

移相干涉技术中移相器的自校正方法*

朱日宏 王 青 陈 磊 陈进榜

(南京理工大学电光学院, 南京 210094)

摘 要 移相干涉技术(PSI)是 80 年代兴起的一门干涉图形自动识别技术, 移相器作为移相干涉技术的关键部件其移相误差将直接影响到移相干涉技术的干涉图的识别精度。本文提出了一种移相器的自校正方法, 即利用移相干涉仪的自身系统, 通过快速傅里叶方法, 对移相器进行逐步逼近校正。结合移相式红外干涉仪的研制, 给出了一组移相器的自动校正的实验, 实验表明, 校正后的移相器的非线性误差可由原来的 5% 降低到 0.2%。

关键词 移相干涉术, 移相器, 压电晶体。

1 引 言

自 70 年代 Brunning 等人提出条纹扫描法以来^[1], 移相干涉术(PSI)在 80 年代已经得到很大的发展^[2], 目前几乎被应用到各类的干涉仪之中。作者在研制可见光波段和红外波段的各种类型的干涉仪(包括 Twyman-Green、Fizeau 和球波面干涉仪)时, 都引入了移相干涉技术, 使干涉图的识别由定性上升到定量, 大大地提高了干涉仪的测试精度。移相式干涉仪中, 移相干涉技术复原被测波面的精度主要受到移相器的移相误差的影响, 解决移相误差的影响一般有两种方法: 一是寻找一种对移相误差不敏感的移相干涉术的算法; 二是尽量消除移相器的误差。作者在干涉仪的研制过程中这两种方法均采用, 在算法上采用了移相干涉术重叠四步平均法^[3], 在移相器的误差校正方面采用了快速傅里叶变换的自校正方法。

在移相干涉仪中, 一般用压电晶体(PZT)作为位移驱动器, 压电晶体及相应的机械固定和导向装置组成移相器。移相器与其驱动源、控制源构成了干涉仪的移相系统。干涉仪在测量时, 移相系统在计算机的控制下, 逐步驱动标准参考镜作等间隔平移, 实现移相调制。为了保证测量精度, 移相干涉技术算法要求移相器随步进数成线性位移, 但由于压电晶体自身的特性, 它随电压伸长的特性曲线总是有一定的非线性, 而且移相器的非线性与其压电晶体的非线性有所不同, 这因为压电晶体与相应的机械结构组成移相器之后, 引入了机械结构等因素的影响, 因此必须利用干涉仪及移相系统自身来校正移相器的非线性。

本文以红外干涉仪为例, 提出了一种实用的移相器自校正方法。

* 江苏省青年基金资助项目。

收稿日期: 1997-10-13; 收到修改稿日期: 1997-12-25

2 移相器的自校正原理

对移相器进行精确的校正, 首先必须精确地测量出移相器随电压而变化的位移曲线, 该曲线是由压电晶体与相应的机械结构来决定的, 由于压电晶体特性和机械结构比较稳定, 因此移相器的固有的特性曲线是不变的, 将“空间载频外差法”^[4]应用到移相器位移测量中, 利用干涉仪自身的干涉条纹, 测量移相器随电压而变化的位移曲线。其次利用移相器的特性曲线, 通过逐次逼近方法, 寻求移相器的非线性电压校正曲线, 使移相器等间隔地位移。

2.1 移相器电压-位移特性曲线的测量方法

以红外干涉仪为例说明原理, 但这种方法几乎适用所有型式的干涉仪。将移相器与锗标准平面联结, 组成图 1 所示的移相器电压-位移特性曲线测试系统。只要配以相应的软件, 图 1 实际上就是移相式红外干涉仪。

