

文章编号: 0253-2239(2010)10-2947-05

用 117 μm 合成波长实现绝对距离干涉测量

梁 晶 龙兴武 张 斌 金世龙

(国防科学技术大学光电学院光电工程系, 湖南 长沙 410073)

摘要 根据以前双纵模绝对距离测量中合成波长过大导致误差较大的缺点,设计了一种新型多波长绝对距离干涉测量系统。采用 633 nm 双纵模 He-Ne 激光器中的一个纵模和 629 nm 波长的 He-Ne 激光组成 117 μm 合成波长,使用双外差干涉技术对距离改变进行精密测量。静态稳定性和动态测量实验表明,由于采用了较小的合成波长,系统的测量不确定度可以达到 $3.8 \times 10^{-6}L + 57$ nm,在 500 mm 的距离上不确定度小于 2 μm 。最后从合成波长不确定性的角度,对干涉系统中的误差作了分析。该系统如能与双纵模拍波测量作衔接则可实现对被测距离由粗至精的测量。

关键词 测量;激光干涉仪;绝对距离干涉;多波长;相位测量

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2947

Absolute Distance Measurement by Using 117 μm Synthetic Wavelength

Liang Jing Long Xingwu Zhang Bin Jin Shilong

(Department of Optoelectronic Engineering, College of Optoelectronic Science and Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract To overcome the defects of large error in two-longitudinal-mode wavelengths interferometer for absolute distance measurement, a new kind of multi-wavelength absolute distance interferometer is introduced. A double-mode 633 nm He-Ne laser and a 629 nm He-Ne laser are employed to generate 117 μm synthetic wavelength, with which distance with high precision is measured by using the double heterodyne interferometric technique. The static and dynamic experiments show that due to the shorter synthetic wavelength, the uncertainty can reach $3.8 \times 10^{-6}L + 57$ nm and the error is 2 μm within 500 mm. From the uncertainty of synthetic wavelength, the error of the new interferometer is also discussed. The interferometer could measure distance with high precision if coupled with two-longitudinal-mode beat measurement system.

Key words measurements; laser interferometer; absolute distance interferometer; multi-wavelength; phase measurement

1 引 言

干涉计量是迄今基准测量和各种精密计量中最精确的方法。在长度测量领域,近年来发展起来的多波长无导轨干涉计量技术^[1,2]抛开了传统干涉方法必须采用导轨的限制,并且不需要对干涉光的光电信号进行叠加计数,通过分析各波长干涉条纹的尾数部分 ϵ ,就可以精确计算出长度,且保留了光干涉计量的高精度。

先前已有很多的多波长测量方案采用 633 nm 双纵模 He-Ne 激光器为光源^[3-6],并利用两纵模之间的拍频作合成波长测量绝对距离。但用双纵模之

间的拍频作测量不可避免的缺点是合成波长过大(一般为 300 mm 左右),在测相精度一定的情况下,距离的测量精度就不能达到很高。鉴于此,本文提出用 633 nm 双纵模中的一个纵模和 629 nm 激光波长组成合成波长的测量方案,用于克服前述缺点。由于 633 nm 和 629 nm 激光的合成波长约为 117 μm ,如将上述合成波长应用于绝对距离测量系统,可提高对被测距离的测量精度。此方案的优点在于激光器制作工艺成熟、寿命长、造价较低,使用也较方便,系统所需的探测器及各种光学元件基本都可方便地购买到,搭建干涉系统也较容易,如能与双纵模拍频

收稿日期: 2010-01-25; 收到修改稿日期: 2010-04-02

作者简介: 梁 晶(1979—),男,博士研究生,主要从事新型激光器技术和激光干涉测量等方面的研究。

E-mail: iamliangjing@126.com

导师简介: 龙兴武(1958—)男,教授,博士生导师,主要从事光电检测技术、光学元件加工工艺学、薄膜光学与技术、新型激光器技术和激光在惯性制导技术中的应用等方面的研究。E-mail: xwlong110@sina.com

