

# 微小光程差的光拍相位检测

徐炳德

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

## 提 要

本文讨论了双稳频双频激光高斯光束光拍检测程差的方法。报道了用这种方法检测微小光程差,其灵敏度达 $1\text{\AA}$ 。

## 一、前 言

由于光频率甚高( $10^{14}$  Hz量级),无法直接探测光的相位,因此,光程差检测的传统方法都是干涉强度法。即测量由光程差形成的相位差所引起的光干涉强度的变化,间接地测得光程差,其典型检测精度为 $\lambda/50\sim\lambda/100$ 。

利用光频和差频都有适当稳定度的双频激光进行差拍,我们可以得到含有两个频率光之间相位差(包含欲测光程差)的拍频信号。以此信号与共程的两个频率光得到的拍频信号相比,我们就可以测出光相位差的变化,从而测得程差的变化量,即光程差<sup>[1]</sup>。

如果双稳频双频激光\*的频差适当,这种方法达到 $1\text{\AA}$ 的检测灵敏度是不太困难的。而其测量范围,原则上由相位探测的单值范围决定,即为一个光波长。

## 二、原理分析

设激光原子谱线中心频率为 $f_0$ ,塞曼分裂后由激光器输出的上频移激光频率为 $f_+$ ,下频移激光频率为 $f_-$ ,频差 $f_+-f_-=\Delta f^{**}$ 。

由于采用相位探测,为使讨论简化而又不影响问题的实质,我们不考虑双频激光为高斯光束的场振幅部分而只讨论其相位部分,将振幅部分均归化为1,则两个不同频率激光的电场分量可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} E_+(z, \rho, t) &= \exp\left\{-i\left[2\pi f_+ t - K_+\left(z_+ + \frac{\rho_+^2}{2R(z_+)} - \varphi(z_+)\right)\right]\right\}, \\ E_-(z, \rho, t) &= \exp\left\{-i\left[2\pi f_- t - K_-\left(z_- + \frac{\rho_-^2}{2R(z_-)} - \varphi(z_-)\right)\right]\right\}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $z$ 为光传播方向坐标, $\rho$ 为光传播方向垂直截面内偏离 $z$ 轴的极径, $K$ 为波数, $R(z)$

收稿日期:1984年12月13日;收到修改稿日期:1985年1月31日

\* 利用纵向或横向塞曼(Zecman)效应光差小,光频和差频均有适当稳定度的双频激光器。

\*\* 对于横向塞曼激光, $f_0$ 为 $\sigma, \pi$ 光的平均频率; $f_+, f_-$ 分别对应 $\sigma, \pi$ 光的频率, $\Delta f$ 为 $\sigma, \pi$ 光的频差,且本文以后所述分别用脚标“+”和“-”区别两不同频率光的对应量。

是在  $z$  处光波阵面的曲率半径,  $R(z) = z[1 + (\pi w_0^2/\lambda z)^2]$ ,  $\varphi(z)$  是与  $z$  有关的相位因子  $\varphi(z) = \text{tg}^{-1}(\lambda z/\pi w_0^2)$ ,  $w_0$  为束腰半径。

将上面两个不同频率光按照同一偏振条件在光混频器上混频, 则对于非共程的两个不同频率光的混频输出信号为

$$i_1 = \alpha |E_+(z, \rho, t) + E_-(z, \rho, t)|^2 \\ = 2\alpha \left\{ 1 + \cos \left[ \left[ K_+ \left( z_+ - \frac{\rho_1^2}{2R(z_+)} \right) - K_- \left( z_- - \frac{\rho_1^2}{2R(z_-)} \right) \right] + [\varphi(z_+) - \varphi(z_-)] - 2\pi \Delta f t \right] \right\}, \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为光电转换系数, 横线表示在几个光波周期内取平均。(2) 式已考虑到光混频时的同相位迭加条件, 非共程两光束的光轴应良好重合, 因此令  $\rho_+ = \rho_- = \rho_1$ 。

对于共程的 ( $z_+ = z_- = z$ ) 两个不同频率光, 同样可得经混频后的输出信号为

$$i_2 = 2\alpha \left\{ 1 + \cos \left[ \left[ K_+ \left( z + \frac{\rho_2^2}{2R(z)} \right) - K_- \left( z + \frac{\rho_2^2}{2R(z)} \right) \right] - 2\pi \Delta f t \right] \right\} \\ = 2\alpha \left\{ 1 + \cos \left[ (K_+ - K_-) \left( z + \frac{\rho_2^2}{2R(z)} \right) - 2\pi \Delta f t \right] \right\}. \quad (3)$$