倾斜干涉仪中的测试反射镜, 形成密集的干涉条纹, 如图 2 所示。干涉条纹的光强分布

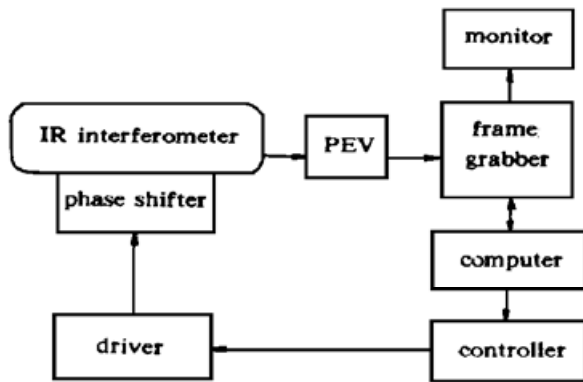


Fig. 1 The measurement system of the characteristic curve of phase shifter

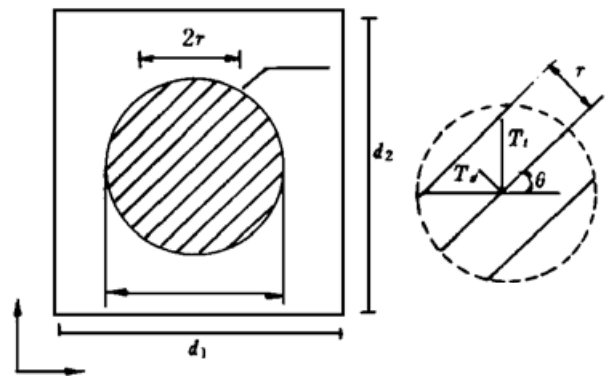


Fig. 2 Interferogram with carrier frequency

可表示为:

$$I(x, y, k) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\Phi(x, y) + 2\pi f_0(x \cos \theta + y \sin \theta) + \Psi(k)] \quad (1)$$

式中 f_0 ($f_0 = 1/T$) 为由参考反射镜偏转引入的空间载频频率, θ 为条纹与空间坐标的夹角, 如图 2 所示, $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$ 分别为干涉图的背景与调制度, $\Phi(x, y)$ 为表征被测面形的参考与测试相干光束的相位差, $\Psi(k)$ 是由压电晶体驱动参考反射镜电压变化 $V(k)$ 引入的相位变化量, 压电晶体驱动电压随步进数 k 而变, 所以可以看作为电压变化序数 k 的函数。(1) 式的复数形式为

$$I'(x, y, k) = a(x, y) + c(x, y) \exp [2\pi j(x \cos \theta + y \sin \theta)] + c^*(x, y) \exp [-2\pi j(x \cos \theta + y \sin \theta)] \quad (2)$$

式中

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp \{j[\Phi(x, y) + \Psi(k)]\} \quad (3)$$

对 $I'(x, y)$ 作二维快速傅里叶变换可算得

$$I'(u, v) = A(u, v) + C(u - f_0 \cos \theta, v - f_0 \sin \theta) + C^*(u + f_0 \cos \theta, v + f_0 \sin \theta) \quad (4)$$

上式是频域函数, 如图 3 所示, 用滤波函数 $H(u, v)$ 取出两旁瓣函数之一, 把旁瓣中心移到坐标原点, 就可以得到 $C(u, v)$, 然后作二维快速傅里叶逆变换



Fig. 3 (a) The value in frequency domain, (b) Filter window

$$F^{-1}\{C(u, v)\} = c(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y) \exp \{j[\Phi(x, y) + \Psi(k)]\} \quad (5)$$

于是就可得到相位值

$$\Phi(x, y) + \Psi(k) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{c(x, y)\}}{\text{Re}\{c(x, y)\}} \quad (6)$$

$\Phi(x, y)$ 表示了被测面的面形, 它对步进数 k 来说是一个常量。 $\Psi(k)$ 相应参考镜的位移量 $S(k)$ 可以通过正式换算

$$S(k) = \frac{\lambda}{2\pi} \Psi(k) \quad (7)$$

如图 4 所示, 不同的驱动电压给出不同相位位移 $\Psi(k)$ 及相应的微位移量 L , 这样就可精确地得到 $S(k) - k$ 或者 $S(k) - V(k)$ (驱动电压) 的关系曲线。该方法求的仅仅是相对位移量, 在求位移的过程中消除了每幅干涉图所共有的误差, 同时, 在整个干涉图中对应的点的位移比较后平均而得到整幅干涉图的位移量, 这样就减小了空间的随机噪声的影响, 因此, 相对位移的确定精度可达到 $\lambda/100$ 。

