

·信号与信息处理·

干涉型光纤传感器PGC解调算法的研究

张爱玲¹, 王恺晗¹, 郝彬², 王燕¹

(1.天津理工大学计算机与通信工程学院, 教育部通信器件与技术工程研究中心, 天津市薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384;
2.天津光电通信技术有限公司技术中心, 天津 300211)

摘要:相位生成载波解调(PGC)技术是一种广泛应用于干涉型光纤传感器的零差解调法。简要概述了PGC的定义以及调制原理,分析了各种解调算法,研究发现干涉信号幅度、调制深度会对解调结果产生影响。通过消除干涉信号幅度和调制深度的影响,可以减小解调信号的失真;并且,采用低阶次的混频载波可以减小采样频率。文中的结论对于干涉型光纤传感器的解调技术具有重要的理论参考价值。

关键词:干涉型光纤传感器;相位生成载波;交叉微分相乘;反正切算法

中图分类号:TP212.44

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-06-0049-04

Research on PGC Demodulation Algorithm of Interference Fiber Sensor

ZHANG Ai-ling¹, WANG Kai-han¹, HAO bin², WANG Yan¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Communication Devices and Technology Engineering Research Center of Ministry of Education, School of Computer and Communication Engineering, University of Tianjin for Science and Technology, Tianjin 300384, China; 2. Technology Center for Tianjin Optical Electrical Communication Technology Ltd., Tianjin 300211, China)

Abstract: Phase generated carrier (PGC) demodulation technology is a kind of homodyne demodulation algorithm widely used in interference fiber sensor systems. The definition and modulation principle of PGC are introduced briefly. Different kinds of demodulation algorithms are analyzed and the results show that the demodulation signal is affected by the amplitude of interference signals and modulation depth. The distortion of demodulation signals is greatly decreased by eliminating these impacts. Moreover, the sampling frequency can be reduced by using the mixing carrier with lower orders. The results have significant theoretical reference value on the demodulation technology of interference fiber sensors.

Key words: interference fiber sensor; phase generated carrier (PGC); differential cross multiply; arctangent algorithm

干涉型光纤传感器因其具有广泛的应用领域和极大的潜力而受到人们的重视^[1-2]。它具有抗电磁干扰、体积小、质量轻、空间分辨率高、易于构成网络实现对多点多参量测量等优点。干涉型光纤传感器的解调方法目前主要有:相位生成载波解调法、光路匹配差分干涉法、差分时延外差法。由于相位生成载波解调信号有动态范围大、灵敏度高、线性度好、

测相精度高等优点,逐渐成为光纤传感信号解调技术研究的热点,是目前光纤传感干涉领域工程上较为实用的解调方法,也是最适于光纤水听器遥测和大规模组阵的信号检测技术^[3-4]。介绍了用于干涉型光纤传感器的相位生成载波的解调原理及各种具体改进的实现方法,对各种解调方法的优缺点进行分析比较。

收稿日期:2013-09-12

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0611)

作者简介:张爱玲(1973-),女,博士,教授,主要研究方向为光纤通信技术;王恺晗(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术。

1 相位生成载波的调制

干涉型光纤传感器将外界物理量变化转化成光纤中光信号相位的变化^[5]。如果对相位进行直接测量,环境噪声的随机相位漂移和解调电路的直流漂移都会对解调结果造成严重的影响。因此,通过引入待测信号带宽以外的某一频率的大幅度的周期信号对待测信号进行调制,使得待测信号位于调制信号的边带上,从而把外界干扰对待测信号的影响转变成对调制信号的影响,这就是相位生成载波的调制^[6]。

相位生成载波的调制分为外调制和内调制。外调制一般采用压电陶瓷(PZT)作为相位调制器,假设调制信号频率为 ω_0 ,幅度为 C ,则光纤干涉仪的输出信号可表示为^[7]

$$I = A + B \cos[C \cos \omega_0 t + \phi_s(t)] \quad (1)$$

式中, A 为直流量, B 为干涉信号幅度且 $B = \kappa A$, $\kappa \leq 1$ 为干涉条纹可见度。

$\phi_s(t) = D \cos \omega_s t + \psi(t)$, $\phi_s(t)$ 为幅度; D 为频率为 ω_s 的待测信号和环境漂移噪声 $\psi(t)$ 共同引起的相位变化。内调制是用电流信号调制激光器的光频,这种方法可以实现传感器的全光纤化、阵列化,但在调频同时,不可避免地产生了伴生调幅。因此,考虑伴生调幅的影响光纤干涉仪的输出信号修正为^[8]

$$I = (1 + m \cos \omega_0 t) \{A + B \cos[C \cos \omega_0 t + \phi_s(t)]\} \quad (2)$$

