

文章编号: 0258-7025(2005)01-0101-04

双纵模激光拍频干涉仪的研究

周肇飞, 张 涛, 朱目成, 尹伯彪

(四川大学激光应用技术研究所, 四川 成都 610065)

摘要 介绍了一种可对大尺寸工件进行无导轨精密测量的系统。以有高稳定性和强抗干扰能力(室外可达 10^{-7}) 的双纵模热稳频 He-Ne 激光器为光源, 其拍频约为 790 MHz, 拍频波长约 $376 \mu\text{m}$; 以节点为对准标志, 最邻近节点到被测点的间距用组合于同一光路中的分系统激光干涉仪测量, 分辨率为 $0.08 \mu\text{m}$ 。采用自适应滤波和小波运算大幅度地降低了光电信号噪声, 并强化波形。测试表明, 测量的不确定度优于 $30 \mu\text{m}/10 \text{m}$, 整个测量系统可在 $0 \sim 20 \text{m}$ 范围内工作。

关键词 仪器; 大尺寸测量; 双纵模激光; 激光拍频干涉仪

中图分类号 TH 744.3 **文献标识码** A

Research on the Laser Beat-Wave Interferometry

ZHOU Zhao-fei, ZHANG Tao, ZHU Mu-cheng, YIN Bo-biao

(Institute of Applied Laser, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract A precision measuring system for large size measurement is described. The frequency-stabilized He-Ne laser with thermoregulation is used as the light source, which operates on the double longitudinal modes, has high frequency stability and good anti-disturbance performance. The frequency stability is better than 10^{-7} (in open air). It has the beat frequency about 790 MHz and beat wavelength $376 \mu\text{m}$. The node of the beat-wave is used as sampling flag and the distance between the node and the close measuring point is measured with double frequency interferometer, which is combined in the same optical system. In this system, an adaptive filter and a wavelet transform program are used to improve the measurement accuracy. The test indicates that the measuring accuracy is better than $30 \mu\text{m}/10 \text{m}$ and the measuring range is $0 \sim 20 \text{m}$.

Key words instrumentation; large size measurement; double longitudinal modes laser; beat-wave interferometry

1 引 言

绝对距离干涉测量是 20 世纪 70 年代后期开始考虑的一种用多波长激光作光源的无导轨大尺寸测量技术, 迄今为止仍被认为是很有希望能真正解决重型机械、航空航天、船舶、汽车、无线电工业等行业中大型工件大尺寸现场测量的技术手段之一。其发展水平主要受以下两个因素的制约: 1) 多波长激光装置的研制水平, 原因是: 稳频精度、同轴度、抗干扰能力还不能使人满意^[1,2], 一般需要在 3 m 至几十

米范围内相对精度优于 $\sim 5 \times 10^{-6}$ ^[3]; 2) 节点定位精度差, 主要表现在很不稳定。而这两个因素对满足大尺寸现场测量的基本要求有重要的影响。

到 20 世纪 80 年代, 国内外曾有不少这方面的研究探索, 但最后都不能很好地克服上述两个基本问题, 实际精度徘徊于毫米级 ($0.1 \sim 10 \text{mm}$)^[4,5]。本课题始于 1986 年, 到 1996 年, 得到 $50 \mu\text{m}/10 \text{m}$ 的好成绩^[6]。但在后来的实验中发现其复现性和抗干扰能力仍有问题。直到最近才得到稳定、可靠的结果。

收稿日期: 2003-09-03; 收到修改稿日期: 2003-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(50275101)资助项目。

作者简介: 周肇飞(1936—), 男, 江苏南京人, 四川大学教授, 主要从事激光、光电测试技术、表面微观形貌和大尺寸测量的研究工作。E-mail: zhfzhou@scu.edu.cn

2 双纵模热稳频激光光源

2.1 工作原理及组成

多波长激光器通常采用两种方法稳频。对于单波长顺序出现的激光器采用增益线中心频率作为基准;对于多波长成对切换的激光器采用双波长等光强或保持一定差值为稳频基准。这两种基准都受增益线稳定性和重复性的影响^[7,8],因此,频差及其对应的合成波长的稳定性及重复性都不可能很高,同时不少稳频方法的结构复杂及对环境要求苛刻也造成在工业现场环境下进行大尺寸测量的困难。这里要介绍的双纵模稳频激光光源则较成功地解决了上述问题。

