

文章编号: 1000-8349(2006)04-0362-11



基于四棱锥传感器的波前检测仿真设计

陈欣扬^{1,2}, 朱能鸿¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 波前检测是天文望远镜自适应光学中的重要环节。四棱锥作为一种新型的波前检测元件, 与其他传统的波前传感器相比, 具有较高的灵敏度。特别是对于光干涉或拼接镜面望远镜而言, 四棱锥波前传感器能够被用来检测子望远镜或子镜面之间的相对光程差, 从而为干涉 (或共相) 的实现提供有效的检测信号。在分析四棱锥波前检测原理的基础上, 阐述了单孔径条件下波前倾斜检测及双孔径干涉条件下相对光程差检测的软件仿真设计和阶段性成果, 并简述了下一阶段的研究计划。

关键词: 天文观测设备与技术; 自适应光学; 光干涉; 波前检测; 软件仿真; 四棱锥

中图分类号: P111.47, TP273+.2 **文献标识码:** A

1 引 言

大气湍流的高频扰动引起折射率的随机起伏, 会使现代大型光学 (包括红外) 天文望远镜入射波前产生畸变, 从而造成望远镜成像质量退化。即使在大气状况良好的地点, 可见光波段的大气相关长度 r_0 通常也仅在 10 cm 左右, 大气湍流效应使得望远镜的实际分辨率会随着口径的增加而急剧下降。自适应光学作为一种闭环控制的光学系统, 能够被有效用来实时检测和校正波前误差, 从而显著改善像质, 所以已被世界上许多大型天文望远镜 (无论是单口径还是干涉阵列) 广泛采用。波前检测是自适应光学中的前端环节, 为后端的波前重构和校正提供波前检测信号。自适应光学发展至今, 先后涌现出剪切干涉仪、曲率传感器、夏克-哈特曼传感器 (简称 S-H 传感器) 等多种检测器件。其中的 S-H 传感器采用子透镜阵列对波前进行采样, 在天文望远镜上应用较为普遍。然而, S-H 传感器在 CCD 面元上形成的子孔径动态范围较小, 并且光斑的能量由子透镜的尺寸决定, 所以检测灵敏度受到很大影响。1996 年, Ragazzoni^[1] 首先提出利用四棱锥 (Pyramid) 实现波前检测的概念。与 S-H 传感器相比, 通过四棱锥波前传感器在 CCD 面上得到的出瞳光斑的能量由整个望远镜的孔径尺寸决定, 因而具

收稿日期: 2006-04-25; 修回日期: 2006-06-27

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (10533040)

有更高的灵敏度。特别对于光干涉望远镜(或拼接镜面望远镜)而言,四棱锥波前传感器能够用来检测子望远镜(或子镜面)之间的相对光程差,为干涉(或共相)的实现提供检测信号。2002年4月,意大利3.5 m Galileo 望远镜的自适应光学实验装置采用了四棱锥波前检测;ESO的VLT以及即将建成的美国LBT望远镜正在开展多层共轭自适应光学系统研制,都将采用这种波前检测方法。

目前国内正在开展的天文光干涉特别是多孔径干涉(子孔径数 ≥ 3)研究,对自适应光学提出了新的要求。如果采用常规的S-H传感器,其数量会随着子孔径的增加而增加,势必提高成本和仪器的复杂性。除了波前畸变的检测,各子孔径间的光程差检测也是保证获得干涉条纹或直接成像的重要条件。鉴于四棱锥波前检测具有能同时检测上述两种信号的特点,本文尝试利用软件仿真逐步实现双孔径干涉条件下的基于四棱锥的低阶波前倾斜以及光程差检测,希望能为国内的光干涉研究提供有益的参考。

