

双波长绝对距离外差干涉仪的研究*

赵 洋¹⁾ 周 挺²⁾ 李达成¹⁾

1), 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

2), Calimetrics Inc, 815 Atlantic Avenue Suite 105, Alameda, CA 94501-2274, U. S. A.

摘 要 提出了一种采用双纵模稳频激光器的新型绝对距离测量外差干涉仪。该干涉仪探测两个波长各自的外差信号, 通过测量两信号的相位差, 直接测量出合成波的小数级次。指出了两波长间的相互耦合对测量精度的影响, 提出了补偿方法, 在 25 m 的测量范围取得了 140 μm 的测量精度。

关键词 外差干涉仪, 绝对距离干涉术, 相位测量, 模耦合。

1 引 言

传统的干涉仪与绝对距离干涉仪的主要区别是: 1) 前者是以光的波长作为测量的基本单位, 后者则是以两列波的合成波长作为测量的基本单位; 2) 前者是通过测量干涉仪的条纹变化对被测对象进行测量, 后者则是利用计算确定合成波长条纹的整数级次, 干涉仪测量其小数级次。多波长绝对距离干涉仪的理论基础是小数重合法, 该方法 1892 年贝诺瓦首次在干涉度量学中使用, 1977 年 Tilford 作了进一步的发展^[1]。这方面已经在实验室中进行了大量的研究工作, 先后开展了多波长 CO₂、He-Xe、He-Ne、染料、半导体激光绝对距离测量方面的研究^[2]。在 80 年代后期, 开始了结构简单、更有实用性的双波长绝对距离干涉仪的研究^[3]。本文提出了一种用双纵模 0.6328 μm He-Ne 激光器作为光源、可直接测量出合成波长小数级次的外差绝对距离干涉仪。在干涉仪中用声光调制器同时对这两个纵模光波进行调制实现外差干涉。在干涉仪的信号处理时, 分别对各自的外差信号进行混频、比相处理, 测量出合成波小数级次。文中叙述了外差干涉仪的测量原理和干涉仪的特点, 提出了模耦合对测量精度的影响, 并给出了实验结果。

2 绝对距离测量激光外差干涉仪原理

2.1 基于小数重合法的绝对距离测量原理

用激光干涉仪测量长度时, 干涉仪的干涉条纹与被测长度之间有如下的关系:

$$L = (n + \epsilon)(\lambda/2) \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目(59305051)。

收稿日期: 1997-12-10; 收到修改稿日期: 1998-07-10

式中 L 为被测长度, n 、 ϵ 分别为干涉条纹的整数级次和小数级次, ϵ 可以直接通过干涉仪精确测量出来, λ 为干涉仪使用的光波波长。

设 L' 为已知初始值的被测长度, 其精度(考虑正负) 为 dL' , 那么对(1)式微分得:

$$2dL' = dn(\lambda/2) \tag{2}$$

要使 n 唯一确定, 根据数学原理只需使 $dn < 1$, 即

$$dL' < \lambda/4 \tag{3}$$

即如果 L 的已知初始值的测量误差小于所用波长的 $1/4$, $n = \lfloor 2L'/\lambda \rfloor_{int}$ 唯一确定, 这时只需测量出小数级次 ϵ , 即可精确测量出长度 L' , 小数级次 ϵ 的测量精度就是长度 L' 的测量精度。因此要实现绝对距离测量, 必须有一个较长波长的波。

2.2 绝对距离测量外差干涉仪

He-Ne 激光器在 $0.6328 \mu\text{m}$ 波段的增益线宽为 1500 MHz , 当它的谐振腔腔长在 150 mm 左右时, 激光器有两个纵模同时振荡, 这两个纵模间隔为 1080 MHz 的线偏振光, 偏振方向固定、正交。这两波长组成的合成波长在 300 mm 左右, 适合于绝对距离测量。