合成波长作测量衔接,则可在较大范围内高精度实现绝对距离测量。

2 绝对距离干涉测量原理简介

绝对距离干涉计量是剩余小数法的发展。Tilford 在此理论上作出了重要的贡献^[7],他给出了一组利用剩余小数(在多波长测量中即为各干涉条纹的小数偏离部分 ϵ)求解被测距离的数学公式。

以双波长测量为例,设参与干涉测量的两光波分别为 λ_1 和 λ_2 (不妨设 $\lambda_1 > \lambda_2$),对于被测距离 L ,用两波长分别测量后,有如下公式成立:

$$L = (\lambda_1/2)(m_1 + \epsilon_1), \quad (1)$$

$$L = (\lambda_2/2)(m_2 + \epsilon_2), \quad (2)$$

式中 m_1, m_2 为对应于波长 λ_1 和 λ_2 下干涉级的整数部分, ϵ_1, ϵ_2 为对应小数部分。求解(1)和(2)式得

$$L = \frac{1}{2} \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} [(m_2 - m_1) + (\epsilon_2 - \epsilon_1)], \quad (3)$$

令

$$\lambda_s = \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad m_s = m_2 - m_1, \quad \epsilon_s = \epsilon_2 - \epsilon_1,$$

则有

$$L = (\lambda_s/2)(m_s + \epsilon_s), \quad (4)$$

式中 λ_s 即为两波长的合成等效波长, m_s 和 ϵ_s 则分别为 λ_s 干涉级的整数部分和小数部分。只要选择较接近的两个波长,其合成波长 λ_s 将比原波长 λ_1 和 λ_2 大得多。设距离的初测值为 L_c , 不确定度为 ΔL_c , 若选定合适的激光波长,使得初测不确定度满足条件 $\Delta L_c < \lambda_s/4 - \Delta L_p$, 其中 ΔL_p 为干涉级小数测量的不确定度,则

$$m_s = \begin{cases} \text{int}[2L_c/\lambda_s], & \epsilon_s > 0 \\ \text{int}[2L_c/\lambda_s] + 1, & \epsilon_s < 0 \end{cases} \quad (5)$$

由距离的初测值,经过(5)式可以得出 m_s , 这样只需通过读出两波长下干涉条纹偏离部分 ϵ_1 和 ϵ_2 , 并结合(4)式精确计算出距离且测量结果的精度不受初测精度的影响。

3 117 μm 合成波长绝对距离干涉测量系统设计方案

3.1 波长的选择

由前面分析可知,合成波长本质是由若干条具有一定频差的激光谱线构成。以双波长为例,频差越大合成波长越小。较小的频差可由 Zeeman 效应产生, Zeeman 双频激光器可提供 3 MHz 频差的激光;利用晶体双折射效应的双频激光器可以提供

1 MHz~1 GHz 以上的频差;在此频差段还可用声光晶体移频的方法获得 40~80 MHz 的稳定频差;利用激光器内的纵模间隔则可以获得稳定的吉赫兹量级频差(根据激光器腔长不同)。频差较小对应合成波长较大,因此在同等测相精度条件下,距离的测量精度就不可能很高。例如,以通常双纵模 1 GHz 频差来算,合成波长 $\lambda_s = 0.3 \text{ m}$, 要使测量精度突破微米量级有难度。因此,如果能够有频差更大且稳定度较高的谱线组成合成波长加入干涉系统,并满足 λ_s 在 80~200 μm 之间,则测量精度可在原有基础上大为提高。这一级合成波长完全可以由激光器内两根相邻跃迁谱线构成。

鉴于此,本文提出了利用 He-Ne 激光器 633 nm 波段两根相邻谱线组成合成波长的测量方案,即利用 633 nm He-Ne 激光的双纵模中的一个纵模和 629 nm 谱线构成干涉测量系统。若选用上述两个波长,其合成波长 $\lambda_s = 117.14 \mu\text{m}$ 。

