

·信号与信号处理·

## 干涉型光纤传感器相位载波解调技术研究

夏东明, 娄淑琴, 温晓栋, 李木群

(全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要:** 相位载波解调技术是用于光纤传感器中的一种重要的信号解调技术。简要说明了 Mach-Zehnder 干涉型光纤传感器的检测原理, 对 PGC 解调算法进行了详细的理论分析, 并用 MATLAB 搭建系统进行仿真, 实现了传感信号的解调。对系统中的一些关键技术进行了讨论, 重点分析了系统的动态范围上限, 得到动态范围上限受低通滤波器、待测信号频率和载波频率的影响趋势, 结论对于设计干涉型光纤传感系统有重要的理论指导意义和参考价值。

**关键词:** 干涉型光纤传感器; 光纤干涉仪; 相位载波 (PGC)

中图分类号: TP212.9; TN216

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)05-0047-04

## PGC Method Using in Fiber-optic Interference Sensors

XIA Dong-ming, LOU Shu-qin, WEN Xiao-dong, LI Mu-qun

(Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The phase generated carrier (PGC) demodulation scheme is one of the important signal demodulation schemes used for fiber-optic sensors. The detection principle of Mach-Zehnder fiber-optic interference sensors is introduced. Detailed mathematical deduce on the phase generated carrier demodulation algorithm is given. MATLAB simulation is implemented to illuminate the feasibility of the method. Some of the important technologies of the system are discussed. The upper limitation of detecting dynamic range is analyzed and the effects of some parameters are got. These results on designing interference fiber-optic sensing system have the significant theoretical guidance and important reference value.

**Key words:** fiber-optic interference sensors; optical fiber interferometer; phase generated carrier (PGC)

光纤传感器是 20 世纪 70 年代末发展起来的一种新型传感器。其中, 基于光纤干涉仪的干涉型光纤传感器, 因具有灵敏度高、动态范围大、易于阵列化等优点, 已广泛应用于水声、压力、微振动、电磁场等方面的检测<sup>[1-2]</sup>。

在干涉型光纤传感器的多种解调技术中, 相位载波 (PGC) 解调技术有利于实现信号的远距离传送和全光纤化, 且结构简单, 便于复用, 提高了系统的实用价值, 因此在遥测、无源检测和阵列化应用中具有广阔的应用前景<sup>[3-5]</sup>。传统的 PGC 解调系统大多

采用模拟电路的方式来实现。它的缺点是不能充分发挥该技术易于阵列化的优势, 同时系统性能受电阻电容特性参数的影响大, 稳定性差, 以及电路体积庞大, 系统配置不方便。近年来, 随着数字信号处理技术的快速发展, PGC 解调技术的数字化实现已成为可能, 其应用也变得更加广泛和灵活, 出现了一些能够改善 PGC 解调性能的更为简便的方法<sup>[6-8]</sup>。由于 PGC 解调算法非常复杂, 因此在数字化实现的初期一般采用仿真软件配合整个系统的设计<sup>[9]</sup>。文中基于这种思想, 首先讨论了 Mach-Zehnder 干涉型光

收稿日期: 2011-09-06

基金项目: 教育部重大项目“新型分布式波分纤分全光交换网结构及关键技术器件的研究”(308002)

作者简介: 夏东明(1988-), 男, 河南商丘人, 硕士。主要研究方向为光纤传感与光纤通信。

纤传感器的基本原理和PGC解调算法,然后对此传感器系统进行了仿真分析,分析结果对PGC解调技术的数字化实现提供了很好的理论依据。

## 1 Mach-Zehnder干涉型光纤传感器检测原理

图1所示为Mach-Zehnder光纤干涉仪结构示意图。由激光器发出的相干光经3 dB耦合器1一分为二分别送入信号臂和参考臂,待测信号作用于信号臂,使信号臂中传输的光信号发生相位变化,两束光在3 dB耦合器2的输出端发生干涉<sup>[10-11]</sup>。显然,这是一种双光束光纤干涉仪。输出干涉光的幅度与参考臂、信号臂的幅度有关,其相位为两臂光信号的相位差,干涉场的光强分布为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Phi \quad (1)$$