其中, m 为调制度。

2 相位生成载波解调算法

为了实现对水声信号的检测,国内外相关研究机构与众多学者提出并开拓了多种特点各异的PGC解调方法。其中,微分交叉相乘(DCM)算法和反正切算法是两种传统的PGC解调算法。随着研究的深入,为了减小采样频率,避免伴生调幅造成的失真以及消除光强扰动和总谐波失真,众多专家学者在传

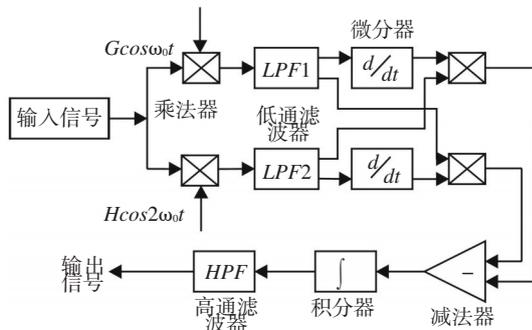


图1 DCM算法原理图

统PGC解调方法基础上,提出了许多很有实用价值的改进算法。

最先提出的是微分交叉相乘算法,其原理图如图1所示。

输入的干涉信号分别与基频和二倍频进行混频,把它们携带的边带信号搬到载波的奇次谐波或偶次谐波的边带上,再通过低通滤波器滤除载波的基频及其谐波成分。将两路低通滤波器输出的信号进行DCM运算,得到两个正交信号的平方项,利用 $\sin^2 \phi_s + \cos^2 \phi_s = 1$ 消除正交量,经过积分运算再通过高通滤波器滤除缓慢变化的环境噪声,最终得到的解调信号为^[9]

$$B^2 GH J_1(C) J_2(C) D \cos \omega_s t \quad (3)$$

由式(3)可以看出,最后的解调输出信号与待测信号成线性关系,因此与后面将要讨论的反正切算法相比,产生的非线性失真要小的多。但是由于输出信号中的干涉幅度 $B = \kappa A$,而 κ 又与光传输中偏振态的变化有关, A 是与光源光功率的稳定度、光路中各环节光功率的衰减、光纤干涉仪输入的光强等因素有关的量。因此,解调信号幅度受调制深度、光强、光路损耗、耦合器分光比、偏振态等诸多因素的影响。

反正切算法的原理如图2所示。

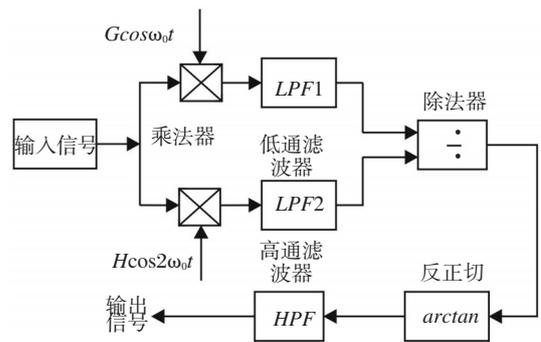


图2 反正切算法原理图

反正切算法前端部分均与DCM法相同,只是该法在两路信号分别通过低通滤波器后,进行相除

$$\frac{G \times J_1(C)}{H \times J_2(C)} \tan \phi_s(t) \quad (4)$$

对式(4)进行反正切运算,再通过高通滤波器滤除环境噪声 $\psi(t)$,即可得到待测信号^[10-11]。

与DCM算法相比,反正切算法通过除法运算,消除了 B 对解调结果的影响,而且,如果令 $G=H$,那么 $G、H$ 对解调结果的影响也会被消除。同时,反正切算

法比DCM算法原理相对简单,使得其解调算法比较简单,从而缩短了系统信号处理的时间,使系统的实时性得到了显著地提高。但是,由于调制深度(C值)的偏差,使得 $J_1(C)/J_2(C)$ 不等于1,从而使解调结果产生了非线性,同时带来了严重的谐波失真以及总谐波失真。

以上两种算法的提出,为PGC解调奠定了基础。然而,它们自身的缺陷,导致了解调结果均会产生不同程度的失真,以下则是几种改进的算法。

两种基础算法均采用的是外调制,若采用内调制,由于有伴生调幅的影响,将会产生解调失真。其根本原因是由于式(2)与基频的混频,使得 $m \cos \omega_0 t$ 与 $G \cos \omega_0 t$ 相乘后将会出现 $\frac{1}{2}AGm$ 的直流项,影响最后的解调结果。在DCM算法的基础上,若利用干涉信号的高次谐波进行解调^[12],则可以避免这种失真,原理图如图3所示。

