

半导体激光器线性调频干涉仪的多路复用

徐左 谢巍 田芊 李达成

(清华大学精密仪器系, 北京)

Study on multiplexing of interferometers with frequency modulated laser diode

Xu Zuo, Xie Wei, Tian Qian, Li Dacheng

(Department of Precision Instruments, Qinghua University, Beijing)

提要: 利用半导体激光器线性调频技术, 研究了干涉仪的多路复用。介绍了复用原理, 研究了干涉仪之间的串话。理论分析表明, 干涉仪的动态范围为 1 mm 时, 串话 < -20 dB。进行了相应的实验研究。

关键词: 调频干涉仪, 半导体激光器

一、引言

干涉仪的多路复用已引起人们的广泛兴趣^[1]。在复用中, 来自同一个光源的多个干涉仪的信号入射在光电探测器上, 在电路中将各个干涉仪的信号分开, 同时进行检测。其优点是: 适用于多点探测, 成本低, 结构紧凑。国外文献已报道利用半导体激光器的时间相干性进行多路复用^[2]。我们利用国产准单纵模半导体激光器以及线性调频技术, 构成外差干涉仪, 并人为地使干涉仪具有不同的光程差, 以研究干涉仪的多路复用。

二、半导体激光器线性调频外差干涉仪

在半导体激光器偏置电流上叠加锯齿波

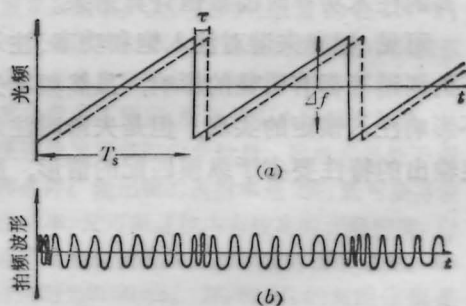


图 1

(a) 光频的锯齿状调制; (b) 拍频波形

调制电流, 可同时实现幅度调制和频率调制。当调制频率小于 10 kHz 时, 出射光波的频率变化与调制电流成正比。将被调制的光束送入一个光程差不为零的迈克尔逊干涉仪, 相对时延为 τ 的两光束叠加在 PIN-FET 探测器上, 输出为一拍频信号, 如图 1 所示。

收稿日期: 1988 年 6 月 13 日。

设半导体激光器以单纵模振荡, 且忽略幅度调制(在实验中用除法器消除), 则线性调频的光场可写为

$$e_r(t) = E_R \exp\{j[\omega_c t + \alpha t^2 + \phi(t)]\}$$

其中 $2\alpha = \Delta F/T_s$;

ΔF 为最大频偏; T_s 为调制周期。

相对时延为 τ 的光波场可写为

$$e_d(t) = E_D \exp\{j[\omega_c(t+\tau) + \alpha(t+\tau)^2 + \phi(t+\tau)]\}$$

光电探测器产生的光电流 $I(t)$ 为^[3]

$$\begin{aligned} I(t) &= \langle [e_r^*(t) + e_d^*(t)] [e_r(t) + e_d(t)] \rangle \\ &= D \{ E_R^2/2 + E_D^2/2 \\ &\quad + E_R E_D \cos(2\alpha\tau t + \omega_c\tau + \alpha\tau^2) \\ &\quad \times \langle \exp j\Delta\phi(t, \tau) \rangle \} \\ &= D \{ P_1 + P_2 \\ &\quad + 2\sqrt{P_1} \cdot \sqrt{P_2} \\ &\quad \times \cos(2\alpha\tau t + \omega_c\tau + \alpha\tau^2) \\ &\quad \times \exp(-\tau/2\tau_{coh}) \} \quad (\tau \leq t \leq T_s) \end{aligned}$$