对于一定长度的激光谐振腔,可能出现几个纵

模,模间隔为 $f = c/2nl$ (式中 c 为光速, n 为折射率, l 为谐振腔长度)。模之间是相互竞争的^[9],在不加控制的情况下只能一个模占主要地位,但不久又被相邻的模取代。但如果能精确地控制谐振腔长度,使腔长变化总是倾向于使在模竞争中已处于劣势的那一个模变强,则使两个纵模同时并存是完全可行的。我们采用最直接,也是最简单的控制方法,即控制放电电流来改变激光谐振腔长度,达到稳频目的。稳频系统原理如图 1 所示。由激光器出射的光含有两个纵模,被偏振分光器变成电信号,经差动放大、光电耦合、预热控制和调节激光电源的输出,达到稳频目的^[6]。实验表明,稳频系统在室外环境下频率稳定度仍不低于 10^{-7} 量级。这种稳频光源已多年成功地用于其他要求很高的干涉仪^[10]。

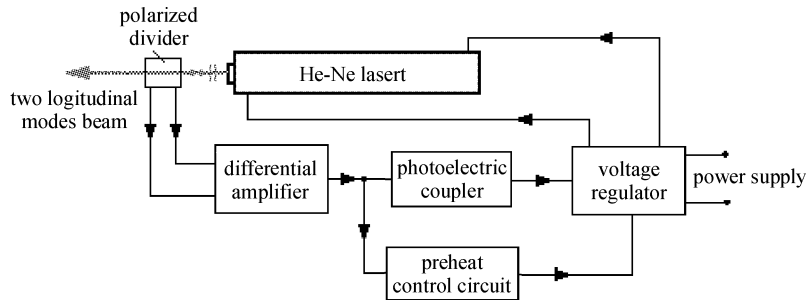


图 1 双纵模热稳频系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the double longitudinal modes frequency stabilization with thermoregulation

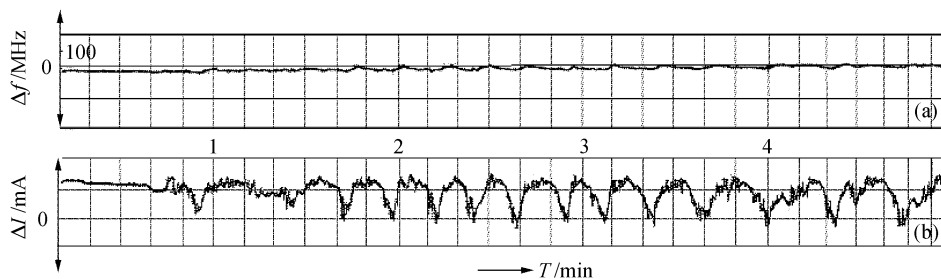


图 2 在开敞空间并有气流干扰时的稳频试验

Fig. 2 Frequency-stabilized experiment in a windblown environment

图 2 所示是在开敞空间并有气流干扰(100 W 电风扇 5 m 处吹风)时的稳频试验结果。图中曲线 (b) 是激光管放电电流为保持稳频的剧烈调整,曲线 (a) 是此时频率的微小波动。

2.2 拍频稳定性分析

可以证明,双纵模稳频激光光源两纵模频差稳定度与其任一单纵模频率稳定度相同。

根据双纵模激光稳频原理及激光产生条件可知其两纵模频率 f_q 和 f_{q+1} 分别为

$$f_q = \frac{c}{2nl} \cdot q, \quad f_{q+1} = \frac{c}{2nl} \cdot (q+1),$$

式中 l 为激光管长度, q 表示模式序号。在稳频情况下,激光不会发生跳模,其稳定度分别为

$$\frac{df_q}{f_q} = -\frac{dl}{l} - \frac{dn}{n}, \quad \frac{df_{q+1}}{f_{q+1}} = -\frac{dl}{l} - \frac{dn}{n},$$

而双纵模激光两纵模频差为

$$f = f_{q+1} - f_q = \frac{c}{2nl},$$

故其频率稳定度为

$$\frac{df}{f} = -\frac{dl}{l} - \frac{dn}{n}. \quad (1)$$

由此可见,双纵模稳频激光源的两纵模频差稳定度与其任一单纵模频率稳定度相同,即频差稳定度也可保证不低于 10^{-7} 量级。实验也证实了这一点。

3 拍频干涉仪工作原理

图 3 中由稳频 He-Ne 激光器出射的双纵模激光,穿过分光器 S_0 和 S , 由靶镜反射回来,再经与两正交偏振光成 45° 放置的偏振片 P_{45} , 由雪崩管 A_2 接收。由于频率 790MHz 的拍频已不是光波,此测

