

# 激光调频光纤位移传感器 多路复用技术的研究

田 芊 章恩耀 郑 刚 王屹滨 尤 政 赵 洋

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

**摘 要** 叙述了运用半导体激光器连续波调频外差干涉和频域多路复用原理, 研究了光纤位移传感器多路复用技术。已研制成的分频与分幅相结合四路复用光纤位移传感器, 可同时进行对多点、多维位移和多种物理量的测量, 各路位移测量范围大于 1 mm, 测量精度优于 0.1  $\mu\text{m}$  及位移分辨率为 0.01  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 光纤传感器, 多路复用, 激光调频。

## 1 引 言

光纤传感技术以其主要特点, 检测灵敏度高、可探测物理量种类方式多、特殊环境适应性强, 受到人们的广泛重视, 其中光纤传感器的多路复用是重要发展方向之一。多路复用光纤传感器可列入光纤分布(或阵列)传感器。它大致分为三种类型: 1) 线分布, 如利用光波时域反射, 探测分布在一根光纤上各点的被测物理量所引起的变化; 2) 面分布, 如利用排列的光纤网络, 探测分布在其面上各点的被测物理量所引起的变化; 3) 立体分布, 如利用多维或多点光纤传感器, 探测分布在空间内各维、各点的被测物理量的变化。多路复用光纤传感器属立体分布类型, 它并非是采用同一种传感器取其多个组合而成的, 而是用一个光源和一个或数个探测器, 同时检测多路信号及多种物理量, 因此它的结构更简单可靠些。

本文叙述了作者在研制成一路激光调频光纤位移传感器的基础上<sup>[1]</sup>, 提出的多路复用新方案, 旨在将半导体激光器线性调频技术、外差干涉技术和光纤传感技术有机结合, 运用到多路位移量的高精度检测中, 从而构成一种新型多路复用光纤传感器。

## 2 分类和原理

对于位移测量, 光学干涉技术是测量灵敏度和精度最高的方法, 通常采用外差干涉技术, 因其对光强波动和低频噪声相对不灵敏, 提高了测量的稳定性和可靠性。而利用半导体激光的调频连续波(FMCW)来实现光外差干涉更具有实用性<sup>[2,3]</sup>。

目前适用于多路复用激光调频外差干涉光纤传感器主要有三种方法: 1) 分幅多路复用

\* 本课题为国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1993年12月6日; 收到修改稿日期: 1994年2月17日

法串话量大,光路复杂,使用的耦合和探测元器件多,实用意义不大;2)分时多路复用,其不能跟随快速变化的信号,同时存在需要很长的延时光纤等缺点;3)分频多路复用<sup>[4]</sup>,虽也存在串话问题,较之其它两者仍有优越性,但由于信号探测及处理元器件的限制,其测量响应速度还不可能太高。

下面简述分频多路复用原理<sup>[5,6]</sup>:当注入半导体激光器的偏置电流受锯齿波调制时,其激光频率和光强幅度也被调制,并与调制电流成正比。设激光的中心频率为 $\omega_0$ ,光频调制幅度为 $\Delta\omega$ ,调制周期为 $T$ ,且有 $\alpha = \Delta\omega/2T$ 为光频调制率。该被调制的光波送入干涉仪,形成有光程差或相对时延为 $\tau$ 的两束光,这两束光干涉时的拍频信号为:

$$I(t) = I_0 + I_m \cos(\omega_b t + \omega_0 \tau + \alpha t^2) \exp(-\tau/2\tau_c);$$