图 1 是利用上述 He-Ne 激光器进行绝对距离测量的外差干涉仪原理图。在该外差干涉中, 使用了双声光调制器, 消除了声光调制器的衍射光光强振幅调制对测量精度的影响。在干涉仪中, 从激光器发出的光被分成两束, 一束光经过声光调制器 AOM_2 衍射, 其一级衍射光作为测量光束经扩束后射向测量靶镜;

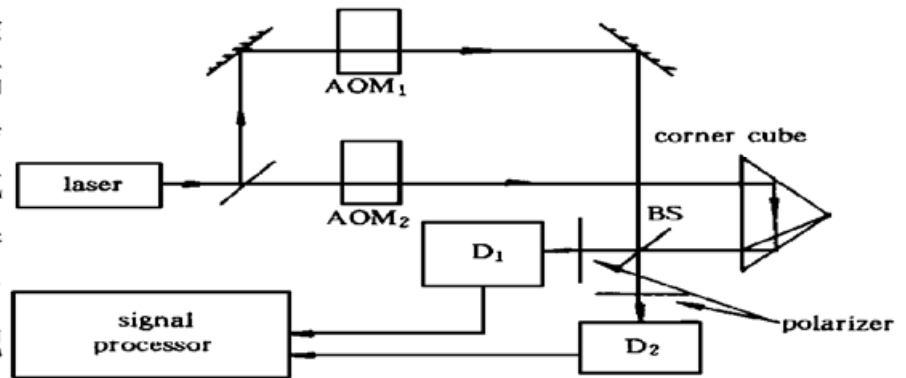


Fig. 1 Schematic diagram of an absolute distance heterodyne interferometer with a dual-longitudinal mode He-Ne laser

另一束光经过声光调制器衍射 AOM_1 , 其一级衍射光作为参考光束, 与从测量靶镜反射回来的光在分光镜 BS 上汇合, 分别入射到两个光电探测器 D_1 、 D_2 上。在两个探测器前面各放置一个检偏器, 使每个光电探测器只能接受到一个波长的外差干涉信号。在省略直流项后, 两个光电探测器 D_1 、 D_2 接收到的光外差干涉信号可表示为:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= A \cos \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_1} \right), \\ I_2 &= A \cos \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda_2} \right) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中, ω 为干涉仪中两个干涉臂光波的角频率差, λ_1 、 λ_2 为两光波的波长, x 为干涉仪两臂间的光程差, 这两个信号的相位差为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi x}{\lambda_2} - \frac{2\pi x}{\lambda_1} = \frac{2\pi x}{\lambda_s} \tag{5}$$

式中合成波长 $\lambda_s = \lambda_2\lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)$ 。因此, 小数级次 ϵ 为:

$$\epsilon = \left\lfloor \frac{x}{\lambda_s} \right\rfloor_{mod} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \tag{6}$$

由此可见, 在测量过程中只要测量出两光电信号的相位差, 可直接测量出合成波的小数级次。

3 实验与分析

3.1 实验装置

根据测量原理建立了实验装置。实验中的双纵模稳频激光器是由北京科学仪器厂生产的,其频差为1 078 462 255 Hz,稳定性为: 2.5×10^{-6} ,形成的合成波长为 278.175 mm,其相对误差与频差的稳定性相同。使用由中国科学院上海硅酸盐所生产的重火石玻璃声光调制器,它们的驱动频率分别为: 40 MHz 和 41 MHz,因此在光电接收器 D_1 、 D_2 接收到的外差信号的频率为 1 MHz。要实现很高的相位测量精度,在这样高的频率下是相当困难的,因此在电信号处理中采用了电子外差技术,一方面降低外差信号的频率,另一方面消除光电探测器的非线性对测相精度的影响。最后利用数字相位测量技术,相位的测量达到了 10^{-4} 。

3.2 重复性试验

对(1)式求偏微分后可得测量精度的表达式:

$$\delta L = \frac{\lambda_s}{2} \delta \epsilon + L \frac{\delta \lambda_s}{\lambda_s} + L \frac{\delta n}{n} \quad (7)$$