量信号被送到混频器与由分光镜 S_0 反射、被雪崩管接收的参考信号干涉(混频)。拍频波形的节点位置被节点鉴别电路检测,并发出节点脉冲(电路分成两路是为了可以经移相后判别移动方向)。图中测量单元部份的分光镜 S 分出一路光,构成用来测量节点到测量点间距离的辅助激光干涉仪:由反射镜 R , 偏振分光镜 PS , 角锥镜 TP 和参考角锥镜和雪崩管 A_1 等组成。分辨率为 $0.08 \mu\text{m}$ 。当测量单元沿总长度只有 190 mm 的短导轨移动时,光束经偏振片 P_{45} 到达雪崩管 A_1 , 测出上述间距。两套干涉仪各参数的关系可表达如下:

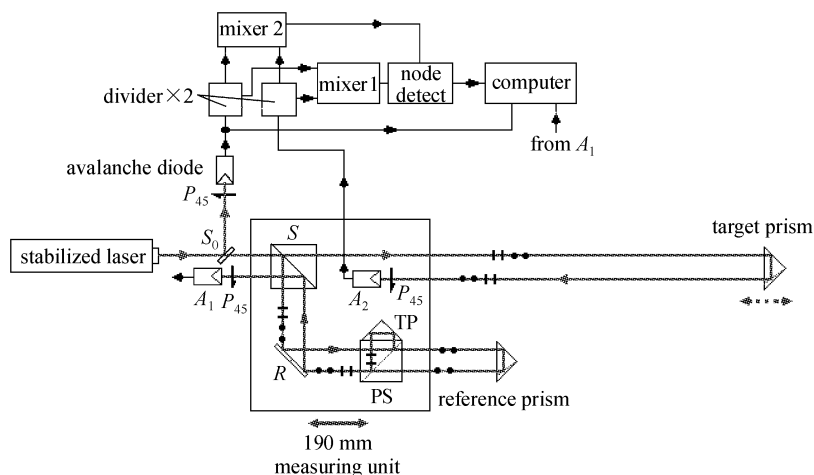


图 3 光电系统原理图

A_1, A_2 : 雪崩管; S_0 : 分光镜; S : 分光器; PS : 偏振分光镜; R : 反射镜; TP : 角锥镜; P_{45} : 偏振片

Fig. 3 Schematic diagram of opto-electric system

A_1, A_2 : avalanche diode; S_0 : beam splitter; S : beam split block;

PS : polarized beam splitter; R : reflector; TP : trihedral prism; P_{45} : polarizer

参考信号: $S_r = A_r \cos\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l_r\right)$, 式中 A_r 为信号振幅, l_r 是从参考光的光分镜 S_0 到雪崩管的不变距离。大尺寸测量信号: $S_m = A_m \cos\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l_m\right)$, 式中 l_m 是 S_0 到靶镜的距离(在这里为了获得高精度 S_m 只伸到距被测点最近的节点)。大尺寸混频后信号

$$S_D = A \cos 2\pi \frac{1}{\lambda} (l_m - l_r). \quad (2)$$

同理,测量节点外距离(尾数)的干涉仪接收信号为

$$S_{mi} = A_{mi} \cos\left[2\pi ft + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2} l_{mi} - \frac{2\pi}{\lambda_1} l_{ri}\right)\right],$$

式中 i 为干涉仪序号,所有下标含 i 的皆为相应的参

数,如 l_m 表示该干涉仪的测量光程。干涉仪混频后信号为

$$S_{ni} = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} l_{mi} - \frac{2\pi}{\lambda_1} l_{ri} + \frac{2\pi}{\lambda} l_r\right). \quad (3)$$

最后由计算机相加,再作气象修正后完成大尺寸测量。

4 实验研究

实验起初是在一台 4 m 测长机上,将光程延长到 10 m(反射两次)与置于另一端的双频激光干涉仪作比对测试。所用激光器为 Uniphase 公司的低噪声同轴内腔式 He-Ne 激光管,长度约为 190 mm,拍频波长为 $\lambda = 376.043 \mu\text{m}$ 。