其中 D 为 PIN 的探测率,

$$\Delta\phi(t, \tau) = \phi(t+\tau) - \phi(t)$$

为位相噪声, τ_{coh} 为相干时间。

至此已得到光拍频信号, 其拍频值为 $2\alpha\tau$, 干涉仪的相位差为 $\omega_c\tau(\alpha\tau^2 \ll \omega_c\tau$, 忽略不计)。与普通拍频信号不同的是拍频信号是 T_s 的周期函数, 同时拍频值随光程差而变, 对鉴相不利。采用滤出谐波法可解决这一问题, 方法如下:

光电流 $I(t)$ 的频谱为

$$\begin{aligned} \hat{i}(\omega) &= F[I(t)] \\ &= \frac{1}{2}(P_1 + P_2)\delta(\omega) \\ &\quad + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} D\sqrt{P_1 P_2} \cdot \exp(-\tau/2\tau_{coh}) \\ &\quad \times \left(1 - \frac{\tau}{T_s}\right) \\ &\quad \times \frac{\sin\left[(\omega_b - n\omega_s)\left(\frac{T_s - \tau}{2}\right)\right]}{\left[(\omega_b - n\omega_s)\left(\frac{T_s - \tau}{2}\right)\right]} \\ &\quad \times \delta(\omega - \omega_s) \cdot \exp[j\omega_c\tau] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 F 表示傅里叶变换,

$$\omega_s = 2\pi/T_s, \quad \omega_b = 2\alpha\tau.$$

从式(1)中可以看出它是由一系列间隔为 ω_s 的谐波成分组成, 各级谐波的幅度受到一中心为 ω_b 的 sinc 函数的调制。如果 ω_b 值在某一谐波附近(设为一级谐波), 则该谐波的幅值为最大。用中心频率为 ω_s 的窄带滤波器将该谐波滤出, 得到:

$$\begin{aligned} \hat{i}(\omega)_{\omega=\omega_s} &= D\sqrt{P_1 \cdot P_2} \cdot \exp(-\tau/2\tau_{coh}) \\ &\quad \times \left(1 - \frac{\tau}{T_s}\right) \\ &\quad \times \frac{\sin\left[(\omega_b - \omega_s)\left(\frac{T_s - \tau}{2}\right)\right]}{(\omega_b - \omega_s)\left(\frac{T_s - \tau}{2}\right)} \\ &\quad \times \delta(\omega - \omega_s) \cdot e^{i\omega_c\tau} \\ &= A e^{i\omega_c\tau} \delta(\omega - \omega_s) \end{aligned}$$

若用时域表示, 则为

$$I(t) = F^{-1}[\hat{i}(\omega)|_{\omega=\omega_s}] = A e^{j(\omega_s t + \omega_c\tau)}$$

取实部, 则

$$I(t) = A \cos(\omega_s t + \omega_c\tau)$$

即得到标准的外差信号, 拍频频率为 ω_s , 是一个常值。用一般的相位比较法极易得到位相 $\omega_c\tau$ 的变化, 从而得到位移量。

三、半导体激光器线性调频外差干涉仪的多路复用原理

光电流的功率谱为

$$\hat{i}^2(\omega) = F[D^2 \langle e_r(t) e_r^*(t) e_T(t+s) e_T^*(t+s) \rangle]$$