该测量系统使用的数字相位计的测量精度为 10^{-4} ,由它引起的测长误差为: $14 \mu\text{m}$ 。热稳频激光器频率稳定性为 2.5×10^{-6} ;空气折射率的波动约为 2×10^{-6} ,所以整个系统测量误差为: $\delta L = 14 \mu\text{m} + 4.5 \times 10^{-6} L$, L 的单位是米。用该实验装置分别测量了 8 m 和 25 m 的距离。其测量误差分别为: 8 m 时测相误差为 0.14° ,测长误差为 0.054 mm; 25 m 时测相误差为 0.2° ,测长误差 0.077 mm,与理论分析相吻合。

3.3 比对实验

实验测量了在 25 m 的距离上与双频激光干涉仪(HP5528)作了位移量为 280 mm 的比对实验。实验结果如图 2 所示。通过试验发现,在测量结果中存在着一个周期性的系统误差,该误差的峰值约为 1 mm。

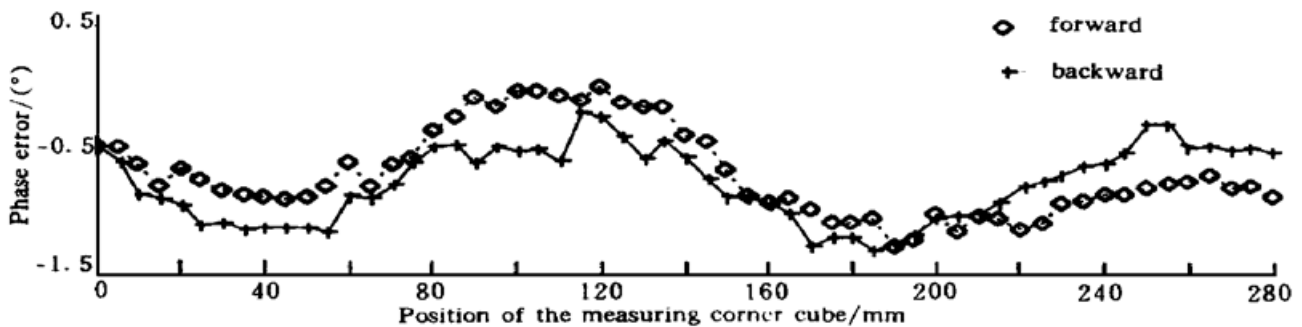


Fig. 2 Comparison experimental results with a HP laser measurement system in a distance range of 25 m

4 模耦合对测量精度的影响

干涉仪是利用双纵模 He-Ne 激光器的输出两纵模偏振正交特点将两个波长的干涉信号分开的,但是干涉仪中使用的光学零件具有非线性(或退偏性),这些非线性使线偏振光椭圆化,特别是经角隅棱镜返回光偏振态的改变^[5],使干涉仪中的检偏器不能达到完全消去另一偏振方向偏振光的目的,产生了模耦合。由于模耦合的存在,干涉仪中每个光电接收器都接收另一个模的耦合干涉信号。这种模耦合是强度叠加的同频干扰,不能利用滤波等信号处理方法去除。假设在测量过程中,模耦合占测量信号的相对比例不变,在两个光电接收器 D_1 、 D_2 上接收到的模耦合信号归一化幅值分别为 a 和 b ,则两个接收器输出信号可以分别表示为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \cos(\omega t + \varphi) + a \cos(\omega t + \varphi + \Delta\varphi) \\ I_2 &= \cos(\omega t + \varphi + \Delta\varphi) + b \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, φ_1, φ_2 为两信号相位, 将上式作数学变换有

$$I_1 = \sqrt{1 + 2a \cos \Delta\varphi + a^2} \cos \left[\omega t + \varphi + \arctan \left(\frac{a \sin \Delta\varphi}{1 + a \cos \Delta\varphi} \right) \right] \quad (9)$$

$$I_2 = \sqrt{1 + 2b \cos \Delta\varphi + b^2} \cos \left[\omega t + \varphi + \arctan \left(\frac{\sin \Delta\varphi}{b + \cos \Delta\varphi} \right) \right] \quad (10)$$