3.2 干涉仪原理图

采用双外差干涉法^[8,9]建立干涉测量系统如图 1 所示, 629 nm He-Ne 激光器发出频率为 ν_1 的光, 经过偏振分光镜 PBS1 分光后, 其中偏振方向平行的光束通过 AOM1 产生频移 f_1 , 然后与未经频移的另一束垂直偏振光在 BS 上合光形成频差为 f_1 的外差信号。同理 633 nm 的激光也经合光后形成频差为 f_2 的外差信号(系统中 $f_1 = 80 \text{ MHz}$, $f_2 = 80.0015 \text{ MHz}$)。这样就有四个频率的激光在干涉系统中, 分别为 $\nu_1, \nu_1 + f_1, \nu_2$ 和 $\nu_2 + f_2$ 。四束激光汇集于 BS1 处, 并被 BS1 分成两束出射。其中一束参考光, 经偏振片被光电探测器 PD1 接收作为参考信号。另外一束经过 PBS3 分光后, 其中两路未经频移的垂直偏振光 ν_1 和 ν_2 进入测量光路被 MCC 返回, 由于中间经过两次 $\lambda/4$ 波片, 光束被 PBS3 反射, 而另两路经过频移的平行偏振光 $\nu_1 + f_1$ 和 $\nu_2 + f_2$ 被角锥棱镜 RCC 反射回, 四路光反射合光后透过偏振片 P 入射至光电探测器 PD2 上。至此, PD2 上接收到的四路光信号振幅为

$$a_1 = A_1 \exp\left[i\left(2\pi\nu_1 t - 4\pi \frac{\nu_1 L}{c}\right)\right], \quad (6)$$

$$a_2 = A_2 \exp\left[i\left(2\pi\nu_2 t - 4\pi \frac{\nu_2 L}{c}\right)\right], \quad (7)$$

$$a_3 = A_3 \exp\left\{i\left[2\pi(\nu_1 + f_1)t - 2\pi \frac{\nu_1 + f_1}{c} z\right]\right\}, \quad (8)$$

$$a_4 = A_4 \exp\left\{i\left[2\pi(\nu_2 + f_2)t - 2\pi \frac{\nu_2 + f_2}{c} z\right]\right\}. \quad (9)$$

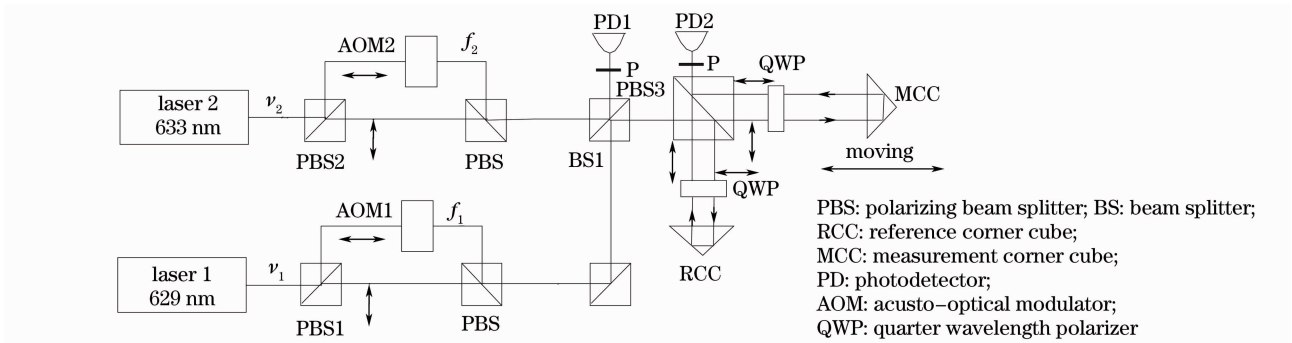


图 1 双波长干涉系统原理图

Fig. 1 Configuration of the interferometer with 2 He-Ne lasers

(6)式和(7)式表示测量光路,(8)式和(9)式表示参考光路; A_i 表示各路光的振幅, ν_1 和 ν_2 表示两

激光器出射光的频率; Z 为两参考光路的光程。因此 PD2 上接收到的光强信号为

$$I_m(t) = |a_1 + a_3|^2 + |a_2 + a_4|^2 = (a_1 + a_3)(a_1^* + a_3^*) + (a_2 + a_4)(a_2^* + a_4^*). \quad (10)$$

