

关于光纤传感器测弱磁场的最高分辨率问题

黄旭 刘延冰

张金如

(华中理工大学)

(武汉工业大学自动化系)

提要: 本文根据实测的数据,采用较严格的分析方法,详细讨论了光纤传感器测弱磁场可达到的最高分辨率问题。

关键词: 光纤传感器,弱磁场

On the highest obtainable resolution of optical fiber sensors for measuring weak magnetic field

Huang Xu, Liu Yanbin

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

Zhang Jinru

(Department of Automation, Wuhan Industrial University, Wuhan)

Abstract: The highest obtainable resolution of optical fiber sensors for measuring weak magnetic field is discussed in detail with magnetostrictive materials based on the data measured experimentally and by means of a more strict analysis method.

Key words: Optical fiber sensor, weak magnetic field.

一、前言

自1980年 Yariv 等人^[1]发表有关利用磁致伸缩光纤传感器测弱磁场以后,由于光纤传感器本身的优点及测弱场可以广泛用于探矿、预报地震、医学工程、猎潜、制导等领域,各国竞相投入了研究。但到目前为止,尚未看到关于光纤传感器测弱磁场有关分辨率的详细讨论。本文根据文献[1]和[2]所测数据讨论了:1. 理想情况下的最高分辨率问题(修正了 Yariv 等人推导中的误差);2. 实际工程中的最高分辨率问题(给出了磁敏材料厚度和分辨率的关系);3. 影响分辨率和其它因素,进一步讨论由于被测信号的环境干扰,如温度、压力等情况下,厚度参数的选择。

二、理想情况下的最高分辨率问题

利用磁致伸缩材料作为磁敏元件的光纤传感器,基本原理如图1所示。采用长为 L , 并敷

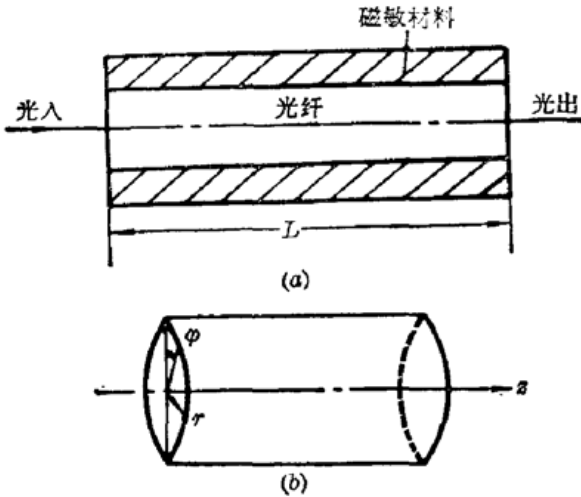


图 1 敷有磁敏材料的光纤(a)及与之对应的柱坐标系(b)

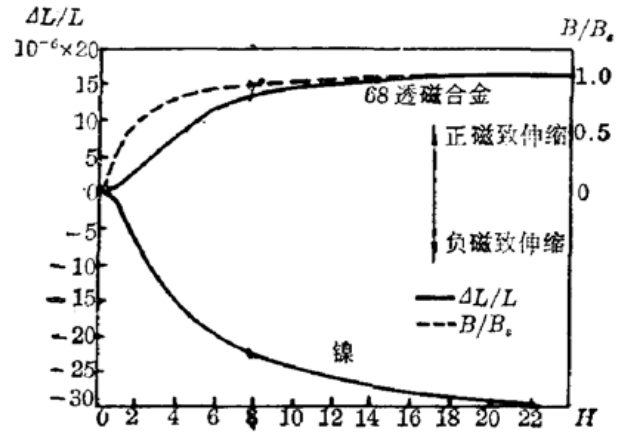


图 2 磁敏材料的伸缩曲线

有磁敏材料的光纤。在磁场的作用下,引起光纤的光程改变,而使传输光束相位产生变化。利用此变化,可测待测场。由图 1(a)建立柱坐标系如图 1(b),并设:

