

# 光纤微弱磁场传感器软件解调方法\*

周晓军\*\* 林水生 刘文达 刘永智 薛志英

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】介绍了高灵敏度光纤微弱磁场传感器的软件解调信号方法，其结果使传感器测量精度达到1 nT，单位带宽最小探测磁场达到 $2.86 \times 10^{-10} \text{ T/Hz}^{1/2}$ ，动态范围达到60 dB。该方法对弱磁探测技术及干涉型光纤传感器的研究十分有用。

关键词 磁致伸缩换能器；微弱磁场；光纤传感器；马赫-然得尔干涉仪

中图分类号 TN29 文献标识码 A

## Demodulation Method by Software for Fiber Optic Sensor of Weak Magnetic Field

Zhou Xiaojun Lin Shuisheng Liu Wenda Liu Yongzhi Xue Zhiying

(State Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, a signal demodulation method by software for high sensitivity fiber optic sensor of magnetic field is introduced. The measure precision of the sensor is 1 nT, the minimum detectable field per unit bandwidth is  $2.86 \times 10^{-10} \text{ T/Hz}^{1/2}$  and the dynamic range is 60 dB for the sensor. This work is very useful for detecting weak magnetic field technology and the research of interferential fiber optic sensors.

**Key words** magnetostrictive transducer; weak magnetic field; fiber optic sensor; M-Z interferometer

微弱磁场探测技术在军事、国防、医学、地质勘探、工业检测等方面有广泛的应用。相位型光纤微弱磁场传感器灵敏度高、结构简单、重量轻、体积小、容易实现三分量矢量式传感、可构成传感器阵列，是很有发展前途的一类磁场传感器。

本文以非晶态金属玻璃作为磁致伸缩材料并制成换能器，介绍光纤微弱磁场传感器和信号还原等软件解调原理。

### 1 工作原理

光纤微弱磁场传感器采用高灵敏度光纤(Mach-Zehnder, M-Z)干涉仪，其结构如图1所示。在干涉仪信号臂上由磁场-应变换能器产生传感信号。参考臂有相位调制器，用于控制干涉仪的工作点。换能器由传感光纤粘接在磁致伸缩材料片上制成。在磁场作用下，磁致伸缩材料的伸缩使光纤的折射率和长度发生变化使两路光在合波耦合器产生相应的干涉信号<sup>[1]</sup>。

