

波面功率谱密度中频波段的干涉测试研究

高志山 陈进榜 何 勇 张国安 吴新民

(南京理工大学电光学院 南京 210094)

提要 讨论了干涉测试表面功率谱密度(PSD)的移相式数字波面干涉仪需注意的问题,即如何保持严格相干性;引起波面测量误差的干涉场杂纹消除的原理和方法;干涉仪频响特性的标定等。

关键词 波面功率谱密度,空间频率,干涉仪

1 引 言

如将光学件波面高度函数展开成傅里叶级数,可对光学件波面质量分为三个频段来评价:(1)高频段,周期 $< 0.12\text{ mm}$,相当于微观粗糙度;(2)中频段,周期在 $0.12\sim 33\text{ mm}$ 之间;(3)低频段,周期 $> 33\text{ mm}$,相当于空间域波面面形。

对低频段的测量,最早是用数光圈的方法,后来使用移相式数字波面干涉仪测量,采用标准偏差(RMS)和峰谷($P-V$)值两个参数来评价;对高频段,早期表面疵病的检查是用接触法,现在采用显微干涉表面微观轮廓仪进行有效测量。而对中频段的测量,在过去被忽视了。

90年代,高功率激光系统,如美国国家点火装置(NIF-National Ignition Facility)或国内神光装置对大口径光学件透射或反射波面质量要求在高、中、低频波段做完整的测量控制,尤其不能忽略中频波段,因为中频段出现误差,会引起高功率激光束小角散射和非线性增益,是破坏高功率激光系统的主要根源;此外,在极紫外或新崛起的X射线光学中,中频段误差同样也引起光能小角散射,严重降低光学系统成像分辨率;再则,随着计算机控制抛光的研究和发展,小磨具的采用,会引起更大的中频段波面误差。

1995年D. M. Aikens^[1]等率先引用新评价参数——频域上的功率谱密度(PSD-power spectral density)参数来评价波面中频波段的误差。然而,新评价参数的使用对干涉仪提出新的挑战和问题,要求干涉仪具有良好的频响特性。1997年澳大利亚的P. Hariharan^[2]从理论上分析干涉仪成像系统传递函数给测量带来的误差,并提出减小误差的方法;美国从事NIF研究的实验室已探索使用新型移相干涉仪检验NIF光学件的波面中频波段。我们研究了移相式数字平面干涉仪对反射或透射波面上中频波段的干涉测试,认为必须注意如下问题:(1)要具有良好的频率特性,干涉仪要严格相干,要分析干涉场杂纹引起的波面测量误差;(2)干涉仪频响特性引起PSD测量误差,为消除此误差,需探讨干涉仪频响特性的标定测试原理和方法。本文提出解决这些问题的途径。

2 波面中频波段评定的原理和标准

如设被测透射或反射波面一维位相函数为 $\Phi(x)$, 空间总采样长度为 L , 采样点数为 N , 则

$$\Phi(\gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x) e^{-j2\pi\gamma x} dx = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \Phi(n) e^{-j2\pi\gamma n/N} \quad (1)$$

其中 γ 为空间频率, 一维 PSD 为

$$\text{PSD}(\gamma) = \Phi^*(\gamma) \cdot \Phi(\gamma) \cdot L \quad (2)$$

PSD 曲线上的尖峰, 一般指波面上具有周期性的变化结构, PSD 曲线下方包含的“面积”等于

波面 RMS 的平方, 即 $\text{RMS} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \text{PSD}(\gamma) d\gamma}$ 。

1997 年最新的国际标准 ISO 10110-8^[3] 给某一类光学元件规定 PSD 上限值, 评定表面光学质量, PSD 上限值表达式为

$$\text{PSD}_{\max} = A \gamma^{-B} \quad (3)$$

这里 A 为反应表面光滑程度的参数, B 为频率幂指数, 如 $B = 2$ 时, $A = 10^{-10} \mu\text{m}$, 超光滑; $A = 10^{-9} \mu\text{m}$, 精抛光; $A = 10^{-8} \mu\text{m}$, 一般抛光; 一般地, A 的单位可取为 $(\mu\text{m})^{3-B}$ 。 γ 取值范围为 $1/(1000D) < \gamma < 1/(1000C)$, C 和 D 分别表示可测量的最小和最大空间周期。该标准规定的方法也适用于评定反射或透射波面上中频波段的误差。