比较(2)式和(3)式, 得到非共程和共程两个光拍信号的相位差为

$$\theta = \left[ K_+ \left( z_+ + \frac{\rho_1^2}{2R(z_+)} \right) - K_- \left( z_- + \frac{\rho_1^2}{2R(z_-)} \right) \right] \\ + [\varphi(z_+) - \varphi(z_-)] - (K_+ - K_-) \left( z + \frac{K_+ \rho_1^2}{2R(z)} \right) \\ = (K_+ z_+ - K_- z_-) - (K_+ - K_-) z + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{K_+ \rho_1^2}{R(z_+)} - \frac{K_- \rho_1^2}{R(z_-)} \right) - \frac{\rho_1^2 (K_+ - K_-)}{R(z)} \right] \\ + [\varphi(z_+) - \varphi(z_-)], \quad (4)$$

利用  $K_{\pm} = (2\pi/c)[f_0 \pm (\Delta f/2)]$ , 并令  $z_{\pm} = \bar{z} \pm (\Delta z/2)$ , 利用激光器半等效腔长  $d = (\pi w_0^2/\lambda)^{[2]}$ , 则(4)式可简化为

$$\theta = (2\pi/c)(f_0 \Delta z + \Delta f \bar{\Delta z}) + \Delta\theta, \quad (5)$$

式中  $\bar{\Delta z} = \bar{z} - z$ , 为非共程两光路的平均程长  $\bar{z}$  与共程光路程长  $z$  之差。

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{K_+ \rho_1^2}{R(z_+)} - \frac{K_- \rho_1^2}{R(z_-)} - \frac{(K_+ - K_-) \rho_1^2}{R(z)} \right) + [\varphi(z_+) - \varphi(z_-)] \right] \\ = \frac{\pi}{c} \left\{ \frac{f_+ \rho_1^2}{z_+ [1 + (d/z_+)^2]} - \frac{f_- \rho_1^2}{z_- [1 + (d/z_-)^2]} - \frac{\Delta f \rho_1^2}{z [1 + (d/z)^2]} \right\} + \text{tg}^{-1} \frac{\Delta z d}{d^2 + z_+ z_-}. \quad (6)$$

$\Delta\theta$  是激光光束相干时特有的附加项。它使相位差  $\theta$  与光程差  $\Delta z$  呈非线性关系。(6) 式表示出  $\Delta\theta$  与各有关量的关系。可见, 只要作程差测量, 这一项总是存在的。但是, 对于微小程差测量,  $\Delta z$  很小,  $z_+ \doteq z_-$ , 取  $z_+$ ,  $z_-$  为大值, 且  $z \doteq z_+$ ,  $\rho_1 = \rho_2 \rightarrow 0$ , 则  $\Delta\theta$  可以很小; 当然, 在透镜变换后的束腰上混频, 通过扩束增大  $d$ , 也可使  $\Delta\theta$  很小。

光拍相位检测微小程差方法的要点还在于通过光拍相位差的变化量来测得微小的程差变化。(5) 式中  $\Delta z$  是非共程两个不同频率光所通过的全部光路中的程差, 它是光路不对称形成的程差与被测对象程差之和, 两者是混融在一起的。要求光路不对称程差远小于被测微小程差是极其困难的, 甚至是不可能的。而取相位差的变化量, 则可将光路中固有的常程差除去, 把被测微小程差变化分离出来。为此, 求(5)式的全微分

$$\delta\theta = (2\pi/c) [f_0 \delta(\Delta z) + \Delta z \delta f_0 + \Delta f \delta(\overline{\Delta z}) + \overline{\Delta z} \delta(\Delta f)] + \delta(\Delta\theta), \quad (7)$$

式中[ ]内第一项对应欲测的程差(其中包含测量过程中非共程两光路间的不稳定程差),其余各项皆为系统不稳定性的影响。如果不稳定性影响的总和与欲测程差相比足够小,以致可以忽略,则有

$$\delta\theta = (2\pi/c) f_0 \delta(\Delta z) = (2\pi/\lambda_0) \delta(\Delta z). \quad (8)$$

使用 6328 Å He-Ne 激光若要求程差检测灵敏度为 1 Å, 则由(8)式可得相应的电子学鉴相精度约为 1 m rad(或 0.05°)。即如果双频激光的频差取得适当低,这对电子学技术来说是不难达到的。

余下的问题是使(7)式中其余各项的值满足相对小量的要求。比如,还是以 1 Å 检测灵敏度为例,其余四次的总和应小于 0.1 m rad。假定采取平均分配,则每次值的允许量可定为  $2 \times 10^{-5}$  rad,按此要求,可确定系统各部分的稳定性要求及有关参数的取值范围。

