

线性调频半导体激光定位的研究

韩劲松 赵洋 李达成 曹芒 王佳

(清华大学精密仪器系,北京 100084)

摘要:本文提出了一种新的半导体激光定位技术,它利用半导体激光器的线性调频特性来实现干涉零点的动态定位。突破了传统白光定位的局限,简化了干涉仪设计,并实现了大范围内的零点捕捉,是一种实用的干涉定位技术。

关键词:半导体激光器;线性调频;动态定位

1 引言

长期以来,在精密测量中比较成熟的定位技术是白光干涉定位技术。如我国研制成功的JLG-1型激光量块干涉仪,就是用一个白光干涉系统实现量块两端的精确定位的。其动态定位精度达到百分之几微米^[1]。白光定位的基本思想是用白光作光源构成迈克尔逊干涉仪,以干涉仪的等光程差点作为定位基准。由于白光的光谱很宽,利用干涉条纹零级的幅值最大可以判定零光程差点^{[2],[3]};也可以选用白光中的两种波长 λ_1 和 λ_2 ,以它们极大值点的符合判别出零光程差点^[2]。

白光定位的精度虽然很高,但实现起来也比较困难。表现在以下几个方面:

(1)首先是准直问题。因为白光是宽光源,要在长达几米到几十米的范围内实现白光的准直是相当困难的。

(2)干涉仪的质量对白光干涉条纹有很大影响。由于白光谱带很宽,对干涉仪析光镜和补偿镜消色差提出了很高要求;另外,与白光宽谱带相适应,干涉仪的膜系一般采用金属膜,反射光束较透射光束的位相跃迁并不严格等于 π ,从而造成干涉条纹不对称,直接影响定位精度^[4]。

(3)白光干涉系统的狭缝尺寸,接受器光谱特性的差异,以及白光能量的不足等都会影响干涉信号的信噪比,一般 $S/N=4\sim 5$,对精确提取等光程点带来了困难。

(4)白光的相干长度只有几个微米,不利于在大范围内捕捉零点。

本文提出一种新的干涉定位技术。它利用线性调频半导体激光作光源构成迈克尔逊干涉仪,由于半导体激光器的光频变化随注入电流的变化在一定范围内成正比,即线性调频特性,所以干涉信号中包含频率与光程差成正比的拍波成分^{[5],[6],[7]}。其中拍频为零正好对应了干涉仪的等光程点。因此可以通过检测拍波频率来实现零点定位。它相对于白光定位的显著优点

是体积小,成本低;可以很容易地在大范围内实现准直;对干涉仪设计的要求较低;能量高,信噪比高,一般可达 40~50dB;相干距离长,对定位的初始位置要求不高,捕捉范围很大。

2 定位原理

图 1 是以半导体激光器作光源构成的迈克尔逊干涉仪。调制半导体激光器 LD 的光频,使其随时间而线性变化。设干涉仪两臂的长度差为 d ,则角锥棱镜 1 和角锥棱镜 2 反射回来的光波有一个相对时延 τ_d 因而形成光拍(如图 2)。设激光频率按三角波规律变化,则在三角波的上升沿范围内,线性调频激光的频率可以表示为:

$$f(t) = f_0 + \beta t \quad \left(-\frac{1}{4f_m} \leq t \leq \frac{1}{4f_m}\right) \quad (1)$$

