

# 利用外差干涉仪的光学系统准直方法

张 琢 孙东松 乔立杰 南京达

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 描述了基于外差干涉仪原理的用于精密空间光学的准直方法, 分析了该方法进行光学系统准直的系统误差; 结果表明, 只要较好地控制倾斜误差和照明光源的质量, 系统误差就可以消除。实验结果说明, 系统的测量误差接近探测元件的分辨率。

**关键词** 光学准直, 外差干涉仪, 像差。

## 1 引 言

在精密空间光学系统的制造和生产过程中, 各个光学元件的粘连和对心要有严格的质量保证。为了保证高精度地控制系统的准直度, 就要同步地监测整个系统的准直情况, 控制整体光学系统的对心以达到要求。要完成光学系统的对心准直测量需要花费相当的时间, 某些误差可以从性能测试中推导出来, 但很难或无法指出误差的位置。很难说明是那个光学元件或那组光学元件的失准直产生的。通常唯一可用的办法是分离各个光学元件, 然后再将它们粘接起来<sup>[1]</sup>, 再测量其性能。为了防止这种装拆光学元件的重复, 采用位置探测器和窄相干长度的激光源相结合<sup>[2, 3]</sup>的电光准直方法。本文介绍了一种精密空间光学系统的准直测量方法, 它采用外差干涉仪的基本光路, 测量光学系统各个表面之间的相对倾斜角或轴间的分离。

## 2 原 理

为了实现表面的选择能力, 这里采用相干分辨的方法, 即采用一个宽带光源与外差干涉仪相结合。光源的相干时间受到限制, 只有当信号光与另一个可控制的参考光束匹配时才能产生干涉。通过只探测干涉部分或返回信号的交流部分, 而不是不相关的直流部分, 就可以进行光学系统的表面选择测量。图 1 给出了这个系统原理图, 即相干分辨的外差干涉仪, 它可用于测量复杂光学系统内的任一个表面的倾斜(或偏心)。宽带光源通过一个变焦光学系统聚焦于测试表面的曲率中心, 该波前垂直地反射, 并由原聚焦系统再准直到原分束片, 然后部分进入位置探测器(PSD)的灵敏面。参考光束简单地传播一段适当的距离后, 返回分束片再到位置探测器表面。如果信号光与参考光之间的光程差小于光源的相干长度, 则在位置探测器或 CCD 表面会产生干涉条纹。任何其它表面的反射, 只要处在大于光源的相干长度外,

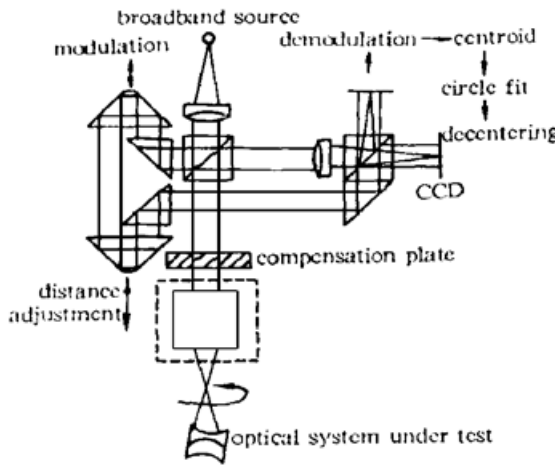


Fig. 1 Diagram of laser heterodyne interferometer with coherence resolution

都不会相干，因此不会与参考光束相干，从光学系统光瞳漫反射的光也是非相干的，也不产生散斑图形，即无相干噪声图，当然这些非相干光源减弱干涉图的对比度。但是干涉环的位置不受这些光的影响。只要这些条纹是可探测的，则系统误差就不会由无用光的存在而引入测量过程。

在光束进入位置探测器的同时，利用分束片后它也进入了 CCD 表面，由此可以监视光路的调整。这里考虑二维位置探测器情况，为简单起见只分析其  $x$  方向的信号输出情况( $y$  方向的信号输出与此类似)。位置探测器的一个特点是只响应落在其上的干涉图的重心。

考虑入射在位置探测器上的信号光和本振光的复振幅分别为

$$E_s(t) = E_s \exp(j\phi), \quad E_r(t) = E_r \exp[j(\omega t + \Phi)] \quad (1)$$