2 四棱锥波前检测

2.1 单孔径条件下的波前检测原理

四棱锥传感器的波前检测原理可以用图1表示。四棱锥镜是一个底面为正方形的金字塔型的折射棱镜,棱镜的顶点与望远镜光学系统的轴上焦点重合。棱镜后面依次放置一个透镜和一个 CCD 探测器。在对波前进行检测时,可以将 CCD 探测器划分为4个大小相等的象限,分别与四棱锥镜的4个棱面对应。光波通过望远镜入射光瞳汇聚于四棱锥镜顶点,经过棱镜4个棱面和透镜的折射后在 CCD 探测器的4个象限上分别生成一个出瞳像,依次编号为1、2、3、4。如果没有任何波前误差,CCD 探测器上的4个子出瞳衍射像轮廓完善并具有十字形的衍射晕环。如果将透镜沿轴向位移,就可以改变 CCD 面上各子出瞳像的大小分布,保证各子出瞳像不发生重叠。

四棱锥镜在原理上可简化为2个棱边相互垂直的X方向光楔与Y方向光楔。来自入瞳的光线,分别被X方向光楔、Y方向光楔分光,形成与入瞳面共轭的出瞳像(每个方向各有2个)。对应于入瞳面上每一点,出瞳像上都会有唯一的像点与其一一映射。以X方向为例,来自入瞳面上某一点 $P(x,y)$ 的光线在理想状态下被X方向光楔的2个棱面同时折射,从而在2个出瞳像上都有光强的反映。如果光线受到畸变,使其只能被一个棱面折射,因而仅有某一个出瞳像的共轭像点上有光强,而另一个是暗点。这种亮-暗模式能够反映出畸变的方向,却无法定量地复原畸变信号。为了解决此问题,在光路中引入能绕X、Y两轴旋转的调制平面镜^[3],如图2所示。以X方向为例,调制镜的Y旋转轴与X方向光楔的棱边平行,并且棱位于焦平面上。在调制镜的旋转作用下,由光瞳面上的P点射至焦平面的光线产生周期性扫描运动,光线经过上、下棱面的时间或者在焦平面上投影轨迹的位移量与 CCD 面上的下共

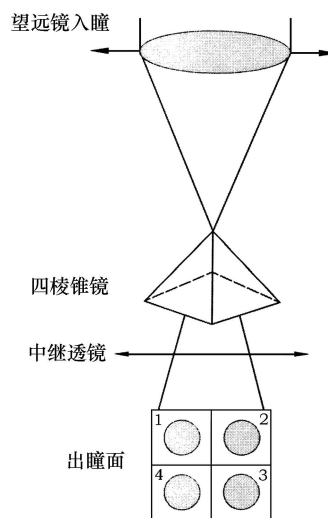
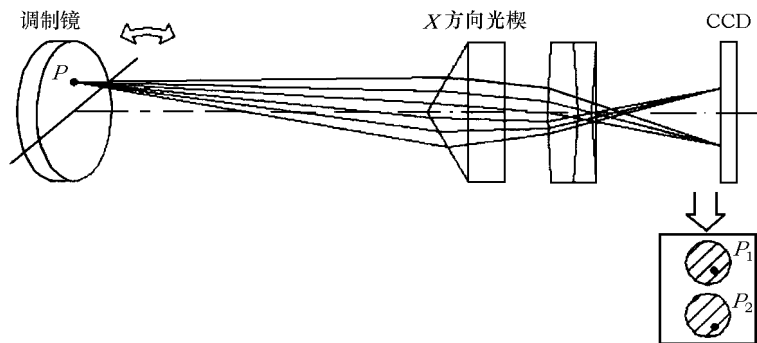


图1 四棱锥波前检测原理和出瞳像^[2]

图2 调制平面镜的工作原理图^[3]

轭像点累积的光强信号有一定的函数关系。图3表示正弦调制的调制周期、投影轨迹的位移量和共轭像点 P_1 、 P_2 光强累积时间的相互关系。其中,假设调制镜的调制角范围为 $[-\theta, +\theta]$,系统有效焦距长度为 f , P 点因畸变产生的波像差为 $W(x, y)$,调制周期为 2π 。从图3中可以看出, P_1 点的光强累积时间为 $t_1 + t_3$, P_2 点的光强累积时间为 t_2 。在无调制状态下, P 点射出光线在焦平面 Y 方向上的初始偏移量:

$$y_f = f \frac{\partial W(x, y)}{\partial y}, \quad (1)$$

在正弦调制时,

$$\frac{y_f}{2f\theta} \propto \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t_1 + t_3 - t_2}{t_1 + t_3 + t_2}\right). \quad (2)$$

