

一种适于自适应光学的旋转软刀口 波面传感器的研究*

俞 信 刘 晨**

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

提 要

利用傅里叶光学理论,证明了一种新型波面传感器——旋转软刀口波面传感器的概念。在经典刀口法的刀口区,以渐变透过率代替突变透过率函数,在光瞳象面上可获得反映光瞳面位置待测波面位相梯度及位相梯度方向的调制信号。文中给出了实验结果和讨论。

关键词 自适应光学,波面传感器,软刀口调制。

1 引 言

实时波面传感器是自适应光学借以完成实时校正大气波前畸变的核心部件之一。目前,在自适应光学系统中通常采用旋转光栅剪切干涉传感器^[1]或 Shack-Hartmann 传感器^[2]。进一步探索光效率高、探测波面误差精度高、动态范围大、结构简单并适于实时波面探测的新型传感器,如曲率传感器^[3]等是自适应光学的一个重要研究方向。

1985年 F. Roddier 等首先提出一种新型的、可用于自适应光学的实时波面传感器——旋转软刀口传感器的概念。原理上,它是经典 Foucault 法或刀口法的改进。其要点是:在刀口区域,以渐变透过率代替突变的透过率函数,在光学系统的焦面上,软刀口绕中心位置旋转而在光瞳孔象面上将产生强度调制。调制信号的幅值反映光瞳孔面位相梯度而调制信号的位相相应反映位相梯度向量的方向。然而,未见到进一步的研究工作发表。

本文利用傅里叶光学理论,在忽略光瞳有限孔径所形成的衍射效应的情况下,考虑了自适应光学中波面位相梯度 $|\nabla\phi|^2$ 和振幅闪烁值 $|\nabla A/A|^2$ 的量级,在删除小量级值后,证明当采用线性振幅透过率函数时,旋转软刀口传感器将给出幅值与待测波面位相梯度成正比,位相直接反映位相梯度向量方向的调制信号。作者制备了软刀口掩膜,设计制作了单孔径旋转软刀口波面传感器模拟实验装置并完成了模拟实验。实验结果与理论分析相符。

2 理 论 分 析

2.1 利用空间滤波获得波前梯度传感

利用空间微分滤波的概念^[4],如令待测瞳平面复振幅为 $f(x, y)$, 其傅里叶变换为 $\tilde{f}(u,$

收稿日期: 1991年9月11日; 收到修改稿日期: 1991年12月11日

* 本工作获国家 863 高科技计划 808 主题研究基金资助。

** 现工作单位为合肥工业大学精仪系。

v) 由于 $2\pi i u \tilde{f}(u, v)$ 是 $\partial f(x, y)/\partial x$ 的傅里叶变换, 如在焦平面设一空间滤波器, 其振幅透过率为线性函数

$$t(u, v) = 2\pi i u, \quad (1)$$

则在瞳象平面的强度分布(可证明)正比于瞳平面复振幅的位相梯度, 亦即可用作波前梯度传感器.

2.2 软刀口空间滤波器透过率函数

由于空间滤波器的位相和振幅的绝对值可为任意的, 故可考虑类似(1)式的振幅透过率取以下形式

$$t(u, v) = au, \quad (a \text{ 为实正数}) \quad (2)$$

对于(2)式, 如 $u < 0$, 则透过率将取负值. 虽然负值透过率亦可通过加入半波片实现, 但为简化起见, 可采用透过率函数 $t(u, v)$ 和相应的强度透过率 $T(u, v) = |t(u, v)|^2$ 分别为

$$t(u, v) = \begin{cases} 0, & u \leq -(1/2a) \\ (1/2) + au, & -(1/2a) \leq u \leq (1/2a) \\ 1, & u \geq (1/2a) \end{cases} \quad (3)$$

$$T(u, v) = \begin{cases} 0, & u \leq -(1/2a) \\ (1/4) + au + a^2u^2, & -(1/2a) \leq u \leq (1/2a) \\ 1, & u \geq (1/2a) \end{cases}$$

(3)式中斜率因子 a 选择为

$$(1/a) \geq d, \quad (4)$$

式中 d 为焦平面处象点直径.

2.3 系统分析

旋转软刀口波面传感器的光学配置图如图 1 所示. 设待测物瞳平面为 (x, y) 平面, 瞳面波前聚焦于焦平面 (x_2, y_2) 平面, 经空间滤波器 $T(x_2, y_2)$ 调制后成象于瞳象平面 (x_3, y_3) . i, j, i_2, j_2, i_3, j_3 分别为 x, y, x_2, y_2, x_3, y_3 轴方向的单位向量, 其相对方向关系为 $i = i_2 = -i_3$ 及 $j = j_2 = -j_3$. 设两次傅里叶变换透镜焦距相等, 均为 f , 忽略光瞳有限孔径的衍射效应.