于是两波长外差干涉信号的相位差 φ 为

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\sin \Delta\varphi}{b + \cos \Delta\varphi} \right) - \arctan \left(\frac{a \sin \Delta\varphi}{1 + a \cos \Delta\varphi} \right) \quad (11)$$

图 3 是在假设 a 和 b 相等, 且等于: 0.01, 0.02, 0.03, 0.40, 0.05 时, 模耦合引起的相位测量误差, 可见: 1) 模耦合引起的相位误差与模耦合量的大小有关, 耦合量越大, 引起的误差就越大; 2) 该误差是一个固定的周期性的误差, 可以通过计算进行修正。在本试验中, 模耦合量为信号幅值的 1%, 用(11)式进行计算, 在这种情况下引起的相位误差最大值为 $\pm 1.2^\circ$, 对应测量长度为 $\pm 0.46 \text{ mm}$, 与图 2 中 25 m 时的误差峰值差约 1 mm 相符合, 从图 2 和图 3 可以看出, 理论计算和实际测量的结果非常一致。利用(11)式对测量距离为 25 m 的测量结果进行了修正, 修正结果如图 4 所示, 其中图 4(a) 和图 4(b) 分别为正向和反向测量时的测量误差修正前后结果。补偿后的测量误差为 0.14 mm。

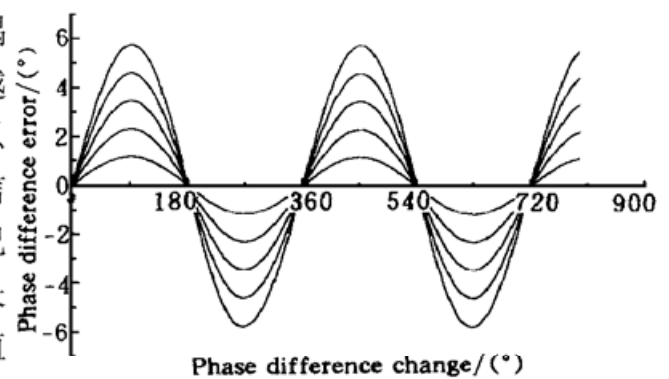


Fig. 3 Error due to the mode coupling as $a = b = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$