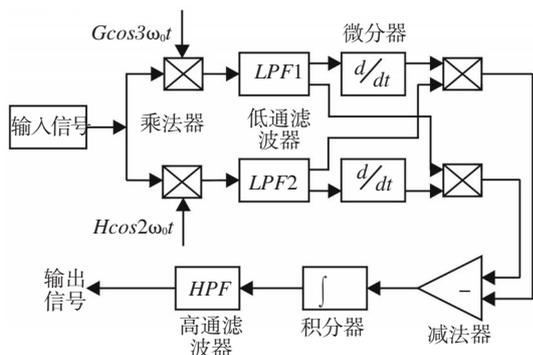


图3 三倍频DCM算法原理图

该算法的实质是将与上路信号混频的基频换成三倍频,最后其得到的解调结果为

$$\begin{aligned} & \{B^2GHJ_2(C)J_3(C) + \\ & \frac{1}{4}B^2m^2GH[J_4(C) - J_2(C)] \\ & [J_3(C) - J_1(C)]\}D \cos \omega_s t \end{aligned} \quad (5)$$

该算法削弱了伴生调幅对解调结果的影响,但是与传统的DCM算法相比,由于使用了三倍频的混频,导致了采样频率的提高。然而,通过增加抗混叠滤波器,可以使采样频率减小到与DCM算法相当。

数字处理芯片技术具有稳定性好、体积小、改动灵活的特点,将之用于光纤干涉仪的相位生成载波解调系统,就必然会涉及到采样频率的问题。相比于两种基础算法,基于基频混频的PGC解调算法^[13]可以降低采样频率。该解调方法只由基频信号对输入信号进行混频,就可以解调出与原始传感信号波

形成正比的信号。原理图如图4所示。

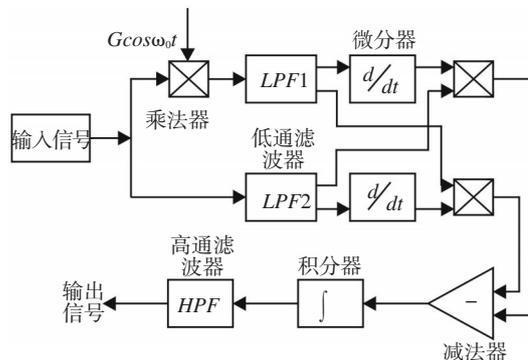


图4 基频混频PGC算法原理图

图4中上路干涉信号与基频进行混频后通过低通滤波可得到包含相位信息的正弦项,而下路干涉信号则直接通过低通滤波即可得到包含相位信息的余弦项和直流项,后面的过程与DCM算法完全相同,故通过积分器后的输出信号为

$$AGBJ_1(C)\sin \varphi_s(t) + GB^2J_0(C)J_1(C)\varphi_s(t) \quad (6)$$

此时 $\sin \varphi_s(t)$ 仍是一个相位调制信号,并没有实现真正意义上的解调。只有待测信号幅值 $D \ll 1$ (小信号)时, $\sin \varphi_s(t) \approx \varphi_s(t)$,该算法才能实现信号的正确解调。

一种基于反正切算法和基频混频算法的改进算法^[14]也可以减小采样频率,原理图如图5所示。

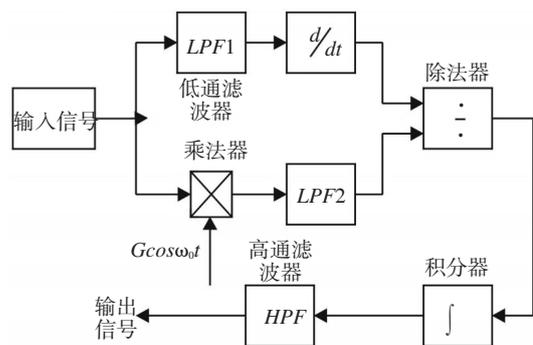


图5 改进算法原理图

图5中上路干涉信号直接通过低通滤波滤除含有载波频率的项,保留含有待测信号频率的余弦项和直流项,再通过进行微分运算,去除直流项同时将余弦项变为正弦项。下路干涉信号与基频进行混频后再经过低通滤波器得到包含待测信号信息的正弦项。再将两路信号相除,消掉会影响信号解调的正弦量,最后得到经过积分器后的输出信号为

$$\frac{1}{G} \times \frac{J_0(C)}{J_1(C)} \phi_s(t) \quad (7)$$

最终通过高通滤波器滤除低频噪声,实现待测信号的解调。该算法保留了反正切算法不受光强扰动影响的优势,与改进前的基频混频的算法相比,在不增加采样频率的基础上,克服了只能解调小信号的局限性,减小了解调系统的复杂性,但是,调制深度的浮动仍然会对解调结果造成一定的影响。