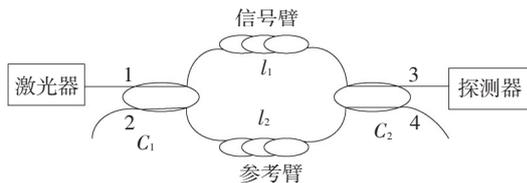


图1 Mach-Zehnder光纤干涉仪结构图

式中,  $I_1$ 、 $I_2$  为两臂单独存在时的光强,在光电检测时以直流项对待;  $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Phi$  为干涉项;  $\Phi = 2\pi n l_1 / \lambda - 2\pi n l_2 / \lambda - \pi$ , 为两臂引入的相位差,由光纤折射率  $n$ 、光波长  $\lambda$  和干涉仪两臂的长度共同决定<sup>[12]</sup>。这样就将外界信号引起的相位变化转换为强度变化,通过光电探测器转换为电信号可表示为

$$I = A + B \cos \Phi \quad (2)$$

式中,  $A$ 、 $B$  与干涉仪输入光强有关。

## 2 PGC解调原理

PGC解调技术是在光纤干涉仪中引入待测信号频带外的某一频率的大幅度相位调制信号,对初始相位进行调制,使待测信号位于载波调制信号的边带上,克服了外界干扰影响而出现的随机相位衰落现象,同时又将待测信号和低频干扰信号的频带分开,有利于噪声的分离<sup>[13-14]</sup>。其解调原理如图2所示。

当图1所示Mach-Zehnder干涉仪受到幅度为  $C$ 、角频率为  $\omega_0$  的余弦信号调制时,干涉仪的输出信号

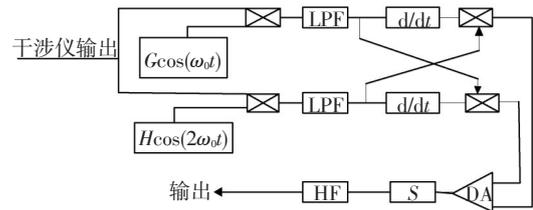


图2 PGC解调原理图

为

$$I = A + B \cos(C \cos \omega_0 t + \phi(t)) \quad (3)$$

其中,  $\phi(t)$  不仅包含了待测信号  $D \cos \omega_s t$ , 还包括了环境噪声引起的相位变化  $\psi(t)$ 。将式(3)按Bessel函数展开,得到

$$I = A + B \left\{ J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t \right\} \cos \phi(t) - 2 \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t \right\} \sin \phi(t) \quad (4)$$

其中,  $J_i(C)$  为第  $i$  阶Bessel函数的宗量值。同理得到  $\sin \phi(t)$  和  $\cos \phi(t)$  的Bessel函数展开式

$$\begin{aligned} \sin \phi(t) &= [2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(D) \cos(2k+1)\omega_s t] \cos \psi(t) + \\ & [J_0(D) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(D) \cos 2k\omega_s t] \sin \psi(t) \\ \cos \phi(t) &= [J_0(D) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(D) \cos 2k\omega_s t] \cos \psi(t) - \\ & [2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(D) \cos(2k+1)\omega_s t] \sin \psi(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)分别与一次、二次载波  $G \cos \omega_0 t$ 、 $H \cos 2\omega_0 t$  相乘,再通过低通滤波器滤除高频成分,可以得到信号的正弦项和余弦项

$$\begin{aligned} I_{\sin} &= -BGJ_1(C) \sin \phi(t) \\ I_{\cos} &= -BHJ_2(C) \cos \phi(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$I_{\sin}$ 、 $I_{\cos}$  含有外界干扰,还不能直接提取待测信号,再通过微分交叉相乘(differential and cross-multiply, DCM)方法还原其中的信号项,得到

$$V' = B^2 GHJ_1(C) J_2(C) \phi'(t) \quad (7)$$

式(7)进行积分后得到

$$V = B^2 GHJ_1(C) J_2(C) \phi(t) \quad (8)$$

相位噪声项  $\psi(t)$  通常为缓变信号,将  $V$

通过高通滤波器滤除相位噪声,就可以得到待测信号,实现传感信号的解调。

### 3 PGC解调关键技术分析

#### 3.1 C值选取

为了减小Bessel函数对输出结果的影响,应当选取载波信号的幅度,使式(8)中 $J_1(C)J_2(C)$ 达到极大值且一阶微分为0。这样,即使C值稍有变化,系统输出信号的幅值变化不大。经计算知 $C \approx 2.37$ 时 $J_1(C)J_2(C)$ 有最大值,满足要求<sup>[15]</sup>。

#### 3.2 动态范围分析

由式(4)和式(5)知,干涉信号的频谱无限宽,频谱中含有载波的基频及其各次倍频成分,且每一倍频的两侧载有无穷多个边频分量。这些边频分量的幅值正比于 $J_k(D)$ 。 $J_k(D)$ 随阶数 $k$ 的变化趋势如图3所示,随着Bessel函数阶数 $k$ 的增大, $J_k(D)$ 趋于零;随着 $D$ 的减小, $J_k(D)$ 趋于零的速度加快。

