

# 二维复用半导体激光器线性调频光纤位移传感器的研究\*

郑刚 田芊 梁晋文

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

## 提 要

利用半导体激光器线性调频外差干涉原理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, 制作了两路复用光纤位移传感器, 研究和解决了多路复用时信号串话问题. 实验证明, 各路之间串话引起的误差小于  $\pm 0.02 \mu\text{m}$ , 每路测量误差小于  $\pm 0.05 \mu\text{m}$ .

关键词 光纤传感器, 半导体激光器.

## 1 引 言

近年来, 半导体激光器线性调频外差干涉技术受到人们的广泛重视. 根据半导体激光器载流子密度调制效应和温度调制效应, 在半导体激光器的偏置电流上叠加锯齿波调制电流, 可同时实现激光强度调制和频率调制. 利用频率调制构成外差干涉仪具有测量精度高、受环境因素影响小等优点<sup>[1, 2]</sup>. 这种外差干涉技术也在光纤传感器中得到应用<sup>[3, 4]</sup>. 最近, 光纤传感器的多路复用技术更为人们所注意<sup>[5]</sup>. 多路复用光纤传感器, 可以用一个光源和一个光电探测器同时测量多个对象. 本文利用频域多路复用原理, 设计和制作了二维复用光纤位移传感器, 并对复用时的串话问题进行了研究.

## 2 原理和结构

### 2.1 原理

当半导体激光器偏置电流受锯齿波调制时, 其激光强度和频率同时受到调制. 在调制频率不太高时, 出射光波的频率变化与调制电流成正比<sup>[4]</sup>, 见图 1. 如果两束相干光波经过不同光程后再相遇, 即相对延时为  $\tau$  的两束光叠加在光电接收器表面时, 将形成拍频干涉信号. 设单纵模半导体激光器的光波函数为:

$$E_r(t) = E_{r0} \exp\{j[\omega_0 t + \alpha t^2 + \phi(t)]\}, \quad (1)$$

则 延时光波函数为:

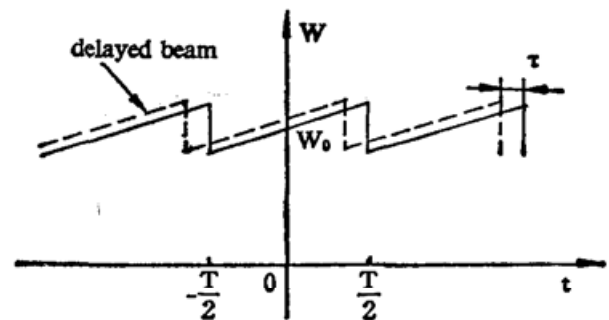


Fig. 1 Waveforms of the two sawtooth optical frequency ramps

收稿日期: 1990年10月29日; 收到修改稿日期: 1991年10月3日

\* 本课题为国家自然科学基金资助的项目.

$$E_d(t) = E_{d0} \exp\{j[\omega_0(t+\tau) + \alpha(t+\tau)^2 + \phi[t+\tau]]\}. \quad (2)$$

在(1)、(2)式中,  $E_{r0}$ 、 $E_{d0}$  分别为两束光的振幅(设为常数. 实际上振幅也受锯齿波调制, 实验中用除法器消除其影响);  $\omega_0$  为光波的中心角频率;  $\alpha$  为频率调制度,  $2\alpha = \Delta\omega/T$ ;  $\Delta\omega$  为频率调制幅度;  $T$  为调制周期;  $\phi(t)$  为初相位. 两束光干涉时的光强为:

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\alpha\tau t + \omega_0\tau + \alpha\tau^2) \exp(-\tau/2\tau_{coh}) \quad (-T/2 \leq t \leq T/2 - \tau), \quad (3)$$

式中,  $\tau_{coh}$  为相干时间;  $2\alpha\tau$  为拍频值, 记作  $\omega_b = 2\alpha\tau$ . 设  $I_1 = I_2$ , 略去  $\alpha\tau^2$  项 ( $\alpha\tau^2 \ll \omega_0\tau$ ), 不考虑相干时间影响(实验中光源相干时间  $\tau_{coh} \gg \tau$ ), 则, 光电接收器输出信号可简写为:

$$u(t) = D \cdot I_0 [1 + \cos(\omega_b t + \omega_0\tau)] \quad (-T/2 < t \leq T/2 - \tau), \quad (4)$$