$$\varepsilon_z = \Delta L/L; \varepsilon_r = \Delta r/r \quad (2-1)$$

其中 L, r 分别为图 1(b) 图中二坐标, $\Delta L, \Delta r$ 为相应的增量。实验所测曲线^[1]如图 2 示。为了方便起见,我们以 Ni 作为例子来进行讨论。由图 2 可设 Ni 曲线的表达式为

$$\varepsilon_z = aH^b \times (-10^{-5}) \quad (2-2)$$

其中 a, b 为待定常数,负号表示磁致收缩。从图 2 中的曲线利用最小二乘法,可求得 $a \approx 0.69$, $b \approx 2.0$ 。于是

$$\varepsilon_z = -6.91 \times 10^{-6} H^2 = FH^{\frac{1}{2}} \quad (2-3)$$

其中 $\triangleq -6.91 \times 10^{-6}$ 。

现设外磁场 H 由 D, C 偏置场 H_0 、待测场 H_1 组成,而且有 $H_0 \gg H_1$ 。即

$$H = H_0 + H_1 \quad (H_0 \gg H_1) \quad (2-4)$$

将(2-4)代入(2-3)式,并由 $H_1/H_0 \ll 1$,可得:

$$\varepsilon_z \approx FH_0^{\frac{1}{2}} + F \frac{H_1}{2H_0^{1/2}} \quad (2-5)$$

由于采用单模光纤,可忽略色散影响,在长为 L 的光纤上,相移变化为:

$$\Delta\phi \approx \frac{\omega}{c} \Delta(Ln) = \frac{2\pi nL}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} \right) = \frac{2\pi L n}{\lambda} \left(\varepsilon_z - \frac{n^2}{2} [(p_{11} + p_{12})\varepsilon_r + p_{12}\varepsilon_z] \right) \quad (2-6)$$

这里利用了(2-1)式中的表达式:

$$\Delta n = \frac{-n^3}{2} [(p_{11} + p_{12})\varepsilon_r + p_{12}\varepsilon_z],$$

其中 p_{ij} 为光弹张量, n 为折射率, λ 为波长, ω 为角频率, c 为真空中光波速。由于在伸缩过程中,光纤体积维持常数。在图 1(b) 的情况下有:

$$\pi r^2 L = \pi (r + \Delta r)^2 (L + \Delta L) \quad (2-7)$$

展开上式,并考虑(2-1)得:

$$\varepsilon_r^2 (1 + \varepsilon_z) + 2\varepsilon_r (1 + \varepsilon_z) + \varepsilon_z = 0 \quad (2-8)$$

注意到初始条件:当 $\varepsilon_z = 0$ 时 $\varepsilon_r = 0$,故

$$\varepsilon_r \approx -\frac{1}{2} \varepsilon_z + \frac{3}{8} \varepsilon_z^2 \quad (2-9)$$

代入(2-6)式可得:

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{2\pi Lm}{\lambda} \left\{ \varepsilon_s - \frac{n^2}{2} \left[(0.12+0.27) \left(-\frac{1}{2} \varepsilon_s + \frac{3}{8} \varepsilon_z^2 + 0.27\varepsilon_z \right) \right] \right\} \\ &= \frac{2\pi Lm}{\lambda} (0.92\varepsilon_z - 0.158\varepsilon_z^2) \end{aligned} \quad (2-10)$$

这里取 $p_{11}=0.12$, $p_{12}=0.27$, $n=1.46$ 。是为了和文献[1]中的结果作比较。如果设 ε_s 分别由 ε_z^0 和 ε_z^1 组成,并分别对应于偏置的恒定磁场和待测场,同时 H_0 的值与[1]中的相同,则由(2-5)式可得:

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= \varepsilon_z^0 + \varepsilon_z^1 = F H_0^{\frac{1}{2}} + F \frac{H_1}{2H_0^{1/2}} = -11.97 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-6} H_1, \text{ 即} \\ \varepsilon_z^0 &= -11.97 \times 10^{-6}, \quad \varepsilon_z^1 = -2 \times 10^{-6} H_1 \end{aligned} \quad (2-11)$$

由于 H_1 很小,故可略去 ε_z^2 中 H_1 的二阶项,于是

$$\varepsilon_z^2 \approx (\varepsilon_z^0 + \varepsilon_z^1)^2 \approx \varepsilon_z^{02} + 2\varepsilon_z^0 \varepsilon_z^1 \quad (2-12)$$

将(2-12), (2-11)代入(2-10),并注意到对 $\Delta\phi$ 作贡献的仅是 ε_z^1 ,则可得

$$\Delta\phi = \frac{2\pi Lm}{\lambda} [0.92\varepsilon_z^1 - 0.158(2\varepsilon_z^0 \varepsilon_z^1)] = -16.8 \times \left(\frac{L}{\lambda} \right) \times H_1 \times 10^{-6} \quad (2-13)$$

在散粒噪声情况下,当信噪比为1时,有^[4]

$$1 = s/N = \frac{p\eta(\Delta\phi)^2}{4h\gamma\Delta\gamma} \quad (2-14)$$

其中 s 、 N 分别表示信号与噪声, p 为光功率, h 为普朗克常数, η 为效率。若取文献[1]中的相同数据,即 $\Delta\gamma=1(\text{Hz})$ (带宽); $p=10^{-3}(\text{W})$; $L=10^3(\text{m})$, $\eta=0.5$, $\lambda=1(\mu\text{m})$, $\gamma=3 \times 10^{14}(\text{Hz})$ (对应于 $\lambda=1\mu\text{m}$), 将(2-13)代入(2-14)后,并代入上述数值后可得

$$H_{1(\min)} = 2.4 \times 10^{-12}(\text{Oe}) \quad (2-15)$$

和文献[1]中结果相比,误差为67%。这是由于文献[1]对曲线处理欠严格所致。

三、实际工程中的最高分辨率问题

上节的讨论是在“光纤敷有充分厚的磁敏材料”的前提下进行的,但在实际工程中这种无穷厚的情况是不存在的。为了从实际出发,现根据文献[2]提供的测试数据(如图3所示曲线)予以讨论。这里仍以Ni为例。令

$$\Delta\psi \triangleq (\Delta\phi/K_0 LH) \times 10^7 \quad (3-1)$$

由图3 Ni 曲线可设其表达式为:

$$\Delta\phi = m t^{1/g} \quad (3-2)$$

其中 m 、 g 为待定常数。由最小二乘法和 Ni 曲线可求出 $\Delta\psi$ 表达式为:

$$\Delta\psi = (\Delta\phi/K_0 LH) \times 10^7 = 0.44 t^{\frac{1}{1.52}} \quad (3-3)$$

根据(3-3)式,可得相移增量与磁敏材料厚度 t 的关系为:

$$\Delta\phi = 0.44^{\frac{1}{1.52}} K_0 LH \times 10^{-7} \quad (3-4)$$

这里物理量的单位分别为 $\Delta\phi$ (rad)、 t (μm)、 L (cm)、 H (Oe) 由第二节(2-14)式可解得最小可测相移为

$$\Delta\phi_{\min} = \sqrt{\frac{4\hbar\gamma\Delta\gamma}{p\eta}} \quad (3-5)$$

如果仍取第二节中的数值代入上式则有:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{\min} &= \sqrt{\frac{4 \times 6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{14} \times 1}{10^{-3} \times 0.5}} \\ &= 3.99 \times 10^{-8} \text{ (rad)} \end{aligned}$$