式中  $\omega$  为参考光调制频率， $\phi_s$  和  $\phi_r$  分别为信号光和参考光的相位。位置探测器的输出信号强度为

$$I(t) = |E(t)|^2 = |E_s(t) + E_r(t)|^2 = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \cos(\omega t + \Delta\phi) \quad (2)$$

式中  $\Delta\phi$  为信号光和参考光之间与时间无关的相位差，它是重心坐标的函数。通过中频滤波可以得到外差探测的差频响应部分，考虑到位置探测器输出信号是位置坐标的函数，故

$$I(x, y, t) = 2\sqrt{I_s(x, y)I_r(x, y)} \cos[\omega t + \Delta\phi(x, y)] \quad (3)$$

位置探测器在  $x$  方向的输出有左右两部分，假设位置探测器的光敏面在  $x$  方向的有效长度为  $L$ ，干涉图重心距离位置探测器的左输出端为  $x$ ，则左输出信号为

$$\begin{aligned} S_L(t) &= \int I(x, y, t) \frac{x}{L} dA \\ &= \frac{2}{L} \int \sqrt{I_s(x, y)I_r(x, y)} (\cos \Delta\phi \cos \omega t - \sin \Delta\phi \sin \omega t) dA \\ &= C_L \cos(\omega t + \mathcal{Q}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} C_L &= \sqrt{A_L^2 + B_L^2}, \quad A_L = \frac{2}{L} \int x \sqrt{I_s(x, y)I_r(x, y)} \cos[\Delta\phi(x, y)] dA \\ B_L &= -\frac{2}{L} \int x \sqrt{I_s(x, y)I_r(x, y)} \sin[\Delta\phi(x, y)] dA, \quad \mathcal{Q} = \tan^{-1}(-B_L/A_L) \end{aligned} \quad (5)$$

类似地，右端输出信号具有相同的形式。对于总输出信号，即左、右端输出信号的和，亦有类似形式的表达式

$$\begin{aligned} S(t) &= S_R(t) + S_L(t) \\ &= \int I(x, y, t) dI = C \cos[\omega t + \mathcal{Q}(x, y)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad A = 2 \int \sqrt{I_s(x, y) I_{L0}(x, y)} \cos [\Delta\Phi(x, y)] dA$$

$$B = -2 \int \sqrt{I_s(x, y) I_{L0}(x, y)} \sin [\Delta\Phi(x, y)] dA, \quad \varphi = \tan^{-1}(-B/A) \quad (7)$$

于是, 对于任意点, 调制部分的干涉条纹重心位置为

$$g(t) = \frac{LS_L(t)}{S(t)} = \frac{LC_L \cos(\omega t + \varphi_L)}{C \cos(\omega t + \varphi)}$$

$$= \frac{LC_L}{C} \cos \delta - \frac{LC_L}{C} \tan[\gamma(t)] \sin \delta \quad (8)$$

$$\gamma(t) = \omega t + \varphi, \quad \delta = \varphi_L - \varphi \quad (9)$$

如果参考光与信号光匹配, 无像差和倾斜误差, 则干涉条纹无明显移动, 进行简单的闪烁。这时两信号间无位相移动, 即  $\delta = 0$ , (8) 式第二项为零。干涉图的重心是常数, 即  $g(t) = LC_L/C$ 。如果光束准直不好, 就会存在条纹移动(例如倾斜误差), 则两信号之间存在位相移动  $\delta \neq 0$ , (8) 式的第二项正切因子使干涉图的重心随时间在  $-\infty \rightarrow +\infty$  之间变化。如果控制探测器仅周期性地接收信号, 由于对称性(8)式中的第二项变为零, 重心将只由第一项给出, 并利用(5)、(7)和(9)式可以得到下面关系

$$X_c = \frac{L(A_L A + B_L B)}{A^2 + B^2} \quad (10)$$

这时的重心是整个干涉包络图的重心, 且不随时间变化(瞬时重心随调制周期变化)。为了分析由于像差产生的系统误差程度, 并利用各种可能的对称性质, 将坐标原点平移到干涉包络图的重心。设  $(X, Y)$  表示干涉图的包络重心位置, 定义新的坐标  $p$  和  $q$  是距点  $(X, Y)$  的距离: 有  $p = x - X$ ,  $q = y - Y$ , 代入(5)式。同时, 考虑一个基本的假设是干涉光点远离位置探测器的边缘, 忽略落在位置探测器边缘的强度(否则重心就要受到影响), 于是对整个位置探测器面的积分就可以变为对以点  $(X, Y)$  为中心的一个小区域进行; 假设参考光在整个积分区域上是均匀分布的, 则有