3 测试波面中频波段的干涉仪

3.1 干涉仪的相干状态及杂纹控制

为测试波面中频波段, 必须考虑干涉仪的频率测量宽度和分辨率, 这就要求干涉仪有严格的相干性, 使仪器频率响应具有较大带宽。

以往的干涉仪通常用于低频段的测试, 为消除干涉场中杂纹, 提高条纹对比, 通常在 CCD 的前焦面上加旋转漫射物—毛玻璃, 也还有在干涉仪准直物镜的前焦点加上旋转毛玻璃片, 这使仪器处于非相干或部分相干状态, 仪器的频响带宽和传递函数都低于完全相干状态, 见图 1 所示^[4]。

旋转毛玻璃撤除后, 干涉场中将出现杂散光条纹。由被测面和参考面与 CCD 靶面保护玻璃之间的多次反射引起的杂光条纹, 在移相过程中, 其光强也发生周期性变化, 这部分杂纹将引起波面测量主要误差。

由 CCD 靶面保护玻璃带来的杂光如图 2 所示, 光束 a 包含参考和测试面反射的两束光, 光场振幅为

$$a: \quad R = R_0 \cdot \exp[j(k_{1z}z + \varphi)], \quad T = T_0 \cdot \exp[j(k_{3z}z + \phi)] \quad (4)$$

光束 b 包含参考和测试面反射而又在保护玻璃内二次反射的两束光, 光场振幅为

$$b: \quad r = r_0 \cdot \exp[j(k_{2z}z + \phi_c + \varphi)], \quad t = t_0 \cdot \exp[j(k_{4z}z + \phi + \phi_c + \alpha)] \quad (5)$$

而再由 CCD 靶面反射引入的两束光 c 和 d 比 a 和 b 弱得多, 可以忽略; 式(4), (5) 中, k_1, k_2, k_3, k_4 分别表示波数 $k = 2\pi/\lambda$ 在 4 束光传播方向的投影, 如果参考光与测试光完全平行, 则 $k_1 = k_3, k_2 = k_4$ 。 φ 为参考和测试光束间的位相变化, ϕ_c 为 CCD 保护玻璃表面引入的附加位相, ϕ 为被测位相, α 为由参考面和测试面之间相对倾斜引起的附加位相, z 为光轴方向坐标, R_0, T_0, r_0, t_0 跟表面反射率有关。

干涉场光强为

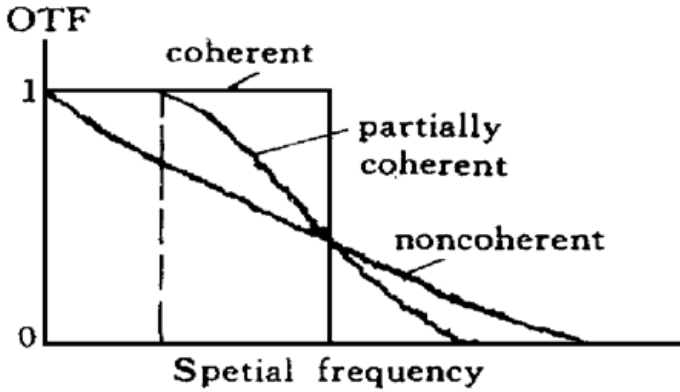


图 1 相干、部分相干及非相干系统传递函数和频响有效带宽

Fig. 1 The optical transfer functions & frequency-band width of coherence, partially coherence and non-coherence