由光频项  $(2\pi/c)df_0 \Delta z$  可得:当  $\delta f_0 = 10$  MHz 时,  $\Delta z = 0.1$  mm。即如果光频稳定度为  $2 \times 10^{-8}$ ,则非共程两光束的全部程差(含光路不对称程差和欲测最大程差)应在 0.1 mm 以内。

由光路光程项  $(2\pi/c)\Delta f \delta(\overline{\Delta z})$  可得:当  $\Delta f = 1$  MHz 时,  $\delta(\overline{\Delta z}) = 1$  mm。即如双频激光差频值取 1 MHz,则非共程光路平均程长与共程光路程长之差的变化量(或不稳定性)应小于 1 mm。

同样,由差频项  $(2\pi/c)\delta(\Delta f)\overline{\Delta z}$  可得:当  $\delta(\Delta f) = 100$  Hz 时,  $\overline{\Delta z} = 10$  m。即若差频变化量为 100 Hz,则允许非共程光路的平均程长与共程光路程长相差 10 m。

最后一项,附加项  $\delta(\Delta\theta)$ ,可由微分(6)式求出其一般表达式,但此式相当繁琐。

如果采取前面提到的措施,在变换束腰面上混频,此时  $z_+ = z_- = z = 0$ ,  $R(z_+) = R(z_-) = R(z) = \infty$ ,则(6)式可简化为

$$\Delta\theta = \text{tg}^{-1}(\Delta z/d), \quad (9)$$

$$\delta\theta = \frac{d \cdot \delta(\Delta z) + \Delta z \cdot \delta d}{d^2 + (\Delta z)^2}. \quad (10)$$

由(10)式,可按允许的  $\delta(\Delta\theta)$  值,根据已确定的  $\Delta z$ ,  $\delta(\Delta z)$  及  $d$  值来确定半等效腔长  $d$  的允许变化值  $\Delta d$ ;反之,由可能做到的  $\delta d$  值来确定应有的等效腔长  $2d$ ,进而选择激光腔参数或选择扩束倍率。

实际计算表明,保证 1 Å 程差检测灵敏度所相应要求的系统各部参数和稳定性,原则上都是可以实现的。因此可以认为,光拍相位检测微小光程差方法,是一种用可见光实现 Å 量级程差的无接触测量的可行方法。

### 三、实验结果及讨论

根据上述原理,我们设计了微小光程差光拍相位检测实验。实验系统示意图如图 1 所示。

实验用双稳频双频激光器为利用横向塞曼效应,输出平均波长为 633 nm,光频稳定度不低于  $1 \times 10^{-9}$ ,频差约为 60 kHz,差频稳定度优于  $1 \times 10^{-4}$  的 He-Ne 激光器。非共程光

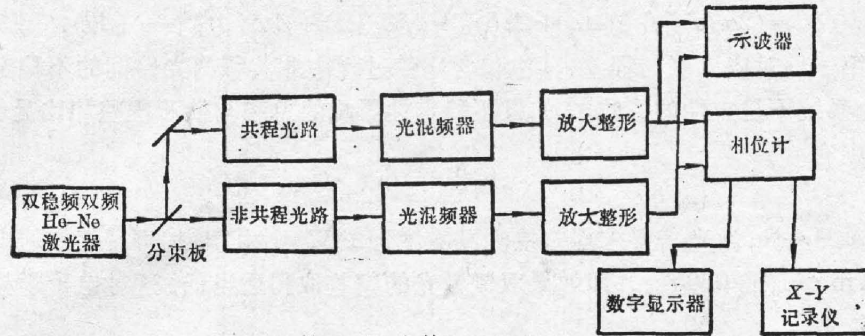


图 1 实验系统的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

路中,分别采用电光光学移相器和压电陶瓷作为微小程差的产生机构,用光电倍增管作光混频器,用双踪示波器监视两路混频输出的差拍信号,采用在输入信号频率 100 kHz 以内,其相对鉴相精度为  $\pm 0.05^\circ$  (输入信号的噪声与谐波成分应小于 0.1%) 的相位计,其输出可由显示精度为  $\pm 0.1^\circ$  的数字显示器作数字显示;也可用相位计的“模拟输出”口接 X-Y 记录仪进行记录。