若物瞳平面波面复振幅为

$$\psi(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) \exp[i\phi(\mathbf{r})], \quad (5)$$

式中 \mathbf{r} 为 (x, y) 平面的位置向量, $A(\mathbf{r})$ 为振幅(设为实、正数), $\phi(\mathbf{r})$ 为位相(实数). 设具有(3)

式形式振幅透过率的空间滤波器 $t(\mathbf{r}_2)$ 位于透镜焦面(傅里叶变换平面)

$$t(\mathbf{r}_2) = \begin{cases} 0, & x_2 \leq -(1/2a) \\ (1/2) + ax_2, & -(1/2a) \leq x_2 \leq (1/2a), \\ 1, & x_2 \geq (1/2a) \end{cases} \quad (6)$$

式中 \mathbf{r}_2 为 (x_2, y_2) 面的位置向量. 则通过滤波器的波函数为

$$\psi_2(\mathbf{r}_2) = t(\mathbf{r}_2) \int \psi(\mathbf{r}) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda f} (\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{r})\right] d\sigma, \quad (7)$$

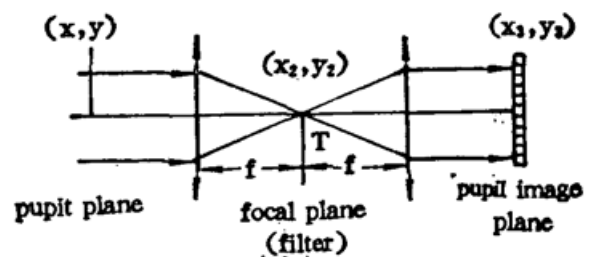


Fig. 1 Optical diagram of wavefront sensor

式中 λ 为波长, $d\sigma$ 为 (x, y) 平面的积分元, 积分对 (x, y) 平面, 即物瞳面进行。

由傅里叶反变换, 瞳象平面 (x_3, y_3) 处的波函数为

$$\psi_3(\mathbf{r}_3) = \int_{s_1} \psi_2(\mathbf{r}_2) \exp \left[\frac{2\pi i}{\lambda f} (\mathbf{r}_3 \cdot \mathbf{r}_2) \right] d\sigma_2 \quad (8)$$

式中 \mathbf{r}_3 为 (x_3, y_3) 平面的位置向量, $d\sigma_2$ 为 (x_2, y_2) 平面的积分元, 积分对 (x_2, y_2) 平面即焦面进行。由(5)~(8)式及傅里叶变换的导数定理, 若在(6)式空间滤波器 $t(\mathbf{r}_2)$ 的线性区工作

$$\psi_3(\mathbf{r}_3) = \left\{ -\frac{i\alpha\lambda f}{2\pi} [A'(\mathbf{r}_3) + i\phi'(\mathbf{r}_3)A(\mathbf{r}_3)] + \frac{1}{2} A(\mathbf{r}_3) \right\} \exp[i\phi(\mathbf{r}_3)], \quad (9)$$

$$A'(\mathbf{r}) = \partial A(\mathbf{r}) / \partial x, \quad \phi'(\mathbf{r}) = \partial \phi(\mathbf{r}) / \partial x,$$

式中以 \mathbf{r} 替换了 \mathbf{r}_3 。瞳象平面的光强分布为

$$I_3(\mathbf{r}) = \frac{1}{4} A^2(\mathbf{r}) + \frac{\alpha\lambda f}{2\pi} A^2(\mathbf{r})\phi'(\mathbf{r}) + \frac{a^2\lambda^2 f^2}{4\pi^2} [A'^2(\mathbf{r}) + A^2(\mathbf{r})\phi'^2(\mathbf{r})], \quad (10)$$

即 $I_3(\mathbf{r})$ 为位相函数梯度 $\phi'(\mathbf{r})$ 的两次型函数。由于平方项在调制中的频率为线性项的两倍, 故此非线性项可在滤波中去除。

对二维位相测量, 最可取的调制方法是使空间滤波器绕光轴旋转。设旋转频率为 ω , $t=0$ 时刻给出位相梯度的 x 方向分量。调制信号应为

$$I_\omega(\mathbf{r}) = \frac{\alpha\lambda f}{2\pi} A^2(\mathbf{r}) |\nabla\phi(\mathbf{r})| \cos(\omega t - \theta_\phi), \quad (11)$$