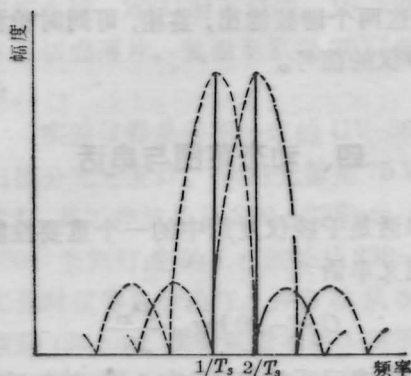


图2 复用原理

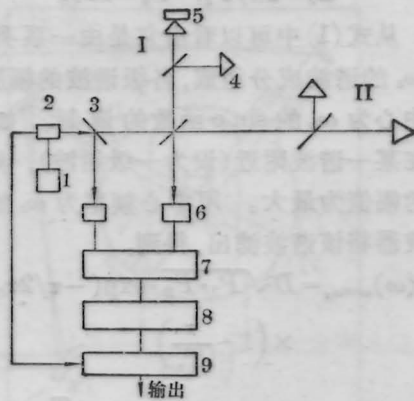


图3 实验装置示意图

- 1—调制电源； 2—激光器； 3—分束镜；
4—棱镜； 5—PZT； 6—PIN FET；
7—除法器； 8—窄带滤波器； 9—比相

其中的拍频功率谱为

$$i_b^2(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} 4D^2 P_1 P_2 \exp\left(\frac{-\tau}{\tau_{coh}}\right) (T_s - \tau)^2 \times \frac{\sin^2\left[(\omega_b - n\omega_s)\left(\frac{T_s - \tau}{2}\right)\right]}{\left[(\omega_b - n\omega_s)\left(\frac{T_s - \tau}{2}\right)\right]^2} \times \delta(\omega - n\omega_s) \quad (2)$$

当拍频值等于一次谐波频率 $1/T_s$ 时，此谐波的功率为最大，而其他各次谐波的功率基本为零。根据这一特点，设置了另一路干涉仪 II，如图 3 所示，使它产生的拍频为 $2/T_s$ ，二次谐波的功率为最大，如图 2 所示。此时两路干涉仪的相互影响为最小，近似为零。在 $1/T_s$ 及 $2/T_s$ 处分别设置窄带滤波器，将这两个谐波滤出，鉴相，可同时检测两路干涉仪的信号。

四、动态范围与串话

串话是干涉仪复用中的一个重要性能指标。定义串话

$$C = -10 \log_{10} \frac{P_{21}}{P_1}$$

其中 P_{21} 表示干涉仪 II 在 $1/T_s$ 处的功率， P_1 表示干涉仪 I 在 $1/T_s$ 处的功率。当干

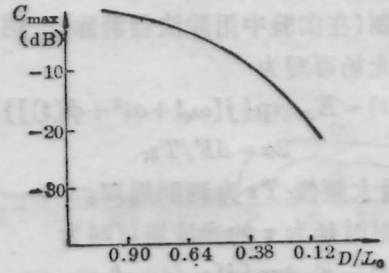


图4 串话与干涉仪动态范围的关系

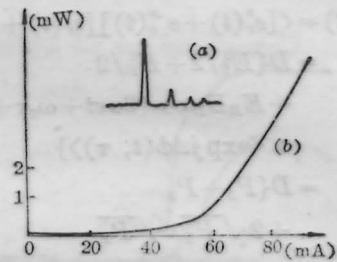


图5 实验管的特性

(a) 光谱； (b) 输出功率与注入电流的关系

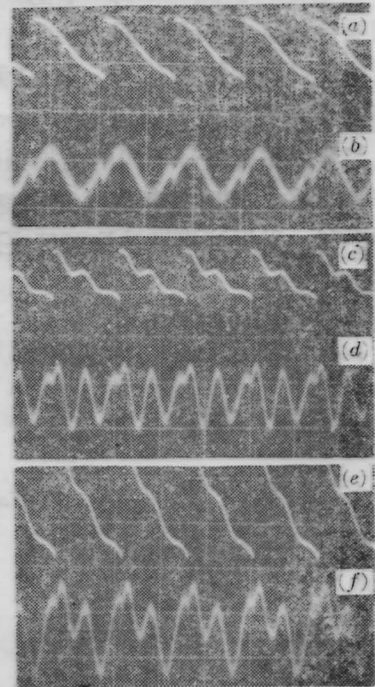


图6

(a)、(c)、(e)—PIN-FET 输出信号；
(b)、(d)、(f)—经过除法器处理后的信号

涉仪 II 的拍频偏离 $2/T_0$ 时, 串话增加。根据式 (2), 可计算出 C , 如图 4 所示。图中 L_0 表示当拍频值等于 $1/T_0$ 时对应的光程差, D 表示干涉仪的动态范围。如果取