其中 f_0 为调频激光中心频率, $\beta = 2f_m \Delta f$ 为激光频率调制系数,表示单位时间的激光频移, Δf

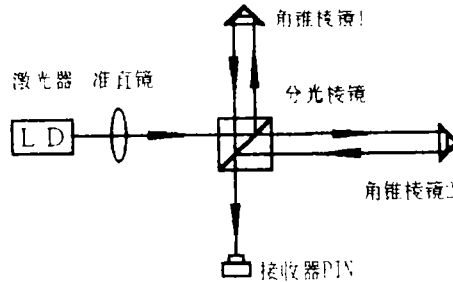


图 1 半导体激光器迈克尔逊干涉仪

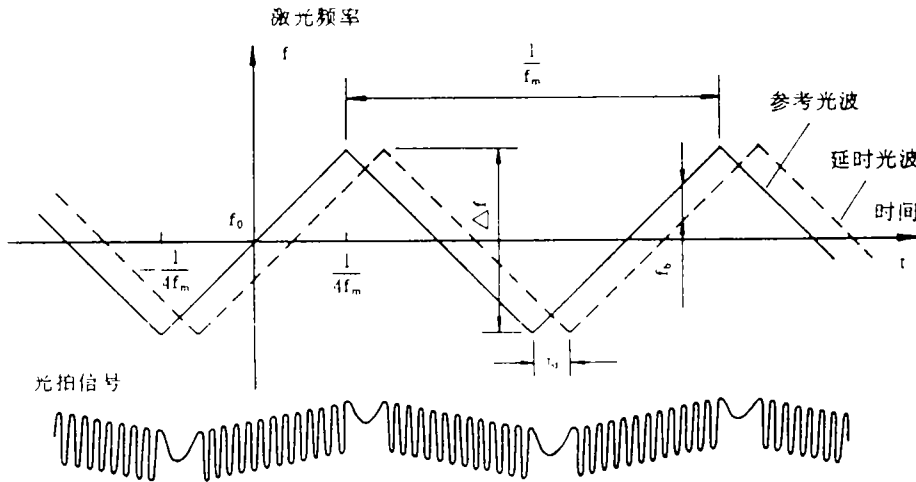


图 2 半导体激光线性调频示意图

为激光调频幅度, f_m 为调制频率。因此,调频光波的位相为:

$$\varphi(t) = \int 2\pi f(t) dt = 2\pi f_0 t + 2\pi \frac{\beta}{2} t^2 + \varphi_0 \quad (2)$$

其中 φ_0 为初相位。

迈克尔逊干涉仪两臂中的光波分别称为参考光波和延时光波。则参考光波为:

$$E_0(t) e^{j\varphi(t)} = E_0(t) e^{-j(2\pi f_0 t - 2\pi \frac{\beta}{2} t^2 - \varphi_0)} \quad (3)$$

延时光波为:

$$E_0(t - \tau_d) e^{j\varphi(t - \tau_d)} = E_0(t - \tau_d) e^{-j(2\pi f_0 (t - \tau_d) - 2\pi \frac{\beta}{2} (t - \tau_d)^2 - \varphi_0)} \quad (4)$$

其中 $E_0(t)$ 表示在调制激光频率时所引起的光波的振幅调制, 它的变化周期等于 $\frac{1}{f_m}$, $\tau_d = \frac{2d}{c}$ 为光波延迟时间, d 为被测距离, c 为真空中光速。

所以, 合成光波的光强为:

$$I(t) = [E_0(t)e^{j\omega(t)}][E_0(t - \tau_d)e^{j\omega(t - \tau_d)}] \\ = I_1(t) + I_2(t) + 2\sqrt{I_1(t)I_2(t)}\cos[2\pi(\beta\tau_d t + f_0\tau_d)] \quad (5)$$

由于 $\beta \ll f_0$, 式中将小量 $\frac{\beta}{2}\tau_d^2$ 忽略。

在三角波的下降沿范围内的情况类似, 不再分析。

显然, (5) 式是光拍的数学表达式, 其拍频为:

$$f_b = \beta\tau_d = \frac{4f_m\Delta f_d}{c}$$

式中 f_m , Δf 和 c 均为与光程差无关的定值, 拍频正比于光程差, 而 $f_b = 0$ 的点正好是零光程差点。所以可以通过检测拍频的零点来实现定位。

3 定位装置及实验结果

图 3 为用线性调频半导体激光定位的实验装置框图。

定位装置包括两部分: 迈克尔逊干涉仪和信号处理电路。用一个三角波发生器调制半导体激光器的注入电流, 使其光频按线性变化。角锥棱镜 1 固定不动, 作为参考镜; 角锥棱镜 2 由步进电机带动在导轨上移动, 以实现动态定位。