现令(3-4)中的 $\Delta\phi$ 取 $\Delta\phi_{\min}$, 代入(3-1)式可得:

$$H_{\min} = \frac{3.99 \times 10^{-8}}{0.44K_0Lt^{1.82} \times 10^{-7}} \quad (3-6)$$

这便是所取参数下的最高分辨率和磁敏材料厚度的关系表达式。在工程设计时, 可利用(3-6)式进行估算。例如, 文献[2]中讨论的 $t=13\mu\text{m}$ 情况: 这时 Ni 的压敏曲线表明压力噪声为零。利用(3-6)可估算这时最小可

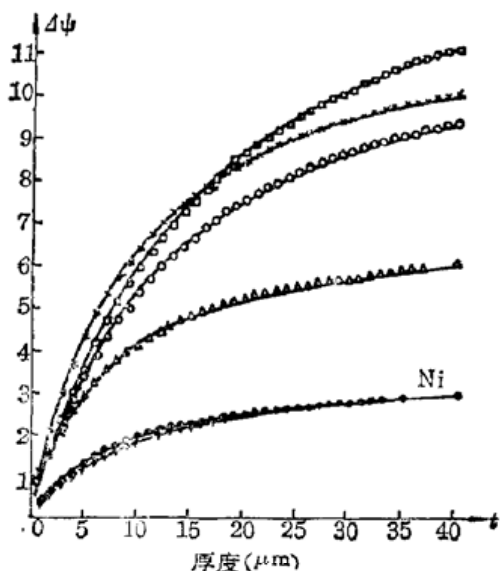


图3 磁敏材料厚度与相移关系曲线

测的弱场。由 $t^{1.82} = 13^{1.82} = 4.1$ 代入(3-6)式, 得:

$$H_{\min} = 3.5 \times 10^{-11} \text{ (Oe)} \quad (3-7)$$

如依文献[2], 查图3中的 Ni 曲线可知, 当 t 为 $13(\mu\text{m})$ 时, $\Delta\phi=2.0$ (参见图3)。于是有

$$2.0 = \Delta\phi / K_0 LH \times 10^{-7}$$

代入 $\Delta\phi = \Delta\phi_{\min}$ 的值可求出:

$$H_{\min} = 3.2 \times 10^{-11} \text{ (Oe)} \quad (3-8)$$

比较(3-8)和(3-7)可知本节推出的(3-6)式是符合要求的。设计中, 对于其它磁敏材料, 运行时其它参数。由于步骤和(3-6)步骤相同, 可以利用计算机进行“最佳分辨率的CAD”分析即可对设计方案予以估算。应指出的是由于(3-6)和(2-15)式的前题不同, 所以 H_{\min} 值不可能同, 这也正说明文献[1]中的不足。

四、影响分辨率的其它因素

在实际应用中, 磁敏材料都具有一定厚度, 必然要受到压力和温度等噪声影响。虽然[2]讨论了压力噪声问题, 提出 t 选用 $13\mu\text{m}$, 但一方面由于工艺上难以保证, 另一方面还有其它噪声, 如文献[8]计算了当温度变化 ΔT , 值满足 $\Delta T = 0.248H_1$ 时 (H_1 为被测信号) 将会使光纤中光相移为零。所以在测量方案上, 国际上倾向于采用调制的方案^[4,5]。从检测系统上, 通常采用的有五种方法^[3]。关于检测系统, 将专门行文讨论一种新的利用软件的方法。对于测量方案, 下面予以简单讨论。

由(3-6)可知, 当 $\Delta\phi_{\min}$ 一定时, 希望 H_{\min} 越小(分辨率越高), 则 t 、 L 均要大。但 t 的过大会带来涡流耗。这就存在 t 的优化问题, 详细讨论将在另一文章中报道。这里仅给出 t 的最大值估计, 以供应用中参考。

由哈佛大学水声实验室研究结果^[9]: 通常磁致伸缩转换的主要损失源于涡流。由涡流理