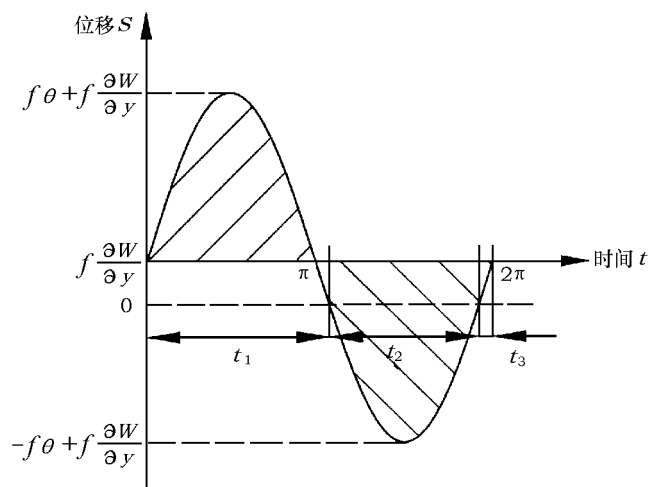


图3 正弦调制下的调制周期、投影位移量和共轭像点光强累积时间的关系

假设单位时间内 CCD 平面上吸收的光子数是恒定值, 则由 (1)、(2) 式可得:

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \propto \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}\right), \quad (3)$$

其中, S_1 是调制周期内 P_1 点的累积光强, S_2 是 P_2 点的累积光强。根据 (3) 式, 可以由检测出的光强信号求出波前梯度, 进而重构出波前相位。Y 方向光路的波前检测与 X 方向类似:

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \propto \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{S_3 - S_4}{S_3 + S_4}\right). \quad (4)$$

其中, S_3 、 S_4 分别是 P 点在 Y 光路中的共轭像点 P_3 、 P_4 的累积光强。

2.2 双孔径干涉条件下的相对光程差检测原理

由于大气湍流效应, 双孔径干涉时各个子孔径面的平均波前相位都存在一定的涨落, 两者之差称为相对光程误差, 利用四棱锥镜可以对此误差信号进行检测。其方法是使四棱锥镜顶点与 2 个子孔径望远镜的合成焦点重合, 在 CCD 上能够同时检测到波前畸变信号以及子望远镜之间的相对光程差信号。最后通过波前重构, 驱动各自的变形镜 DM1 和 DM2 完成变形和光程差校正^[4]。同样, 在拼接镜面的情形下, 各子镜面如果没有严格共相, 就会产生相对光程差, 这种光程差与由于大气扰动造成的相对光程误差是相同的, 所以也可以利用四棱锥镜加以检测。需要指出的是, 光程差检测存在 2π 周期缠绕的问题, 一般能够通过双波长检测的方法解决^[5], 本文不再就此问题展开讨论。图 4 是基于干涉合成光束的波前检测原理图。

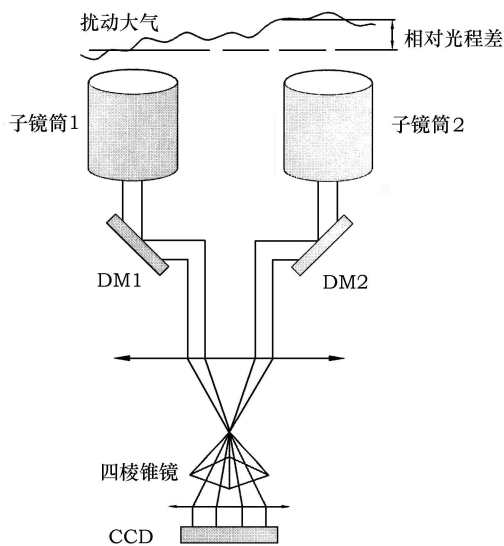


图 4 四棱锥镜在双孔径干涉仪中的波前检测原理图

3 单孔径波前倾斜误差检测的软件仿真

3.1 仿真算法

建立软件仿真的目的在于能够比较充分地了解波前检测方法的性能, 能够重复模拟很多难以实现的实验场景, 从而保证硬件实施方案的可行。本文的计算机软件仿真基于 Windows XP 平台, 采用 Matlab 6.5 作为程序开发工具。软件算法的构建均基于物理光学原理, 具有明确的物理意义。单孔径波前检测的软件仿真参考了 Carbillet 等人^[6]的方法, 原理见图 5。