$$A_L = \frac{2E_{L0}}{L} \int p E_s(p, q) \cos [\Delta\Phi(p, q)] dA + \frac{2XE_{L0}}{L} \int E_s(p, q) \cos [\Delta\Phi(p, q)] dA$$

$$B_L = \frac{2E_{L0}}{L} \int p E_s(p, q) \sin [\Delta\Phi(p, q)] dA + \frac{2XE_{L0}}{L} \int E_s(p, q) \sin [\Delta\Phi(p, q)] dA \quad (11)$$

式中,  $\Delta\Phi(p, q)$  主要由两部分构成, 即信号光的像差和固定的倾斜误差。因此, 它可以分解为两部分, 其中远心误差是坐标的线性函数, 即

$$\Delta\Phi(p, q) = \Delta\Phi_0(p, q) + kp \quad (12)$$

式中  $k$  为系数。代入(11)式并展开, 得

$$A_L = (2E_{L0}/L)(A_{L1} + A_{L2}) + (2XE_{L0}/L)(A_{L3} + A_{L4}),$$

$$B_L = (2E_{L0}/L)(B_{L1} + B_{L2}) + (2XE_{L0}/L)(B_{L3} + B_{L4}) \quad (13)$$

式中,

$$A_{L1} = \int p E_s(p, q) \cos [\Delta\Phi_0(p, q)] \cos(kp) dA,$$

$$A_{L2} = - \int p E_s(p, q) \sin [\Delta\Phi_0(p, q)] \sin(kp) dA,$$

$$A_{L3} = \int E_s(p, q) \cos [\Delta\Phi_0(p, q)] \cos(kp) dA,$$

$$A_{L4} = - \int E_s(p, q) \sin [\Delta\Phi(p, q)] \sin (kp) \, dA, \quad (14)$$

$$B_{L1} = \int p E_s(p, q) \sin [\Delta\Phi(p, q)] \cos (kp) \, dA,$$

$$B_{L2} = \int p E_s(p, q) \cos [\Delta\Phi(p, q)] \sin (kp) \, dA,$$

$$B_{L3} = \int E_s(p, q) \sin [\Delta\Phi(p, q)] \cos (kp) \, dA,$$

$$B_{L4} = \int E_s(p, q) \cos [\Delta\Phi(p, q)] \sin (kp) \, dA, \quad (15)$$

将相应的表达式代入(10)式, 得到探测器输出位置的一般表达式

$$X_e = X + \frac{(A_{L1} + A_{L2})(A_{L3} + A_{L4}) + (B_{L1} + B_{L2})(B_{L3} + B_{L4})}{(A_{L3} + A_{L4})^2 + (B_{L3} + B_{L4})^2} \quad (16)$$

式中, 第二项是一般情况下输出位置的系统误差。

### 3 误差分析

#### 3.1 无像差情况

如果像差为零, 则  $\cos [\Delta\Phi(p, q)] = 1$ ,  $\sin [\Delta\Phi(p, q)] = 0$ 。并考虑到  $A_{L1}$  和  $B_{L4}$  是奇函数, 对应的积分为零, 则(16)式简化为

$$X_e = X + \frac{A_{L1}A_{L3} + B_{L2}B_{L4}}{(A_{L3})^2 + (B_{L3})^2} = X \quad (17)$$

由此, 在无像差情况, 没有系统误差。

#### 3.2 旋转对称像差

如果像差是轴对称的, 光点的振幅和相位也是轴对称的, 则  $\Delta\Phi(p, q)$  是偶函数, 于是  $A_{L1}$ ,  $A_{L4}$ ,  $B_{L1}$  和  $B_{L4}$  是奇函数, 对应的积分为零, 即  $A_{L1} = A_{L4} = B_{L1} = B_{L4} = 0$ 。代入位置的一般表达式(16), 得

$$X_e = X + Error \quad (18)$$

式中

$$Error = \frac{A_{L3}A_{L2} + B_{L3}B_{L2}}{A_{L3}^2 + B_{L3}^2} \quad (19)$$

与无像差情况不同, 该表达式不能进一步简化; 必须对每个特定情况的误差项进行积分求得误差。考虑到轴对称像差和无倾斜误差的情况,  $A_{L2}$  和  $B_{L2}$  等于零, 于是(19)式的  $Error$  是零。这说明对于无倾斜误差和存在轴对称像差时, 系统不会出现误差。

