不足,借鉴相位生成载波(PGC)解调算法,提出了一种新的 3×3 耦合器相位解调算法。该算法通过在干涉仪中加一个高频大幅相位调制信号,使用 3×3 耦合器中 2 路输出的一阶倍频项实现相位解调,对该算法进行了理论推导,并通过 Matlab 编程对算法进行了验证。该方法避免了传统 3×3 耦合器法被动解调中无法实时判断干涉效果、不能及时进行偏振控制的不足。

关键词:光纤干涉仪;相位解调;3×3 耦合器

中图分类号:TN622 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)05-0051-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.05.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical fiber phase demodulation algorithm based on 3×3 coupler

SONG Meijie¹, YU Tingkuan²

(1. College of Electronic Information and Automation, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In view of the shortcomings of the current phase demodulation algorithm of 3×3 coupler, a new phase demodulation algorithm of 3×3 coupler is proposed by referring to the phase generation carrier(PGC) phase demodulation algorithm. Which uses a high frequency and large phase modulation signal in the interferometer, and uses the first-order doubling term of the two outputs in the 3×3 coupler. The algorithm is theoretically deduced and verified by Matlab programming. The method avoids shortcomings of the traditional 3×3 coupler method passive demodulation, which cannot judge the interference effect in real time, and cannot perform the polarization control in time.

Key words: fiber optic interferometer; phase demodulation; 3×3 coupler

0 引言

光纤干涉仪是光纤传感技术中经常用到的一种光路结构,它可将光纤中的相位变化转换为光强变化以便于观测,具有灵敏度极高的优点。例如对于波长为 1.55μm 的光源,只要干涉仪的光程差变化达到 1.55μm,干涉仪输出光强就能得到一个明暗条纹,因此在直接观察方式下,光纤干涉仪的检测精度可达微米量级。如果需要更高的测量精度和动态范围,就需要用到相位解调技术。常用的相位解调技术有:相位生成载波(PGC)法^[1]、3×3 耦合器法和外差探测法^[2]等。

收稿日期:2019-02-20。

作者简介:宋美杰(1983-)女,内蒙古赤峰人,硕士,电子信息与自动化学院讲师,主要研究方向为光电传感、光电测量和电子信息信息,近几年主要从事电子信息相关教学与科研工作,主持和参与区级科研课题 3 项。



无论从实现难易度和实现成本看,3×3 耦合器法都是一种优秀的相位解调方法,但是在某些应用场合,3×3 耦合器法也有局限性^[3-6]。比如在干涉仪的偏振态不稳定情况下,需要增加偏振控制器来稳定干涉效果。对于 PGC、外差等主动解调方法,因为一直有外部大幅度调制信号,所以可以实时判断出干涉仪的干涉效果;而 3×3 耦合器法属于被动解调方法,只有当检测相位信号幅度超过 πrad 时,才能知道干涉仪的干涉效果,若干涉仪的相位差长期处在零值或小值范围内,就很难了解此时的干涉效果并进行偏振态调节。

本文将 3×3 耦合器解调算法与 PGC 法^[1]相结合,通过在干涉仪中引入一个额外的大相位变化信号来弥补上述 3×3 耦合器法的不足。

1 相位解调算法原理

本文提出的基于 3×3 耦合器的光纤相位解调方

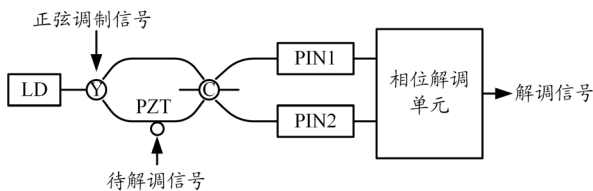


图 1 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的 3×3 耦合器相位解调系统图

案如图 1 所示。

图 1 中,LD 为激光器,Y 为集成光子器件 Y 波导,C 为 3×3 耦合器,PIN1、PIN2 为光电探测器,PZT 为压电陶瓷。Y 波导、3×3 耦合器和光纤构成了一个光纤 Mach-Zehnder 干涉仪。激光器发出的光经过 Y 波导均分为 2 路输入干涉仪,同时 Y 波导被加上一个频率为 f_0 的正弦电信号,从而在干涉仪中形成一个频率为 f_0 的正弦相位调制。将干涉仪探测臂的光纤缠绕在 PZT 上数圈,在 PZT 上加载电压使 PZT 形变,形变引起光纤的拉伸,从而形成相位变化,该相位变化被当作需要解调的相位信号。3×3 耦合器 3 路输出中的 2 路经光电探测器转换为电信号,交由相位解调单元实现相位解调。下面对相位解调单元的原理及算法进行阐述。

