

干涉型光纤传感器的消偏振衰落技术研究*

荆振国^{1a}, 殷锴^{1a,1b}, 张敏^{1a}, 王立威^{1a}, 朱耀强², 王子秋², 王宏华², 廖延彪^{1a}

(1 清华大学 a. 电子工程系, b. 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

(2 中海油田服务股份有限公司技术中心, 河北 燕郊 065201)

摘 要: 本文对消除干涉型光纤传感器信号偏振衰落的偏振分集接收 PDR(Polarization Diversity Receiver)技术进行了理论分析. 通过三态 PDR 方式, 对输出的最大有效幅度信号进行选取, 能够避免传输光偏振态变化导致干涉信号完全衰落的现象, 使干涉信号有效幅度在一定范围内变化. 采用基于反正切计算的相位生成载波 PGC(Phase Generated Carrier)解调技术的相位测量结果不受由于偏振衰落导致干涉信号有效幅度变化的影响. 提出结合三态 PDR 方式和基于反正切计算的 PGC 解调技术消除偏振衰落问题的影响, 实现干涉型光纤传感器中相位信号的理想解调.

关键词: 干涉型光纤传感器; 偏振衰落; 偏振分集接收; 相位生成载波

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2024-5

0 引言

近年来, 干涉型光纤传感器成为光纤传感器领域最受关注的研究方向之一^[1-4]. 干涉型光纤传感器通过一定长度的敏感光纤可以实现极高的灵敏度^[5-6]. 构成光纤干涉仪主体部分的光纤存在着双折射现象, 会使光纤中传播光信号的偏振态发生变化^[7]. 当发生干涉的两束光的偏振态不一致时, 会使干涉信号的幅度发生衰落, 产生偏振衰落现象. 两束光的偏振状态完全正交时, 两束光完全不相干, 干涉信号的幅度衰落为零. 为了从干涉信号中解调出对外界传感信息敏感的相位信号, 需要克服偏振衰落现象, 使干涉信号维持一定的幅度.

当前解决干涉型光纤传感器中的偏振衰落问题的途径主要有: 全保偏光路方式、法拉第旋镜方式和偏振分集探测方式等^[8-10].

基于反正切计算的相位生成载波 PGC 解调技术, 具有灵敏度高, 动态范围大等优势, 与传统的基于微分交叉相乘 DCM(Differentiate Cross Multiply)的 PGC 解调技术相比, 其相位测量结果不受由于偏振衰落, 导致干涉信号幅度变化的影响. PDR 技术结合基于反正切计算的 PGC 解调技术可以理想地解决干涉型光纤传感器系统的偏振衰落问题.

本文将 PDR 技术与基于反正切计算的 PGC 解调技术结合消除偏振, 衰落其优势在于干涉型光纤传感器的时分复用系统应用中, 可以利用单一的偏

振分集探测单元结合相应的解调技术解决时分复用阵列中所有光纤干涉仪的偏振衰落问题, 极大地降低了系统的成本, 简化了传感器的制作工艺和系统结构.

1 消除偏振衰落的 PDR 方案

在 PDR 方案中, 光纤干涉仪输出经分束后, 经过 Y 方向与 X 方向成 θ 角的检偏器, 由探测器探测.

光纤干涉仪的传感臂输出的 X、Y 方向的偏振分量分别为

$$\begin{cases} A_x \cos(\omega t + \phi_A) \\ A_y \cos(\omega t + \phi_A + \delta_A) \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_x 、 A_y 分别是传感臂输出信号 X、Y 两方向偏振分量的幅度, ω 是光频, ϕ_A 是两个偏振方向的公共相位, δ_A 是两个偏振方向的相位差.

参考臂输出的 X、Y 方向的偏振分量分别为

$$\begin{cases} B_x \cos(\omega t + \phi_B) \\ B_y \cos(\omega t + \phi_B + \delta_B) \end{cases} \quad (2)$$

式中 B_x 、 B_y 分别是传感臂输出信号 X、Y 两方向偏振分量的幅度, ϕ_B 是两个偏振方向的公共相位, δ_B 是两个偏振方向的相位差.