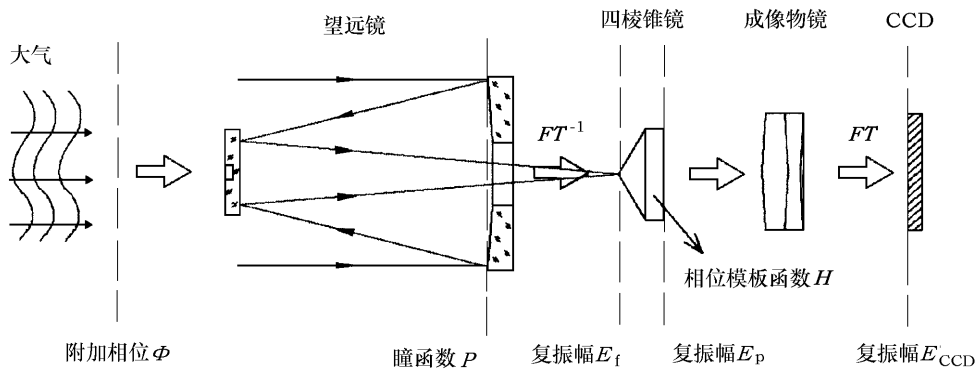


图 5 单孔径条件下四棱锥镜波前检测的算法原理图

四棱锥镜顶点与望远镜系统的焦点重合。根据 Fourier 光学，焦平面上光波的复振幅可表示为

$$E_f = \text{FT}(P(x, y) \cdot \exp(-i \cdot (\phi(x, y) + \varphi_{\text{tilt}}(x, y)))) , \quad (5)$$

其中，瞳函数 $P(x, y) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq D/2 \\ 0, & \sqrt{x^2 + y^2} > D/2 \end{cases}$ ； $\phi(x, y)$ 是大气扰动造成的波前误差项；

$\varphi_{\text{tilt}}(x, y)$ 是调制路径的倾斜角；FT 表示作傅里叶变换。四棱锥镜的功能可以视为一个具有空间滤波功能的相位模板。在 CCD 面上得到的 4 个出瞳像是作为一个整体计算出的，能够体现 4 个像之间存在的相干效应。经过四棱锥镜后光波的复振幅为

$$E_p = E_f \cdot \exp(-i \cdot \phi_p(x, y)) , \quad (6)$$

最终再经过透镜成像，CCD 面上 4 个子孔径像的光强分布 $I_i(x, y)$ 可以表示为

$$I_i(x, y) = \sum_{m=1}^n |E_{\text{ccd}}|^2 = \sum_{m=1}^n |\text{FT}(E_p)|^2, \quad i = 1, 2, 3, 4 , \quad (7)$$

其中， $m = 1, 2, 3, \dots, n$ 表示调制路径的采样数。定义 X 轴和 Y 轴方向的波前斜率信号分别为

$$S_x(x, y) = \frac{I_1(x_p, y_p) + I_4(x_p, y_p) - I_2(x_p, y_p) - I_3(x_p, y_p)}{\sum_{i=1}^4 I_i(x_p, y_p)} , \quad (8)$$

$$S_y(x, y) = \frac{I_1(x_p, y_p) + I_2(x_p, y_p) - I_3(x_p, y_p) - I_4(x_p, y_p)}{\sum_{i=1}^4 I_i(x_p, y_p)} , \quad (9)$$

式中的 (x_p, y_p) 是光瞳面上某点 (x, y) 在 CCD 面上的共轭位置。

波像差函数的一阶偏导与波前斜率信号之间是一种正弦函数关系, 最终会得到一个非线性方程组, 不易求解。本文引入 S-H 波前重构方法中的 Southwell 模型^[7], 即有:

$$\begin{cases} (S_x^{i+1,j} + S_x^{i,j})/2 = (\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j})/h, & i = 1 \sim (N-1) \\ (S_y^{i,j+1} + S_y^{i,j})/2 = (\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j})/h, & i = 1 \sim (N-1) \end{cases}, \quad (10)$$