式中,  $D$  为光电接收器的探测率,  $I_0 = 2I_1 = 2I_2$ . 整个时间域的信号为:

$$u'(t) = D \cdot I_0 \left[ 1 + \cos(\omega_b t + \omega_0\tau) \text{rect} \left( \frac{t - \tau/2}{T - \tau} \right) \right] * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT). \quad (5)$$

电信号的频谱为:

$$U(\omega) = 2m\pi\delta(\omega) + 2m\pi^2(1 - \tau/T) \{ \sin[(\omega + \omega_b) \cdot (T - \tau)/2] \cdot e^{-j\omega_0\tau} / [(\omega + \omega_b) \cdot (T - \tau)/2] \\ + \sin[(\omega - \omega_b) \cdot (T - \tau)/2] e^{j\omega_0\tau} / [(\omega - \omega_b) \cdot (T - \tau)/2] \} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - n\omega_s), \quad (6)$$

式中, 调制频率  $\omega_s = 2\pi/T$ ,  $m$  为一系数. 由(6)式可知, 外差干涉的信号频谱为一个受  $\text{sinc}$  函数调制的  $\delta$  函数序列, 其数值分布周期为原调制角频率  $\omega_s$ . 而  $\text{sinc}$  函数的最大值位于拍频位置, 其数值分布周期也近似为  $\omega_s$ , 即每一个分布周期内只含一个谐波成分. 如果把  $\text{sinc}$  函数最大值附近的某一次谐波用带通滤波器滤出, 则得到的电信号为:

$$u''(t) = l \cdot \cos(N\omega_s + \omega_0\tau) \quad (7)$$

式中,  $l$  为一系数. 显然, (7)式中的相位项与延时时间  $\tau$  有关, 即与两束光的光程差有关. 测出相位变化量, 就可得到延时时间  $\tau$  的变化量或两束光光程差的变化量.

拍频  $\omega_b$  与延时时间  $\tau$  有关, 光程差不同, 拍频大小也不同. 只要设计一路与第一路大小不同的拍频信号, 就可以通过中心频率不同的两个带通滤波器, 分别滤出各路拍频信号. 鉴相后即可分别求出两路干涉信号各自对立的延时时间  $\tau$  的变化量或光程差的变化量.

## 2.2 结构

二维复用光纤位移传感器原理图见图2, 其特点: 光路简单可靠, 稳定性非常好, 不受环境温度影响, 抗电磁干扰. 与单路光纤位移传感器<sup>[4]</sup>相比, 既不增加耦合元件, 又因除法信号直接取自调制电源还少用一个光电接收器. 由半导体激光器发出的调频光波经耦合透镜

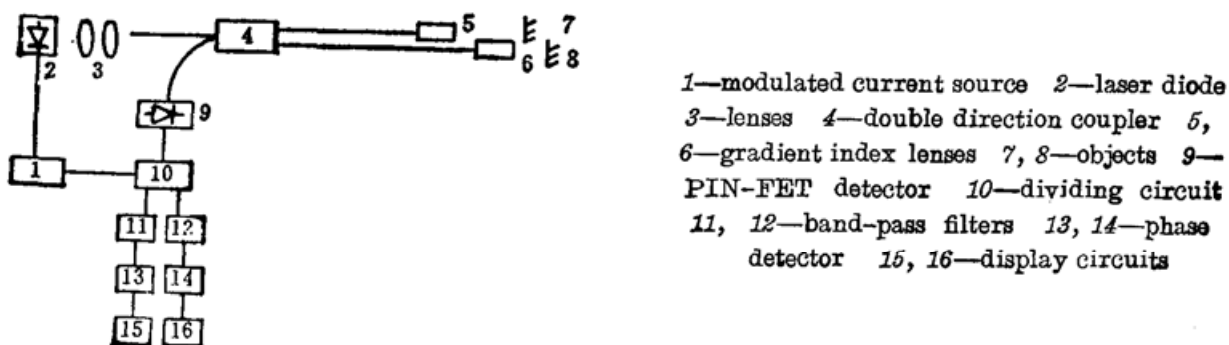
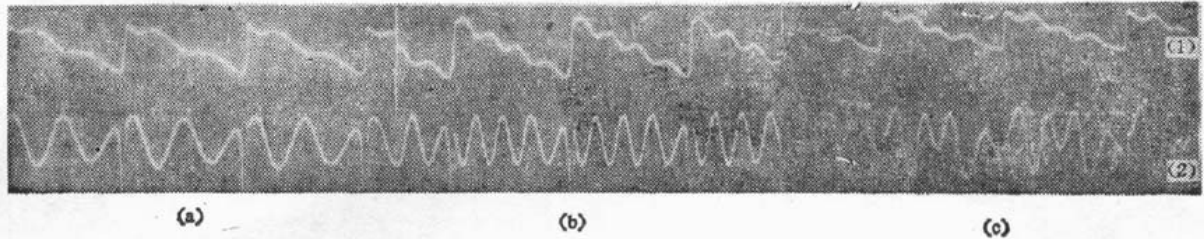