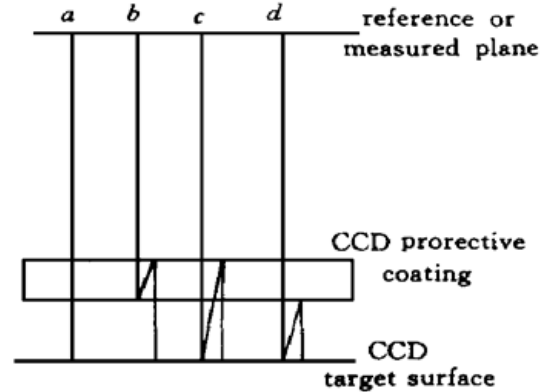


图 2 入射到 CCD 靶面上的 4 种可能光束示意图

Fig. 2 Four possible beams incident on CCD target

$$I = (R + T + r + t) \cdot (R + T + r + t)^* = C + 2R_0T_0\cos[(k_3 - k_1)z + \phi - \varphi] + 2r_0T_0\cos[(k_3 - k_2)z + \phi - \phi_c - \varphi] + 2R_0t_0\cos[(k_4 - k_1)z + \phi + \phi_c + \alpha - \varphi] \quad (6)$$

其中第一项 $C = R_0^2 + T_0^2 + r_0^2 + t_0^2 + 2r_0R_0\cos[(k_2 - k_1)z + \phi]$, 跟移相无关; 第二项为正常干涉场信号; 第三、四项为杂光条纹信号, 它与移相有关, 因此引起波面测量误差。

经数学处理(6) 式可简化表示如下

$$I = C + Q_2\cos(\phi - \varphi) - Q_1\sin(\phi - \varphi) \quad (7)$$

这里

$$Q_1 = 2R_0T_0\sin[(k_3 - k_1)z] + 2r_0T_0\sin[(k_3 - k_2)z - \phi_c] + 2R_0t_0\sin[(k_4 - k_1)z + \alpha + \phi_c]$$

$$Q_2 = 2R_0T_0\cos[(k_3 - k_1)z] + 2r_0T_0\cos[(k_3 - k_2)z - \phi_c] + 2R_0t_0\cos[(k_4 - k_1)z + \alpha + \phi_c] \quad (8)$$

通过上式, 代入不同移相算法的 φ 值及相应的光强值, 可得出被测位相。对四步移相算法, 依次

取 $\varphi = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$, 有 $\phi = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \right] =$

$\tan^{-1} \left[\frac{Q_2 \tan \phi + Q_1}{Q_2 - Q_1 \tan \phi} \right]$, 测得位相误差见(9) 式, 计

算结果见图 3, 该图表示 $\Delta\phi$ 与 α 和 ϕ_c 的关系曲线, α 为参变量

$$\Delta\phi = \phi - \phi_c = \tan^{-1}(Q_1/Q_2) \quad (9)$$

使用三步法、五步法等移相算法, 得到相同的结论, 对(9), (8) 式及图 3 讨论可知, 波面测量误差 $\Delta\phi$

(1) 随保护玻璃引入的附加位相 ϕ_c 变化, 即与保护玻璃的表面面形和楔角有关;

(2) 与被测面相对参考面的相对倾斜有关;

(3) 与被测位相 ϕ 及移相所采用的算法步数无关。

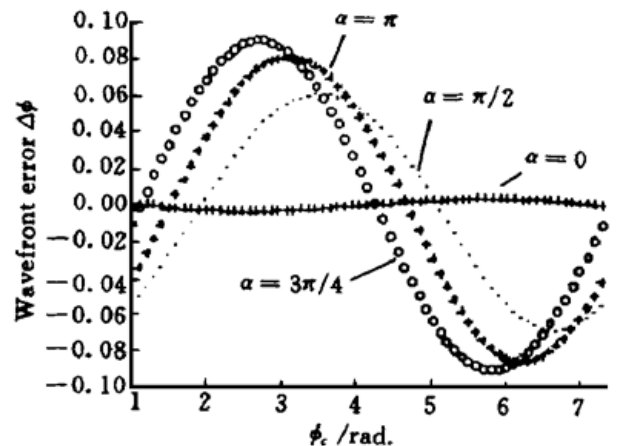


图 3 波面测量误差 $\Delta\phi$ 与 α 和 ϕ_c 的关系曲线

Fig. 3 The relation between the wavefront error and α or ϕ_c

为了减小波面测量误差,应采取以下方法:第一,被测面和参考面尽量平行(干涉场中条纹数最少),即 $k_3 = k_1, k_2 = k_4, \alpha = 0$

