

提高光纤传感测量精度的方法研究

常丹华

(燕山大学光电子工程系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:采用激光干涉原理实现了微位移光纤传感测量。通过对光学系统和光电检测系统的研究,总结出提高光纤传感测量精度的方法。文中对微弱光信号的相位调制,数字解理过程,给出了低噪声设计的理论依据,电路参数的选取原则和预放级设计的一般方法。系统微位移测试精度约0.05nm。

关键词:光纤; 测量; 噪声

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

1 引言

研究表明,光纤传感器可提供高灵敏度、非接触性的微信号测量方法。但是其灵敏度和准确性受到电路的噪声、信号的漂移、光纤自身的微弯损耗、外界环境等诸多因素的影响。为了克服这些因素的影响,提高微信号测量的精度,科技领域开展了大量的研究工作。本文采用激光干涉原理实现微位移光纤传感测量。通过对光学系统和光电检测系统的分析和研究,设计了低噪声信号系统,它补偿了诸多误差因素的影响,使系统测试精度约0.05nm。

2 系统工作原理

测试原理结构框图见图1。

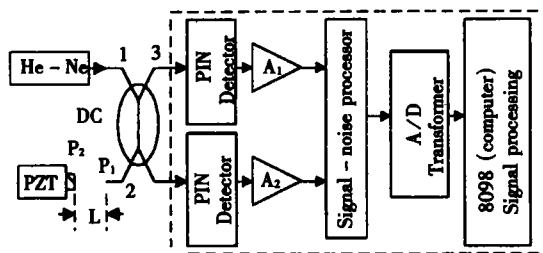


Fig. 1 Block diagram of system

系统中光传输采用单模光纤。传感头由传感

光纤端面 P_1 与被测表面 P_2 及中间间距为 L 的空气介质组成平行反射平面式 Fabry-Perot 干涉结构。当激光器发出的单频光束经透镜垂直注入到高隔离度的光纤耦合器(DC)1端时,然后经光纤2垂直发射到待测物表面 P_2 ,从 P_2 反射回来的多束光束形成的测量光束又进入光纤2,并与从光纤2端面 P_1 上反射回来的参考光束相干,形成 F-P 相干光。

由干涉理论可知,相干光的相邻光束间的相位差 φ 是与 L 大小相关的量,其值可由相邻光束间的光程差 d 求得。

$$\varphi = (2\pi/\lambda)d = (4\pi/\lambda)n_2L$$

式中 $\lambda = 632.8\text{nm}$,为真空中的激光波长。 $n_2 \approx 1$ 为干涉腔空气介质的折射率。 L 为干涉腔的腔长。实验中的被测表面是直径约3mm的反射膜与PZT(压电陶瓷)相接,当驱动PZT使被侧面作余弦规律位移变化时,腔长 $L = L_0 + L_s \cos\omega t$ 。

$$\begin{aligned} \varphi &= (4\pi n_2/\lambda)(L_0 + L_s \cos\omega t) \\ &= \varphi_0 + \varphi_s \cos\omega t \end{aligned} \quad (1)$$

L_0 是干涉腔静态长度。 φ_0 、 φ_s 是静态、动态相差的幅值。

根据干涉理论,相干光的光强为

$$I = 2RI_0 \frac{1 - \cos\varphi}{1 + R^2 - 2R\cos\varphi} = I_1 \frac{1 - \cos\varphi}{1 + R^2 - 2R\cos\varphi} \quad (2)$$

式中 I_0 为入射光纤中的光功率, R 为反射面的反射率。

因此,借助光纤传感系统,从(DC的)3端检测 I 信号,经放大、滤波、数模转换后送微机处理,最后可解调出 L 的值,测取位移的大小。

实际微小位移信号的解调技术要受系统中光路和电子线路诸多内部噪声的影响。这里用 $n(t)$ 定义附加噪声强度,实际相干光强表达式为:

$$I = I_s(1 + n(t)) \frac{1 - \cos\varphi}{1 + R^2 - 2R\cos\varphi} \quad (3)$$

显然,噪声水平的大小直接影响测试精度。

3 提高测试精度的理论依据

研究表明,光纤传感器的噪声主要是光源噪声,光探测器噪声及电子线路噪声。因为系统实际噪声的大小直接影响系统位移的分辨率。因此分析噪声的特性及其在电路中的规律,以便从电路设计上控制、降低噪声,就显得十分重要。

