

半导体激光器多路光纤位移传感器中光强 对测量精度的影响*

王屹滨 田 芊 章恩耀

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要 利用半导体激光器线性调频外差干涉原理及分频复用技术构成的新型光纤位移传感器, 可同时进行多点位移测量。测量范围为 ± 1 mm, 精度为 $\pm 0.15 \mu\text{m}$ (3σ)。研究了光强因素对其测量精度的影响。

关键词 半导体激光器, 光纤传感器, 位移测量

1 引 言

多路复用外差干涉光纤位移传感器, 综合运用了光纤传感、半导体激光调频外差干涉、多路复用等技术, 具有测量精度高、结构紧凑、稳定性好、抗电磁干扰、非接触、可远距离操作等优点, 可进行多点位移测量, 还可对能转化为位移量的其它物理量(压力、磁场等)进行测量^[1]。

这种光纤位移传感器的工作原理主要是测量随位移而变化的光拍频信号的位相, 对光强的波动变化要求不高。但实际上, 光强仍会以各种不同的形式影响到它的测量精度及动态范围。本文介绍了有关的研究及实验结果。

2 传感器的工作原理及构成

如图 1 所示, 调制驱动电路 1 向半导体激光器 2 提供锯齿波调制电流。半导体激光器发射出光频受到调制的光波, 经耦合镜组 3 耦合到光纤中, 定向耦合器 4 把光波分成两路, 分别由自聚焦透镜 5、6 变为平行光射出。出射光由被测物表面反射回光纤, 与一部分直接在自聚焦透镜端面反射回的光发生干涉, 由探测器 9 接收得到拍频信号。

形成拍频信号的原理如图 2 所示。半导体激光器的光频率被调制为锯齿波变化。调制率 $2d = \Delta\omega/T_s$, 其中 T_s 为调制信号周期, $\Delta\omega$ 为光频调制量。自聚焦透镜端面与被测物表面反射回的两束光存在着时延差 τ , 干涉时产生差频 $\omega_b = \omega_1 - \omega_2 = 2d\tau$, 这就是接收到的拍频信号。

图 3 所示为拍频信号的频谱图。它是由一系列间隔为 ω_b 的谐波成分组成^[2]。各级谐波的幅度受到一中心频率为 ω_b 的 sinc 函数的调制。若 ω_b 在某一级谐波附近, 则该谐波的幅值为最

* 本课题为国家自然科学基金资助项目。

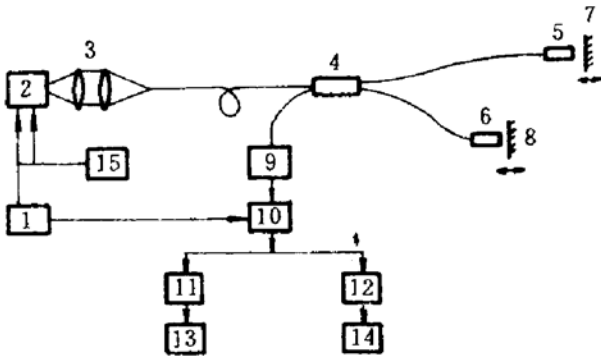


Fig. 1 Setup of a multiplexing optical fiber displacement sensor

1—modulated power supply; 2—laser diode; 3—lenses; 4—direction coupler; 5,6—gradient index lenses; 7,8—objects; 9—detector; 10—dividing circuit; 11,12—pass band filters; 13,14—phase detector and digital display

大。 ω_b 是随着时延差 τ 即光程差而变化的。若调整被测物体与自聚焦透镜之间的距离, 设置两路干涉系统的初始光程差, 分别使两路干涉信号形成的拍频为: $\omega_{b1} = 2\omega_s, \omega_{b2} = 4\omega_s$, 即两种干涉光路形成的拍频信号频率是不一样的, 通过带通滤波器可以把它们分离出来, 由此实现两路复用, 进一步还可以实现更多路的复用。