与 PGC 法一样,在干涉仪上加载一个相位调制信号后,干涉仪的输出信号 I 有如下形式:

$$I = A + B \cos [C \cos(\omega_c t) + \Phi] \quad (1)$$

其中, A 表示干涉光中直流部分强度, B 表示干涉光中交流部分幅度, $C \cos(\omega_c t)$ 表示加载的相位调制信号。 C 为调制幅度, ω_c 为调制信号角频率 ($\omega_c = 2\pi f_0$), Φ 表示干涉仪中的相位差,该相位差为待解调相位信号 $\varphi(t)$ 与干涉仪固定相位差 θ 之和,即: $\Phi = \varphi(t) + \theta$ 。

将式(1)用贝赛尔函数展开,并乘以 $\cos(\omega_c t)$ 后经过低通滤波得:

$$I = B J_1(C) \cos \Phi \quad (2)$$

其中, J_1 为一阶贝赛尔函数, Φ 与式(1)中相同。

将式(2)用于 3×3 耦合器的 2 路输出,分别表示为:

$$I_1 = B_1 J_1(C) \cos[\varphi(t) + \theta_1] \quad (3)$$

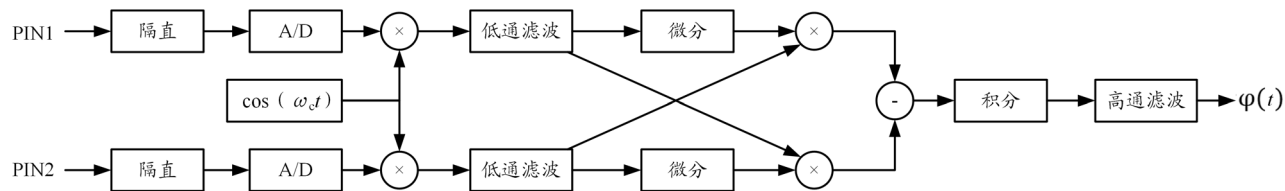


图 2 基于 3×3 耦合器的相位解调单元算法框图

$$I_2 = B_2 J_1(C) \cos[\varphi(t) + \theta_2] \quad (4)$$

因为实际的 3×3 耦合器很难做到 3 路严格均分,所以一般 $B_1 \neq B_2$, 且 2 路输出存在着恒定相位差,即 $\theta_1 - \theta_2 \neq 0$ 。

将式(3)、式(4)分别微分并交叉相乘、相减后可得:

$$I_1' = -B_1 J_1(C) \sin[\varphi(t) + \theta_1] \varphi'(t) \quad (5)$$

$$I_2' = -B_2 J_1(C) \sin[\varphi(t) + \theta_2] \varphi'(t) \quad (6)$$

只要 $\sin(\theta_1 - \theta_2) \neq 0$, 即 $\theta_1 - \theta_2 \neq k\pi, k=0, 1, 2, \dots$ 时,上式积分可得到 $\varphi(t)$ 。

相位解调单元算法可用图 2 表示。图 1 中 PIN1、PIN2 输出的 2 路电信号作为相位解调单元的 2 路输入; 经过隔直处理移除直流分量、A/D 采样为数字信号; 再依次完成上述算法要求的混频、低通滤波、微分、交叉相乘、相减及积分等操作; 最后通过一个高通滤波消除可能的低频相位漂移量,得到需要解调的相位信号。

2 仿真试验

本文采用 Matlab 编程对上述解调算法进行了仿真。仿真中采用的参数有:采样频率为 1MHz,调制信号频率 $f_0=100\text{kHz}$ 、幅度 $C=\pi\text{rad}$ 。考虑到现实中的 3×3 耦合器不能达到严格的 3 路输出光强均等,故取 $B_1=1$ 、 $B_2=1.1$,2 路输出的相位差 $\varphi(t)=2\pi/3\text{rad}$ 。

试验采用频率为 f_d 、幅度为 D 的正弦相位信号作为待解相位信号,即: $\varphi(t) = D \sin(2\pi f_d t)$, 取 $D=1\text{rad}$ 、 $f_d=1\text{kHz}$, 由此可得 3×3 耦合器的 2 路输出经光电探测、隔直和采样后的探测信号如图 3 所示。

将 2 路探测信号按图 2 完成后续的解调算法得到解调信号,相应的频谱分析以及与原始信号的比较如图 4 所示(图中的蓝线原始信号,红线为解调信号)。可以看出,解调信号在频率上与原始信号一致,仅幅度有些差别,以及存在一个固定的初始相位差。幅度差可以通过一个放大倍数来调整,初始相位差的存在是因为算法中多次使用到有限脉冲响应(FIR)滤

