

光纤干涉测距中光程定位的研究*

洪海涛 俞 朴

(上海交通大学信息检测技术及仪器系, 上海 200030)

叶声华

(天津大学精仪学院, 天津 300072)

摘 要 提出一种由定位干涉仪和测量干涉仪组成的光纤干涉绝对距离测量方法; 并用标准长度光纤实现光程倍增以增大测量范围; 重点讨论了用脉冲电流调制的准单色光源实现光程定位的方法及其精度。通过理论分析和仿真实验, 定位重复性误差优于 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

关键词 光纤干涉, 绝对测距, 光程定位。

1 引 言

距离测量是相对位移测量而言的。传统的光学干涉仪采用条纹计数的数据处理方法, 从测量原理上只能实现位移的测量。它们要求一个长度至少超过被测位移的精密导轨, 并要求连续记录下从起点到终点的所有信息。在很多场合下, 这些要求极大地限制了干涉仪的应用。只有摆脱导轨, 才能实现距离测量的现场化和简单化。

在实际的测距应用中, 真正感兴趣的是被测目标的起始位置和终止位置及其之间的关系, 而对目标之间的过渡区域并不感兴趣。传统的测距干涉仪将对目标的定位过程和测量过程统一在一个干涉仪上完成, 从而造成它必须在干涉仪中连续地进行光程定位, 并通过导轨的辅助将这种定位连续地延伸到下一个目标; 而一旦测量过程被中断, 将使这种定位无法延续到被测目标, 因而测量无法实现。绝对测距, 就是要打破位移法测距中不必要的连续测量过程, 而直接实现对目标位置的非连续测量。

本文提出一种将目标定位过程和测量过程分开的绝对距离测量系统, 引入光纤干涉方法增加了系统的柔性和抗干扰性能, 利用精确标定的不同长度光纤实现光程倍增以扩大系统的测量范围。给出了系统的基本测量原理, 并就定位原理及定位精度进行了理论分析和实验研究。

2 测量系统

测量系统由定位干涉仪和测量干涉仪两部分组成, 如图 1 所示。两个干涉仪由扫描镜进行连接。当扫描镜沿着导轨运动时, 它将通过定位干涉仪分别对起始镜和目标镜进行定位,

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-01-15; 收到修改稿日期: 1999-01-07

并发出一个脉冲信号使测量干涉仪开始和停止计数。这样从起始镜到目标镜的绝对距离可以通过下面的公式计算出来:

$$X = OP_i - OP_t = N \frac{\lambda}{2} + OP_n, \tag{1}$$

其中 OP_i 是起始镜的光程, OP_t 是目标镜的光程, λ 是 He-Ne 激光器的波长, N 是测量干涉仪的计数器所计条纹数, $OP_n (n = 1, 2, 3, 4, \dots)$ 是用以扩大系统动态范围的插入单模光纤的光程。当每一个 OP_n 经过精确的标定之后, 作为标准距离引入系统中, 系统就可以测量从起始镜到目标镜的绝对距离。