式中 $\omega_b = 2\alpha\tau$ 为拍频信号的频率, $\tau_c$ 为激光的相干时间, $I_0$ 为一“准直流分量”,它同样受到激光器调制电流的调制,但在后面信号处理中能以解调信号来消除,故这里可不予考虑。若略去 $\alpha t^2$ 项(因 $\alpha t^2 \ll \omega_0 \tau$ ),并不考虑激光相干时间的影响(因 $\tau_c \gg \tau$ ),则由光电探测器得到的拍频信号频谱为:

$$U(\omega) = 2m\pi\delta(\omega) + 2m\pi^2(1 - \frac{\tau}{T}) \left\{ \frac{\sin[(\omega + \omega_b)(T - \tau)/2]}{(\omega + \omega_b)(T - \tau)/2} \exp(-j\omega_0\tau) + \frac{\sin[(\omega - \omega_b)(T - \tau)/2]}{(\omega - \omega_b)(T - \tau)/2} \exp(j\omega_0\tau) \right\} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s)$$

由此式可知,该信号的频谱为一个 $\delta$ 函数序列,它由一系列周期为调制频率 $\omega_s(\omega_s = 2\pi/T)$ 的谐波成份组成,且各级谐波的幅度受sinc函数所调制。而sinc函数的最大值位于拍频 $\omega_b$ 位置,其数值分布周期也近似为 $\omega_s$ ,此即意味着每一个分布周期内只含一个谐波成份,因此只有位于 $\omega_b(\omega_b = n\omega_s)$ 值附近的某一级谐波幅值最大(图1)。这样可采用带通滤波器将此谐波滤出,得到拍频信号 $I(t) = A \cos(n\omega_s t + \omega_0 \tau)$ ,其位相部分 $\omega_0 \tau$ 即为干涉仪两束光延时差(光程差)的变化量,再利用位相检测就可求得相应的位移量大小。

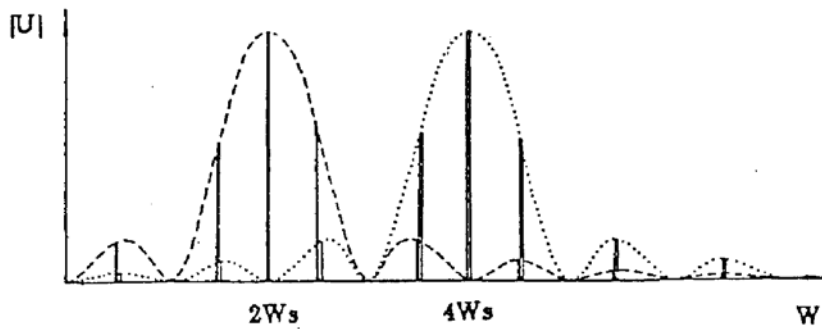


Fig. 1 The principle of frequency division multiplexing

上述拍频值 $\omega_b$ 是与延时差时间 $\tau$ 有关的,故光程差不同,其拍频值也不同。因此在设计多路探测回路时,只要各路分别取不同的光程差,即在 $n\omega_s$ 中取不同的 $n$ 值( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),从而得到不同拍频值的拍频信号。再通过中心频率不同的各个带通滤波器,分别滤出各路拍频信号,然后将各路的位相差经鉴相而得到各路所探测的位移量。

### 3 研 究

基于分频多路复用原理,作者曾分别研制了两路、三路、四路复用调频光外差光纤位移

传感器。两路复用光纤位移传感器是采用 X 型光纤定向耦合器构成的，实验研究表明<sup>[6]</sup>，其每一路传感器位移测量精度均小于  $0.05 \mu\text{m}$ ，两路传感器之间的串话扰动量小于  $0.05 \mu\text{m}$ ，可确认两路复用光纤传感器的测量精度不大于  $0.1 \mu\text{m}$ 。下面分别叙述三路、四路复用光纤位移传感器的研究情况。

### 3.1 三路复用光纤传感器

如图 2 所示，它是由 1 个 Y 型与 1 个 X 型光纤定向耦合器所组成。由半导体激光器发出的调频光波经透镜耦合到单模光纤，再经上述定向耦合器构成的光纤网络分成三路光束。每一路光束经折射率梯度透镜准直后射出到被测物体表面上，由透镜出射端面 and 物体表面反射的两束光将相互干涉形成拍频信号，信号由探测器接收并经处理检测，最后显示被测物体的位移量。