把(6)~(9)式代入(10)式并滤除掉高频和直流项可得

$$I_m(t) = 2A_1A_3 \cos(2\pi f_1 t + 4\pi \frac{\nu_1}{c} L - 2\pi \frac{\nu_1 + f_1}{c} z) + 2A_2A_4 \cos(2\pi f_2 t + 4\pi \frac{\nu_2}{c} L - 2\pi \frac{\nu_2 + f_2}{c} z). \quad (11)$$

目前为止被测距离仍然和等效波长 λ_s 没有联系,但如把(11)式中的信号通过一个自混频器后可以得到如下形式:

$$\begin{aligned} S(t) = I_m^2(t) = & 2A_1^2A_3^2 \cos\left(4\pi f_1 t + 8\pi \frac{\nu_1}{c} L - 4\pi \frac{\nu_1 + f_1}{c} z\right) + 2A_2^2A_4^2 \cos\left(4\pi f_2 t + 8\pi \frac{\nu_2}{c} L - 4\pi \frac{\nu_2 + f_2}{c} z\right) + \\ & 4A_1A_2A_3A_4 \cos\left[2\pi(f_1 - f_2)t + 4\pi \frac{\nu_1 - \nu_2}{c} L - 2\pi \frac{\nu_1 + f_1}{c} z + 2\pi \frac{\nu_2 + f_2}{c} z\right] + \\ & 4A_1A_2A_3A_4 \cos\left[2\pi(f_1 + f_2)t + 4\pi \frac{\nu_1 + \nu_2}{c} L - 2\pi \frac{\nu_1 + f_1}{c} z - 2\pi \frac{\nu_2 + f_2}{c} z\right]. \end{aligned} \quad (12)$$

式中低频项 $(f_1 - f_2)$ 含有与等效波长 $\lambda_s = (\nu_1 - \nu_2)/c$ 及被测距离 z 有关的项,通过滤波器除去高频信号,得到

$$S(t) = A \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \phi]. \quad (13)$$

(13)式即为所需测量信号, ϕ 为包含了被测距离和参考距离在内的相位项。实际测量距离的时候,参考光程 z 不变,而 L 的改变量 ΔL 会带来 ϕ 的相位变化,且相位变化可表示为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{c}(\nu_1 - \nu_2) \times 2\Delta L = \frac{4\pi}{\lambda_s} \Delta L. \quad (14)$$

所以只要测得信号 $S(t)$ 在测量过程中相对于参考信号的相位改变就可以计算出绝对距离的改变量 ΔL 。

把 PD1 处接收到的参考信号 $I_r(t)$,也经过类似上面的处理得到新的参考信号 $R(t)$:

$$R(t) = B \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \phi_0], \quad (15)$$

式中 ϕ_0 为参考信号初始相位。

由于 $S(t)$ 和 $R(t)$ 具有相同的频率,因此可通过

相关运算等测相方法得到信号的相位改变。至此,可在低频 $f_1 - f_2$ (图 1 中为 15 kHz)下,测出由 λ_1 和 λ_2 组成的合成波长 λ_s 的相位改变。

4 干涉测量实验

如前所述 117 μm 合成波长由 633 nm 和 629 nm 两支 He-Ne 激光器产生,把上述两波长引入干涉测量系统,经两探测器分别输出参考、测量信号,再通过混频滤波电路把距离信息解调出来。由于合成波长较短,因此具有测量精度较高的优点,但缺点也是明显的,即单值确定区间 $\lambda_s/2$ 较小。

4.1 静态稳定度测量

为了清晰地看出静止状态时干涉仪的测量精度,把干涉仪停留在 $L=500$ mm 处作为测量零点,移动测量角锥棱镜,使 $\Delta L=25$ μm 。对干涉仪静态时的测量稳定度做实验,实验结果如图 2 所示。