假设干涉仪输出的幅度相等的相互干涉的两束光光强均为 1. 则有

$$\begin{cases} A_x^2 + A_y^2 = 1 \\ B_x^2 + B_y^2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

偏振分量向 θ 方向投影可以得到

$$A_x \cos(\omega t + \phi_A) \cos \theta \quad (4)$$

$$A_y \cos(\omega t + \phi_A + \delta_A) \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) \quad (5)$$

$$B_x \cos(\omega t + \phi_B) \cos \theta \quad (6)$$

* 国家高技术研究发展计划(2006AA0AA102-03)资助
Tel: 010-62781372 Email: jingzhenguo@tsinghua.edu.cn
收稿日期: 2008-06-17 修回日期: 2008-07-23

$$B_y \cos(\omega t + \phi_B + \delta_B) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (7)$$

在检偏器之后探测器探测到干涉信号结果为

$$P = (A_x \cos \theta)^2 = (A_y \sin \theta)^2 + (B_x \cos \theta)^2 + (B_y \sin \theta)^2 + 2A_x A_y \sin \theta \cos \theta \cos \delta_A + 2B_x B_y \sin \theta \cos \theta \cos \delta_B + 2A_x B_x (\cos \theta)^2 \cdot \cos(\phi_A - \phi_B) + 2A_x B_y \sin \theta \cos \theta \cos(\phi_A - \phi_B - \delta_B) + 2A_y B_y (\sin \theta)^2 \cos(\phi_A - \phi_B - \delta_B) + 2A_y B_x \sin \theta \cos \theta \cos(\phi_A - \phi_B + \delta_A) \quad (8)$$

其中可以用来解调相位信息的交流信号成分为

$$Q = \cos(\phi_A - \phi_B) [2A_x B_x \cos \theta]^2 + 2A_x B_y \sin \theta \cdot \cos \theta \cos \delta_B + 2A_y B_y (\sin \theta)^2 \cos(\delta_A - \delta_B) + 2A_y B_x \sin \theta \cos \theta \cos \delta_A \sin(\phi_A - \phi_B) [2A_x B_y \cdot \sin \theta \cos \theta \sin(\delta_B) - 2A_y B_y (\sin \theta)^2 \sin(\delta_A - \delta_B) - 2A_y B_x \sin \theta \cos \theta \sin \delta_A] \quad (9)$$

为了简化,取

$$M = [2A_x B_x (\cos \theta)^2 + 2A_x B_y \sin \theta \cos \theta \cos \delta_B + 2A_y B_y (\sin \theta)^2 \cos(\delta_A - \delta_B) + 2A_y B_x \sin \theta \cdot \cos \theta \cos \delta_A] \quad (10)$$

$$N = [2A_x B_y (\sin \theta \cos \theta \sin \delta_B - 2A_y B_y (\sin \theta)^2 \cdot \sin(\delta_A - \delta_B) - 2A_y B_x \sin \theta \cos \theta \sin \delta_A)] \quad (11)$$

并且取 α , 使式(12)成立

$$\begin{cases} \cos(\alpha) = \frac{M}{\sqrt{M^2 + N^2}} \\ \sin(\alpha) = \frac{N}{\sqrt{M^2 + N^2}} \end{cases} \quad (12)$$

则有

$$Q = \sqrt{M^2 + N^2} \cos(\phi_A - \phi_B - \alpha) \quad (13)$$

定义干涉信号的有效幅度为

$$K = \frac{\sqrt{M^2 + N^2}}{2} \quad (14)$$

当前主要的 PDR 方案有三态 PDR 方式和双态 PDR 方式。

三态 PDR 方式是将光纤干涉仪输出的分束后通过三个互成 $\pi/3$ 角度的检偏器,然后由探测器分别探测.可以设定三态 PDR 方式的三个检偏器的角度分别为 $0, \pi/3, 2\pi/3$ 。

通过求取有效幅度 K 的定域极值,可以得到三态 PDR 方式中三个探测器输出的有效幅度最大的一路干涉信号的幅度最大值 $K_{\max} = 1$, 最小值 $K_{\min} = 0.38$, 即信号最大衰落为最大有效幅度的 38%。

因而通过三态 PDR 方式,能够避免偏振导致干涉信号完全衰落的现象。

而对于双态 PDR 方式,通常光纤干涉仪输出的分束后通过两个互成 $\pi/2$ 角度的检偏器,然后由探

测器分别探测.可以设定双态 PDR 方式的两个检偏器的角度分别为 $0, \pi/2$

通过求取有效幅度 K 的定域极值,可以得到双态 PDR 方式两个探测器输出的有效幅度最大的一路干涉信号的幅度最大值 $K_{\max} = 1$, 最小值 $K_{\min} = 0$ 。

可以看到,在相互正交的两个检偏器组成的双态 PDR 方式中,仍然可能出现偏振态变化导致干涉信号完全衰落的现象.这种情况是发生在两束干涉光为线偏振光,且偏振方向分别和两个检偏器的偏振方向一致的情形。