由于测量光束和参考光束在同一根光纤中传输,所以环境温度、光纤弯曲、及其它一些因素的变化对干涉效果的影响是相同的,可互相抵消。因为采用优质的并具有稳频措施的国产 He-Ne 激光器,光源的相位噪声可忽略不计^[2],但光源的幅度噪声仍为2%(-28dB)。

前置放大器对解理电路的噪声影响最大,这是因为前置放大器产生的噪声将随信号一起被后级电路放大。前置放大器与探测器相接,其参数直接影响到二者的噪声匹配。因此需要着重分析前置放大器的噪声。

为了保证既有低噪声,又有大的动态范围,这里选择了跨阻抗放大器。其噪声等效模型如图2所示^[3]。

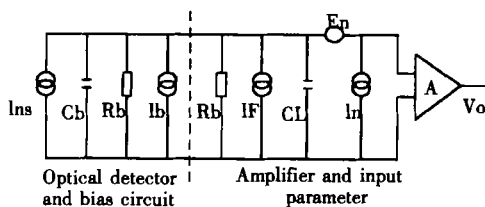


Fig. 2 The noise model of preamplifier

图中 C_b 为光探测器的分布电容, R_b 为偏置电阻, R_f 为放大器的跨阻抗, C_L 为引线分布电容。 I_{ns} 为探测器光生电流 I_s 的等效散粒噪声:

$$I_{ns}^2 = 2qI_s\Delta f$$

I_b 、 I_F 分别为 R_b 、 R_f 的热噪声:

$$I_b^2 = 4kT\Delta f/R_b, I_F^2 = 4KT\Delta f/R_f$$

E_n 、 I_n 分别表示放大器的内部噪声电压和噪声电流。以上各式中 q 为电子电荷量: $q = 1.602 \times 10^{-19}c$ 。 Δf 为系统的带宽。 k 为波尔兹曼常数: $k = 1.38 \times 10^{-23}J/K$ 。 T 为绝对温度: $T = 290K$ 。

对上述噪声模型进行分析。设前置放大器的噪声等效输入电流为 I_{ni} , 因 I_s 为信号电流。根据噪声理论,信噪比可表示为:^[3]

$$S/N = I_s^2/I_{ni}^2 \quad (5)$$

由图 2 可知

$$I_{ni}^2 = I_{ns}^2 + I_b^2 + I_F^2 + I_n^2 + E_n^2[1/R^2 + \omega^2(C_b + C_L)^2] \quad (6)$$

$$1/R = 1/R_b + 1/R_f$$

因此,只要设计、选择电路的有关参数时,分别减小各种噪声项的贡献,就有望获得低噪声的前置放大器。

4 电路的设计

噪声分析表明,光源的幅度噪声及测试系统的散粒噪声和热噪声均与系统的带宽成正比。只要合理选择滤波器,压缩电路带宽,就有希望获得优良的噪声性能。

为了获得性能良好的低通特性,采用高阶巴特沃兹滤波是较好的方案。因它在通带内有最大的平坦度,在转折频率处能锐截止,有近似矩形的频率响应。系统采用了带宽为 10 kHz 的三‘二阶节’的六阶结构,它们的巴特沃兹多项式分别为:

$$B_1(s) = S^2 + 0.517S + 1$$

$$B_2(s) = S^2 + 1.414S + 1$$

$$B_3(s) = S^2 + 1.932S + 1$$

其合成频率特性如图 3,在阻带内有 -120 db/+倍频的陡度。

前置放大器对检测电路的噪声影响最大。由(6)式知,为降低前置放大器的等效输入噪声,需分别减小式中各种噪声项的贡献。 I_{ns} 的散粒噪声可由压缩带宽明显改善。偏置电阻 R_b 和跨阻抗 R_f 分别作取样电阻和并联反馈电阻时,除引起 I_b 、 I_F 外,还将影响带宽、动态范围和噪声匹配。根据噪声理论^[3], R_f 加大会使 I_F 降低,并利于噪声匹配,但使带宽变窄。本设计将 R_b 电阻开路($R_b = \infty$),令 R_f 既做反馈电阻也做取样电阻,这样因偏置电阻 R_b 存在造成的噪声消除了,也可减少 E_n 的贡献。运算放大器采用 OP-97 型,以它作前置预放,可以获得较小的等效输入电压和低的噪声