Fig. 2 Schematic diagram of the two-dimension-multiplexing optical fiber displacement sensor

入射到单模光纤里,再经双向定向耦合器分束为两路光束,每路光束经折射率梯度透镜准直后投射到被测物体表面上,从透镜表面和物体表面反射的两束相干光形成的拍频信号由 PIN-FET 探测器接收,得到的电信号经除法器 and 带通滤波器处理后再进行鉴相、计数、显示,即可得到被测物体的位移量。

在两路复用位移传感器中,因折射率梯度透镜与位移物体距离不同,两路信号的拍频频率不同,经过中心频率不同的两个带通滤波器,即可分辨出各路物体位移量的大小.图 3 的 (a)、(b)分别为第一、第二路光纤位移传感器的拍频信号,(c)为两路复用时的拍频信号。



(1) the initial best signal (2) the signal after dividing

Fig. 3 Beat signals

(a) The beat signal of the first channel; (b) The beat signal of the second channel;  
(c) The beat signal of two channels multiplexing

### 3 信号串话的研究

因为每一路拍频信号是由一系列谐波组成的,所以两路信号中各谐波之间会相互干扰,引起串话.又因为两路拍频信号之间也有可能再次交叉干涉,使二维复用时的信号更加复杂.我们在目前尚未查到有关半导体激光器线性调频外差干涉多路复用信号串话问题的报道文献,为便于分析,权当二维复用两路拍频信号相互交叉干涉为相干串话,把两路拍频信号强度叠加称为非相干串话。

#### 3.1 相干串话及其消除方法

见图 2,由于两个传感器中的光是来自同一个单纵模半导体激光器的相干光,如果它们之间光纤长度的差值小于光源的相干长度,则反射回到 PIN 探测器表面时将发生干涉,形成四束相干光交叉干涉的光信号.在理想的情况下,只要求每路传感器从透镜表面和物体表面反射回的光干涉,而两路间的光束不发生干涉,才可能区别出各路的拍频信号.为此,本文实验采用加大两路传感器光纤长度差,使之超过光源相干长度的方法,完全消除了相干串话。

#### 3.2 非相干串话及其减小方法

单路光纤位移传感器拍频信号的频谱是一个受  $\text{sinc}$  函数调制的  $\delta$  函数序列,而两路复用是将两路传感器的拍频频率设置在不同位置.如,  $\omega_{b1} = 2\omega_s$ ,  $\omega_{b2} = 4\omega_s$ , 经过中心频率分别为  $2\omega_s$  和  $4\omega_s$  的两个带通滤波器,分别测出各路的相移值.在第一路拍频信号  $\omega_{b1} = 2\omega_s$  谐波频率处,第二路信号也有一定份量;同理,在第二路拍频信号  $\omega_{b2} = 4\omega_s$  谐波频率处,也有第一路信号的份量,这便是影响着各路传感器位移测量精度的非相干串话。

用相对串话量表示非相干串话较为方便,因为串话对位移测量精度的影响直接与相对

串话量有关。这里,定义相对串话量为:

$$R = P_{21}/P_1 \quad (8)$$

式中,  $P_1$  和  $P_{21}$  分别为传感器 1 和传感器 2 在某次谐波上的功率。串话量与测量动态范围有关,随着位移物体的移动,  $\sin c$  函数在频率轴上移动,各次谐波的幅度在变化。当相对动态范围为  $\omega_s/4$  时,各次谐波的相对幅度如表 1 所示。如果两路传感器复用且两个拍频信号强度相等,表中的数据便是两路拍频信号相差不同次谐波时的相对串话量。

Table 1 The cross-talk in theory

order of harmonics	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
phase of $\sin c$ function ( $\times 1/8\pi$ )	7	15	23	31	39	47	55	63	71	79
$E_{\max} \& \Delta\phi_{\max}$ ( $\times 10^{-4}$ )	1392	650	424	314	250	207	177	155	137	123
$\Delta x_{\max} (\mu\text{m})$ ( $\times 10^{-4}$ )	94	44	29	21	17	14	12	10	09	08