换能器磁致伸缩材料采用非晶态金属玻璃薄片，它在磁场作用下的伸缩性能可以用相干旋转模型表示为

2002年12月20日收稿

\* 国防科研基金

\*\* 女 47岁 博士 教授 主要从事光纤传感与光纤通信方面的研究

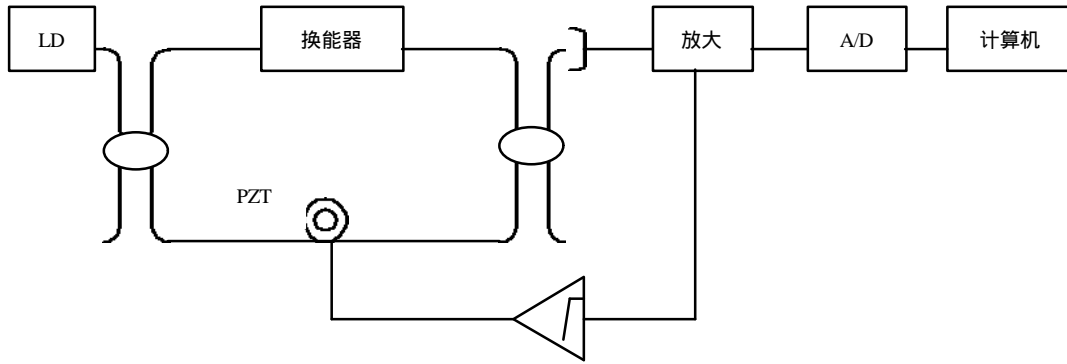


图1 光纤微弱磁场传感器系统图

$$\begin{cases} e = \frac{\Delta l}{l} = cH^2 \\ c = \frac{3I_s}{2H_A^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $l$  为磁致伸缩材料的长度,  $\Delta l$  为磁致伸缩的长度改变量,  $c$  为磁致伸缩系数,  $H$  为外加磁场强度,  $I_s$  为饱和磁致伸缩,  $H_A$  为各向异性场。在非晶态金属玻璃的居里点加高温和磁场进行磁热处理可使各向异性场大大减小, 在最佳状态下  $c$  可以增加一个数量级。使用的非晶态金属玻璃片长 7 cm、宽 1 cm、厚 25  $\mu\text{m}$ , 用 Michelson 干涉仪测量经过磁热处理后的磁致伸缩系数约为  $1 \times 10^{-5} \text{Oe}^{-2}$ 。为了增加磁场灵敏度, 换能器采用多圈粘接, 传感光纤长度增加为 30 cm。

磁致伸缩使传感光纤产生的相位变化为<sup>[2, 3]</sup>

$$\begin{cases} f = \frac{2n\pi l c x H^2}{l} \\ x = h \left\{ 1 - \frac{1}{2} n^2 [(1-m)P_{12} - mP_{11}] \right\} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $n$  为光纤的折射率,  $l$  为光波长,  $h$  为光纤应变转换系数 ( $h = \text{光纤应变} / \text{磁致伸缩应变}$ ),  $m$  为光纤的泊松比,  $P_{ij}$  为光纤的光弹系数。

在换能器上加一频率为  $w$  的高频调制磁场, 作用在换能器上的总磁场为

$$H = H_s + H_w \cos wt \quad (3)$$

根据相干旋转模型经过光电转换后正比于光纤 M-Z 干涉仪输出的电信号为

$$V = V_0 \cos(f_0 + f_w \cos wt + f_{2w} \cos 2wt) \quad (4)$$

式中

$$f_0 = f_0 + a(H_s^2 + H_w^2/2) \quad (5)$$

$$f_w = 2aH_s H_w \quad (6)$$

$$f_{2w} = aH_w^2/2 \quad (7)$$

$$a = \frac{2n\pi l c x}{l} \quad (8)$$

式中  $j_w$  正比于传感磁场强度  $H_s$  和 高频调制磁场强度  $H_w$ 。高频调制磁场使直流和低频磁场传感信号调制在高频上, 使传感信号放大了  $H_w$  倍。与之类似, 如果被测磁场是高频磁场, 加直流偏置磁场也可使信号增大。

## 2 光纤微弱磁场传感器的信号处理

式(4)传感器信号可为傅里叶谱。当高频调制磁场和传感磁场都较小时可以忽略二次以上高次谐波产生的相移, 传感磁场信号正比于基频信号的幅度。因此, 信号的解调可以用锁相放大技术检测频率为  $w$  的信号, 该方法需要较复杂的电路, 调制磁场过大时会出现信号衰落, 要求锁相放大器有较大的动态范围。下面介绍一种用简单放大电路与软件处理的解调传感信号的方法。

在第  $m$  个周期中  $\omega t = 2m\pi$ 、 $(2m + 1)\pi$ 、 $2m\pi + \pi/2$  ( $m = 0, 1, 2, \dots, n$ ) 三个时刻的传感器输出

$$V|_{\omega t=2m\pi} = V_0 \cos(\mathbf{j}_0 + \mathbf{f}_w + \mathbf{j}_{2w}) \tag{9}$$

$$V|_{\omega t=(2m+1)\pi} = V_0 \cos(\mathbf{j}_0 - \mathbf{f}_w + \mathbf{j}_{2w}) \tag{10}$$

$$V|_{\omega t=2m\pi+\pi/2} = V_0 \cos(\mathbf{j}_0 - \mathbf{j}_{2w}) \tag{11}$$

由式(9)~(11)得到

$$\mathbf{f}_w = \frac{1}{2} \left[ \arccos \frac{V|_{\omega t=2m\pi}}{V_0} - \arccos \frac{V|_{\omega t=(2m+1)\pi}}{V_0} \right] \tag{12}$$

$$\mathbf{f}_{2w} = \frac{1}{4} \left[ \arccos \frac{V|_{\omega t=2m\pi}}{V_0} + \arccos \frac{V|_{\omega t=(2m+1)\pi}}{V_0} \right] - \frac{1}{2} \arccos \frac{V|_{\omega t=2m\pi+\pi/2}}{V_0} \tag{13}$$