系数,OP-97 组件的内部噪声电压 E_N 约为 $10\text{nv}/\sqrt{\text{Hz}}$ 内部噪声电流 I_n 约为 $20\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$, 这时检测电路的最佳源电阻应为 $R_{SO} = E_n/I_n = 500\text{k}\Omega$ 。显然应 $R_F \gg R_{SO}$, 在兼顾考虑带宽、动态范围和噪声匹配时, R_F 选 $1\text{M}\Omega$ 。

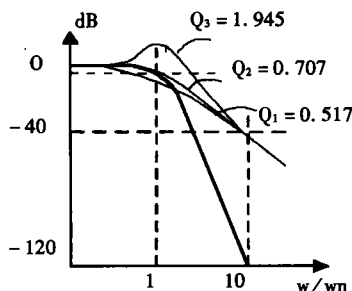


Fig. 3 Characteristic of filter (six order Butter-worth)

2%的光源幅度噪声通过采用光路的双探测器结构加以抑制。如图1,定向耦合器的输出由探测器1和2同时接收。探测器采用低噪声的PIN光电二极管,将光信号转换成电信号,并经A1、A2放大输出。经A1输出是包含激光强度噪声的干涉信号。根据(3)式

$$V_1 = A_1 I_{i1} [1 + n(t)] \frac{1 - \cos\varphi}{1 + R^2 - 2R\cos\varphi} \quad (7)$$

A_2 的输出不含干涉成分:

$$V_2 = A_2 I_{i2} [1 + n(t)] \quad (8)$$

调节 A_1 和 A_2 , 使 $A_1 I_{i1} = A_2 I_{i2}$, 则除法器的输出为:

$$V = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1 - \cos\varphi}{1 + R^2 - 2R\cos\varphi} = V_d + V_n + V_s \quad (9)$$

显然,低频噪声和光源的强度噪声 V_n 经除法器几乎被消除。但非理想状态下,完全消除是不可能的。经处理后,幅值噪声改善约 10db。

低反射率 F-P 干涉为多光束干涉,虽然允许用双光束干涉近似,但引入的测试误差使微信号检测精度降低。因此系统采用实际的多光束干涉传递函数,借助微机技术数字解调输出信号。由(9)式

$$\cos\varphi = \frac{1 - (1 + R^2)V}{1 - 2RV} \quad (10)$$

对于一定的系统,反射率 R 是常量,仅除法器的输出 V 是可变的。如令 $V_s = 0$, (9)式变为

$$V_d = \frac{1 - \cos\varphi_0}{1 + R^2 - 2R\cos\varphi_0} \quad (11)$$

在正交条件下 $V_d = \frac{1}{1 + R^2} \approx 1$

因此根据 φ_s 和 V_s 的关系可得到

$$\varphi_s \cos\omega_s t = \sin^{-1} \left[\frac{-R^2 + (1 + R^2)V_s}{1 - 2R - 2RV_s} \right] \quad (12)$$

可见如果获得除法器的输出 V , 信号 φ_s 可由 12 位 ADC 转换,再由 8098 微机根据(1)式求得被测微位移量 L_s , 实现数字解调过程。

5 效果与结论

经光路、解调电路的合理设计,光源的幅度噪声降至约 -38db, 用 $n_1(t)$ 表示, $n_1(t) \approx 0.014\%$ 。光探测器及预放级的附加噪声 $n_2(t)$ 可由下式求出:

$$n_2(t) = \frac{I_{ni}}{I_s} \quad (13)$$

式中 I_s 为探测器的信号电流。当光强 $4 \mu\text{w}$ 时,根据 BPX-65 的响应度 $\eta = 0.4$, 求得 I_s 约为 $1.6 \mu\text{A}$ 。根据(6)、(13)式计算:

$$n_2(t) \approx 5.29 \times 10^{-5}$$

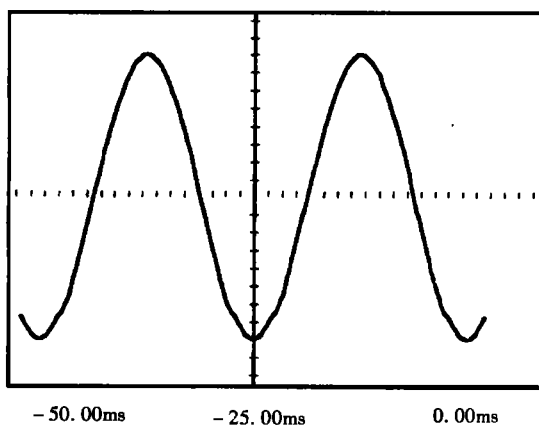
最终

$$n(t) = n_1(t) + n_2(t) = 1.83 \times 10^{-4} \quad (14)$$

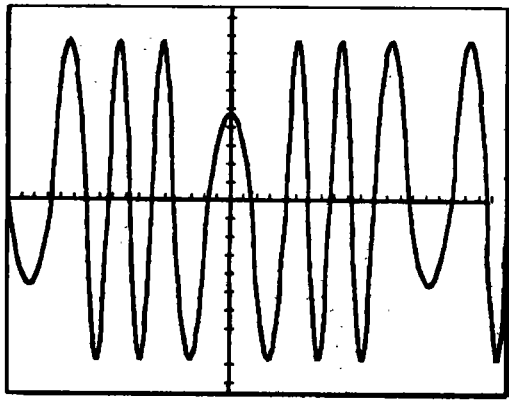
对图1的系统进行了实验,图中PZT的位移 L 与驱动电压 U 的关系根据压电陶瓷理论并经中国科学院标定

$$L = 1.8 \times 10^{-10}U + 0.8 \times 10^{-12}U^2 \quad (15)$$

改变驱动电压 U 的值,使位移 L 的幅值分别为 $0.05 \text{ nm} (< \lambda/8)$ 和 $0.506 \mu\text{m} (> \lambda/8)$ 。传感器的输出波形见图4(a)、图4(b)。



(a)



(b)

Fig. 4 Waveform of the sensor output

测试结果表明,当动态测试范围从 0.005nm $\sim 79.1\text{nm}$ 时,输出为正弦波,波形幅度随位移线性变化(图 4(a)),测试精度约为 0.05nm 。当动态测试范围从 $79.1\text{nm} \sim 3200\text{nm}$ 时,波形幅度不再随位移变化而增加,只是频率发生变化。位移每增加 $\lambda/8$,输出信号的频率增加 1Hz ,图 4(b)中位移为 $0.506\mu\text{m} = 6.4\lambda/8$,则在位移信号波形变化的一周期内,输出波形交替变化约 6 次。

由于实际的光纤端面的倾斜度及端面反射率的非理想程度对测试精度均有影响,工程中光纤端面的进一步工艺处理是必要的。

参考文献:

- [1] Beard P C, Mills T N. Extrinsic optical-fiber ultrasound sensor using a thin polymer film as a low-finesse Fabry-Perot interferometer[J]. Appl. Opt. 1996. 35. 4. 663-675.
- [2] Wright O B. Stabilized dual-wavelength fiber-optic interferometer for vibration measurement[J]. Opt. Lett. 1991. 16. 1. 56-58.
- [3] 方志豪. 晶体管低噪声电路[M]. 北京:科学出版社,1984,7,223-228.
- [4] 刘瑞复,文锦珊. 光纤传感器及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1987,3,116-127.

Method of improving measurement precision for optical fiber sensor

CHANG Dan-hua

(Dept of Photo-electronic Engineering, Yanshan University,
Qinhuangdao, 066004, China)

Abstract: Improvement on measuring precision of a optical fiber sensor, based on principle of laser interference, was proposed through the investigation of both the optical system and the optical-electron measuring system. The theoretical foundation, the selecting principle of circuit parameters and the designing method of preamplifier were given and analyzed in detail for the phase modulation of low noise of weak signal and the demodulation procedure of telephone digits. A precision of 0.05nm for micro-displacement measurement has been obtained by this new method.

Key words: optical fiber; measurement; noise

作者简介:常丹华(1964—),女,河北抚宁县人。工学硕士,现为燕山大学光电子工程系副教授。主要从事光纤传感、图象传感及微机应用方面的研究。