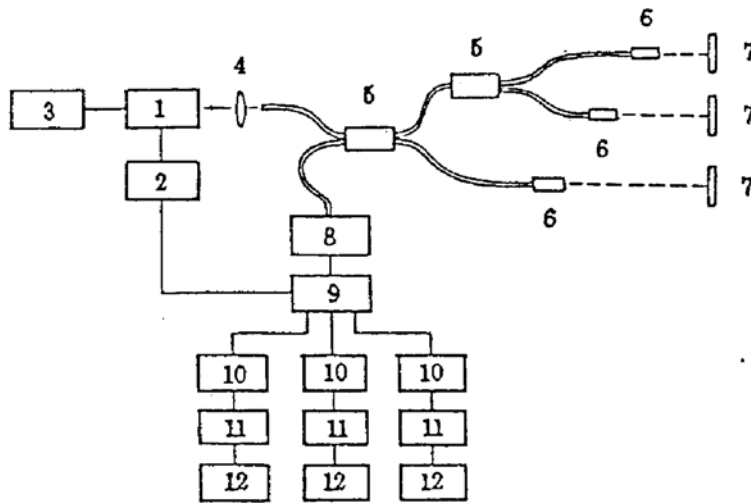


Fig. 2 Scheme of the three-dimension-multiplexing optical fiber displacement sensor

- |                             |                                    |                          |
|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 1. laser diode              | 5. optical fiber direction coupler | 9. amplifier and divider |
| 2. modulated current source | 6. gradient index lens             | 10. band-pass filter     |
| 3. thermostatic controller  | 7. object                          | 11. phase detector       |
| 4. lenses                   | 8. photodetector                   | 12. display displacement |

图 3 是三路中各路的拍频频谱图，每一路拍频信号是由一系列谐波组成，其相应拍频值处的主谐波最大。但是由于其余各级谐波不为零，所以三路信号中的各谐波之间会相互干扰，

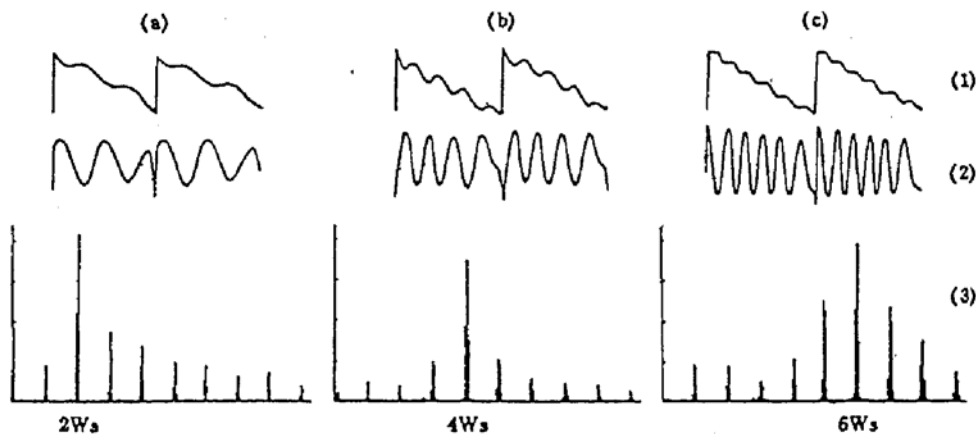


Fig. 3 Beat signals in frequency-division multiplexing

- (1) the initial beat signal, (2) the signal after dividing, (3) the frequency spectrum, (a) the beat signal of the first channel, (b) the beat signal of the second channel, (c) the beat signal of the third channel

引起串话。串话将影响到各路传感器位移测量的精度，所以应采取方法消除或减少其影响。实验表明，三路复用中各路信号的干扰比两路复用时严重。加之拍频频率越高，对应的光程差越大，光源的位相噪声影响加大，从而导致高频拍频信号信噪比下降。实验测量结果显示，三路复用时的测量精度要比两路复用时降低两倍多。