#### 3.3 非对称像差

考虑如果像差是非对称的, 则光点强度是非对称的, 如旁轴的重心。在这种情况下, 即使是非外差准直仪也会遇到测量误差。如果像差是非对称的(如, 彗差, 畸变)且透镜的照明是对称的, 则复光瞳函数是厄米的, 点的变换是实数。这意味着在位置探测器平面的相位函数  $\Delta\Phi(x, y)$  相当于零, 相同的讨论也适用于无相位差情况; 结果导致系统误差为零。这说明(10)式的计算结果就是精确的干涉图包络的重心。应该注意的是, 包络的自身畸变和重心位于不希望的旁轴位置并不会通过(10)式的算法而变坏或改善。

## 4 实验和结果

根据上述分析, 如果可以保证系统的倾斜误差为零(或最小)和系统的像差为至少是中心对称的, 该方法的测量误差就不存在。那么, 测量误差就应该由测量元件本身产生, 即位置探测器的位置测量分辨率。根据图 1 的原理结构, 采用分辨率为  $1\ \mu\text{m}$ 、面积为  $4\times 4\ \text{mm}$  的位置探测器, 对一个平面玻璃进行了表面倾斜测量, 如图 2 所示。根据测量结果发现, 在  $-8\sim +8$  分的倾斜范围内, 产生了约  $1\ \text{mm}$  的位置偏移, 由此该测量系统的灵敏度为约  $0.9''/\mu\text{m}$ ; 测量的均方根误差约为  $1.5\ \mu\text{m}$ 。测量误差偏离探测器的分辨率的主要原因被认为是, 光路的调节很难达到真正的无非对称像差和无倾斜误差。

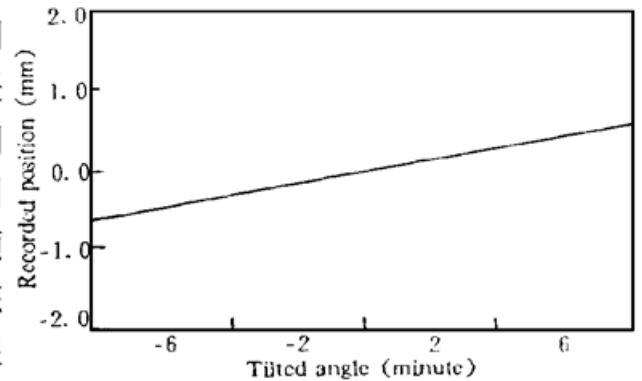


Fig. 2 Sensitivity of tilted angle measurement

**结 论** 本文提出了一种利用相干分辨的外差干涉原理进行精密光学系统准直的方法。它采用宽带激光光源照明和外差的接收方法, 能够实现光学表面的选择测量; 并利用位置探测器器件得到精密的误差位置信息。文章推导和分析了该方案的原理和系统误差, 结果表明对像差和倾斜误差不敏感。只要较好地控制倾斜误差或照明光源的质量, 就可以消除系统误差, 同时测量误差应取决于探测器的位置分辨率。实验证明了, 测量误差接近探测器的分辨率。

## 参 考 文 献

- [1] O. Katsuyuki, S. Hironobu, O. Teruji *et al.*, Separate measurements of surface shapes and refractive index inhomogeneity of an optical element using tunable-source phase shifting interferometry. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(19) : 3280~ 3285
- [2] K. Tatsuno, Y. Tsunoda, Diode laser direct modulation heterodyne interferometer. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(1) : 37~ 40
- [3] J. Chen, Y. Ishii, M. Murata, Heterodyne interferometry with a frequency-modulated laser diode. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(1) : 124~ 128

## Collimating Optical Component Systems Using Heterodyne Interferometer

Zhang Zhuo      Sun Dongsong      Qiao Lijie      Nan Jingda  
 (Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)  
 (Received 6 July 1996; revised 3 March 1997)

**Abstract** A method of collimating optical systems by a heterodyne interferometer is described and the errors of the system measurements are analyzed. It is shown that the errors can be eliminated as long as well controlling the tilt or the light quality. The experiments prove that the measuremental error is close to the resolution of the detector.

**Key words** optical collimation, heterodyne interferometer, aberration.