在现实使用的系统中,一般通过一定距离的传输光纤,由于光纤的双折射现象,原有的线偏振光都会退化成椭圆偏振光.或者采用一些退偏的措施,也可以使线偏振光退化成椭圆偏振光.如果假定椭圆偏振光的最大消光比约为 10 dB,则此时双态 PDR 方式的有效幅度最大的一路干涉信号的幅度最小值 $K_{\min} = 0.1$.商用的偏振分束器 PBS (Polarization Beamsplitter) 器件内的两个检偏方向正好也是互成 $\pi/2$ 角度,可以利用其结合一定的退偏措施实现双态 PDR 方式避免完全的偏振衰落。

偏振分集检测方案能够避免偏振导致干涉信号完全衰落的现象.但是返回干涉信号的偏振态变化仍然会导致所探测到的干涉信号有效幅度在一定范围内变化.需要结合具体应用的光纤干涉仪的解调技术,避免探测到的干涉信号有效幅度的变化对相位测量结果的影响。

2 光纤干涉仪的解调技术

为了从光纤干涉仪返回的干涉信号中提取相位信息,需要有效的信号解调手段对干涉信号进行解调处理.光纤干涉仪目前通行的解调方案是 PGC 解调技术.PGC 解调技术通过直接对光源进行频率调制,在干涉仪中产生相位载波,消除相干检测中初相位的影响。

PGC 解调方法中,光纤干涉仪的输出为

$$I = A + B \cos [C \cos \omega_c t + \varphi(t)] \quad (15)$$

式中, A 是干涉信号的直流项, B 是干涉信号的幅度, C 是施加载波的幅度, ω_c 为施加载波的角频率, φ 是待测的相位信号。

PGC 解调方法有基于 DCM 和基于反正切计算的两种思路.传统的基于 DCM 的 PGC 解调技术^[11]其解调的相位结果受到干涉信号的有效幅度的影响.需要在测量过程中,实时计算由于光信号的偏振态变化导致的干涉信号的有效幅度的变化,消除其影响。

基于反正切计算的 PGC 解调方法^[12](见图 1)

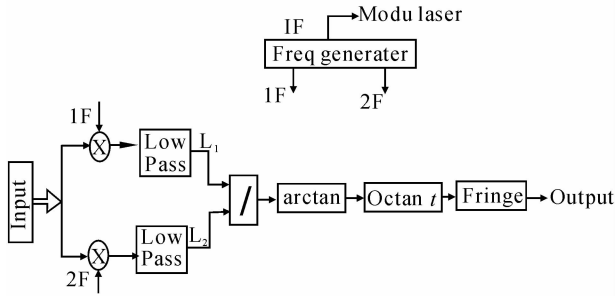


图1 基于反正切计算的 PGC 解调技术

Fig. 1 PGC demodulating technology based on ARCTAN calculation

的基本思想是由一个频率生成模块产生对光源进行高频余弦调制的载波. 同时生成供解调使用的一倍频和二倍频载波. 将干涉信号分别与一倍频载波和二倍频载波相乘, 然后通过低通滤波器得到两项结果

$$L_1 = BJ_1(C) \sin \varphi(t) \quad (16)$$

$$L_2 = BJ_2(C) \cos \varphi(t) \quad (17)$$

式中 $J_1(C)$ 和 $J_2(C)$ 是宗量为 C 的第一类 1 阶贝赛尔函数和 2 阶贝赛尔函数.

在基于反正切计算的 PGC 解调方法中, 将通过低通滤波的两项相除, 得到

$$L_1/L_2 = \frac{J_1(C)}{J_2(C)} \tan \varphi(t) \quad (18)$$

设定 C 值使 $J_1(C) = J_2(C)$

然后求取反正切函数, 就可以得到相位信号 φ , 进行值域扩展至超过 2π 的范围.

基于反正切计算的 PGC 解调技术, 其相位测量结果是绝对的相位值, 不受干涉信号幅度 B 的影响. 这样在采用 PDR 方式来消除偏振衰落系统中, 测量结果不受由于偏振态衰落导致返回干涉信号幅度变化的影响, 不需要对相位测量结果进行任何修正.

基于反正切计算的 PGC 解调技术除了具有测量结果不受干涉信号幅度的影响的特点外, 与传统的 DCM 方式相比, 还具有对冲击信号响应好, 不受初始相位的影响等方面的优势. 这样, 使其与 PDR 方式结合成为一种极具竞争力的光纤干涉仪测量解调方案.