结合传统的反正切算法和DCM算法的优点,有人提出了反正切-微分自相乘算法^[15](Arctan-DSM)。原理图如图6所示。

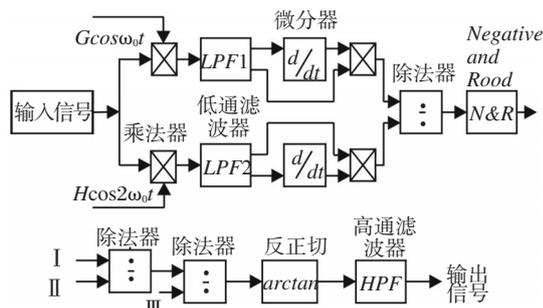


图6 Arctan-DSM算法原理图

该算法通过DSM运算得到两路信号均有相同 $\sin \phi_s(t) \cos \phi_s(t) \cdot \phi'_s(t)$,若令 $G=H$,则相除后可消去两路信号中相同的因子,再经过取负和开方运算得到信号III,即 $J_1(C)/J_2(C)$ 。

如图6下半部分所示,接下来的解调过程与反正切算法极为相似,只是添加了一个除法器,使信号I和信号II相除后得到的信号,再与信号III相除,用以消去与调制深度有关的量,输出的信号为^[16]

$$\tan \phi_s(t) \quad (8)$$

最终经过反正切运算和高通滤波器得到待测信号。该算法与DCM算法相比,从解调结果中消去了 B 值,从而减小了光强的扰动对解调结果的影响;与反正切算法和基频混频算法相比,消去了与调制深度有关的贝塞尔函数项,完全解除了解调结果对调制深度的依赖,从而在一定程度上降低了总谐波失真。只是算法过程相对复杂,增加了信号处理的时间,降低了系统实时性,但综合考虑,仍然是一种很有实用价值的解调方案。

3 结论

简要介绍了相位生成载波调制技术的原理,主

要分析了几种解调算法特点。通过研究发现,主要有以下几个因素会对解调造成影响:干涉信号光强;调制深度;混频载波的阶次。通过解调算法可以减小光强扰动和调制深度不稳定对解调结果造成的影响,采用低阶次的混频载波可以减小采样频率,减轻了硬件系统的负担。

参考文献

- [1] DANDRIDGE A, TVETEN A B, GIALLORENZI T G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, QE-18(10):1647-1653.
- [2] Strobel O, Seibl D, Lubkoll J. Fiber-optic sensors an overview [J]. IEEE J. Transparent Optical Networks, 2009, 9(10):1-6.
- [3] 侯俊芳,裴丽,李卓轩,等.光纤传感技术的研究进展及应用[J]. 光电技术应用, 2012, 27(1):49-53.
- [4] LI Yu, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, et al. All-digital real time demodulation System of Fiber La-Ser Hydrophone Using PGC Method[C]/ICM-TEMA, 2011:359-362.
- [5] 陈志伟,谭中伟,闫俊芳,等.光纤光栅传感系统的信号解调[J]. 光电技术应用, 2012, 27(2):49-52.
- [6] 张毅,贾波,许海燕,等.基于同步载波提取的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. 光子学报, 2011, 40(10):1531-1535.
- [7] 李玉,黄俊斌,谢顺依,等.光纤激光水听器的PGC实时全数字解调系统[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(1):97-100.
- [8] 施清平,王利威,张敏,等.一种消除伴生调幅的光源调频型相位生成载波解调方法[J]. 光电子·激光, 2011, 22(2):180-184.
- [9] 夏东明,娄淑琴,温晓栋,等.干涉型光纤传感器相位载波解调技术研究[J]. 光电技术应用, 2011, 26(5):47-50.
- [10] 王凯,施清平,蒋佳佳,等.参数估计误差对光纤水听器反正切解调性能的影响[J]. 光电子·激光, 2012, 23(10):1856-1862.
- [11] 孟鑫,宫铭举,张爱玲,等.一种光源调频的相位生成载波的反切解调方法[J]. 天津理工大学学报, 2012, 28(3):38-40.
- [12] 宫铭举,邓越,乔东海,等.一种模数混合的PGC解调方案[J]. 压电与声光, 2008, 30(5):538-540.
- [13] 李阳,苏晓星,刘艳.基于基频混频的相位生成载波调制解调方法研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(5):933-936.
- [14] 邱立忠,曹家年,刘海亮.干涉型光纤传感器解调方法改进与研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(8):28-30.