在环境条件良好(恒温室,减震、深度、双层气闭)的情况下,分别对电光光学移相器和压电陶瓷产生的微小程差作了测量。

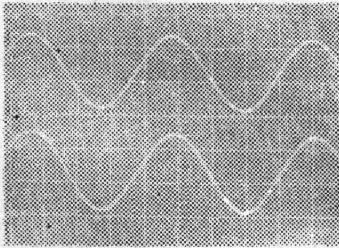


图 2 两路拍频信号的示波图

Fig. 2 Oscillogram of two-beat signal

图 2 为两路差拍信号的示波图;把加到移相器上的电压分接到 X-Y 记录仪的  $x$  轴,相位计输出接到  $y$  轴所画出的电光移相器程差——电压曲线见图 3。用同样方法画出的压电陶瓷的位移——电压曲线见图 4。图 3 和图 4 中,横向标度由记录仪  $x$  轴扫描速度决定;纵向标度由记录仪  $y$  轴的灵敏度和相位计的位相差,与输出电压的对应关系 ( $0^\circ \rightarrow 360^\circ$ , 对应  $0 \rightarrow 3600$  mV) 并通过 (8) 式换算给出。

由图 3 推算的电光移相器的半波电压,与标称值相近,但略偏低。由于测量前相位计经过自校 ( $0^\circ \rightarrow 360^\circ$ , 对应  $0 \rightarrow 3600$  mV)、测量是在几秒钟内

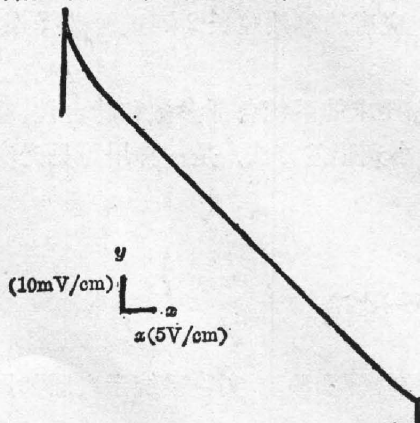


图 3 电光移相器的光程差随电压变化曲线

Fig. 3 Optical path difference versus voltage for the electro-optic phase shifter

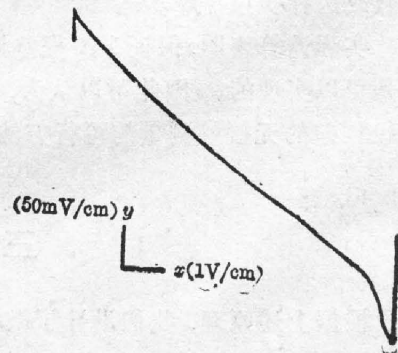


图 4 压电陶瓷的位移随电压变化曲线

Fig. 4 Displacement versus voltage for PZT

完成的、从数字显示器上确认系统在短时间内静态示值稳定,因此,所得曲线唯一对应移相器程差的变化。所测数据在相位计精度范围内应是准确的。

采用干涉法(计数、干涉条纹)对图 4 曲线的程差变化范围进行了比较,结果表明,所得值范围在计数条纹精度内是相符的。

所测曲线的线性不甚好,主要是由于分压用的滑线电阻的线性不佳造成的,这在曲线端部表现尤为明显。

#### 四、结 语

理论分析和实验结果表明,光拍相位检测方法是无接触检测微小程差的可行方法。其检测灵敏度可达到  $1 \text{ \AA}$ , 测量范围一般为一个光波长,对于单向连续变化程差情况,如采用进位计数方法还可以扩大。由于此方法采用相位探测,光强随时间起伏对测量影响甚小,因此,它比一般干涉(强度)法抗干扰,更可靠。但是,由于其灵敏度很高,因此采用此方法对环境(如振动、温度、湿度、气流等)的稳定要求也高。

最后应指出,本文第二部分讨论的是光束横截面上点元混频情况。实际上,输出总是混频面积内所有微分元输出的迭加,各微分元输出的振幅和相位都将对输出的相位有影响。只有满足等相位面重叠条件,且混频面积足够小,才能把相位噪声限制到很小。

参加实验工作的还有马月英、高唯、汪洋、刘杰同志。

实验用的双频激光器稳频器是由北京大学无线电系王楚、吴义芳同志协作提供的,在此表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] G. E. Sommargren; *Appl. Opt.*, 1981, 20, No. 4 (Feb), 610.
- [2] 叶声华主编;《激光在精密计量中的应用》, (机械工业出版社, 1980), 90.

### Measurement of tiny path difference by phase difference of optical beat

XU BINGDE

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 13 December 1984; revised 31 January 1985)

#### Abstract

A method for the measurement of optical path difference by phase difference of optical beat is discussed with respect to a Gauss beam from a twin-frequency laser with its light frequency and frequency difference stabilized. The measurement of tiny path difference is performed by this method with a measurement sensitivity of the order of  $1 \text{ \AA}$ .