由半导体激光器的特性决定, 当通过改变注入电流进行调频时, 激光器的输出光强也同时被调制, 如式 (5) 中的直流项 $I_1(t) = I_2(t)$ 和交流振幅项 $2\sqrt{I_1(t)I_2(t)}$, 要准确地提取拍波信号, 必须去除该调制项的影响。由于半导体激光器的输出光强与它的监测电流 (Monitor Current) 呈线性关系, 在装置中引入了一个除法器。用半导体激光器的监测电流去除接收到的干涉信号, 即可消除光强调制的影响, 如图 4 所示。

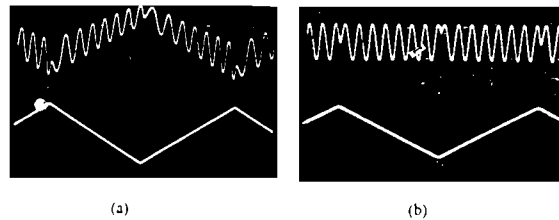
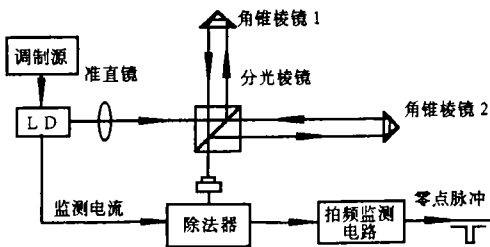


图 3 线性调频半导体激光定位装置框图

图 4 光拍信号: (a) 加除法器之前, (b) 加除法器之后

由于是动态定位, 所以在接收信号中包含干涉项 $\cos 2\pi \frac{2v}{\lambda} t$, v 为测量镜移动的速度。这对检测拍波不利。为了去除干涉项的影响, 在零点附近对测量镜的速度有严格的限制 (不大于

$10\mu\text{m}/\text{s}$),使干涉信号的频率 $f_c \ll f_m$,则干涉项可以忽略。

实验中以东芝的 TOLD9200⁻⁸¹(波长 670nm,调制率约 2.5GHz/mA)作光源,实时定位精度为 $\pm 5\mu\text{m}$,软件判别的定位精度优于 $\pm 1\mu\text{m}$ 。

4 结 论

线性调频半导体激光定位技术将半导体激光器的线性调频特性应用于定位中,突破了白光定位应用场合的局限,简化了干涉仪设计,减小了干涉仪体积,很容易在大范围内捕捉定位信号,使调频半导体激光定位更接近广泛的实际应用,为精密测量中方便地采用干涉定位技术提供了可能。

参 考 文 献

- [1]中国计量院,激光量块干涉仪研制报告. 1979,8:1-8
- [2]李茂山,双光束白光干涉条纹随光程差变化的动态分布. 计量研究,1980,4:15-24
- [3]罗镇伟,白光干涉条纹动态定位误差及其与信噪比的关系. 计量研究,1981,2:6-9
- [4]罗镇伟,白光干涉条纹动态定位的一些问题及其方法的探讨. 计量测试,1980,3
- [5]徐勇,半导体激光器在大尺寸绝对测量中的应用. 清华大学博士论文,1989
- [6]武勇军等,线性调频半导体激光绝对测长技术. 航空计测技术,1993,4:2-4
- [7]小林乔郎,半导体レーザーによる干涉測长技术,光学. 1988,17(6):279-284
- [8]Toshiba, Laser diode guide book. 1992

Research on Positioning Using Linearly Frequency-modulated Diode Laser

Han Jingsong, Zhao Yang, Li Dacheng, Cao Mang and Wang Jia
(Department of Precision Instrument, Tsinghua University
Beijing 100084)

Abstract

A new diode laser positioning technique is proposed in this paper. The zero optical-path-difference (OPD) point of a interferometer can be dynamically searched with diode laser's property of linear frequency modulation. Compared to traditional white light positioning, the diode laser positioning interferometer is simplified, and the searching range of the zero OPD point has been increased greatly.

Key words: Diode laser, Linear frequency modulation, Dynamic positioning