### 3.2 四路复用光纤位移传感器

由三路复用光纤位移传感器的分析和实验研究可知，单调地增加拍频频率，依靠频域复用原理来增加多路复用数目是不可取的。因此比较可行的最佳方案是分频与分幅相结合多路复用原理，四路复用光纤位移传感器就是采用双二路复用结构，如图 4 所示，其中用 Y 型光

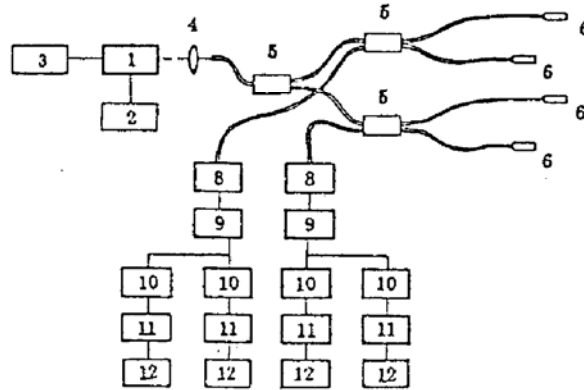


Fig. 4 Scheme of the four-dimension-multiplexing optical fiber displacement sensor

(use the same mark of Fig. 2)

纤定向耦合器将光波分幅成两束，每一束组成两路频域(分别为二倍频和四倍频)复用传感器。这样，四路复用与三路复用相比，光纤网络结构基本一样，而其测量精度高，即仍为两路复用时的测量精度，其测试结果如表 1 所列。

Table 1.

measured range	linearity ( $2\sigma$ )		repeatability ( $2\sigma$ )		cross talk ( $2\sigma$ )	
	A1	A2	A1	A2	A1	A2
$\pm 50$ ( $\mu\text{m}$ )	0.029	0.025	0.007	0.010		
$\pm 500$ ( $\mu\text{m}$ )	0.032	0.065	0.019	0.027	0.018	0.028

(注: A1 为二倍频测头的测量值、A2 为四倍频测头的测量值)

以上测试，实验是使用美国 HP 公司的 5528A 型双频激光干涉仪，作为位移比对的，由以上几项误差按其最大的  $2\sigma$  进行合成，得到测量精度为：1)  $\pm 50 \mu\text{m}$  内， $2\sigma \leq 0.05 \mu\text{m}$ ；2)  $\pm 500 \mu\text{m}$  内， $2\sigma \leq 0.1 \mu\text{m}$ 。另外，位移分辨率最高为  $0.01 \mu\text{m}$ 、响应速度约可达  $2 \text{ mm/s}$ ，以及稳定性、最大零漂为  $0.1 \mu\text{m/hr}$ 。由精度分析可知，测量误差主要有如下几项：1) 半导体激光器位相噪声，当工作距离为  $11 \text{ mm}$  时，位相噪声约有  $0.086 \text{ rad}$ ，由此产生相对精度为  $5 \times 10^{-4}$ ；2) 半导体激光器温漂为  $2.5 \times 10^{-4} \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ，温控小于  $0.1 ^\circ\text{C}$  时，这部分相对精度为  $3 \times 10^{-5}$ ；3) 半导体激光器电流约为  $2.5 \times 10^{-4} / \text{mA}$ ，当稳流达到  $0.2 \text{ mA}$  时，相对精度为  $5 \times 10^{-5}$ ；4) 测量值的线性当量引入误差，当测量范围为  $1 \text{ mm}$  时，相对精度为  $5 \times 10^{-5}$ 。而由作者实测结果可知，其相对精度为  $2 \times 10^{-4}$ 。因此可以看出，与双频激光干涉仪是固定频差不同，多路复用光纤位移传感器中半导体激光调频是变频差，所以其测量结果是一种综合效应的测量值，测量误差中主要因素为半导体激光器位相噪声。