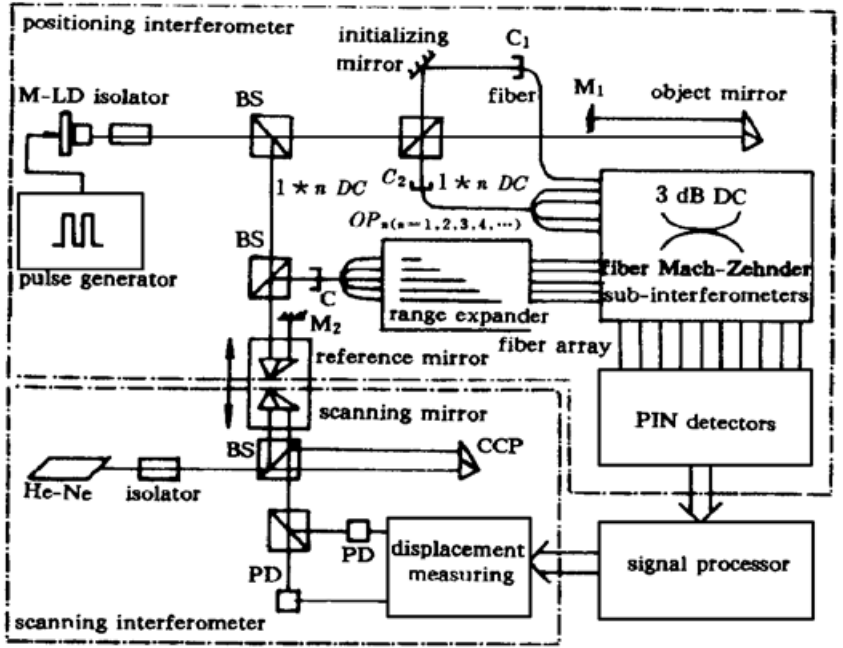


Fig. 1 Scheme diagram of the measurement system

3 定位原理和精度分析

为实现定位系统的准确定位, 光源的选择是很重要的。以白光作光源, 可获得 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 或更高的精度, 但其相干长度太短, 由于光纤具有对光波的色散作用, 经过光纤传播后再相遇的两路光很可能就无法干涉, 从而捕捉不到干涉条纹。半导体激光器具有较窄的光谱宽度, 可以视为准单色光源, 经过光纤色散后, 仍然可以达到足够的干涉长度和定位精度。所以选用一种半导体激光器作为定位光源^[1]。

3.1 定位原理

假设准单色光源的中心频率为 ω , 谱宽为 $\Delta\omega (\Delta\omega/\omega \leq 1)$, 谱的功率分布为 $|F(\nu)|^2$, 根据准单色光源的独立传播原理, 可以将其分解为以下单色光波:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\nu) \exp(i2\pi\nu t) d\nu.$$

从干涉角度出发, 假设参考光路光程为 $OP_r = \tau_r c$, 信号光路的光程为 $OP_s = \tau_s c$, 其中 c 为光速, 于是干涉点处的两相干波列可以用下式描述:

信号:
$$f_s(t) = k_s f(t - \tau_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} k_s F(\nu) \exp[i2\pi\nu(t - \tau_s)] d\nu,$$

参考:
$$f_r(t) = k_r f(t - \tau_r) = \int_{-\infty}^{+\infty} k_r F(\nu) \exp[i2\pi\nu(t - \tau_r)] d\nu,$$

其中 k_s 为信号光路的波数, k_r 为参考光路的波数。

干涉信号经光电器件接收后的输出为:

$$I = [f_s(t) + f_r(t)][f_s(t) + f_r(t)]^* =$$

$$I_s + I_r + 2k_s k_r \operatorname{Re} \left\{ \exp(i2\pi\nu_0\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\nu)|^2 \exp[i2\pi(\nu - \nu_0)\tau] d\nu \right\},$$

假设 $|F(\nu)|^2$ (光源的功率谱分布) 为高斯分布函数, 则有干涉输出为:

$$I = (I_s + I_r) [1 + \exp(-2\pi^2\sigma^2\tau^2) \cos(2\pi\nu_0\tau)], \quad (2)$$

其中 σ 是关于中心谱线和谱宽的函数。

这是一个单峰值包络, 在 $\tau = 0$ 时, 干涉密度输出 I 达到最大值 $2(I_s + I_r)$ 。当 $\tau \neq 0$ 时, $\exp(-2\pi^2\sigma^2\tau^2) < 1$, 干涉密度输出下降; 其输出下降的幅度由 δ 决定, σ 越大, 其干涉输出的包络下降越迅速。因此反过来, 根据干涉密度输出 I 的极值特征点, 可以确定 $\tau = 0$ ($\tau_s = \tau_r$), 即光程差为零的点 ($OP_s = OP_r$)。这种确定是唯一的, 完全可以由准单色光源干涉的对比度极值点来实现光程定位。

3.2 定位精度

从前面的讨论中可以看出, 定位干涉仪的光源是整个测量系统的一个最关键的部分。它的谱宽 $\Delta\nu$ (对应其干涉长度) 直接影响并决定光程的定位精度, 而它的能量又关系到整个系统的信噪比和抗干扰性能。因而设计一个合适的定位光源是一个至关重要的课题。下面将针对定位干涉仪的要求, 提出一种用脉冲式电流深度调制的多纵模半导体激光器 (MLD) 作定位干涉仪光源的光程定位设计方案^[2, 3]。