式中 θ_ϕ 为位相梯度 $\nabla\phi$ 方向与 x 轴方向间的夹角。由(11)式可见, 调制信号振幅与待测波面位相梯度之模成比例, 信号位相直接反映了位相梯度向量的方向。如系统在空间滤波器的非线性区工作(光点落入(6)式中 $t(\mathbf{r}_2)=0$ 或 $t(\mathbf{r}_2)=1$ 区域), 经简单分析可知, 此时信号振幅调制度最大, 系统饱和。

为在(11)式中去除瞳平面 $A^2(\mathbf{r})$ 的影响, 求得(10)式中直流项为

$$I_0(\mathbf{r}) = \frac{1}{4} A^2(\mathbf{r}) \left[1 + \frac{a^2\lambda^2 f^2}{2\pi^2} |\nabla\phi(\mathbf{r})|^2 + \frac{a^2\lambda^2 f^2}{\pi^2} \left| \frac{\nabla A(\mathbf{r})}{A(\mathbf{r})} \right|^2 \right]. \quad (12)$$

考虑到该传感器在自适应光学中应用于测试星体经大气扰动波面畸变的实际情况, 取典型参数, 如 Fried's 常数 r_0 为 10 cm, 星闪烁指数为 0.2 等量值, 可合理地估计(12)式中 $|\nabla A(\mathbf{r})/A(\mathbf{r})|^2$ 项为 2×10^{-3} 量级, $|\nabla\phi(\mathbf{r})|^2$ 为 0.1 至 0.01 量级。

传感器检测信号 $S(\mathbf{r})$ 定义为 $I_\omega(\mathbf{r})/I_0(\mathbf{r})$, 由(11)、(12)式得

$$S(\mathbf{r}) \doteq \frac{2\alpha\lambda f}{\pi} |\nabla\phi(\mathbf{r})| \cos(\omega t - \theta_\phi), \quad (13)$$

以上证明了软刀口波面传感器工作于相干光情况的原理。对具有宽光谱成份的光源, 如白光光源, 若为远距点目标或平行波面, 具空间相干性。注意到光瞳面待测波面可写作 $z(x, y)$ 形式, 如用位移坐标表示, 波面梯度可写为 $\nabla z(\mathbf{r})$, $\nabla z(\mathbf{r})$ 与位相梯度 $\nabla\phi(\mathbf{r})$ 的关系为

$$\nabla z(\mathbf{r}) = (\lambda/2\pi) \nabla\phi(\mathbf{r}). \quad (14)$$

于是(13)式可写作

$$S(\mathbf{r}) = 4\alpha f |\nabla z(\mathbf{r})| \cos(\omega t - \theta_s), \quad (15)$$

式中 θ_s 为波面梯度 ∇z 方向与 ω 轴方向间的夹角, $\theta_s = \theta_\phi$ 。由(15)式, $S(\mathbf{r})$ 与 λ 无关, 故当

采用位移坐标或角度表示待测波面梯度时, 传感器信号与波长无关, 其工作原理应适于宽光谱光源。

3 实验结果

单孑孔径模拟实验装置如图 2 所示。因利用现有实验装置条件, 实验中采用反射光路。软刀口膜片作为调制盘位于透镜 L_1 焦面位置, 其强度反射率要求具有 (3) 式的形式。研究中采用真空镀膜, 利用自制刀口掩膜在真空蒸镀中边缘区形成渐变透射特性的现象, 经多次试验, 获得渐变区透过率符合实验要求的软刀口掩膜片。如忽略吸收, 所制得软刀口膜片相对反射率 R 与位置坐标关系如图 3 所示。