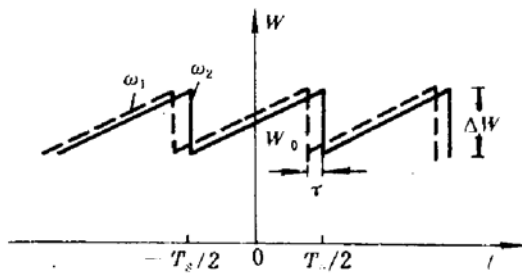


Fig. 2 Frequency modulation and heterodyne interference

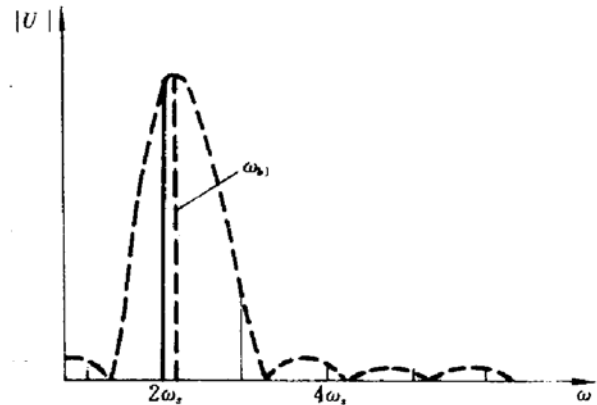


Fig. 3 Frequency spectra of divider signal

理论分析可以得出, 滤出的谐波信号, 其位相是随着干涉仪的光程差而变化的, 于是可以用相位比较的方法实现位移的测量。

3 光强因素对测量精度影响的分析

光强对测量精度的影响主要表现在串话量及线性度上。两路传感器之间的干扰主要是强度的串话^[3]。由于两路传感器共用同一个探测器, 从拍频信号的频谱可知, 4 倍频的拍频信号中同时含有 2 倍频的谐波成分, 这就对 2 倍频的传感器构成干扰。这是滤波器无法滤掉的。但也可以看出, 由于受到 sinc 函数的调制, 当 4 倍频成分处于 sinc 函数主峰中心位置时, 其 2 倍频谐波正好在 sinc 函数的极小点处, 这时串话量最小。经测试, 在 $\pm 1 \text{ mm}$ 测量范围内, 两路之间的串话量小于 $0.06 \mu\text{m}$ 。

影响测量线性度的光强因素主要有四个方面: 1) 两路之间的强度串话; 2) 光强受到锯齿波调制; 3) 电路的延时及死区; 4) 激光器的线宽调制引起的拍频幅度的调制。它们最终都表现为: 探测信号经带通滤波器输出后, 不但有真正与位移有关的载波信号成分, 而且有上述四种原因所造成的与位移无关的背景频率成分。所以最终参加比相的信号是这两部分的合成, 合成波的相位与位移量不再保持线性关系。

4 理论计算

由上节的分析可以建立下列数学模型：

经中心频率为 ω ($\omega = 2\omega_s$ 或 $4\omega_s$) 的带通滤波器后, 设与位移有关的谐波成分为

$$S_m = K \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

与位移无关的四部分频率成分合成为

$$S_s = \cos \omega t \quad (2)$$

式中 K 为 S_m 与 S_s 之间的振幅比, φ 为 S_m 与 S_s 之间的位相差, 直接与位移量有关。严格地讲, S_s 的频率是有一个带宽的。

两者的合成可表示为

$$S = S_m + S_s = (K \cos \varphi + 1) \cos \omega t - K \sin \varphi \sin \omega t \quad (3)$$

$$\text{令} \quad A = \sqrt{(K \cos \varphi + 1)^2 + (K \sin \varphi)^2} \quad (4)$$