图 2 示出了在改变 $\Delta L=25$ μm 后,静态时干涉仪的测量结果,分别测量 200 次,每次采样时间 2 s。

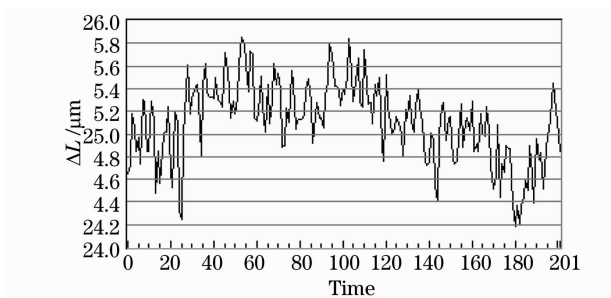


图 2 静态测量

Fig. 2 Static measurement

图中位移测量最大误差 $\pm 1 \mu\text{m}$, 200 次测量标准差 $0.53 \mu\text{m}$ 。

4.2 动态位移测量

把图 1 中的角锥棱镜 MCC 置于可以提供高精度单向移动的三维平台上, 实现被测物体的位移改变。同时使用位移测量精度为 $1 \mu\text{m}$ 的电感测微仪 (DGS6B) 对该位移改变作同步对比评测。

由于该合成波长单值确定区间 $\lambda_s/2$ 仅有 $58.57 \mu\text{m}$, 因此以 $50 \mu\text{m}$ 区间作位移测量实验。首先单方向移动角锥棱镜, 每 $10 \mu\text{m}$ 间隔记录下干涉仪测量所得数据, 单点重复测量 20 次。当位移改变 $50 \mu\text{m}$ 后再反方向移动角锥棱镜, 同样每 $10 \mu\text{m}$ 间隔记录下干涉仪测量数据, 实验结果如图 3 所示。

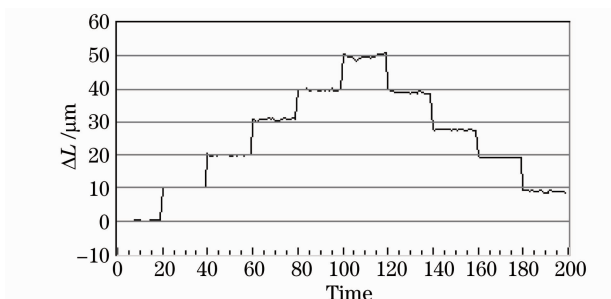


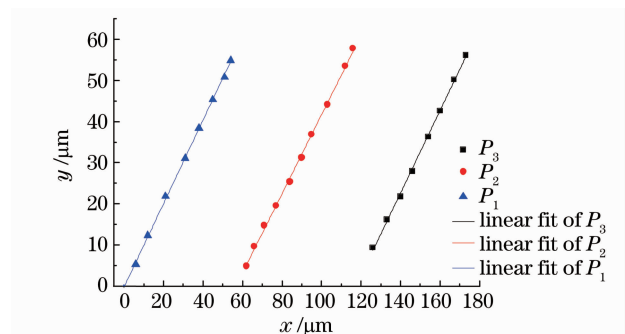
图 3 动态位移测量

Fig. 3 Dynamic displacement measurement

图 3 中每次测量耗时 2 s (整个往返过程耗时 400 s), 从图中看出, 对于 $10 \mu\text{m}$ 间隔的位移改变量, 干涉仪均能给出正确测量结果。还可以看到, 在测量至 $50 \mu\text{m}$ 后由于运动方向改变, 所测位移存在一个约 $2 \mu\text{m}$ 的系统误差。

为了验证合成波长的单值测量区间, 使角锥棱镜单方向移动 $180 \mu\text{m}$, 同时记录下干涉仪所得测量数据如图 4 所示。

图 4 中 x 轴为由电感测微仪中的读数, y 轴表示由干涉仪中测量得到的位移结果。图中所作的坐标点为一一对应的实际测量值, 三条直线则为对测量值的线性拟合。可以看出, 由于该级合成波长单