其中, N 为相位栅格点数; 相位屏栅格间隔 $h = D/N$, D 为望远镜通光口径。进一步可得到波前重构的线性方程组:

$$\mathbf{G} = \mathbf{K} \cdot \Phi, \quad (11)$$

其中, 梯度矩阵 $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix}$; 系数矩阵 $\mathbf{K} = -(h/2) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{D} \end{bmatrix}$; Φ 是待求的波前相位误差矩阵。式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & -1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & -1 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

\mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 均为 $N \times N$ 阶矩阵。(11) 式的解应当是最小二乘解, 可以写成 $\Phi = \mathbf{K}^+ \mathbf{S}$ 。式中的 \mathbf{K}^+ 为矩阵 \mathbf{K} 的广义逆, 利用奇异值分解算法求出。借助泽尼克多项式可将相位误差展开为波前 Tip-Tilt、离焦等低阶误差及其他高阶项误差^[8]:

$$\phi(x, y) = (a_{11} \cdot x + a_{12} \cdot y) + a_2(x^2 + y^2) + Q(x, y), \quad (12)$$

式中第一项为波前 Tip-Tilt 误差; 第二项为离焦误差; 第三项为高阶项误差。通过最小二乘法, 根据下式可求出各项系数实现相位分离。自适应光学系统中的变形镜和倾斜镜即利用这些重构信号进行波前校正:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_j & \sum (x_i^2 + y_j^2) x_i \\ \sum x_i y_j & \sum y_j^2 & \sum (x_i^2 + y_j^2) y_j \\ \sum (x_i^2 + y_j^2) x_i & \sum (x_i^2 + y_j^2) y_j & \sum (x_i^2 + y_j^2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \phi_{i,j} x_i \\ \sum \phi_{i,j} y_j \\ \sum \phi_{i,j} (x_i^2 + y_j^2) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

3.2 仿真步骤

仿真时需要首先设置大气和望远镜的初始参数, 见表 1。

表 1 大气和望远镜的初始参数

参数名称	参数值
大气相干长度 r_0/m	0.2
望远镜通光口径 D/m	2.2
副镜遮挡率	0.1
相位屏采样尺寸 / 像素	512×512
CCD 面尺寸 / 像素	1024×1024
入射光波长 $\lambda/\mu\text{m}$	0.55
调制范围	$\pm 4\lambda/D$
调制总步数	64

本文仿真以 Kolmogorov 功率谱作为理论模型, 产生随机的相位屏矩阵模拟大气。算法的主要步骤如下^[9]: (1) 根据 $\Phi(k) = 0.023r_0^{-5/3}k^{-11/3}$ (r_0 是大气相干长度; k 是空间频率), 建立功率谱矩阵 \mathbf{P} ; (2) 生成零均值的高斯随机复矩阵 \mathbf{R} ; (3) 令 $\mathbf{A} = \sqrt{\mathbf{P}} \cdot \mathbf{R}$, 对其进行傅里叶逆变换并进行归一化, 得到随机相位屏矩阵。这种变换方法存在一个缺点: 因为傅里叶变换具有周期性, 所以得到的相位屏也具有周期性, 这一特性会给仿真出的波前带来虚假信息, 可以通过截短相位屏来解决。

取 20 幅随机相位屏进行检测仿真, 图 6 显示了仿真过程中的可视化结果。其中, 图 6(a) 是仿真四棱锥镜的相位模板; 图 6(b) 是一帧模拟大气的随机相位屏; 图 6(c) 是仿真 CCD 终端上的 4 个出瞳像。