则式(3)可写作

$$S = A \left(\frac{K \cos \varphi + 1}{A} \cos \omega t - \frac{K \sin \varphi}{A} \sin \omega t \right) \quad (5)$$

$$\text{令} \quad \cos \alpha = (K \cos \varphi + 1)/A, \quad \sin \alpha = K \sin \varphi / A \quad (6)$$

$$\text{则} \quad S = A \cos(\omega t + \alpha) \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad A = \sqrt{1 + K^2 + 2K \cos \varphi} \quad (8)$$

$$\alpha = \text{tg}^{-1}[K \sin \varphi / (1 + K \cos \varphi)] \quad (9)$$

由式(7)可见, 合成后的滤波信号仍可表示为一简谐波。只是其振幅 A 与 K 值有关, 且随 φ 以 2π 为周期变化。合成位相 α 也与 K 值有关, 并且与 φ 没有线性关系。而鉴相得到的是 α , 于是造成位移测量的线性误差。

图4所示为计算得出的不同 K 值下 α 与 φ 的关系曲线。下面简要作些讨论：

4.1 $\varphi = 0$ 时, 不论 K 大于或小于 1, 由式(6)得 $\cos \alpha = 1$, $\sin \alpha = 0$, 故有 $\alpha = 0$;

4.2 $\varphi = -\pi$ 时, 由式(4), (6) 得

$$\cos \alpha = (-K + 1) / |-K + 1| = \begin{cases} +1 & (K < 1) \\ -1 & (K > 1) \end{cases}$$

$$\sin \alpha = 0$$

所以, 当 $K < 1$ 时, $\alpha = 0$; $K > 1$ 时, $\alpha = -\pi$

4.3 $\varphi = +\pi$ 时, 同理也有, 当 $K < 1$ 时, $\alpha = 0$; 当 $K > 1$ 时, $\alpha = \pi$ 。

由图4可以看出 α 相对于 φ 有一定的线性偏差。进一步分析可知, 此线性偏差随 K 值的增大而减小, 且随位移呈 2π 周期变化, 长距离并不累计。当 $K > 1$ 时, α 随 φ 单调变化。 $K < 1$ 时, α 只是摆动, 这时传感器不能正常工作。 $K = 1$ 为临界点。这些现象都在实验中得到了验证。

图5为最大线性偏差相对值与 K 值的关系曲线。可见 K 越大, 偏差越小。

表1为不同 K 值时, 最大线性偏差的相对值及所对应的位移量(单位 μm), 可见要使最大位移偏差小于 $0.05 \mu\text{m}$, 必须有 $K > 1.4$, 要使最大位移偏差小于 $0.016 \mu\text{m}$, K 值应大于 4.0, 这对传感器的设计和安装都有指导意义。

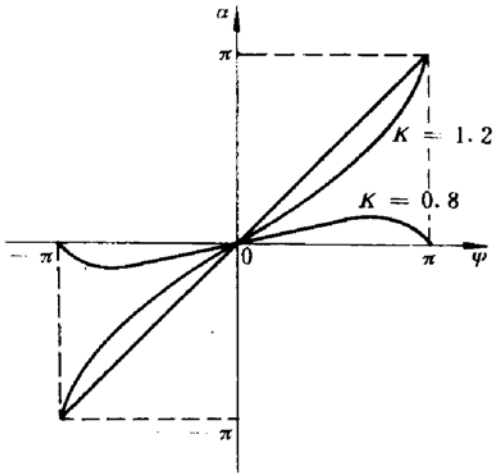


Fig. 4 Curve $\alpha-\varphi$ at $K = 0.8, K = 1.2$

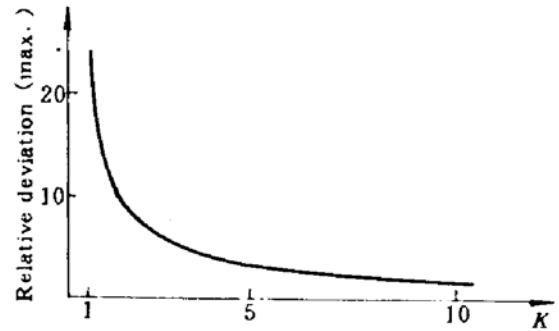


Fig. 5 Relative maximum deviation with different K

Table 1 Deviation at different K

K	1.4	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
Relative deviation (max)	12.7%	8.3%	5.4%	4.0%	3.2%	2.7%
Displacement deviation (μm)	0.051	0.033	0.022	0.016	0.013	0.011