系统测量误差主要还是源于节点定位。大量测

试结果说明,精度虽与距离有关但无明显的比例关系,节点定位偏差是随机的。全量程的实验是在 20 m 激光测长机上进行的。测试结果如图 4 所示。测试共往返进行 6 次,图 4 显示的是其中一次的测试结果。曲线 a,b 分别为反正向测量结果。除图示的每米一点是人工测出外,实际所测点远多于图示,因为测试设计成:靶镜移动每次经过节点时(每隔 188 mm)由本仪器系统自动向测长机的 HP-5529 激光干涉仪发出测量信号,得到该点的测量结果。全程测试进行了 6 次,测量的误差分散相似。在 10 m 距离内的重复性 $2\sigma = 28 \mu\text{m}$,10 m 以外的重复性 $2\sigma = 39 \mu\text{m}$,其中并无明显比例关系。因此将系统的测量不确定度定为 $\pm 30 \mu\text{m}/10 \text{ m}$ 虽有些粗略,但还是偏于安全的。

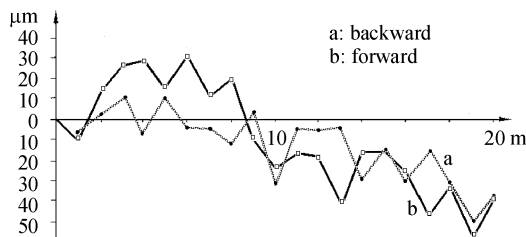


图 4 全量程的正反向测试结果

Fig. 4 Testing results for the full measuring range

5 结 论

1) 大尺寸拍波干涉测量法的波长稳定性和同轴度对测量精度影响很大^[1,2]。用双纵模稳频激光不仅解决了不借助于任何外加频率标准使波长稳定性在计量室达到 10^{-9} 量级,敞开空间、有气流干扰时达到 10^{-7} 量级,而且由于两个纵模产生于同一激光谐振腔中,自然同轴。

2) 本文提出的测量方法无需借助其他仪器测量节点到测量点间距,也无需连续移动靶镜,直接用组合于光路中的辅助双频激光干涉仪测量。激光头对准靶镜后的测量过程自动完成,易于携带,抗干扰能力强。

3) 节点定位误差仍是此系统测量误差的最主要来源,本文采用了自适应滤波和小波运算消减噪声、锐化波形,并在运算的有关系数选择上做了大量实验,使节点鉴别精度和系统稳定性达到现在的水

平,信号处理有其重要作用。

4) 由于本系统测量精度高,除了正在对准靶镜进行测量时外,允许阻挡激光束。这不仅方便操作,而且在地震研究等需要长期精确测距的领域也有应用前景。

致谢 感谢东风电机股份有限公司,计量测试中心在 20 m 测长机上为本课题做的测定,以及提供试验条件。

参 考 文 献

- 1 E. Gelmini, U. Minoni, F. Docchio. Tunable, double-wavelength heterodyne detection interferometer for absolute distance measurements [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3):213~215
- 2 J. Schwider. Phase shifting interferometry; reference phase error reduction [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(18):3889~3892
- 3 R. Dändiker, R. Thalmann, D. Proguè. Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(5):339~341
- 4 Bin Li, Jin-wen Liang. Measurement of large internal diameters based on dual-wavelength heterodyne interferometer [J]. *Precision Engineering*, 1997, **21**:36~42
- 5 Feng Qibo, Liang Jinwen. Study of absolute measurement of large diameters by a 3.39 μm dual wavelength beat wave interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(11):897~903
冯其波,梁晋文. 3.39 μm 双波长拍波干涉仪绝对测量大直径方法的研究[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(11):897~903
- 6 Zhou Zhaofei, Wu Bin, Zhang Tao. The precision measurement of large size object with double longitudinal modes laser without guide [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1996, **23**(4):51~55
周肇飞,吴斌,张涛. 用双纵模激光作无导轨大尺寸精密测量[J]. *光电工程*, 1996, **23**(4):51~55
- 7 Chao Zhixia, Yin Chunyong, Xu Yi *et al.*. The absolute measurement of distance with changeable synthetic wavelength chain [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, **23**(3):161~163, 177
晁志霞,殷纯永,徐毅等. 可调合成波长链绝对距离干涉测量[J]. *计量学报*, 2002, **23**(3):161~163, 177
- 8 Zhang Zhengyu, Sui Xiaolin. Faint signal digital correlation detection of laser ranging; study and simulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7):661~665
章正宇,聿晓林. 激光测距弱信号数字相关检测技术的研究和仿真[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7):661~665
- 9 Huang Shaomei, Ye Shenghua, Duan Fajie. Self-calibration of multiplication optic fiber's length in the optic fiber interferometer for distance measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9):805~808
黄绍梅,叶声华,段发阶. 光纤干涉测距仪中倍增光纤长度的自标定[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9):805~808
- 10 Zhaofei Zhou, Tao Zhang, Weidong Zhou. Laser profiling system for on-line measurement of superfine surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(1):125~129