

衍射谱位相恢复——一种测量波像差的新方法

王海明 (中国科学院上海光机所) 米航宇 (天津大学机械系)

phase retrieval of diffraction spectrum—a new method for measuring wavefront errors

Wang Haiming

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

Mi Hangyu

(Department of Machinery, Tianjin University, Tianjin)

Abstract: CCD linear array is used to measure the diffraction power spectrum, and the diffraction spectrum that goes through the slit and the tested optical system is obtained. By retrieval of the phase of the diffraction spectrum, the wavefront errors of the tested optical system is obtained.

1. 通常用干涉方法测量光学系统的波像差, 但由于干涉法需要参考波面, 因而在实际应用中有一定限制。Sarnik 提出了一种通过恢复点扩散函数 (PSF) 的位相半反演空间望远镜波像差的方法^[1]。但由于在像点附近能量高度集中, 探测器易于饱和; 并且对高分辨率光学系统 (例如高倍显微物镜), 常规探测器的分辨率不易满足需要。

本文提出一种简单的用衍射谱分析光学系统波像差的方法, 可以避免干涉法的一些缺点。并且由于衍射功率谱对探测器空间分辨率的要求比点扩散函数低得多^[2], 因此较易于用常规探测器 (例如 CCD 阵列) 实现。

2. 测量装置如图 1 所示。氦氖激光 (单模, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 经准直后照明狭缝, 通过待测系统, 在其后焦面上形成衍射图样, 由 CCD 线阵列 (2048 单元) 接收, 经 A/D 变换, 由计算机处理。

测量的基本原理参考图 2。令 $P(\xi, \eta)$ 表示光瞳函数, $w(\xi, \eta)$ 表示波像差函数。由于物是宽度为 b 的狭缝, 故物函数为:

$$\theta(x_1, y_1) = \text{rect} \left(\frac{x_1}{b} \right) = \begin{cases} 1 & |x_1| \leq b/2 \\ 0 & |x_1| > b/2 \end{cases} \quad (1)$$

由文献^[3], 衍射焦面上的光强分布为:

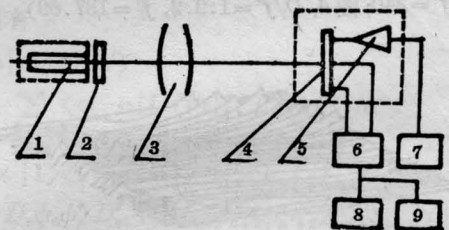


图 1

1—He-Ne 激光器及准直装置; 2—目标板 (狭缝); 3—待测光学系统; 4—CCD 线阵列 (2048 单元); 5—驱动电路; 6—NF 高速数据采集系统; 7—时钟触发电路; 8—示波器; 9—HP 9816 微机

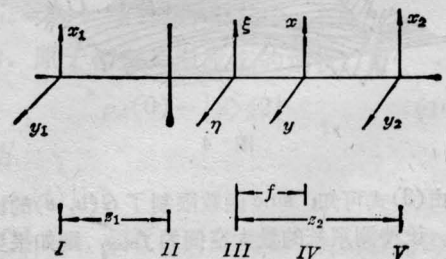


图 2

I—物面; II—物方主面; III—像方主面; IV—衍射焦面; V—像面

$$I(x, y) = \text{PSD}\{G(u, v)\} \quad (2)$$

式中 PSD 表示功率谱, 且:

$$G(u, v) = P(-\lambda su, -\lambda sv) \cdot \exp[ik v(-\lambda su, -\lambda sv)] \cdot \text{sinc}(Mbu) \cdot \exp[-i\pi\lambda s(u^2 + v^2)] \quad (3)$$

式中 M 是系统横向放大率, 且 (u, v) 是空间频率, 与光瞳坐标 (ξ, η) 的关系为:

$$u = \frac{\xi}{\lambda s}, \quad v = \frac{\eta}{\lambda s}$$

而且 $s = s_2 - f$, 又

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\sigma x)}{\sigma x} \quad (4)$$

(3) 式表明, 衍射光强分布即波像差函数在光瞳内加权后的功率谱, 因此可由衍射光强分布反演得波像差。将波像差以波差多项式展开:

$$W(\xi, \eta) = \sum_{m=0}^N \sum_{n=0}^n w_{nm} \xi^m \eta^{n-m} \quad (5)$$

令

$$E(w_{nm}) = \sum_{i,j=1}^M [I(x_i, y_j) - \text{PSD}(x_i, y_j; w_{nm})]^2 \quad (6)$$

由最小二乘法可以确定波差系数 w_{nm} 。

3. 利用迭代法作位相恢复。测量了二个照相物镜, 其波面形状如图 3、图 4 所示。(图 3: $D/f' = 1:3.5$, $f' = 240$; 图 4: $D/f' = 1:2.2$, $f' = 137.69$)。