5 实验结果

实际的 K 值可由式(8) 求出, 设合成波振幅最大时为 A_{max} , 振幅最小时为 A_{min} 则

$$K = (A_{\text{max}} + A_{\text{min}}) / (A_{\text{max}} - A_{\text{min}}) \tag{11}$$

表 2 为 K 的测试结果及所对应的位移最大线性偏差的理论值。可见当两测头单独使用时, 因为没有另一路的强度串话, K 值明显变大, 线性偏差变小。其中 4 倍频信号中由于所含的无用背景成分比 2 倍频的少, 因此它的 K 值更大些。而复用时, 两路传感器的 K 值一般都能达到 2, 线性偏差最大值为 $0.033 \mu\text{m}$ 。

Table 2 Maximum deviation of calculated value

Woke type	Channel	A_{max}	A_{min}	K	Deviation (μm)
Multiplex	$2\omega_s$	2.4	0.8	2.0	0.033
	$4\omega_s$	3.0	1.0	2.0	0.033
Solo	$2\omega_s$	3.4	1.6	3.0	0.022
	$4\omega_s$	3.6	2.6	6.2	0.011

对位移线性偏差的测量, 使用了美国 HP 公司生产的 5528A 型双频激光干涉仪。在 $50 \mu\text{m}$ 及 $1000 \mu\text{m}$ 的测量范围内, 分别取 10 个点, 同时记录双频激光干涉仪和光纤传感器的显示读数。以双频干涉仪的读数为横座标, 对光纤传感器的读数进行最小二乘法的直线拟合, 求出各点位移测量值与拟合值的线性偏差。把每组的最大线性偏差换算成实际位移值, 如表 3 所示。可见最大线性偏差的实测值和理论值是基本相符的。并没有因为测试范围的增加而变化很大。表中只列出复用时的测试值。由于 2 倍频和 4 倍频传感器的分辨率分别为 $0.01 \mu\text{m}$ 及 $0.02 \mu\text{m}$ (激光波长 $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$, 对拍频分别进行了 40 细分和 20 细分), 实际上 K 值也有一定的变

化范围。故实测值和理论值不可能完全一致。

Table 3 Maximum deviation of measured value

Channel	Range (μm)	Deviation max. (μm)			Average (μm)
		1	2	3	
$2\omega_s$	50	0.026	0.026	0.016	0.023
	1000	0.047	0.024	0.038	0.036
$4\omega_s$	100	0.028	0.040	0.020	0.030
	1000	0.028	0.018	0.032	0.026

参 考 文 献

- 1 I. Sakai. *Opt. & Quant. Electr.*, 1986, 18(4): 279~289
- 2 田 芊, 李达成等. 中国激光, 1992, 19(9): 668~670
- 3 郑 刚, 田 芊等. 光学学报, 1992, 12(9): 835~840

Influence of Light Intensity on Measurement Accuracy of Laser Diode Multiplexing Optical Fiber Displacement Sensor

Wang Yibing Tian Qian Zhang Enyao

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Reported here is a new optical fiber displacement sensor based on the principles of laser diode linear frequency-modulation heterodyne interference and frequency-division multiplexing technique. Many points displacement can be measured at the same time. The measurement range of displacement is ± 1 mm with an accuracy of $\pm 0.15 \mu\text{m}$ (3σ). The influence of light intensity on measurement accuracy is studied.

Key words laser diode, optical fiber, displacement measurement