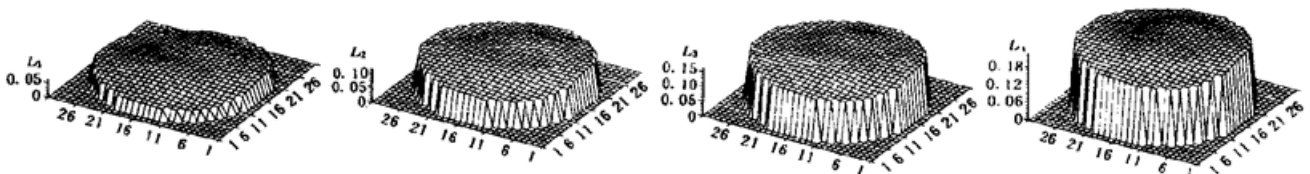


Fig. 4 Shifting wavefront under various voltages

2.2 移相器非线性的自校正方法

移相器的校正采用逐次逼近法, 其原理如图 5 所示, 首先由计算机产生一个随步进数线性变化的初始电压 $V_0(k)$, 计算机通过控制源和驱动源把电压施加到移相器上, 移相器驱动镜标准参考平板产生平移, 由 2.1 节描述的空间载频外差法求得相位位移 $\Psi_0(k)$, 同时用(7)式可以换算出移相器的位移量 $S_0(k)$, 这样就求出移相器的特性曲线, 即 $V_0(k) - S_0(k)$ 或 $V_0(k) - \Psi_0(k)$ 关系曲线。

移相器的特性曲线由组成移相器的压电晶体和机械结构决定, 它是移相器所固有的, 设想如果施加在移相器上的电压随 k 是线性变化的, 象 $V_0(k)$ 一样, 那么 $S_0(k)$ 必然随 k 成非线性变化, 反之 $S(k)$ 变会线性变化。移相干涉术的算法要求移相器必须随 k 线性位移, 即要求消除移相器的非线性。通过计算机可以产生一个理想的移相器的位移量值 $S'(k)$, 在实测的初始位移量 $S_0(k)$ 相比较, 求得移相器的位移偏差 $\Delta S(k)$

$$\Delta S(k) = S'(k) - S_0(k) \quad (8)$$

利用偏差给出一组新的校正位移量 $S_1(k)$ 值

$$S_1(k) = S_0(k) + \Delta S(k)/q \quad (9)$$

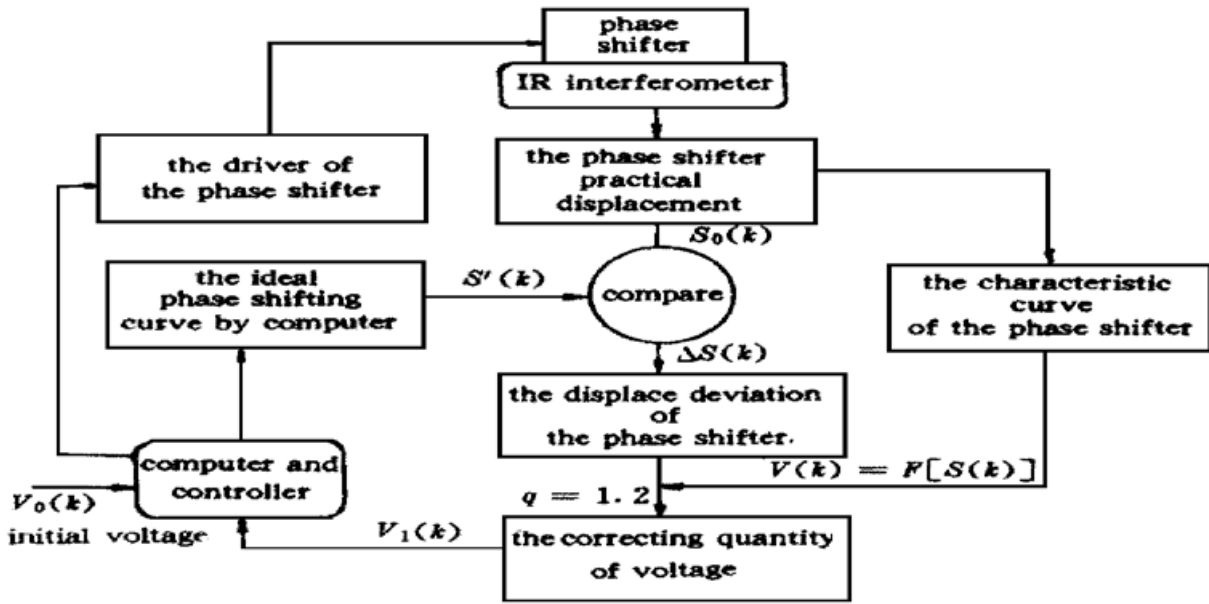


Fig. 5 Schematic diagram of self-correcting method of phase shifter

式中 q 为逐次逼近系数, 一般为大于 1 的常数。利用前面求出的移相器的 $V_0(k) - S_0(k)$ 特性曲线, 通过计算机拟合, 求出 $V(k)$ 与 $S(k)$ 之间的函数关系 $V(k) = F[S(k)]$, 通过这一函数, 由 $S_1(k)$ 求出校正电压 $V_1(k)$ 。如此反复, 直到移相器的位移偏差 $\Delta S(k)$ 满足要求为止。