图 3

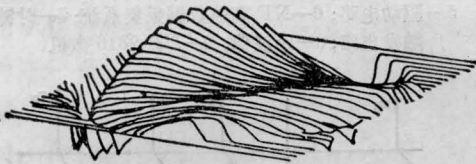


图 4

由(3)式可知, sinc 函数限制了 $G(u, v)$ 的扩展范围。设待测系统的最大空间为 f_{\max} , 则如果要精确恢复波像差函数, 至少应该有:

$$b \leq 1/(M f_{\max}) \quad (7)$$

如果要降低狭缝对测量结果的影响, 当宗量等

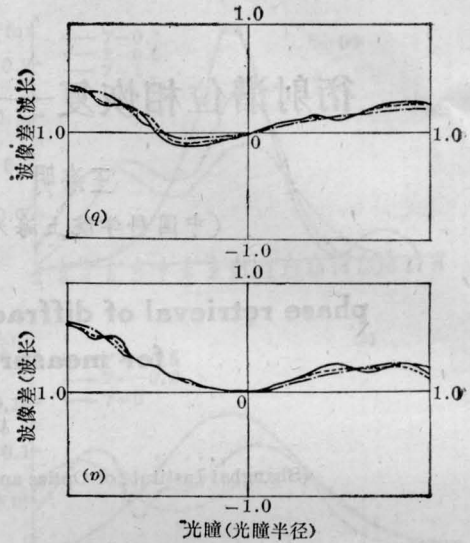


图 5

实线— $b = 10 \mu\text{m}$; 虚线— $b = 20 \mu\text{m}$;
点划线— $b = 50 \mu\text{m}$

于 $\sigma/4$ 时, sinc 函数下降为 0.9, 按此要求, 可取

$$b \leq \frac{\sigma}{4} \frac{1}{M f_{\max}} = \frac{0.735}{M f_{\max}} \quad (8)$$

这样, 照相物镜一般取 $f_{\max} = 2001/\text{mm}$ 已经足够。此外, 设 $M \leq 1/5$ 也是合理的。则由(8)式, 有:

$$b \leq 20 \mu\text{m} \quad (9)$$

取 $b = 10 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$, 测量了轴上点的波像差, 结果见图 5(a)、(b)。

由图中结果可见当 b 变化时, 波差的最大离散值约为 0.05λ , 并且当 b 增大时, 波像差高频结构被平滑, 这与理论预期是一致的。而当 $b = 10 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 时, 最大离散约为 0.01λ 。

测量系统中影响测量精度的另一个因素是探测器的分辨率。由(3)式可知, 衍射功率谱是限带函数, 由抽样定理, 只要抽样点间隔小于二倍带宽的倒数, 即可准确恢复带限函数。由文献[2], 只要取样是满足

$$\text{抽样点间} \leq \frac{\lambda}{2Mb/s} \quad (10)$$

取 $\lambda = 550 \text{ nm}$, $M = \frac{1}{5}$,

$$b = 20 \mu\text{m}, \quad s = 0.5 \text{ mm},$$

则只要抽样点间隔小于 $30 \mu\text{m}$, 即可准确恢复衍射功率谱。对分辨率为 $8 \mu\text{m}$ 的 CCD 器件, 这是毫无困难的。

影响测量精度的主要因素是迭代误差。由于抽样点数的限制,在用(6)式进行最小二乘法拟合时,项数不宜过高;另外多项式(5)的项数太多时,(6)式的迭代矩阵会趋于病态。在本文的实验中,波像差取到8级,即相当于7级几何像差,这对照相物镜是已经足够的。本文对二个照相物镜多次迭代表明,7级球差系数最大离散大约为 $\lambda/20$ 。

参 考 文 献

- 1 Sarnik AM. *SPIE Proc.*, **558**, 85-94(1985)
- 2 王海明。“激光-CCD系统衍射谱分析法测量光学系统传递函数”,全国第八届激光会议论文,西安,1986. 10.

(收稿日期:1987年5月13日)

压缩光场同两个耦合原子的相互作用*

邹明亮

(福建师范大学物理系)

郭光灿

(中国科技大学物理系)

Squeezed light interaction with a couple of atoms

Zou Mingliang

(Department of Physics, Fujian Teacher's University, Fuzhou)

Guo Guangcan

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei)

Abstract: This paper deals with the change of statistical characters of squeezed light, i. e. the characters of distribution of photons, the squeezed and antibunching of a mode squeezed light field after its interacting with a couple of atoms which has interaction between them.

一、引 言

光与物质相互作用的问题一直是人们注意的问题,处理这个问题时,在一定的条件下可把原子看成一个二能级系统,而光与二能级原子的相互作用的量子理论都是基于J-C模型^[1]。以前,由于压缩态光场未能实现,因此人们只注意相干光、混沌光等与物质的相互作用。自从Stoler^[2]在理论上提出压缩态光场的存在以及Bell实验室观察到压缩态以后^[3],人们把注意力集中在压缩态光场与物质的相互作用上。Milburn^[4]研究了压缩光作用于一个二能级原子后原子状态的变化。我们也研究过压缩光与一个二能级原子的相互作用,发现作用后光的压缩效应消失^[5]。这里我们采用类似文献^[5]的方法,从解时移么正算符的矩阵元出发,求出光与原子作用后的密度矩阵元,借以讨论其光子数分布、压缩特

性、反聚束性等。

二、压缩光场同二个耦合两能级原子的相互作用

在旋转波近似下,单模辐射场与两个耦合全同二能级原子相互作用的哈密顿为:

$$H = H_0 + H_I + H_{II} \quad (1)$$

式中:

$$H_0 = \hbar\omega\alpha^+\alpha + \hbar\omega_0(S_{3A} + S_{3B}) \quad (2a)$$

$$H_I = \hbar\lambda[(S_{+A} + S_{+B})\alpha + (S_{-A} + S_{-B})\alpha^+] \quad (2b)$$

$$H_{II} = \hbar V(S_{+A}S_{-B} + S_{-A}S_{+B}) \quad (2c)$$

$$V = \frac{P_A \cdot P_B}{R^3} - \frac{3(P_A \cdot R)(P_B \cdot R)}{R^5} \quad (2d)$$

* 中国科学院科学基金资助课题。