3 实验研究

在实验中, 采用三个检偏方向互成 $\pi/3$ 角度的三态 PDR 器件来测量一个 SMF28 单模光纤构建的光纤迈克尔逊干涉仪的干涉信号输出. 监测三路输出信号的有效幅度, 利用信号有效幅度最大的一路

干涉信号进行基于反正切运算的 PGC 解调得到光纤干涉仪的相位信息. 消除偏振衰落的迈克尔逊干涉仪试验系统如图 2.

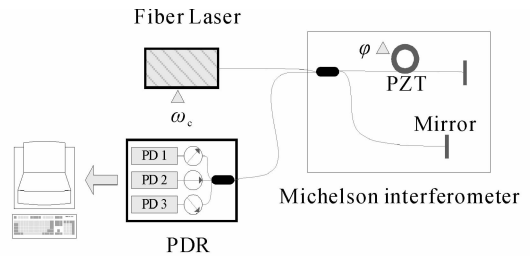
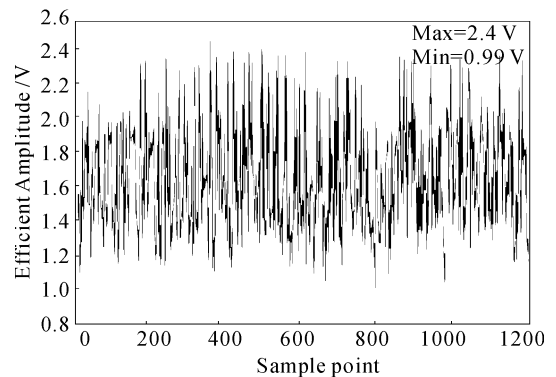


图2 消除偏振衰落的干涉仪试验系统

Fig. 2 Polarization induced fading eliminating interferometer experimental system

对光纤干涉仪通过压电陶瓷施加一定幅度的正弦相位信号. 对光纤干涉仪及其传输光纤进行扰动, 以影响其中传输光信号的偏振态. 对 PDR 输出有效幅度最大的一路干涉信号的幅度进行记录, 结果如图 3 所示. PDR 输出有效幅度最大的一路干涉信号的幅度最大值为 2.4 V, 幅度最小值为 0.99 V, 即干涉信号最大衰落为最大有效幅度的 42%, 与前述三态 PDR 输出干涉信号最大衰落为最大有效幅度 38% 的理论预测基本一致. 测量值略高于理论值的原因是由于传输光纤出现一定的退偏现象或一定时间的测量没能遍历的小概率的偏振状态. 通过对 PDR 输出有效幅度最大的一路干涉信号的选择, 可以避免由于偏振态变化导致干涉信号的完全衰落.

图3 扰动下 PDR 探测到的干涉信号的最大有效幅度变化
Fig. 3 Maximum efficient amplitude change detected by PDR during distortion

通过对 PDR 输出的有效幅度最大的干涉信号进行基于反正切的 PGC 解调, 同时对传输光纤进行扰动. 在施加的正弦相位信号幅度一定的情况下, 解调出来的相位信号结果如图 4, 其幅度基本不受由于传输光信号偏振态变化导致干涉信号幅度变化的影响.

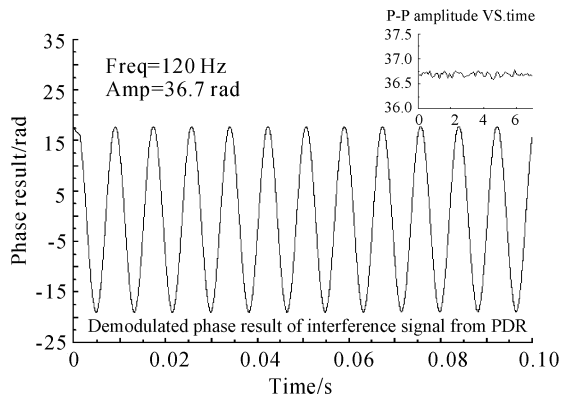


图4 克服偏振衰落的解调结果
Fig. 4 Demodulated phase result eliminating polarization induced fading

4 结论

本文提出了结合 PDR 技术和基于反正切运算的 PGC 解调技术解决光纤干涉仪偏振衰落问题的方案. 通过三态 PDR 方式, 能够避免传输光偏振态变化导致干涉信号完全衰落的现象, 使干涉信号有效幅度在一定范围内变化. 基于反正切运算的 PGC 相位信号解调技术其相位测量结果不受干涉信号幅度涨落的影响. 结合 PDR 技术和基于反正切运算的 PGC 解调技术, 能够完全消除光纤干涉仪中偏振衰落的影响, 实现干涉型光纤传感器中相位信号的理想解调.