首先考察恒流 (CW) 工作下的多纵模半导体激光器光谱特性及其干涉特性。一般的多纵模半导体激光器在恒流工作条件下的光谱分布是非连续的, 它由一系列分离的纵模光谱线组成。这是由其多纵模特性所决定的。用示波器得到的直流驱动下多纵模半导体激光器定位干涉仪差动放大输出的干涉条纹曲线如图 2 所示。该曲线为基本对称的驻波分布, 所对应的相干长度很长, 曲线包络峰值衰减非常缓慢, 这对于光程定位是一个非常不利的因素。因为它的包络中央主极值点相对相邻极值点光强优势不明显, 没有一个明显的特征点, 容易造成零位信号提取误差过大甚至错误, 从而极大地影响了系统的定位精度, 因此要对其作适当的处理。一方面要将它的驻波数量压缩, 另一方面要缩短其相干长度。

半导体激光器的特性之一是它的发光波长受驱动调制电流的影响, 其输出波长可随驱动电流的改变而发生变化。这是由于当采用脉冲驱动 ($f_m < 10 \text{ MHz}$) 时, 由于激光器谐振腔的工作区温度变化而引起输出光频率的偏移。当采用脉冲电流驱动时, 多纵模半导体激光器的整体谱线和单独谱线都发生了展宽, 因此发生了光谱谱线的连续和展宽, 由其多纵模间隔谱线所引起的干涉条纹曲线驻波效应亦得到了可观的改善, 并大大缩短了相干长度。

图 3 所示为采用 455 kHz 的方波电流驱动多纵模半导体激光器所得到的干涉信号。不难

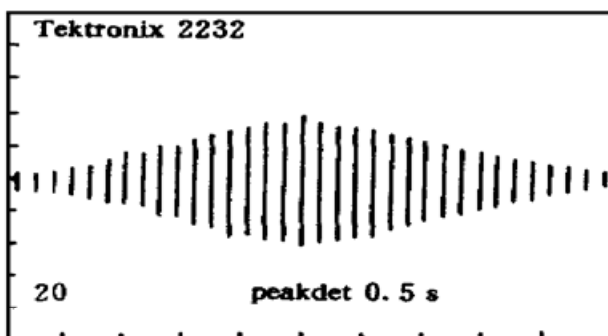


Fig. 2 Interference fringe of MLD under CW operation

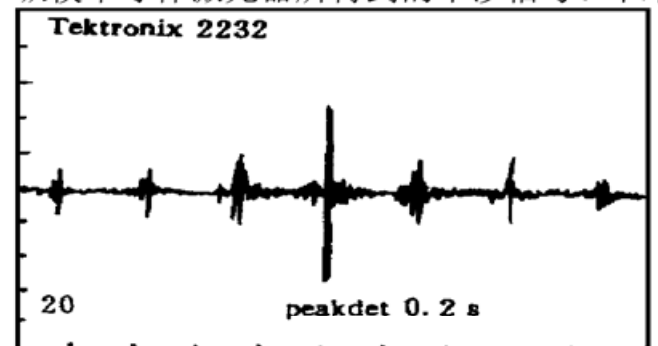


Fig. 3 Interference fringe of MLD under pulsed operation

发现，与图 2 的恒流驱动干涉条纹相比，此干涉信号不仅零位特征明显，而且相干长度也得到了压缩。

未经调制的半导体激光器(HL6711G)，其中心波长 $\lambda = 0.673 \mu\text{m}$ ，谱宽 $\Delta\lambda$ 约为 1 nm，可以得到其相干长度 ΔL 约为 $450 \mu\text{m}$ 。图 4 为直流驱动下多纵模半导体激光器的光谱特性曲线；由仿真实验可知，调制后半导体的波谱宽度展宽， $\Delta\lambda$ 约为 10 nm，其相干长度 ΔL 约为 $45 \mu\text{m}$ 。图 5 为脉冲驱动下多纵模半导体激光器的光谱特性曲线。