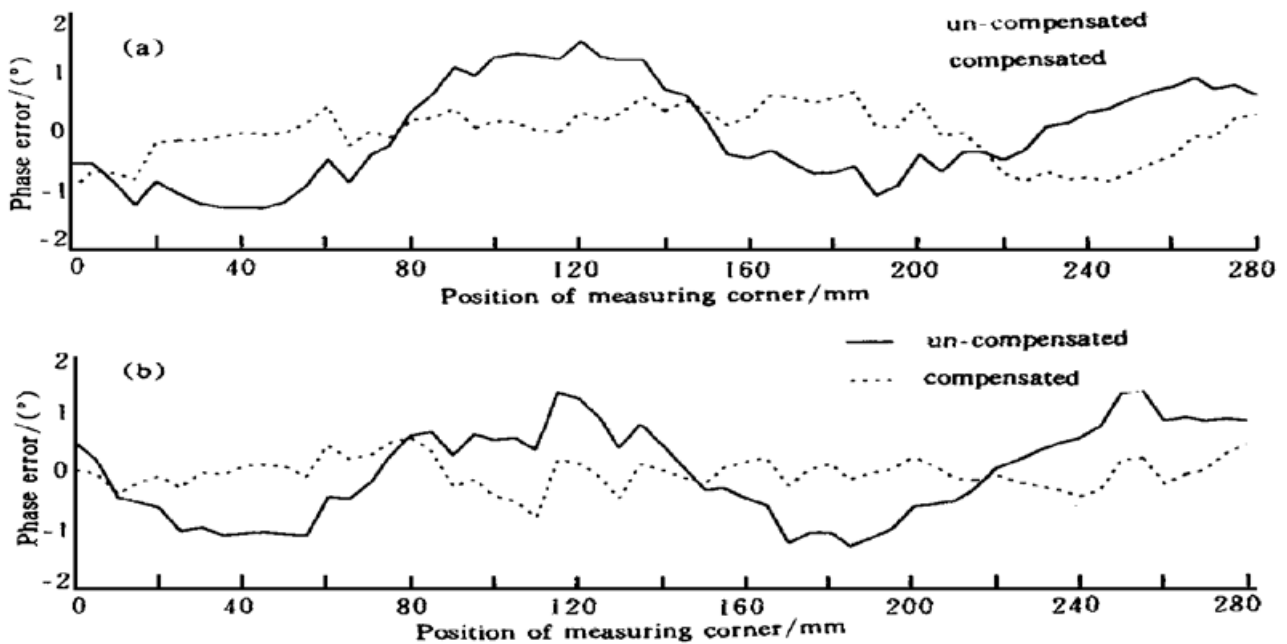


Fig. 4 Residual error curves after compensating for the error caused by mode coupling. (a) Residual error as the measuring corner cube was moved forward, (b) Residual error as the measuring corner cube was moved backward

结 论 本文叙述了用双纵模 $0.6328\ \mu\text{m}$ He-Ne 激光器作为光源、外差干涉直接测量出合成波长小数级次的外差绝对距离干涉仪的工作原理和实验分析。实验结果表明: 1) 用双纵模激光作为光源, 通过外差干涉仪测量小数级次, 提高了干涉仪的测量精度, 缩短了测量时间, 整个测量过程瞬间完成, 降低了被测长度随外界环境变化所引起的测相误差。2) 由于双波长光波共光路, 比相结果将降低光路中的空气波动等干扰对测量的影响。3) 该干涉仪利用了从激光器发出的两个模的偏振特性将两个模的干涉信号分开, 由于光学元件的非理想特性会产生模耦合, 根据理论分析和试验验证, 这种模耦合将产生一个周期性的测量误差, 且模耦合量越大, 引起的测量误差就越大。如果模耦合量确定, 通过计算可以进行补偿修正。目前在 $25\ \text{m}$ 的测量距离上取得了 $0.14\ \text{mm}$ 的测量精度, 在通常大型工作的生产及装调中这样的测量精度已可以满足多数场合的检测要求。

参 考 文 献

- [1] Tilford C R. Analytical procedure for determining lengths from fractional fringes. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(7): 1857~ 1860
- [2] 任伟明, 梁晋文. 大尺寸绝对距离测量发展综述. 计测技术, 1991, (6): 1~ 7
- [3] Dandiliker R, Thalmann R, Prongue A D. Two-wavelength laser interferometry using super-heterodyne detection. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(5): 339~ 341
- [4] 周 挺. 用于绝对距离测量的 $0.6328\ \mu\text{m}$ He-Ne 激光外差干涉仪的研究. 清华大学硕士论文, 1995.
- [5] 沃敏政等. 角隅棱镜干涉仪中光的偏振与干涉. 光学学报, 1981, **1**(5): 415~ 422

Study on a Dual-Wavelength Absolute Distance Heterodyne Interferometer

Zhao Yang¹⁾ Zhou Ting²⁾ Li Dacheng¹⁾

1), State Key Lab of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084

2), Calimetrix Inc, 815 Atlantic Avenue Suite 105, Alameda, CA 94501-2274, U.S.A.

(Received 10 December 1997; revised 10 July 1998)

Abstract An absolute distance heterodyne interferometer using a dual-longitudinal mode He-Ne laser is proposed. In this interferometer an optical heterodyne technique is used to enhance the signal/noise ratio of its opto-electrical signals. By measuring the phase difference between these two heterodyne signals, the fractional fringe of the synthetic wavelength is measured precisely and directly. Also the influence on the measuring accuracy from the mode coupling is analyzed. The compensation for this error is discussed. An accuracy of $140\ \mu\text{m}$ in $25\ \text{m}$ is obtained.

Key words heterodyne interferometer, absolute distance interferometry, phase measurement, mode coupling.