参考文献

- [1] WANG Ze-feng, HUANG Lei, LUO Hong, *et al.* Pseudo working-point control detection scheme for interferometric fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):39-41.
王泽锋, 黄磊, 罗洪, 等. 干涉型光纤水听器伪工作点控制检测方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1):39-41.
- [2] ZOU Qi-lin, WANG Li-wei, PANG Meng, *et al.* Down-hole Seismic survey system with fiber-optic accelerometer sensor for 3-dimensions vertical seismic profile [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):77-81.
邹琪琳, 王利威, 庞盟, 等. 3 维 VSP 光纤检波器井下地震采集系统[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1):77-81.
- [3] TAN Jing, CHEN Weimin, WU Jun, *et al.* Study on long

distance pipeline destruction alarm technology based on Sagnac/ Mach-Zehnder Interferometers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):67-72.

谭靖, 陈伟民, 吴俊, 等. 基于萨格奈克/ 双马赫-曾德干涉原理的长途管道破坏预警技术研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1):67-72.

- [4] HU Liang, YU You-long, LI Ruo-ming, *et al.* Research on pressure sensing based on all-fiber Mach-Zehnder interferometer covered by silicon rubber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7):1277-1280.
胡亮, 余有龙, 李若明, 等. 使用硅橡胶涂敷的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的压力传感研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7):1277-1280.
- [5] CLAY K. K, ANTHONY D. Overview of high performance fibre-optic sensing [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, **37**(18): R197-R216.
- [6] PENG Bao-jin, LIAO Mao, LIAO Yan-biao, *et al.* Study on measuring sensitivity of fiber-optic hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1633-1638.
彭保进, 廖茂, 廖延彪, 等. 光纤水听器灵敏度测试研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11):1633-1638.
- [7] LIAO Yan-biao. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003:158-160
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003:158-160.
- [8] MENG Zhou, HU Yong-ming, XIONG Shui-dong. All polarization maintaining fiber hydrophone array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **A29**(5), :415~417.
孟洲, 胡永明, 熊水东, 等. 全保偏光纤水听器阵列[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5), :415~417.
- [9] KERSEY A D, MARRONE M J, DAVIS M A. Polarisation insensitive fibre optic Michelson interferometer[J]. *Electronics Letters*, 1991, **27**(6):518-520.
- [10] FRIGO N J, DANDRIDGE A, TVETEN A B. Technique for elimination of polarization fading in fiber interferometers[J]. *Electronics Letters*, 1984, **20**(8):319-320.
- [11] 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, **QE-18**(10):1647-1653.
- [12] WANG Li-wei, ZHANG Min, MAO Xian-hui, *et al.* The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic Interferometric Sensors. [J]. *SPIE*, 2006, **6292**:62921E

Polarization Induced Fading Eliminating Technique for Interferometric Optical Fiber Sensor

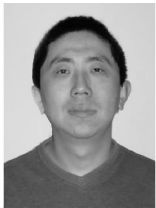
JING Zhen-guo^{1a}, YIN Kai^{1a,b}, ZHANG Min^{1a}, WANG Li-wei^{1a}, ZHU Yao-qiang²,
WANG Zhi-qiu², WANG Hong-hua², LIAO Yan-biao^{1a}

(1 *a. Department of Electronic Engineering; b. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(2 *Research & Development Center, China Oilfield Services Limited, Yanjiao, Hebei 065201, China*)

Abstract: A method of polarization induced fading eliminating with PDR (Polarization Diversity Receiver) is analyzed theoretically. Complete polarization induced fading is avoided through tri-state PDR method. The phase measurement result of PGC(Phase Generated Carrier) demodulating technology based on ARCTAN calculation is immune to amplitude change of interference signal due to polarization induced fading. Combination of tri-state PDR method and PGC demodulating technology based on ARCTAN calculation overcomes the problem of polarization induced fading in interferometric optical fiber sensor and ideal demodulation of phase signal will be implemented.

Key words: Interferometric optical fiber sensor; Polarization induced fading; PDR (Polarization Diversity Receiver); PGC(Phase Generated Carrier)



JING Zhen-guo received his Ph. D. degree in engineering from Dalian University of Technology in 2006. Now he is a postdoctor at Department of Electronic Engineering, Tsinghua University. His research interests focus on optical fiber sensor.