$$\begin{aligned} Q_1 &= 2r_0T_0\sin[(k_1 - k_2)z - \phi_c] + 2R_0t_0\sin[\phi_c - (k_1 - k_2)z] \\ Q_2 &= 2r_0T_0\cos[(k_1 - k_2)z - \phi_c] + 2R_0t_0\cos[\phi_c - (k_1 - k_2)z] \end{aligned} \quad (10)$$

此时, Q_1 中两项符号相反,相互抵消,误差减少,受保护玻璃波面的影响最小;第二,减小 r_0, t_0 ,即给保护玻璃正反面镀增透膜。

3.2 干涉仪频响特性的标定

用于光学件中频波段测试的干涉仪要求具有良好的频响特性,即当空间频率取截止频率的一半时,其传递函数值优于 60%。影响干涉仪频率响应特性的因素很多,如干涉仪光学系统、图像采集与处理系统以及采用的算法软件,等等。

标定了干涉仪的频响特性后,使用(11)式可以消除干涉仪频响特性对被测 PSD 的影响

$$\text{PSD}_r(\gamma) = \text{PSD}_i(\gamma) / [\text{TF}(\gamma)]^2 \quad (11)$$

式中, $\text{PSD}_r(\gamma)$ 为 PSD 真值, $\text{PSD}_i(\gamma)$ 为 PSD 测量值, $\text{TF}(\gamma)$ 为干涉仪的频率响应函数。

为了求取实际干涉仪的 $\text{TF}(\gamma)$, 采用以下方法

$$\text{TF}(\gamma) = \sqrt{\frac{\text{PSD}_i(\gamma)}{\text{PSD}_r(\gamma)}} \quad (12)$$

这里, $\text{PSD}_r(\gamma)$ 可通过计算得到, $\text{PSD}_i(\gamma)$ 通过被标定的干涉仪测量得到。

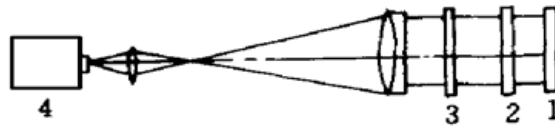


图 4 形成正弦位相光栅并标定干涉仪频响特性的原理装置图

1: 被测平面; 2: 透射平板; 3: 参考平板; 4: CCD

Fig. 4 The diagram of forming sinusoidal grating on situ and calibrating frequency response function of the interferometer

1: measured plane; 2: transmission plate; 3: reference plate; 4: CCD

例如,可通过形成频率可变的正弦位相光栅标定干涉仪的频响特性,其原理如图 4 所示(图中略去了光源部分)。由被测平面 1 前表面反射和透射平板 2 的前表面反射回来的双光束叠加形成标准的位相光栅,对应的位相函数为

$$\phi(x) = \tan^{-1} \left[\frac{A_1 \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta_1 \right] + A_2 \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta_2 \right]}{A_1 \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta_1 \right] + A_2 \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta_2 \right]} \right] \quad (13)$$

其中 A_1, A_2 为两反射光束的振幅,跟表面反射率有关; x 为垂直于光轴方向和光栅栅线方向的坐标; θ_1, θ_2 为两反射光束方向跟光轴的夹角; λ 为光波波长。通过精心调整,使 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \theta$, 如果通过镀膜,使 $A_2 \ll A_1$, 则(13)式近似为

$$\phi(x) = \frac{A_2}{A_1} \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta \right] \quad (14)$$