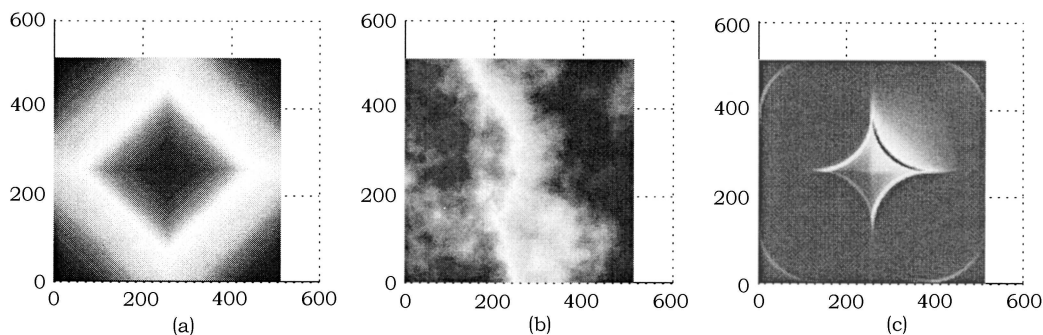


图 6 仿真过程中的可视化结果

利用 (12)、(13) 式对相位屏进行相位分解, 得到相位屏中的波前倾斜信号参考值。再根据 3.1 节的算法重构计算波前相位误差, 相位分解后求出波前倾斜信号的检测值。图 7 是参考值 (用 * 号表示) 和实际检测值 (以圆圈表示) 的比较。两者差值的 RMS 值等于 ± 0.0463 , 可以看出两者变化趋势基本是吻合的。

根据重构出的这 20 组二维波前倾斜误差信号, 依次构造线性相位屏, 然后与相应的随机相位屏进行 RMS 运算和归一化处理, 计算出波前倾斜所引起的相位误差占整个波前相位误差

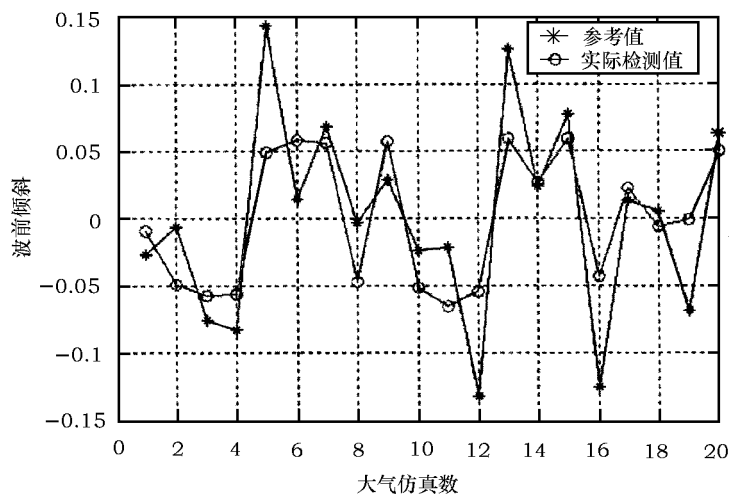


图 7 随机相位屏条件下的波前倾斜仿真检测结果

的比例, 见表 2。可以看出波前倾斜所引起的相位误差是大气引起的波前误差的主要分量。

表 2 波前倾斜引起的相位误差分量在整个波前相位误差中所占的比例

序号	误差比例	序号	误差比例
1	0.66324	11	0.77494
2	0.47958	12	0.46043
3	0.91503	13	0.34877
4	0.46985	14	0.82904
5	0.76709	15	0.46597
6	0.90285	16	0.71525
7	0.89143	17	0.9161
8	0.40356	18	0.43109
9	0.94635	19	0.62134
10	0.59751	20	0.80169
平均比例			0.6701

4 双孔径干涉条件下的相对光程差检测的软件仿真

4.1 仿真算法

按照 Esposito 等人^[10]在论述利用四棱锥镜检测拼接镜面的共相性的问题时提出的观点, 图 1 所示光路中望远镜主镜如系拼接, CCD 终端获得的波前斜率信号(即 3.1 节(8)、(9)式中的 S_x 、 S_y)与子镜间的相对光程差就形成一种正弦的关系, 并已通过光学实验加以验证。在多孔径干涉条件下, CCD 面上的每个象限均包含了各出瞳像的集合。此时在整个孔径上的