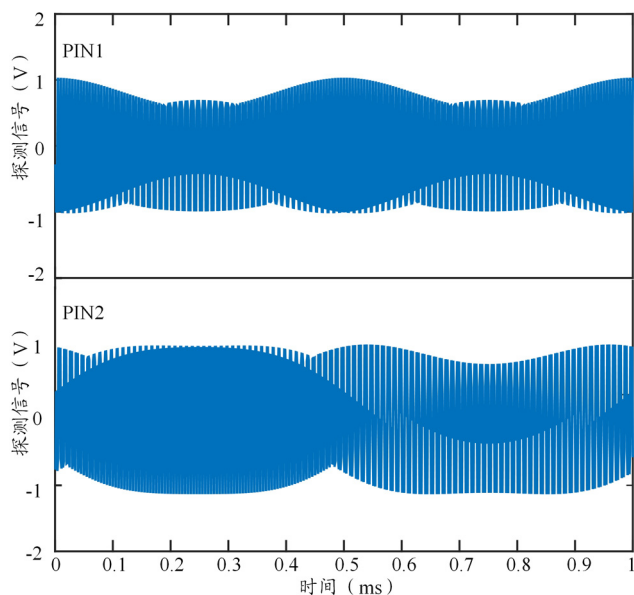
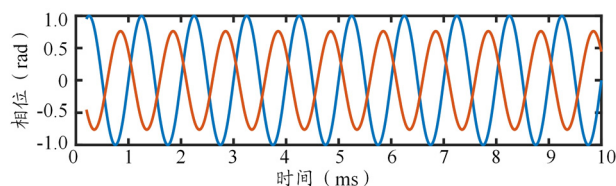
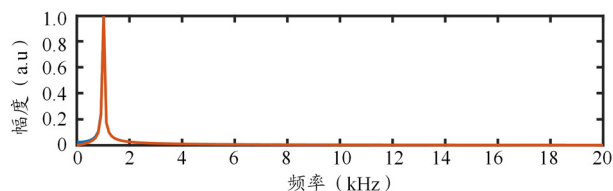


图3 耦合器的2路输出光的探测信号图



(a) 相位解调时域信号



(b) 相位解调频域信号

图4 相位解调结果与频谱分析

波器,这些对算法的解调效果都不会造成影响。

由于在实际环境中,待解调信号不可能为一个单一频率的信号,因此解调算法对不同频率信号的解调一致性很重要。在仿真中,当解调幅度为1时,用本文提出的新的 3×3 耦合器相位解调算法依次解调频率为 1kHz,2kHz,⋯,20kHz 的正弦信号(如图5所示),

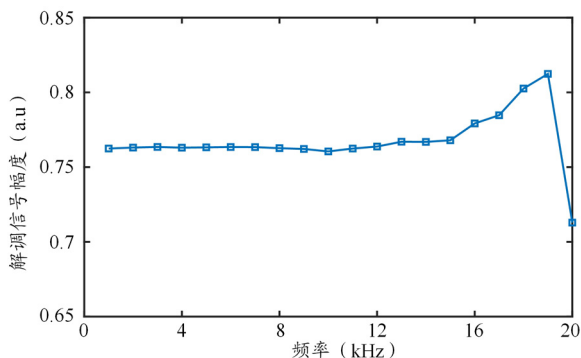


图5 不同频率信号的解调一致性曲线

通过测量解调后信号的幅度评估本算法对不同频率解调的一致性。

从图5可以看出,本解调算法在 0~20kHz 的频率范围内保持着较好的一致性,特别是在 1~15kHz 范围内,误差小于 1%。

3 结束语

本文基于对当前 3×3 耦合器相位解调算法不足的分析,借鉴 PGC 相位解调算法,通过在干涉仪中引入一个大幅相位调制信号,使用 3×3 耦合器的 2 路输出实现相位解调。本文不仅对算法进行了理论推导,而且通过 Matlab 编程进行了仿真,仿真结果表明:该算法可实现相位解调,并且在一定频率范围内具有很好的解调一致性。

参考文献:

- [1] 张爱玲,王恺哈,郝彬,等. 干涉型光纤传感器 PGC 解调算法的研究[J]. 光电技术应用, 2013,28(6):49-52.
- [2] 叶博,张自丽,葛辉良. 光纤水听器 PGC 和外差法信号解调的比较[J]. 声学及电子工程, 2013(4):10-14.
- [3] 洪广伟,贾波,华中一. 一种基于 3×3 耦合器构造干涉仪的被动解调新方法[J]. 仪器仪表学报, 2006,27(4):341-344.
- [4] 吴红艳. 全光纤分布式振动传感技术研究[D]. 上海:复旦大学,2007.
- [5] 吕舜,姜莉凤,王超. 全光纤干涉振动信号测试系统的硬件解调系统的研究[J]. 传感技术学报, 2013,26(7):932-935.
- [6] 曾周末,刘芳,封皓,等. 基于 3×3 耦合器的双马赫-曾德尔干涉仪数字化相位解调[J]. 光学精密工程, 2014,22(6):1410-1417.

《光通信技术》加入 OSID 公告

《光通信技术》期刊自 2018 年 9 月 3 日起加入 国家新闻出版署出版融合发展(武汉)重点实验室提出的 OSID(Open Science Identity)开放科学计划。通过在期刊每篇文章上添加 OSID 开放科学(资源服务)标识码,可以使论文成果更加立体化展现,增强论文质量,促进传播与交流;使作者获得直接拓展学术人脉的渠道,并为作者与研究同领域课题的学者交流互动提供途径。

《光通信技术》编辑部