

移相干涉术的新方法——声光变频移相法*

朱秋东

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

摘 要 提出了一种变频移相的方法, 并用声光器件作为变频移相器件进行了移相干涉实验。这种方法可以完成压电陶瓷移相方法无法实现的一些移相干涉测量。

关键词 移相干涉, 声光器件。

1 引 言

目前干涉测量中常用移相干涉和外差干涉等方法实现高精度的自动测量。其中以移相干涉使用较广泛也较成熟, 其测量迅速、精度高。移相是通过在一支干涉光路中加入一移相器件(常用压电陶瓷), 改变光路的光程(或相位)使干涉场产生一附加的相位改变。但在有些情况下, 如测量玻璃两表面产生的等厚干涉条纹, 这种移相方法就不能使用, 因为不可能在玻璃中间加入移相器件, 也不可能改变玻璃的厚度。本文将介绍一种用声光器件改变光的波长(或频率), 使具有一定相位差的两束干涉光之间产生一相位移动, 用以解决上述问题。

2 声光变频移相原理

2.1 变频移相原理

如果两表面之间距离 L 、折射率 n , 则由这两表面反射的波面干涉场为

$$I = a + b \cos(4\pi nL/\lambda), \quad (1)$$

式中 λ 为光的波长, 若将 λ 引入一微小的改变 $\Delta\lambda$, 则(1)式变为

$$I = a + b \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda} - \frac{4\pi nL}{\lambda^2} \Delta\lambda\right) \quad (2)$$

$$\text{令} \quad \delta = -\frac{4\pi nL}{\lambda^2} \Delta\lambda = -4\pi nL \frac{\Delta\nu}{c} \quad (3)$$

式中 $\Delta\nu$ 为光的变频量, c 为光速。则(2)式变为

$$I = a + b \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda} + \delta\right) \quad (4)$$

(4)式中 δ 即为由 $\Delta\nu$ 引入的相位变化或相位移动, 相位移动量与 $\Delta\nu$ 、 n 、 L 成正比, 与 λ^2 成反

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994年1月3日; 收到修改稿日期: 1994年3月28日

比。公式(4)的形式与压电陶瓷移相干涉公式一样,说明通过改变光的频率(或波长)同样可以使干涉场产生一附加相位移动,实现移相干涉。

2.2 移相干涉相位计算公式

在移相干涉术中,常使用“三步阶梯法”和“四步阶梯法”,步长间隔一般用特殊角,故相位计算公式较简单。而在变频移相法中,移相量受光波变频量、玻璃折射率和厚度等因素影响。其数值一般不是特殊角,故需推导出任意移相步长 δ 时的相位计算公式。

1) 三步阶梯法 如果步长为 δ , I_1 、 I_2 和 I_3 为移相量在 0 、 δ 和 2δ 时在干涉场某点采集的光强,则相位计算公式为

$$\varphi = \arctan \left[\frac{2\sin^2\delta(I_1 - I_2) - 2\sin^2\frac{\delta}{2}(I_1 - I_3)}{\sin\delta(I_1 - I_3) - \sin 2\delta(I_1 - I_2)} \right] \quad (5)$$

2) 四步阶梯法 若移相位置在 0 、 δ 、 2δ 和 3δ 时,采集光强值分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 ,相位计算公式为

$$\varphi = \arctan \left[-\frac{\sin 2\delta(I_1 - I_3) - \sin\delta(I_2 - I_4)}{\cos 2\delta(I_1 - I_3) - \cos\delta(I_2 - I_4)} \right] \quad (6)$$

如果移相阶梯数较多,则可用最小二乘拟合^[1]和傅里叶变换^[3]的方法,将相位 φ 求出。

2.3 声光变频器

实现变频移相干涉的关键在于如何找到一种好的变频方式,作者认为声光器件可以作为变频器件,它具有变频量稳定、精度高等优点。

超声波在声光介质中传播时,能使介质产生机械变形。介质的密度和折射率随超声信号的变化而变化。声光介质对入射光的作用就相当于一个光栅,使入射光波产生衍射,衍射光波的强度和频率与声波的变化成比例。如果声光作用长度较小时,产生拉曼-奈斯衍射,这种衍射是一种多级衍射。如果作用长度大于一定值时,相当于一个体光栅,只有0级和一级衍射波,行波式声光调制器的一级衍射波的频率改变量为 $\pm f_A$ ^[2], f_A 为声波频率,当入射光波与声波行进方向相对时为负号,相同时为正号。驻波式声光调制器移频量为 $\pm 2f_A$ 。

作者设计了一种声光调制器,材料为 $P_6M_6O_4$,选用行波布拉格衍射,声波中心频率为300 MHz,1级衍射效率为46%。若(3)式中 $n = 1.5$, $L = 50$ mm, $\lambda = 0.6328$ μm ,300 MHz的移频量所产生的相位移动量为 54° 。+1级、0级和-1级衍射光波各自产生的移相量为 $+54^\circ$ 、 0° 和 -54° 。利用这3级衍射光就可以实现移相干涉。

3 声光移相光路与实验

移相干涉术要求最少要移三步,所以+1级、-1级和0级都要使用,但这三束波在空间的传播方向不同,因此要采取措施使它们在空间重合,图1为一“三步阶梯”的声光移相光路。

激光束经棱镜p分成两路,光束1和光束2分别以布拉格入射角入射到声光调制器AO上,光束1的衍射波为0级和-1级,光束2的衍射波为0级和+1级。 M_1 和 M_2 将1级和0级衍射光束原路返回,即能使不同传播方向的光束重合,又能把衍射光束变频量加倍。比如,光束1衍射的-1级光,其移频量为-300 MHz,经 M_1 反射后又入射到声光调制器上,再衍