## 4 讨 论

对于多路复用激光调频外差干涉光纤位移传感器,影响其测量精度和稳定性的因素及关键技术主要有:

### 4.1 反馈光对半导体激光器的影响

反馈光将会影响半导体激光器的调频特性和光强调制特性,严重时完全破坏了光纤传感器的信号致使其无法工作。在光纤位移传感器中,耦合透镜表面和光纤入射端面会产生反射光,这些表面与激光器出射端面之间的距离约数毫米、数十毫米,小于激光的相干长度,将由此产生属于“复合腔型”反馈光的影响。而光纤中传输的光信号经反射沿原路返回到激光器中的那一部分光,其路径一般大于激光相干长度,所以产生属于“光注入型”反馈光的影响。为了消除光反馈影响,通常都在光路中加入光隔离器。在本实验系统中没有光隔离器,而是在光耦合时注意调偏光轴和聚焦位置,并加长光纤的长度,同样达到了比较满意的效果。当然若使用光隔离器,可大大提高激光的相干性和拍频信号的信噪比,扩大测量范围并保持高精度,实验表明测量范围可达  $10\sim 20\text{ mm}^{[7]}$ 。

### 4.2 半导体激光器温漂效应的影响

当半导体激光器的工作温度发生变化时,其谐振腔腔长和激活介质折射率等随之变化,导致激光频率的漂移,从而造成拍频信号的位相变化( $d\varphi = \tau d\omega_0$ )。在光纤位移传感器中,测量零点的不稳定性主要由半导体激光器的温漂引起,另外温漂对测量精度也有很大影响。如前所述,测量精度主要受限于激光器本身存在的位相噪声和振幅噪声,其中位相噪声的影响更大些,而对激光器进行温控将有助于抑制激光噪声。实验采用最高控温精度为  $0.01\text{ }^\circ\text{C}$  的控温仪,并设计了易于温控并将被控区域与外界热隔离的结构,同时保证了机械结构的稳定性。实验表明,实际温控精度在  $0.04\text{ }^\circ\text{C}$  以内,温漂引入的位移误差小于  $0.02\text{ }\mu\text{m}$ 。

### 4.3 激光调频中光强调制的影响

半导体激光器在被调制时,不仅光频率受到调制,而且光强亦受到调制。前面原理叙述中,曾对此光振幅的调制不予考虑。这在单路光纤位移传感器中是可以的,因为其拍频信号为单一,采用除法电路能够较好地消除光强调制的影响。然而在多路复用时,因有两个以上不同频率的拍频信号,并且由于光路及电路中有延时差,使得被测信号与参考信号之间存在一定的相移(约为  $2\text{ }\mu\text{s}$ ),这就造成了经除法电路输出的信号中含有与调制信号周期相同的尖脉冲。而且这一周期尖脉冲在拍频信号中的占空比,将会因调制频率增高而变大,造成拍频信号的“失真”,如调制频率为  $50\text{ kHz}$  时,其占空比约为  $1/10$ 。这样,混杂有尖脉冲的拍频信号再经过带通滤波器后,得到的信号中将既包含有用的拍频信号成分,又有相位不随被测距离变化的无用分量。由此带来了位相测量的误差,并使测量的线性度变差;严重时,上述混合的信号其相位不再随位移而变化,出现“摆动”现象以至无法进行测量。

### 4.4 多路信号之间串话干扰的影响<sup>[6]</sup>

正如前面所述,几路信号之间会相互干扰而产生串话,这里串话可分为“相干串话”和“非相干串话”。由于各路拍频光信号在返回到光电探测器时,将会相互交叉干涉,这形成所谓的相干串话;由于每路拍频信号均包含有各级谐波的分量,因此在每路主谐波频率处的光强,将会叠加上其它几路中同级谐波分量的光强,从而形成所谓的非相干串话。不管哪种串话都会影响到测量精度,应采取方法消除或减少其影响。其中影响较大的是非相干串话,因为相干串话可对各路光纤测头采用不同长度的光纤予以解决,但要完全消除非相干串话似乎