波前斜率信号的累加之和同样是子孔径上入射波前相对光程差的正弦函数, 可写作:

$$S = \sqrt{\left(\sum S_x\right)^2 + \left(\sum S_y\right)^2} = K_1 \cdot \sin(2\pi \cdot \Delta L/\lambda + K_2) + K_3, \quad (14)$$

其中, ΔL 是相对光程差; K_1 、 K_2 、 K_3 是待定系数。

4.2 仿真步骤

在双孔径干涉条件下, 除了保持 3.2 节所设定的大部分初始参数不变外, 还需要更改和增加一些仿真参数, 见表 3。

表 3 双孔径干涉条件下补充的望远镜的初始参数

参数名称	参数值
子孔径望远镜数	2
子孔径望远镜通光口径 D/m	2.2
中心臂长 L/m	1.9
子孔径分布角 θ	$\pi/2, -\pi/2$
相位屏采样尺寸 / 像素	256×256
CCD 面尺寸 / 像素	512×512

设子孔径 1 和子孔径 2 的入瞳面上因光程差产生的初始相位分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 , 且 $\phi_1 = 0$, $\phi_2 = 2\pi \cdot \Delta L/\lambda$, 其中, ΔL 是子孔径间的光程差。瞳函数为

$$P(x, y) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \sqrt{(x - L \cdot \cos \theta)^2 + (y - L \cdot \sin \theta)^2} \leq D/2 \\ 0, & \sqrt{(x - L \cdot \cos \theta)^2 + (y - L \cdot \sin \theta)^2} > D/2 \end{cases}. \quad (15)$$

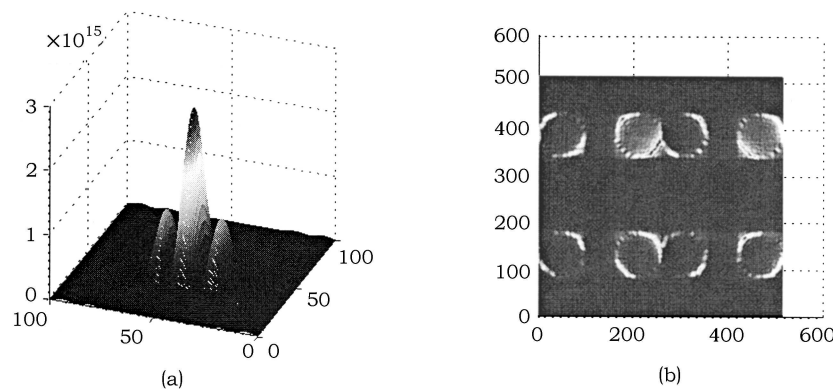


图 8 双孔径干涉条件下的点扩展函数 (a) 与出瞳像 (b)

确定了初始相位及瞳函数后, 其余的运算原理和步骤与 3.2 节相同。图 8 显示了仿真过程中的可视化结果。其中图 8(a) 是干涉望远镜点扩展函数的中央区域的放大视图, 可以明显看出光强被干涉调制。图 8(b) 是仿真 CCD 终端上 4 象限的出瞳像, 每个象限各包含 2 个出瞳像。

设定 ΔL 的取值范围为 $0 \sim 2\lambda$ ，根据 4.1 的算法原理仿真得到检测信号 S 。图 9 中的实线反映了 S 和 ΔL 的关系。利用非线性参数的等精度最小二乘算法，求出式 (14) 的系数： $K_1 = -10.11$, $K_2 = 2.4119$, $K_3 = 1.7555$ 。图 9 中的虚线是根据式 (14) 模型拟合出的正弦曲线。