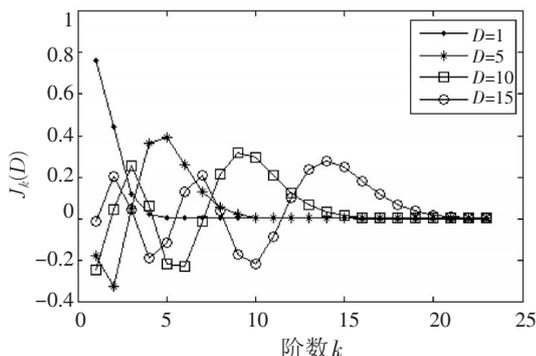


图3  $J_k(D)$ 随阶数 $k$ 的变化关系

为使信号 $\sin \phi(t)$ 、 $\cos \phi(t)$ 不失真,对低通滤波器的带宽有一定的要求。为了获得更高的动态范围上限,要求滤波器的带宽尽量宽。低通滤波器的带宽的极限值为 $B < f_0/2$ ,其中 $f_0$ 为载波频率。实现过程中,非理想滤波器都有一个过滤带,对解调结果会有影响,影响的大小由所设计的滤波器决定。

由上面的分析可知,可测信号幅度与信号的频率有关,频率越低,在相同的载波频率和低通滤波器的情况下能实现的边频数越多,这也就意味着可解调信号的动态范围上限越大。如果低通滤波器的带宽 $B$ 确定,则有

$$B = k \cdot f_s < f_0/2 \quad (9)$$

其中, $f_s$ 为待测信号频率,因此边频阶数与信号频率的关系可表示为

$$k < f_0/(2f_s) \quad (10)$$

工程应用中,当 $J_k(D) < 0.1$ 时, $J_k(D)$ 所对应的边频分量及更高次的边频分量可以忽略不计。已知Bessel函数的性质,当 $k > D+1$ 时, $J_k(D)$ 恒小于0.1。因此得到系统最大可解调信号幅度与频率的关系曲线,如图4所示。可以看出,低频信号可以有更多阶的边频分量,因此低频信号的动态范围上限较大,即系统动态范围上限随待测信号频率的增加而减小。

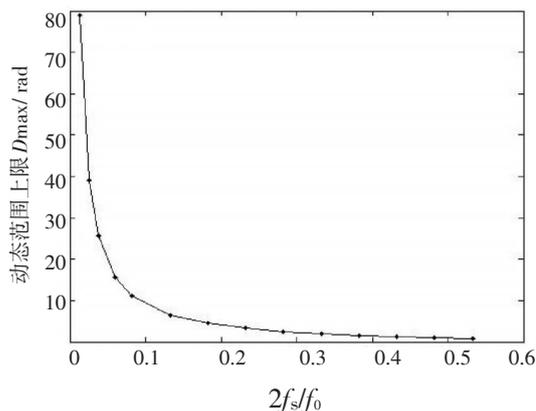


图4 动态范围上限随信号频率的变化曲线

如果信号幅度超过系统动态范围上限,信号将发生混叠现象,输出信号失真。图5、图6分别是 $D=7$ 、 $D=20$ 时的干涉信号频谱图与输入输出波形对比图。仿真中, $A=1$ 、 $B=1$ 、 $C=2.37$ 、 $f_s=1.2$  kHz、 $f_0=50$  kHz、 $\psi(t)=1$ ,采样频率为420 kHz。二者所用低通滤波器近似为理想滤波器,截止频率都是 $f_0/2=25$  kHz。由式(10)知,不能忽视的边频阶数 $k$ 应小于20。图5中 $k$ 近似为9,图6中 $k$ 近似为23,因此图6中干涉信号频谱发生混叠,输出信号出现了失真,与理论分析相一致。解决这个问题就需要提高系统的动态范围上限,显然,增大载波频率能够提高系统动