由式(6)、(7)得到

$$H_s = \frac{\mathbf{j}_w}{2\sqrt{2a}\mathbf{j}_{2w}} \tag{14}$$

传感系统如图1所示, 将调制信号及经过光电转换后的传感器信号经A/D采样后送入计算机处理。首先对信号进行分析, 删除存在A/D漏采样的周期, 由调制信号找出  $\omega t = 2m\pi$ 、 $(2m + 1)\pi$ 、 $2m\pi + \pi/2$  的时刻和同步的传感器信号, 并由式(12)~(14)计算出传感磁场  $H_s$ 。由以上信号还原方法得到  $\mathbf{j}_w$ 、 $\mathbf{j}_{2w}$  计算的传感器输出信号和采样得到的传感器信号如图2所示, 两者基本是重合的。光路和放大电路中的噪声会产生测量误差使传感器输出产生起伏。假设只存在白噪声, 则通过多个测量值的平均可以消除噪声。

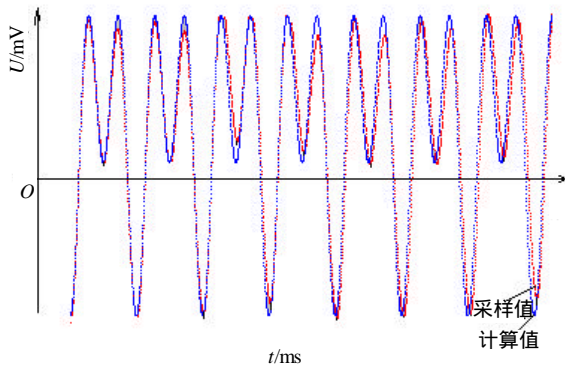


图2 计算的传感器信号与采样得到的传感器信号

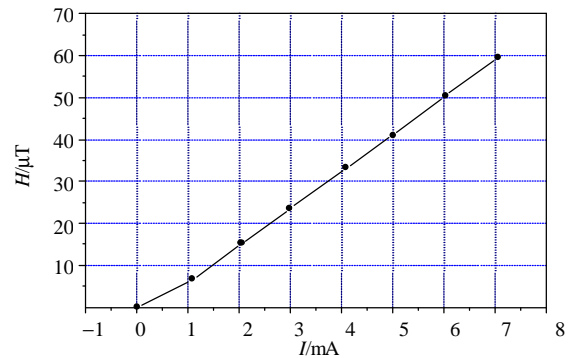


图3 磁场测量曲线

### 3 结果与讨论

磁场测量结果如图3所示, 横坐标为定标螺线管电流, 纵坐标为传感器输出。最小探测磁场  $2.86 \times 10^{-10} \text{ T/Hz}^{1/2}$ , 测量精度为1 nT, 动态范围60 dB。在该方案中, 干涉仪处于正交工作点时灵敏度最大, 如果不在正交工作点, 只要相位稳定也可工作, 但灵敏度会下降。加大高频调制磁场超过传输函数一个周期时, 传感器输出曲线发生改变, 不能应用本方法, 此时可采取其他信号处理方法<sup>[4]</sup>。最佳调制磁场的强度和频率与换能器结构有关, 需由实验确定。

#### 参 考 文 献

- [1] 周晓军, 刘永智. 光纤微弱磁场传感器技术研究进展[J]. 半导体光电, 1997, 18(1): 1-5
- [2] Ariv A. Proposal for detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers[J]. Optics Letters, 1980, 5(3): 87-89
- [3] Bucholtz E. Fiber optic magnetometers using planar and cylindrical magnetostrictive transducers[J]. SPIE, 1986, 718: 128-133
- [4] 周晓军, 薛志英, 林水生, 等. 遗传算法在双光束干涉型光纤传感器信号处理中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 30-31

编辑 漆 蓉