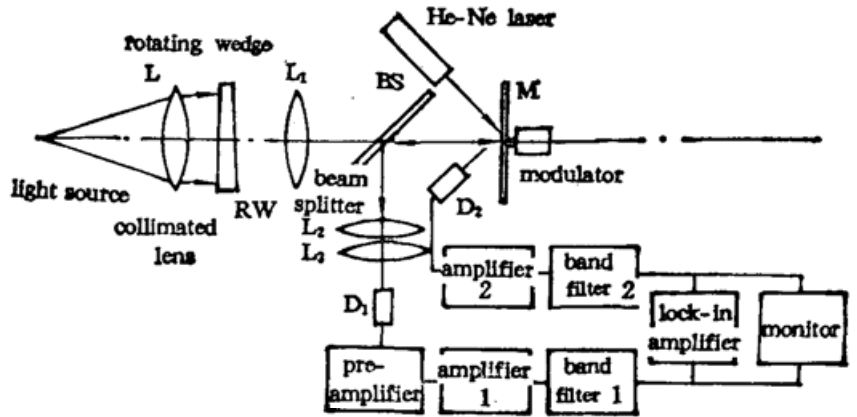


Fig. 2 Diagram of the experimental system

由平行光管产生平行光轴的单色入射光, 经旋转光楔 RW 后由透镜 L_1 会聚于其焦面。旋转光楔的作用是使入射波面产生可变角偏移, 以模拟单孑孔径中波面平均倾斜。入射光经旋转软刀口膜片(空间滤波器)反射调制后, 由分束镜 BS 反射经透镜 L_2 成平行光, 最后由聚焦透镜 L_3 聚焦, 为探测器 D_1 接收。调制信号的幅值与位相由锁相放大器检出。提供锁相放大器参考信号的参考光束为 He-Ne 激光束, 此光束经调制盘反射调制后提供位相基准信号而为探测器 D_2 接收。 D_1 、 D_2 检出的两路信号分别经放大、选频后输入锁相放大器。

利用以上实验系统获得待测入射光束波面倾斜角与此旋转软刀口波面传感器检测信号振幅调制度(相对值)的关系, 如图 4 所示。

由图 4 可见, 在软刀口波面传感器的中心区域, 振幅调制与待测波面倾角成近线性的单调函数关系, 而当波面倾角超过一定值时, 调制度呈饱和状态。说明实验结果与理论分析相符。

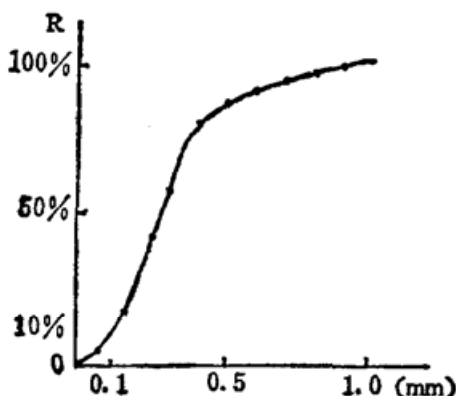


Fig. 3 Relative reflection efficiency versus position coordinate

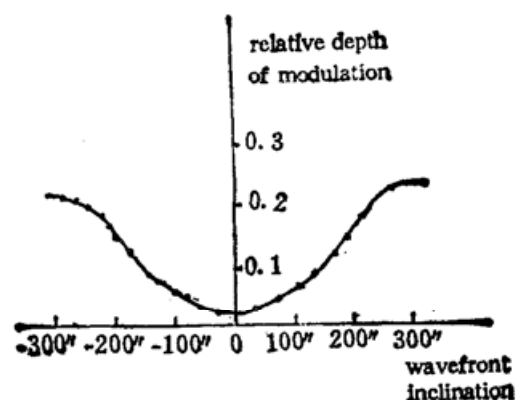


Fig. 4 Relative depth of modulation versus wavefront inclination

4 小 结

旋转软刀口波面传感器作为旋转光栅剪切干涉式波面传感器的替代物具有结构简单,能同时探测波面梯度量值与方向,需用系统数及探测象元数可减少一半等优点,此种传感器与 Shack-Hartmann 传感器相比,不用成像型阵列探测器件,且适于在红外光波段工作,由此,可望其具有良好的实用前景.

本研究获得 F. Roddier 的帮助,赵达尊教授与作者进行了有益讨论,锡利同志协助制备了软刀口掩膜,特此致谢.

参 考 文 献

- [1] J. W. Hardy, J. E. Lefebvre, G. L. Koliogoulos, Real-time atmospheric compensation. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67** (3): 360~369.
- [2] Robert K. Tyson, *Principles of adaptive optics*. United Kingdom Edition, London: Academic Press Limited, 1991: 158~168
- [3] F. Roddier, Curvature Sensing and Compensation: a new concept in adaptive optics. *Appl. Optics.*, 1988, **27** (4): 1223~1225
- [4] John C. Bortg, Wavefront sensing by optical phase differentiation. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1984, **1**(1): 35~39

Study of rotating soft knife edge wavefront sensor used in adaptive optics

YU XIN LU CHEN*

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

(Received September 1991; revised 11 December 1991)

Abstract

The concept of a new type wavefront sensor—rotating soft knife edge wavefront sensor has been proved with Fourier optics theory. At the region of knife edge, the step function of transmittance has been replaced by gradual variation function. As results, at the pupil image plane, the modulation signal which responds both amplitude and orientation of phase gradient of the detected wavefront at pupil plane can be obtained. Experimental results are also given.

Key words adaptive optics, wavefront sensor, soft knife edge modulation.

* HEFEI University of Industry, Department of precision instrumentation.