是不可能的。减少其影响的方法是尽量拉开几路拍频信号的频率间隔,尽量让各路拍频信号的光强相等,以及位移测量尽量工作在确定拍频信号拍频值的光程差区域附近。

总之,激光调频外差干涉光纤位移传感器多路复用技术是光纤传感技术与激光连续波调频技术、外差干涉技术的集成,多路复用光纤位移传感器的结构简单、可靠,测头体积小(直径约 2 mm),具有位移精度高、动态范围大、可非接触与非破坏性测量、抗外界干扰能力强等优点。仪器还可运用到测量许多能直接或间接转动为位移量的其它物理量(如振动、温度、压力等),因此本仪器不仅可以同时进行多点、多维的位移测量,而且可以对多种物理量同时测量\*。本仪器曾用于中国科学院科仪厂生产的二维位移工作台的移动精度检测比对,进行了平台移动平面  $x$  向、 $y$  向及平面跳动(垂直方向  $z$ ) 的同步测量(线性误差测量结果见表 2),为其提供了检验产品的新手段。

Table 2.

displacement measurer	$x$ ( $\mu\text{m}$ )		$y$ ( $\mu\text{m}$ )		$z$ ( $\mu\text{m}$ )	
	$2\sigma_x$	max	$2\sigma_y$	max	x-position	y-position
electro-induction	1.47	-1.20	2.99	-2.13	—	—
optical fiber sensor	1.46	-1.21	3.10	-2.23	0.17	0.09

参加本项研究工作的还有梁晋文教授和李达成教授、徐左、李岩、赵子英等,王大珩院士自选题起就给予热情指导和关注,谨在此表示谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 田 芊,李达成,章恩耀, 半导体激光器线性调频光纤位移测量仪的研究. 中国激光, 1992, 19(9): 668~670
- [2] S. Saito, Y. Yamamoto, T. Kimura, Optical heterodyne detection of directly frequency modulated semiconductor laser signals. *Electron. Lett.*, 1980, 16(22): 826~827
- [3] S. Kobayashi, Y. Yamamoto *et al.*, Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, QE-18(4): 582~584
- [4] I. Sakai, Frequency-division multiplexing of optical-fiber sensor using a frequency-modulated source. *Opt. & Quant. Electron.*, 1986, 18(4): 279~289
- [5] 徐 左,田 芊等, 半导体激光器线性调频新型外差干涉仪的研究. 计量学报, 1989, 10(1): 18~21
- [6] 郑 刚,田 芊,梁晋文, 二维复用半导体激光器线性调频光纤位移传感器的研究. 光学学报, 1992, 12(9): 835~840
- [7] 章恩耀,唐东雷, LD 周波数度调光ファイバ“變位センサ”. *精密工學會志(日)*, 1991, 57(12): 139~144

\* 本技术已获我国发明专利 90110041.2

## Multiplexing Technique of Optical Fiber Displacement Sensor Based on Heterodyne Interference with Frequency-Modulated Semiconductor Laser

Tian Qian      Zhang Enyao      Zheng Gang

Wang Yibin      You Zheng      Zhao Yang

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

(Received 6 December 1993; revised 17 February 1994)

**Abstract** In this paper, the multiplexing technique of optical fiber displacement sensor based on the principles of frequency-modulation continuous wave and heterodyne interference and frequency-division multiplexing is studied. A four-channel multiplexing optical fiber displacement sensors using the scheme of frequency-amplitude-division multiplexing is designed and fabricated. Many points or multi-dimension displacements or many physical parameters can be measured at the same time. The measurement accuracy of each channel is  $0.1 \mu\text{m}$  and the measurement range is more than 1 mm. The highest resolution of displacement is  $0.01 \mu\text{m}$ .

**Key words** optical fiber sensor, multiplexing, frequency-modulation semiconductor laser.