需要说明的是, 移相器的校正是在“红外干涉仪”系统内部完成的, 仪器上的移相器就是被测对象, 借助于红外干涉仪自身来校正它自己的移相器, 实现了移相器的自校正。

3 移相器的自校正实验

按照图 1, 建立一个红外移相式干涉系统, 利用前述的原理, 对该系统的移相器的非线性进行校正。

对移相器的步进数取 $k = 45$ step, 在实验中逐次逼近系数取 $q = 1.2$ 。图 6(a) 为驱动电压 $V(k)$ 与 k 的关系曲线, 图 6(b) 为移相器的位移量 $S(k)$ 与 k 的关系曲线, 取初始电压 $V_0(k)$ 如图 6(a) 中的曲线 1 所示, $k - V(k)$ 成线性关系, 由于移相器的固有特性, $V_0(k) - S_0(k)$ 成非线性关系, 所以 $k - S_0(k)$ 成非线性关系, 如图 6(b) 曲线 1 所示, 该曲线 1 上由前述的空间载频外差法测量而得, 数值关系详见表 1。由表 1 有 $V(k)$ 与 $S(k)$ 的数值用二次曲线拟合, $S(k) = A + BV(k) + CV^2(k)$, 由最小二乘法可求得系数 A 、 B 、 C , 于是可求出 $V(k)$ 与 $S(k)$ 之间的函数关系

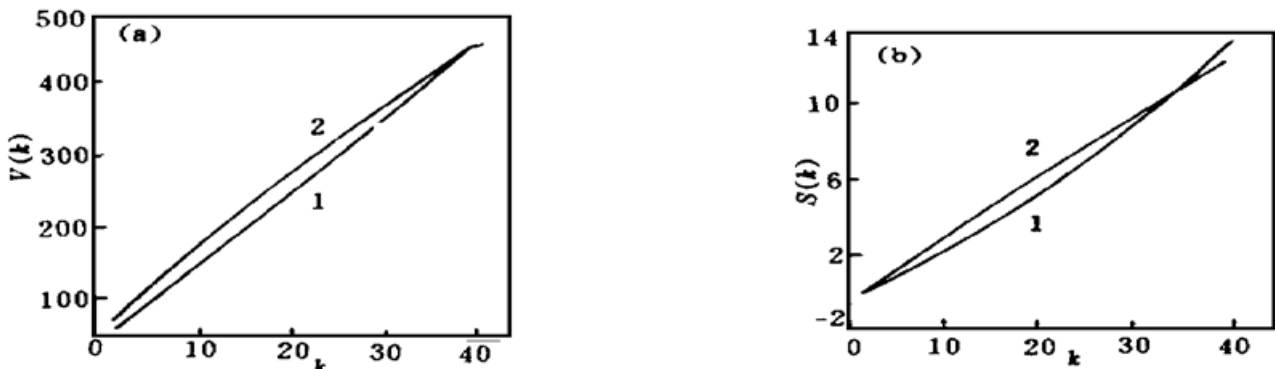


Fig. 6 (a) The curve of driving voltage $V(k)$ vs k , (b) The curve of displacement $S(k)$ vs k , curve 1 indicated before correcting, curve 2 indicated after correcting

Table 1. The relationship of k vs $V(k)$ and $S(k)$ nonlinearity is 5.24%

k	$V(k)/V$	$S(k)/\text{nm}$	k	$V(k)/V$	$S(k)/\text{nm}$	k	$V(k)/V$	$S(k)/\text{nm}$	k	$V(k)/V$	$S(k)/\text{nm}$
1	56.0	0	12	167.1	3.820	23	278.2	8.293	34	389.3	13.24
2	66.1	0.171	13	177.2	4.207	24	288.3	8.724	35	399.4	13.72
3	76.2	0.518	14	187.3	4.597	25	298.4	9.158	36	409.5	14.19
4	86.3	0.869	15	197.4	4.992	26	308.5	9.596	37	419.6	14.68
5	96.4	1.224	16	207.5	5.391	27	318.6	10.03	38	429.7	15.16
6	106.5	1.582	17	217.6	5.794	28	328.7	10.48	39	439.8	15.65
7	116.6	1.945	18	227.7	6.200	29	338.8	10.93	40	449.9	16.15
8	126.7	2.312	19	237.8	6.611	30	348.9	11.39	41	460.0	16.65
9	136.8	2.683	20	247.9	7.025	31	359.0	11.84			
10	146.9	3.058	21	258.0	7.444	32	369.1	12.31			
11	157.0	3.437	22	268.1	7.867	33	379.2	12.77			