(下转第86页)

红外成像制导导弹通过探测目标的热辐射来迅速地发现、识别和跟踪目标,因而红外成像制导导弹与生俱来存在一定的缺点:

(1)其热图像只是二维平面图而无立体感,加之热图像与可见光图像存在一定的差异,给目标识别带来一定的困难,容易受到干扰。

(2)显示的热图像是一幅单色辐射强度的分布图,使得目标识别存在一定的难度。

(3)容易受天气情况的影响。红外成像制导导弹像其他武器系统一样,在一定的条件下受到干扰,就会失去作用。如果能够改变目标和背景的辐射特性,减少两者之间的对比度,或者大幅度地衰减进入导引头红外成像传感器系统的辐射强度,都可以使红外成像导引头系统受到干扰。如果干扰的强度相当大,红外成像导引头分辨不出目标的热图像,便可达到干扰的目的^[8]。

6 结 论

通过对美国 MJU-50/B 面源红外诱饵对抗 AIM-9X 红外成像制导导弹的建模和仿真,经分析可知机载面源红外诱饵应具备如下特性:

(1)辐射能量

面源红外诱饵在来袭导弹红外成像制导的全波段内具有目标的辐射强度两倍以上,过大或过小都不利于诱饵成功。

(2)光谱辐射特性

当机载面源红外诱饵燃烧并达到额定辐射能量后,导弹视场内的能量中心位置主要受到面源红外诱饵的影响,因此面源红外诱饵的红外光谱的频段与飞机的红外辐射频段要一致,光谱辐射分布特性也要相同或相似。

(3)辐射面积大

面源红外诱饵的辐射面积应尽量大,以覆盖飞

机的红外辐射面积为最佳。若单发不能实现,则需连续多发投放,形成有效的红外辐射面积。

(4)形成速度快

由于导弹的飞行速度较飞机的速度快很多,有效对抗实现有限,所以面源红外诱饵达到有效红外辐射强度的时间尽量短,以便抓住干扰的最佳时机。

(5)作用时间长

面源红外诱饵可在最短的时间内对红外成像制导形成干扰,作用时间应大于来袭导弹的红外制导时间,直到被保护目标脱离导弹导引头视场。通常单发作用时间达不到要求,采取多发连续发射方式实现。

仿真中发现机载面源红外诱饵在载机上的装机位置和投放方向及从载机投放时的初速度,直接影响面源红外诱饵能否投放在红外成像制导导弹的导引头视场之内。

参考文献

- [1] 吕相银,黄超超,凌永顺.面源型红外诱饵对红外成像制导干扰的评析[J].电子对抗技术,2004(4):41-45.
- [2] 张宏宇,林涛,常晓玲.面源红外诱饵对红外成像制导系统干扰研究[J].光电技术应用,2008,23(3):25-29.
- [3] 万华军,王峰.红外诱饵干扰效果分析[J].舰船电子对抗,2007(6):20-22.
- [4] 林涛,李阔.分布式面源型红外诱饵建模研究[J].光电技术应用,2007,22(1):72-74.
- [5] 田晓飞,马丽华,洪华,等.面源红外诱饵的干扰特性分析及模拟研究[J].激光与红外,2012(2):165-169.
- [6] 杨东升,慕德俊,戴冠中.机载红外诱饵运动特性仿真技术研究[J].西北工业大学学报,2009(6):781-784.
- [7] 梅遂生,王戎瑞.光电子技术[M].2版.北京:国防工业出版社.
- [8] 汪中贤,樊祥,马东辉,等.红外诱饵对红外成像制导空-空导弹的干扰效果研究[J].红外,2009(3):27-31.

(上接第52页)

- [15] HE Jun, WANG Lin, LI Fang, et al. An ameliorated phase generated carrier de-modulation algorithm with low harmonic distortion and high stability[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22):3258-3265.

- [16] WANG Guo-qing, XU Tuan-wei, LI Fang. P-GC demodulation technique with high stability and low harmonic distortion[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(23):20-93-2096.