射出的-1级衍射光束与光束1同路，而且频率又移了-300 MHz，由于两次通过声光调制器，衍射两次，移频两次，移频的符号相同，因此移频量加倍。

一束光通过声光调制器一次，就会出现两个频率成份，当它们再次通过时，就会出现四个频率成份，而且在空间是重合的。但移相干涉要求只能有一个频率的光束进入干涉仪，也就是要求每个频率的光束要按一定的顺序进入干涉仪。因此通过开关 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 的开关组合，就可以选择所要频率的光束按一定的顺序输出。表1给出开关的工作状态与输出频率的关系。开关可由调制盘来实现，通光时为开，遮光时为关。 K_1 、 K_2 在一个转盘上， K_3 、 K_4 在另一个转盘上，这两个转盘在同一转轴上，若按表1确定 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 的开关顺序，当电机转动时，就可得到按表1给出的顺序输出的光束。这种方法也可扩展到四步、五步阶梯，但光路较复杂。

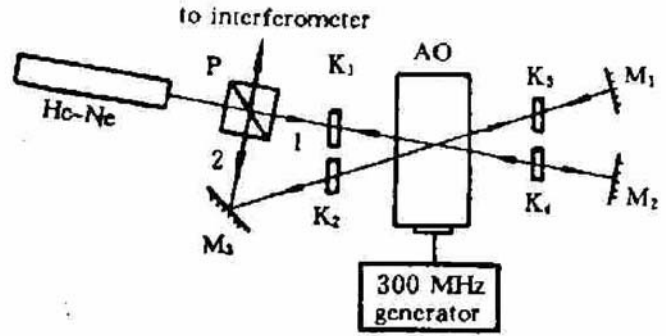


Fig. 1 The principle arrangement of phase shift with Acousto-Optic modulator

Table 1 The relationship between frequency variation and switches

K_1	K_2	K_3	K_4	frequency variation
on	off	on	off	-600 MHz
on	off	off	on	0
off	on	off	on	600 MHz

用此变频移相光路进行了实验，图2为-600 MHz、0和+600 MHz时拍下的干涉图，干涉图为一厚50 mm的玻璃的等厚条纹，此时 $\delta = 108^\circ$ 。从三张干涉图可看出，干涉条纹产生了移动，这与压电陶瓷移相产生的结果一样。



Fig. 2 Phase shifting interferogram

(a) $\Delta\nu = -600$ MHz (b) $\Delta\nu = 0$ (c) $\Delta\nu = +600$ MHz

讨 论

4.1 移相步长

用声光变频移相的方法，频率改变量只能是声波频率的倍数关系，移相量还受玻璃厚度和折射率的影响，因此移相步长不能连续可调，也不能正好是某个特殊角。在玻璃厚度较小时，移相步长也较小。虽然从理论上讲只要作三步以上的移相，就能实现移相干涉测量，但

移相步长较小时, 测量结果的误差较大。对于“三步阶梯法”其最佳移相步长在 120° 左右, “四步阶梯法”在 90° 左右。在光强的测量精度一定时, 随着移相步长的减小, 计算的相位值误差越大, 此时, 应相应提高光强的探测精度。如移相步长在 120° 时, 光强的探测误差允许到峰值的 5%, 但移相步长在 45° 时, 可允许误差小于 1%。

4.2 移相阶梯数

“三步阶梯法”是最简单的移相干涉法, 对于“四步、五步阶梯法”则较麻烦。但从抗噪声干扰能力讲, 阶梯数增加较为有利, 尤其在移相步长较小时, 效果更为显著。比如, 光强探测值含有一定噪声时, 在移相步长在 60° 时, “四步阶梯法”比“三步阶梯法”精度高一倍左右。

4.3 移相精度

移相的精度主要受激光器的频率稳定性、声光调制器电源的频率稳定性以及玻璃厚度等影响。移相量的误差可换算成光强的探测误差, 由此可计算出对相位的影响量。移相量的误差应小于步长的 1%, 声波频率的稳定性很容易高于此值, 玻璃厚度的测量精度也远高于此值。稳频激光器的频率稳定性一般为 10^{-8} , 约为 4.7 MHz, 若移频量为 600 MHz, 则刚满足此条件。因此选用频率稳定性好的激光器是很有必要的。

结 论 本文提出了一种新的移相干涉方法——变频移相法, 并对这种方法进行了理论推导。首次使用声光器件作为变频移相器件, 采用多通光路使变频量倍增, 衍射光沿原路返回, 并使不同衍射级的光束重合。变频移相方法能够解决目前常用的压电陶瓷移相方法不能解决的一些干涉测量问题, 而且移相精度较高。理论和实验证明这种方法是可行的。本文还推导出了任意移相步长时的“三步阶梯”和“四步阶梯”方法的相位计算公式, 并对变频移相方法中的若干问题进行讨论。尽管这种方法还存在光能损失较大, 系统较复杂等问题, 但仍具有很大的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 苏大图等, 光学测量与象质鉴定. 北京, 北京理工大学出版社, 1988: 268
- [2] 刘振玉, 光电技术. 北京, 北京理工大学出版社, 1990: 284
- [3] D. 马拉卡拉, 光学车间检验. 北京机械工业出版社, 1983: 370

A New Method in Phase Shift Interferometry —— Phase Shift by Frequency Change Using an Acousto-Optic Modulator

Zhu Qiudong

(Optical Engineering Department, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 3 January 1994; revised 28 March 1994)

Abstract A new phase shift interferometry through changing the frequency is given. An acousto-optic modulator is used as a frequency changer, and the experimental result of the phase shift interference is presented. The method can be used in some phase shift interference where phase shift with piezoelectric ceramics can not be used.

Key words phase shift interferometry, acousto-optic modulator.