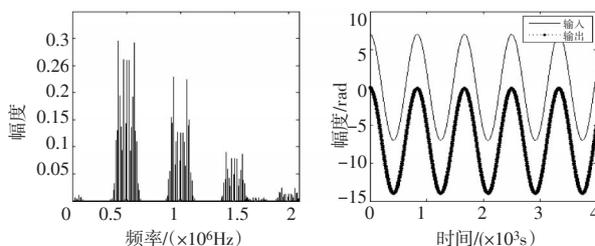


图5  $D=7$ 时干涉信号频谱图和输入输出信号波形对比图

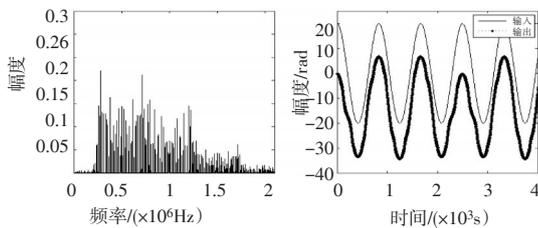


图6  $D=20$ 时干涉信号频谱图和输入输出波形对比图

态范围上限,可同时却要求提高系统的采样频率,这样大大增加了系统的复杂度。因此,应根据实际应用的需要,合理的选取载波频率。

## 4 结论

PGC解调技术利用远离待测信号频率的载波信号进行调制,克服了外界干扰而出现的随机相位衰落现象。它有利于实现传感系统的远距离传送和全光纤化,适于阵列化,提高了系统的实用价值,具有广阔的应用前景。文中对PGC解调系统进行了仿真,并对一些关键技术进行了分析,特别是对系统动态范围上限的分析。更大的载波频率能够提高系统的动态范围上限,可是也要求更高的采样频率,不利于数字化实时系统的实现。这些分析结果为数字化PGC解调的实现提供了很好的理论依据。

## 参考文献

- [1] Dandridge A, Tveten A B, Giallorenzi T G. Homodyne demodulation schemes for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1982, 18(10): 1635-1640.
- [2] 李卓轩,裴丽,祁春慧,等. 光纤光栅分布式传感器信号解调技术[J]. 光电技术应用,2009,24(5): 50-53.

(上接第32页)

- [2] B Lee. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9: 57-79.
- [3] V H Ortiz, Jorge L Flores, G García-Torales. A review on optical current transducers for power system metering[J]. Proc SPIE, 2007, 677018: 1-10.
- [4] 王政平,康崇,张雪原,等. 全光纤光学电流互感器研究进展[J]. 激光与光电子进展,2005,42(3):36-40.
- [5] Guido Frosio. Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor[J]. Appl Opt, 1994, 33(25):6111-6122.
- [6] J Blake, P Tantaswadi, R T de Carvalho. In-line Sagnac Interferometer Current Sensor[J]. IEEE Transaction on Power

- [3] N Lagakos, E U Schnaus, J H Cole, et al. Optimizing fiber coatings for interferometric acoustic sensors[J]. IEEE JQE., 1982, QE-18, 683-689.
- [4] 杨广学,李岩峰,康守强. 光纤F-P和FBG传感器通用解调系统的研究[J]. 光电技术应用,2010,25(1):12-15.
- [5] Thomas G GlaUorenzi, Joseph A Bucaro, Anthony Dandridge, et al. Optical fiber sensor technology[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1982, QE-18(4): 626-665.
- [6] 荆振国,殷锴,张敏,等.干涉型光纤传感器的消偏振衰落技术研究[J]. 光子学报,2009,38(8):2024-2028.
- [7] 陶沛琳,延凤平,尹国璐,等.双光束干涉型光纤传感器灵敏度与精度受光源谱分布特性的影响分析[J]. 红外与激光工程,2011,40(3):501-505.
- [8] 倪明,张仁和,胡永明,等. 关于光纤水听器灵敏度的讨论[J]. 应用声学,2002,21(6):17-21.
- [9] Strobel O, Seibl D, Lubkoll J. Fiber-Optic Sensors An Overview [J]. IEEE J. Transparent Optical Networks, 2009, 9(11):1-6.
- [10] 雷飞鹏,宁提纲,周倩,等. 基于光纤的温度传感器[J]. 光电技术应用,2010,25(5):39-42.
- [11] Clay K K, Anthony D. Overview of high performance fiber-optic sensing [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2004,37(18): 197-205.
- [12] 孙圣和,王廷云,徐影. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999:150-160.
- [13] 柏林厚,廖延彪,张敏,等.干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J]. 光子学报,2005,34(9):1324-1328.
- [14] Geoffrey A Cranch, Philip J Nash. Large-Scale Multiplexing of Interferometric Fiber-Optic Sensors Using TDM and DWDM[J]. Journal of Light wave Technology, 2001, 19(4): 687-699.
- [15] 曹家年,李绪友,张立昆,等.采用PGC零差检测方案的Mach-Zehnder光纤干涉仪动态范围分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,1998,19(5):77-82.

Delivery, 1996,11(1):116-121.

- [7] 王夏霄,张春熹,张朝阳,等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案[J]. 电力系统自动化,2006,30(16):77-80.
- [8] Shayne X Short, Alexandr A Tselikov, Josiel U de Arruda, et al. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors[J]. Lightwave Technol, 1998, 16: 1212-1219.
- [9] James N Blake, Scottsdale, Ariz. Fiber optics apparatus and method for accurate current sensing: United States,5987195 [P].1999-11-16.
- [10] K Bohert, P Cabus, J Nehring. Temperature and vibration Insensitive Fiber optic Current Sensor [J]. Lightwave Technol, 2002, 20(2):267-276.