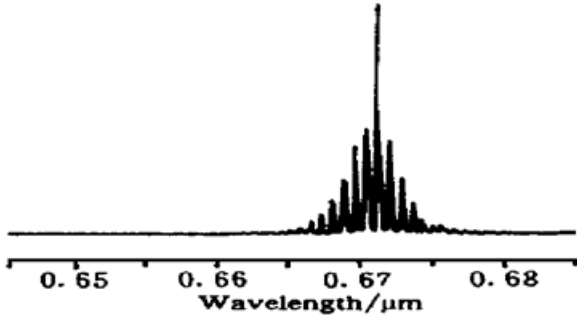


Fig. 4 The spectrum of MLD under CW operation

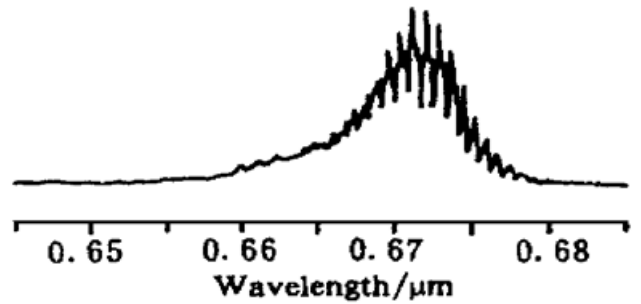


Fig. 5 The spectrum of MLD under pulsed operation

在(2)式中，变量 σ 是关于中心谱线和谱宽的函数： $\sigma = c\Delta\lambda/2.35\lambda^2$ ，并且相干光束的光程差 $OP = \tau$ ，因此相对于光程偏差 ΔOP ，可以得到光能转换偏差：

$$\Delta I = \exp \left[- \frac{2\pi^2 \Delta\lambda^2 (\Delta OP)^2}{2.35^2 \lambda^4} \right] \cos \left(\frac{2\pi \Delta OP}{\lambda} \right),$$

假设干涉极值点提取及处理过程中，输出信号转换误差为 0.5%，则有：

$$\exp \left[- \frac{2\pi^2 \Delta\lambda^2 (\Delta OP)^2}{2.35^2 \lambda^4} \right] = 1 - 0.5\%$$

即

$$\Delta OP = \pm 0.5 \mu\text{m}$$

因此原理上，光程定位误差可达 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

干涉信号进行峰值滤波后可以得到其干涉对比度包络；经屏蔽处理后，可以得到一个宽度大约为 $90 \mu\text{m}$ 的光程定位信号；再将此信号经采样触发，就得到了所需要的光程定位脉冲信号，如图 6 所示定位脉冲提取的实验波形图。经过多次采样，反复实验，该定位脉冲信号提取的重复性误差可以达到 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

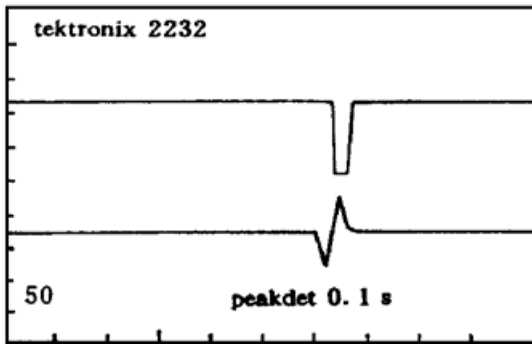


Fig. 6 Positioning pulse of the zero optic path difference point

结 论 通过理论分析和实验研究，采用电流脉冲调制多纵模半导体激光器作为光源，可以实现对目标的精确定位。定位重复性优于 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。如果对定位信号进行数字化提取，光程定位的精度还可以提高，从而可以进一步提高系统的测量精度。

参 考 文 献

[1] Kikuta H, Iwata K, Nagata R. Absolute distance measurement by wavelength shift interferometry. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(17) : 2976~ 2980

[2] Kobayashi S, Yamamoto Y, Ito M *et al.*. Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(4) : 582~ 595

[3] Chen Weikuo, Liu Paolo. Short-coherence-length and high-coupling-efficiency pulsed diode laser for

fiber-optic sensors. *Opt. Lett.*, 1988, 13(8) : 628~ 630

Positioning Method for Optic Fiber Interferometer of Absolute Distance Measurement

Hong Haitao Yu Pu

(*Shanghai JiaoTong University, Department of Instrumentation, Shanghai 200030*)

Ye Shenghua

(*Tianjin University, College of Instrument Engng., Tianjin 300072*)

(Received 15 January 1998; revised 7 January 1999)

Abstract A new optic fiber interferometer is proposed for measuring the absolute distance. It consisted of a positioning interferometer and a measuring interferometer, and used the standard length optic fiber to enlarge the measuring range of the system. The method and the accuracy of the optic path positioning of the system are discussed in detail. Theoretical analysis and experimental results show that the positioning repeatability error is $\pm 1 \mu\text{m}$.

Key words optic fiber interferometer, absolute distance measurement, optic path positioning.