$$V(k) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4[A - S(k)]C}}{2C} \quad (10)$$

用前述的逐次逼近法, 最终求出校正电压, 如图 6(a) 中曲线 2 所示, $k-V(k)$ 成非线性, 校正后的移相器的 $k-S(k)$ 成线性关系, 如图 6(b) 曲线 2 所示, 数值如表 2 所列。由表 2 中数据可得, 校正前 $S(k)$ 与 k 的非线性为 5.24%, 校正后为 0.18%。这样就完成了红外干涉系统的移相器的非线性校正。

Table 2. The relationship of k vs $V(k)$ and $S(k)$ nonlinearity is 0.18%

k	$V(k)/V$	$S(k)/\text{nm}$	k	$V(k)/V$	$S(k)/\text{nm}$	k	$V(k)/V$	$S(k)/\text{nm}$	k	$V(k)/V$	$S(k)/\text{nm}$
1	68.0	0	12	190.6	4.166	23	299.7	8.617	34	399.0	13.04
2	79.8	0.101	13	201.0	4.571	24	309.1	9.020	35	407.6	13.44
3	91.5	0.509	14	211.3	4.977	25	318.4	9.424	36	416.2	13.84
4	103.1	0.916	15	221.5	5.382	26	327.6	9.827	37	424.7	14.25
5	114.4	1.322	16	231.6	5.787	27	336.8	10.23	38	433.2	14.65
6	125.7	1.729	17	241.6	6.192	28	345.9	10.63	39	441.6	15.05
7	136.8	2.136	18	251.5	6.596	29	354.9	11.03	40	449.9	15.45
8	147.8	2.542	19	261.3	7.001	30	363.9	11.43	41	458.2	15.85
9	158.7	2.948	20	271.0	7.405	31	372.8	11.84			
10	169.4	3.354	21	280.7	7.809	32	381.6	12.24			
11	180.1	3.760	22	290.2	8.213	33	390.3	12.64			

结 论 在移相式干涉仪的调试中, 移相器的非线性校正非常重要, 本文在长期从事移相干涉术研究的基础上提出了一套实用的移相器自校正方法, 该方法仅仅借助被调试的干涉仪自身系统, 加上自校正的软件系统, 很方便地高精度完成移相器的校正; 另外, 移相器被校正后, 它不仅消除了压电晶体的非线性性, 同时也消除了移相器的机械结构和干涉系统引入的移相误差。

参 考 文 献

- [1] J. H. Brunning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher *et al.*, Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surface and lenses. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11) : 2693~ 2703
- [2] K. Creath, Phase-measurement interferometry techniques. *Progress in Optics*, 1988, **16** : 349~ 393
- [3] 朱日宏, 陈进榜, 王 青等, 移相干涉的一种新算法: 重叠四步平均法. *光学学报*, 1994, **14**(12) : 1288~ 1293
- [4] Jinbang Chen, Rihong Zhu, Lei Chen *et al.*, Two dimensional Fourier transform algorithm analyzing the interferogram. *Proc. SPIE*, 1991, **1553** : 616~ 625

A Self-Correcting Method of Phase Shifter in Phase Shifting Interferometry

Zhu Rihong Wang Qi Chen Lei Chen Jinbang

(*Institute of Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094*)

(Received 13 October 1997; revised 25 December 1997)

Abstract A self-correcting method to calibrate the error of phase shifter is presented. Firstly, the fast Fourier transform (FFT) was used to analyze the carrier frequency fringes, the characteristic curve of phase shifter was obtained from a series of carrier interferograms by FFT. Using this curve, then the phase shifter was corrected by an iterative self-correcting process relying on the interferometer. The self-correcting experiment with IR interferometer shown that the nonlinearity of phase shifter was reduced from 5% to 0.2%.

Key words phase shifting interferometry, phase shifter, piezoelectric transducer.