$$L_0 = 10 \text{ mm},$$

D 为 1 mm 时,

$$C_{\max} \approx -20 \text{ dB}$$

五、实验结构及结果

实验所选用的半导体激光器由中国科学院上海光机所提供, 输出功率约 2 mW, 其 $P-I$ 曲线及纵模结构如图 5 所示。实验结构如图 3 所示, 干涉仪 I 中的一个直角棱镜由 PZT 驱动。幅度及频率受锯齿波调制的光束进入干涉仪, 用探测器 P_1 接收。为消除幅度调制, 探测器信号经过除法器处理, 然后经过中心频率为 $1/T_0$ 的窄带滤波器、相位比较器, 得到 PZT 的位移量。图 6 所示的是两路干涉仪各自的信号以及它们的叠加, 其中 (a)、(c)、(e) 是 PIN-FET 的输出信号, (b)、(d)、(f) 是经过除法器处理后的信号。图 7 所示的是经过中心频率为 $1/T_0$ 的窄带滤波器后干涉仪 I 及 II 的信号, 分别对应于 (a) 和 (b)。因为干涉仪 I 的光程差产生的拍频在 $1/T_0$ 附近, 因而谐波幅值很大, 而干涉仪 II 的拍频在 $2/T_0$ 附近, 因而在 $1/T_0$ 处的幅值很小, 但不为零。其原因主要有: (1) 半导体激光器线性调频中的非线性效应, 造成拍频谱的幅度调制偏离 $\sin c$ 函数形式; (2) 经过除法器处理后, 残余的幅度调制的影响。图 8 所示的是滤波后的谐波以及标准比相信号。当改变干涉仪 II 的光程差时 ($10 \mu\text{m}$ 左右), 相位计的变化在 1° 以内, 表明了两路干涉仪良好的隔离度。图 9 所示的是干涉仪 II 有干扰时, 干涉仪 I 的 PZT 电压-位移曲线。

本文利用国产准单纵模半导体激光器以及线性调频技术, 研究了干涉仪的多路复用。

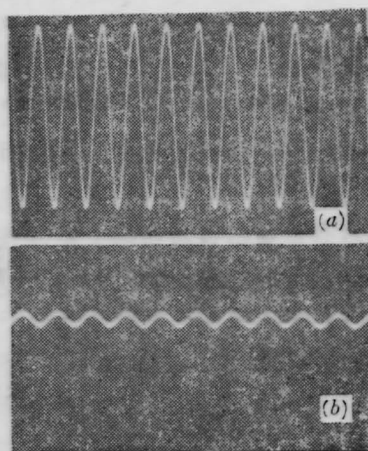


图 7

(a) 干涉仪 I 的信号经过滤波后的波形;
(b) 干涉仪 II 的信号经过滤波后的波形

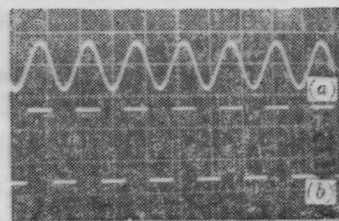


图 8

(a) 比相信号; (b) 标准比相信号

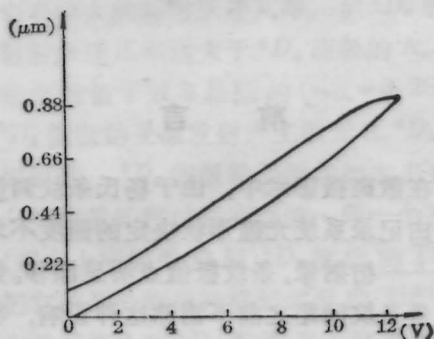


图 9 PZT 电压位移曲线

实验结果验证了原理的可行性。如果同光纤连接, 具有形成多点探测的光纤传感器的潜力。

参 考 文 献

- 1 K. I. Mallalieu *et al.*, *Electr. Lett.*, **22**(15), 809 (1986)
- 2 Brooks *et al.*, *J. Lightwave Technol.*, **LT-3**(5), 1062 (1985)
- 3 D. Uttam *et al.*, *J. Lightwave Technol.*, **LT-3**(5), 671 (1985)