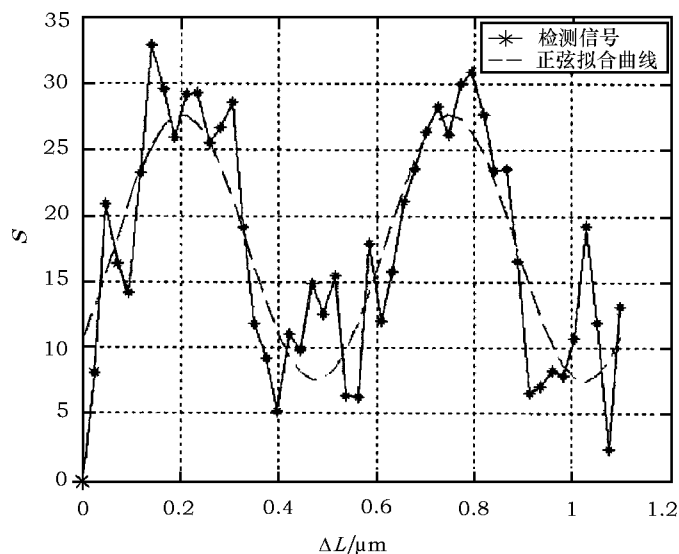


图 9 双孔径干涉条件下的相对光程差仿真检测结果

5 总结和计划

国外研究的四棱锥波前检测方法都是应用于单口径望远镜的自适应光学，并成功地在实验室中得到了验证，但对于光干涉模式却尚未有实际的成功范例。在目前国内尚缺乏光干涉望远镜(特别是多口径)的观测条件下，本文尝试建立具有明确物理意义的光学仿真模型，通过软件方式评估四棱锥波前检测在光干涉条件下的性能和结果。总结以上仿真结果，能够获得两点结论：(1) 单口径条件下波前倾斜误差检测结果不仅验证了四棱锥的波前检测作用，而且通过引入大气相位屏仿真，证明了波前倾斜项所引起的相位误差是由整个大气引起的波前误差的主要分量；(2) 双孔径干涉条件下相对光程差检测仿真结果证实了波前斜率信号与子口径上入射波前相对光程差之间的正弦关系。

软件仿真目前还处于初步的研究阶段，还有许多问题有待探索。下一步的工作计划包括：(1) 评价各种噪声对波前检测信号的影响情况；(2) 在波前检测与重构环节基础上，研究波前校正的仿真实现，最终完成完整的闭环；(3) 从单一湍流层的相位屏模拟拓广到多层共轭模式，从双孔径干涉拓展到多孔径干涉条件下的完全波前相位检测；(4) 通过进一步优化算法，改变目前程序执行速度慢的缺点，向实时化方向发展。

参考文献:

- [1] Ragazzoni R J. *Modern Opt.*, 1996, 43: 289
- [2] Verinaud C, Esposito S. In: Vernet E, Ragazzoni R, Esposito S eds. *Proc. 2002 ESO Conference and Workshop*, Garching: ESO, 2002: 153
- [3] Riccardi A, Bindi N, Ragazzoni R *et al.* *SPIE*, 1998, 3353: 941
- [4] Verinaud C, Esposito S. *Opt. Letters*, 2002, 27: 470
- [5] Esposito S, Davaney N. In: Vernet E, Ragazzoni R, Esposito S eds. *Proc. 2002 ESO Conference and Workshop*, Garching: ESO, 2002: 161
- [6] Carbillet M, Verinaud C, Femenía B *et al.* *MNRAS*, 2005, 356: 1263
- [7] Southwell W H J. *Opt. Soc. Am.*, 1980, 70: 998
- [8] 周仁忠, 曹根瑞, 阎吉祥等. *自适应光学*, 北京: 国防工业出版社, 1996
- [9] http://foehn.univ-lyon1.fr/tmr-lgs/WP_B/WPB_list_library.html, 1998
- [10] Esposito S, Pinna E, Tozzi A *et al.* *SPIE*, 2003, 5169: 72

The Design of Software Simulation Based on Pyramid Wavefront Sensor

CHEN Xin-yang^{1,2}, ZHU Neng-hong¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Wavefront sensing is a crucial part of adaptive optics technology. The pyramid sensor (PS) has the advantage of higher sensibility than other classical wavefront sensors. PS is capable of detecting differential piston between sub-apertures of interferometer or elements of segment mirror. On the basis of analyzing pyramid sensor principle, a software simulation design including algorithm, some initial results and two conclusions about wavefront tip-tilt sensing of single-aperture telescope and differential piston sensing of double-aperture interferometer are discussed respectively. The next research scheme is also introduced briefly.

Key words: astronomical facilities and technique; adaptive optics; interferometry; wavefront sensing; software simulation; pyramid