图 4 $180 \mu\text{m}$ 范围动态位移测量Fig. 4 Dynamic displacement measurement in the range of $180 \mu\text{m}$

值确定区间 $\lambda_s/2 = 58.57 \mu\text{m}$, 因此每经过一个单值区间测量值均重复一次。对于 $180 \mu\text{m}$ 的测量范围, 干涉仪的输出值经历了三个周期 (分别用 P_1 , P_2 , P_3 表示)。三条拟合直线与 x 轴的交点即为每个测量周期的起点。

5 误差分析

干涉系统的光源由一支 633 nm 波长的双纵模 He-Ne 激光器与另一支 629 nm 波长 He-Ne 激光器组成, 两台激光器均由热膨胀系数较低的微晶玻璃制造。对于双纵模激光器, 采用等光强法稳频并取出其中一个纵模作为干涉仪中的 633 nm 单波长, 该稳频方法很多文献^[10,11] 已有介绍。这里给出与中国计量科学研究院 629 nm 碘稳激光器拍频测量后的实验结果, 频率稳定度用阿伦方差表示: 0.1 s 的相对阿伦方差为 6.9×10^{-10} , 1 s 的相对阿伦方差为 2.8×10^{-10} 。频率复现性比稳定度要低一个数量级, 为 5×10^{-9} 。

实验所采用的 629 nm 激光是由教研室独立研制成功的内置法布里-珀罗 (F-P) 标准具 He-Ne 激光器产生的^[12~14]。采用内置 F-P 标准具方法选择谱线克服了原先激光器内选线方法的不足, 通过选择合适的标准具长和反射率, 使相邻谱线具有不同的损耗, 从而达到抑制强线 (633 nm) 增益, 使弱线 (629 nm) 起振出光的目的。该方法与棱镜或光栅选线法相比具有结构紧凑、简单、输出功率高, 且可单谱线单纵模振荡的特点, 非常适合作为多波长绝对距离测量的光源。但该波长激光器由于缺乏高精度的稳频手段, 目前只能通过小抖动稳频法, 把激光频率稳定在增益曲线的峰值处。由于缺乏高稳定的频率基准, 因此对其频率不确定度测量采用间接测量的方案, 即用两支相同的 629 nm 波长稳频激光

器进行自拍,并测量其频率波动。激光频率短期稳定度,5 s 的相对阿伦方差为 5.7×10^{-10} ,测量一小时内,最大频率漂移 9.9 MHz,换算成光波频率相对标准不确定度为 2.1×10^{-8} 。

从误差公式出发,可以估算使用该合成波长测量时产生的误差(暂不考虑空气折射率波动带来的误差),对(4)式作微分可得

$$dL = (\Delta\lambda_s/2)(m_s + \epsilon_s) + (\lambda_s/2)(\Delta\epsilon_s) = L \times \frac{\Delta\lambda_s}{\lambda_s} + \frac{\lambda_s}{2} \times \Delta\epsilon_s. \quad (16)$$

合成波长小数部分的测量误差 $\Delta\epsilon_s = 1/1000$ 。在(16)式中由于 117.14 μm 合成波长是由 629 nm 和 633 nm 两支各自独立振荡的激光器拍频获得,因此其合成波长的不确定度为

$$\frac{\Delta\lambda_s}{\lambda_s} = \sqrt{\left(\frac{\lambda_s}{\lambda_1} \times \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_2} \times \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2}\right)^2}. \quad (17)$$

如前述,把 633 nm 波长不确定度 $\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = 5 \times 10^{-9}$ 及 629 nm 波长不确定度 $\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = 2.1 \times 10^{-8}$ 代入(17)式可得

$$\frac{\Delta\lambda_s}{\lambda_s} = 3.8 \times 10^{-6}. \quad (18)$$

因此由合成波长频率稳定度及测相决定的测量误差为

$$dL = 3.8 \times 10^{-6} \times L + 57 \text{ nm}. \quad (19)$$

由(19)式可以看出,最大的误差来源是合成波长不确定度,如果能进一步改善两根谱线的波长不确定度,测量精度可进一步提高。此外,由(19)式可知,测量误差与被测距离的起始值 L 有关。图 2 实验中被测距离起始值 $L = 500 \text{ mm}$,所以该处的最大测量误差为 2 μm 。