非相干串话由锯齿波调频拍频信号本身决定,只要两路传感器共用一个光电探测器,就存在非相干串话,减小非相干串话的方法是尽量拉开两路传感器拍频频率。

两路复用时的串话,以改变另一路拍频信号相位的方式影响彼此的测量精度。可以用向量图计算串话对相位的影响程度,见图 4。  $\vec{OA}$  为第一路拍频信号向量,  $\vec{AB}$  为第二路信号在第一路拍频频率处谐波分量向量。当经过中心频率为第一路拍频频率的带通滤波器后,得到的信号向量  $\vec{OB}$  为  $\vec{OA}$  与  $\vec{AB}$  之和,相位扰动量为  $\Delta\phi$ 。

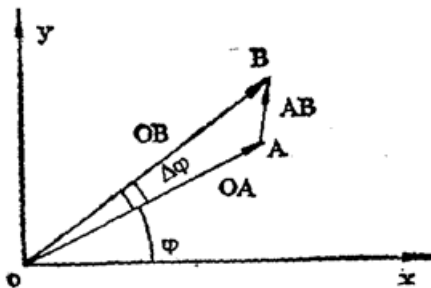


Fig. 4 Calculation of the cross-talk

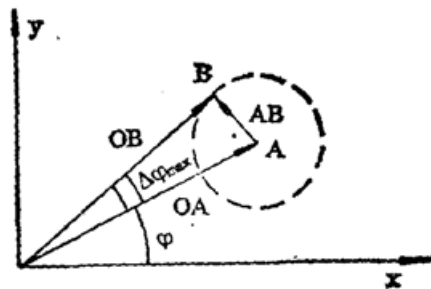


Fig. 5 Maximum of the cross-talk

在第二路位移传感器测量过程中,  $AB$  的相位不断变化,矢端路径轨迹为一个以  $A$  点为圆心,以  $|AB|$  为半径的圆,串话扰动量最大值处在  $OB$  与该圆相切的位置,如图 5 所示。这时,  $\Delta\phi_{\max} = \arcsin(|AB|/|OA|) = \arcsin(P_{21}/P_1)$ ,通常  $\Delta\phi_{\max}$  较小,此式可以近似,  $\Delta\phi_{\max} = (P_{21}/P_1) = R$ 。

测量串话的实际量比较简单。只要使第一路的被测物体不动,移动第二路的被测物体,测出第一路拍频信号的相位变化量,便得到第二路对第一路的串话量  $\Delta\phi$ ,其相位的变化范围  $2\phi_{\max}$  即是串话引起的误差。两路的拍频频谱图见图 6、图 7,测量结果与理论分析基本一致。

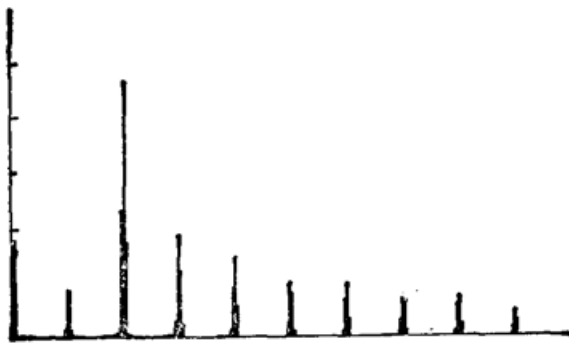


Fig. 6 The frequency spectrum of the first channel beat signal ( $\omega_{b_1} = 2\omega_s$ )

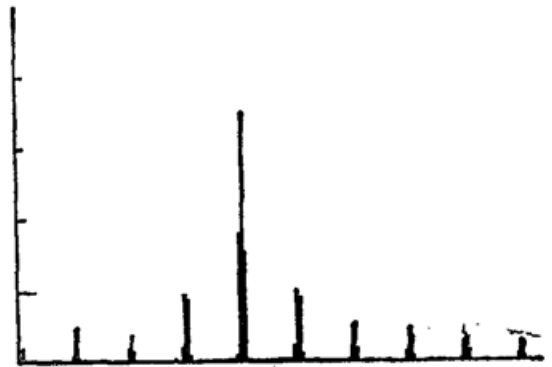


Fig. 7 Frequency spectrum of the second channel beat signal ( $\omega_{b_2} = 4\omega_s$ )