恰好相当于平行光经正弦位相光栅反射的波面位相函数,其频率 $\gamma = \sin \theta / \lambda$ 。该 $\text{PSD}_r(\gamma)$ 容易求得,再经干涉仪测量得 $\text{PSD}_i(\gamma)$ 及(12)式,可得 $\text{TF}(\gamma)$ 。

利用图 4 的原理装置对我们的 PSI-100 移相式数字平面干涉仪 (CCD 阵列 512×512 , 针孔为 $\phi 20 \mu\text{m}$, 移相算法为四步法) 进行标定测量, 干涉仪传递函数如图 5。由图可见, 由于频率分辨率所限, 干涉仪传递函数的频响带宽不太理想。

改善频响特性的方法: (1) 如果干涉仪光学件存在气泡、划痕、污点等疵病, 会降低干涉仪的传递函数; 因此对干涉仪光学件的光洁度、材料均匀性作重新设计, 严格控制; (2) 干涉仪能够分辨的最低频率和最高频率取决于测试孔径和探测器的分辨率; 因此增加面阵的 CCD 像素可以改善干涉仪频响特性。

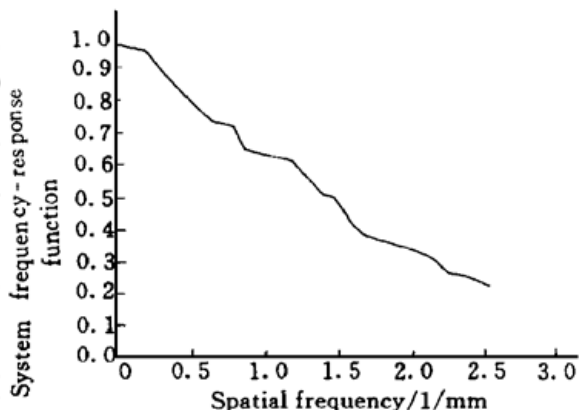


图 5 PSI-100 移相式数字平面干涉仪的传递函数

Fig. 5 The frequency-response function of PSI-100 interferometer

4 结 论

测量光学件波面功率谱中频波段的干涉仪跟传统测量面形的干涉仪相比, 要求大大提高, 不同之处明显表现在: (1) 要求干涉仪工作于严格相干状态下; 同时, 考虑消除干涉场杂纹引起的波面测量误差, 保证波面空间域的准确测量; (2) 要求增加 CCD 面阵的空间分辨率; (3) 对干涉仪光学件的材料均匀性、光洁度、污染、缺陷容限要求严格; (4) 除了对干涉仪在空间域的测量误差进行标定以外, 也要在频域对其频响特性进行标定。前三点是为了提高干涉仪的频响特性和频率分辨率, 第四点是由于干涉仪的频响特性不够理想, 通过标定, 把在测量过程中失去的频率成分恢复出来。

参 考 文 献

- 1 D. M. Aikens, C. R. Wolfe, J. K. Lawson. The use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility. *Proc. SPIE*, 1995, **2576**: 281~ 292
- 2 P. Hariharan. Interferometric measurements of small-scale surface irregularities: sources errors. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(8): 2330~ 2334
- 3 ISO10110. Optics and optical instruments—Preparation of drawings for optical elements and systems—Part 8: Surface Texture, 1997
- 4 Han Changyuan. Fundamental theory and application of information optics. Changchun: Changchun Press, 1989. 75~ 88

Interferometric Test of Power Spectral Density in Spatial Mid-frequency Band of the Wavefront

Gao Zhishan Chen Jinbang He Yong Zhang Guo'an Wu Xinmin
(Institute of Electronic Engineering & Photoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract In this paper, some problems about development of the phase-shifting laser interferometer for testing power spectral density (PSD) are discussed, for example, strictly coherence of sources; the principle and method to deduce wavefront error due to stray-light fringe pattern; calibration of frequency response function for interferometer.

Key words power spectral density, spatial mid-frequency, interferometer