6 结 论

介绍了一种新型多波长绝对距离干涉测量系统的设计方案,提出了用双纵模 633 nm 和 629 nm 光作为光源构成合成波长的方法,对被测距离实现高精度测量。理论计算及实验表明,测量误差可达 $dL = 3.8 \times 10^{-6} \times L + 57 \text{ nm}$ 的水平。使用 629 nm 波长作绝对距离干涉测量优点在于相比以前的测量手段,该方法可以提供更高的测量精度,缺点则是单值确定区间较小以及缺乏高精度的稳频手段,如能与双纵模拍波测量作衔接则可实现对被测距离由粗至精的测量。

参 考 文 献

- Jin Guofan, Li Jingzhen. Laser Metrology[M]. Beijing: Science Press, 1998
金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- Yin Chunyong. Modern Interferometric Measuring Technique [M]. Tianjing: Tianjin University Press, 1999. 194~230
殷纯永. 现代干涉测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999. 194~230
- Suo Rui, Fan Zhijun, Li Yan *et al.*. Dual-frequency laser interferometer present state and development [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(4): 251~253
所睿, 范志军, 李岩等. 双频激光干涉仪技术现状与发展[J]. 激光与红外, 2004, **34**(4): 251~253
- Zhao Yang, Zhou Ting, Li Dacheng *et al.*. Study on a dual-wavelength absolute distance heterodyne interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4): 1274~1278
赵洋, 周挺, 李达成等. 双波长绝对距离外差干涉仪的研究[J]. 光学学报, 1999, **19**(4): 1274~1278
- Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin. Study on a new kind of multi-wavelength absolute distance interferometer [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(5): 681~683
梁晶, 龙兴武, 张斌. 一种新型多波长绝对距离干涉测量系统的研究[J]. 光学技术, 2008, **34**(5): 681~683
- Zhou Zhaofei, Zhang Tao, Zhu Mucheng *et al.*. Research on the laser beat-wave interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 101~104
周肇飞, 张涛, 朱目成等. 双纵模激光拍频干涉仪的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 101~104
- Charles R. Tilford. Analytical procedure for determining length from fractional fringes [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(7): 1857~1860
- G. Margheri, C. Giunti. Double-wavelength superheterodyne interferometer for absolute ranging with submillimeter resolution: results obtained with a demonstration model by use of rough and reflective targets[J]. *Appl. Opt.*, **36**(25): 6211~6216
- R. Dandliker, R. thalmann, D. Prongue. Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection[J]. *Opt. Lett.*, **13**(5): 339~341
- Zhang Hui, Shen Naizheng. Studies on the spectrum and frequency repletion of double-mode He-Ne laser with frequency stabilization [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(7): 1009~1012
张辉, 沈乃微. 双纵模氦氖激光器的光谱与频率复现性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(7): 1009~1012
- Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin. Stability analysis of beat frequency in double-longitudinal-mode He-Ne laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1301~1304
梁晶, 龙兴武. 双纵模 He-Ne 激光器的拍频稳定度分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1301~1304
- Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. Spectral selection in He-Ne laser by internal F-P etalon [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3108~3113
梁晶, 龙兴武, 张斌等. 一种内置 F-P 标准具选择 He-Ne 激光器内谱线的方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3108~3113
- Gao Bolong, Ding Jinxing, Long Xingwu *et al.*. Green (yellow, green) He-Ne laser with internal cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12): 1617~1621
高伯龙, 丁金星, 龙兴武等. 全内腔绿(黄、橙)光 He-Ne 激光器[J]. 光学学报, 1995, **15**(12): 1617~1621
- Long Xingwu, Yang Kaiyong, Huang Yun *et al.*. Green He-Ne laser with internal cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1639~1643
龙兴武, 杨开勇, 黄云等. 全内腔绿光 He-Ne 激光器[J]. 光学学报, 2005, **25**(12): 1639~1643