## 4 实验结果

为了确定二维复用光纤位移传感器的测量精度,用德国制造的 Millitron 1202 D 高精度电感测微仪进行对比测量,选用电感测微仪  $\pm 20 \mu\text{m}$  档,位移分辨率为  $0.01 \mu\text{m}$ ,测量精度为  $0.5\%$ 。

对比测量结果表明,每一路传感器位移测量精度(均方差  $S$ )均小于  $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 。两路传感器之间的扰动量实测值小于  $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 。所以,可以确认光纤传感器的测量精度不大于  $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] S. Saito, Y. Yamamoto, T. Kimura, Optical heterodyne detection of directly frequency modulated semiconductor laser signals. *Electr. Lett.*, 1980, **16**(22): 826~827
- [2] S. Saito, Y. Yamamoto, T. Kimura, Optical FSK heterodyne detection experiments using semiconductor laser transmitter and local oscillator. *IEEE, J. Q. E.*, 1981, **QE-17** (6): 935~940
- [3] I. P. Giles, D. Uttam, B. Culshaw *et al.*, Coherent optical-fiber sensors with modulated laser sources. *Electr. Lett.*, 1983, **19**(1), 14~15
- [4] 徐 左、田 芊、李达成. 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
- [5] I. Sakai, Frequency-division multiplexing of optical-fiber sensor using a frequency-modulated source. *Opt. & Quant. Electro.* 1986, **18**(4): 279~289.

## Two-dimension-multiplexing optical fiber displacement sensor using frequency-modulated laser diode

ZHENG GANG    TIAN QIAN    LIANG JINWEN

(Precision Instruments Department, Qing Hua University, Beijing 100084)

(Received 29 October 1990; revised 3 October 1991)

## Abstract

Based on the principles of laser diode linear frequency modulation heterodyne

interference and frequency division multiplexing, the multiplexing technique of the optical fiber displacement sensor is studied. A two-dimension-multiplexing optical fiber displacement sensor is designed and fabricated. The problem of the cross-talk of signals is studied. The experiment proves that the cross-term of the sensor is smaller than  $0.02\mu\text{m}$  and the measurement accuracy of each channel is  $0.05\mu\text{m}$ .

**Key words** optical fiber sensor, laser diode.

### 1990—1991 年中国自然科学核心期刊百名表

1 科学通报	35 南京大学学报(自然科学版)	69 动物学杂志
2 中国科学	36 中国稀土学报	70 中国激光
3 化学学报	37 地质论评	71 气象
4 物理学报	38 光学学报	72 生物物理学报
5 高等学校化学学报	39 催化学报	73 化学物理学报
6 植物学报	40 应用化学	74 结构化学
7 药学学报	41 数学年刊	75 冰川冻土
8 生物化学与生物物理学报	42 生物化学杂志	76 上海医科大学学报
9 植物生理学报	43 色谱	77 云南植物研究
10 分析化学	44 地球物理学报	78 中华血液学杂志
11 生理学报	45 化学试剂	79 兰州大学学报(自然科学版)
12 遗传学报	46 石油化工	80 自然杂志
13 化学通报	47 半导体学报	81 地理科学
14 地质科学	48 北京医科大学学报	82 中国地质科学院院报
15 气象学报	49 吉林大学自然科学学报	83 波谱学杂志
16 有机化学	50 古生物学报	84 分析试验室
17 动物学报	51 作物学报	85 力学学报
18 物理	52 遗传	86 分子科学与化学研究
19 地理学报	53 药物分析杂志	87 厦门大学学报(自然科学版)
20 数学学报	54 地球科学	88 海洋与湖沼
21 大气科学	55 武汉大学学报(自然科学版)	89 中国药科大学学报
22 物理化学学报	56 高原气象	90 动物学研究
23 中草药	57 生理科学进展	91 地理研究
24 植物生理学通讯	58 地震地质	92 中国区域地质
25 地质学报	59 中华内科杂志	93 中国药学杂志
26 中国药理学报	60 微生物学报	94 北京大学学报(自然科学版)
27 中华医学杂志	61 中国农业科学	95 中国科技大学学报
28 高分子学报	62 金属学报	96 应用数学学报
29 实验生物学报	63 中华肿瘤杂志	97 古脊椎动物与古人类
30 生物化学与生物物理进展	64 沉积学报	98 两栖爬行动物学报
31 地球化学	65 生物工程学报	99 军事医学科学院院刊
32 中国医学科学院学报	66 物理学进展	100 解剖学报
33 无机化学	67 中山大学学报(自然科学版)	
34 岩石学报	68 海洋学报	