

文章编号 1004-924X(2011)09-2197-08

哈特曼技术在序列光斑检测中的应用

母一宁, 刘 泉, 于林韬, 李 平*
(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了提高水平链路大气无线激光通信中的对准精度, 降低强湍流对激光通信的影响, 对系统结构进行了改进并研究了光斑检测对准算法。首先, 根据哈特曼-夏克传感器对波前畸变局部的实时探测结果, 计算局部畸变的变化量, 从而实时确定局部截止频率-局部判决阈值 T_n 。接着, 采用统计序列均方误差获取序列采样信息 $M(X_i, Y_i)$, 并根据局部阈值判决确定信标序列采样空间 (X_i, Y_i) 。最后, 遵循最小二乘原则进行圆心拟合, 使序列均方误差达到最小, 并从信息论的角度出发, 分析了基于序列信息圆心拟合光斑检测法的优缺点。实验结果表明, 在湍流中该方法的检测精度优于 $4 \mu\text{rad}$, 比传统质心算法的检测精度高 1 倍, 满足了大气无线激光对准的基本要求, 较好地回避了湍流引入噪声过大这一难题。

关键词: 序列信息; 圆心拟合; 波前畸变; 最小均方误差; 哈特曼技术

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2197

Application of Hartmann technique in sequence spot detection

MU Yi-ning, LIU Quan, YU Lin-tao, LI Ping*

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: liping@cust.edu.cn

Abstract: The structure of the system is aimed at improving the spot detection algorithm, in order to improve the level of an atmospheric wireless laser communication link alignment accuracy by reducing the impact of turbulence on laser communication. First, we calculate the changes in the local distortion to determine the real-time local decision threshold T_n by a Hartmann-Shack wave-front sensor on the local distortion of the results of real-time detection. We then obtain the sequence of Mean Square Error(MSE) from the sampling information $M(X_i, Y_i)$ by a statistical series. At the same time, we can determine the sampling space (X_i, Y_i) of the beacon based on the local threshold. Second, we use the center of a circle for fitting to make the MSE a minimum by following the method of least squares. We also analyse the advantages and disadvantages of the method with center-fitting of spot detection based on the sequence information, from the perspective of information theory. The results show that the detection accuracy is better than $4 \mu\text{rad}$ in the turbulence and more than twice the traditional centroid algorithm. The method avoids a problem with the introduction of strong turbulence noise. It basically

meet the requirements of Air-Wireless-Laser alignment.

Key words: sequence information; circle fitting; wavefront aberration; Minimum Mean-square Error (MMSE); Hartmann technique

1 引言

信标光在大气随机信道中传输,受随机信道噪声的干扰,所传递的标定信息量下降(幅度、相位以及偏振态等指标改变),光斑的几何形状也会发生畸变。当系统的信噪比较低时,信标光的光斑会出现破碎现象(比如激光散斑)。在大气无线激光通信中,大气湍流的干扰会导致接收望远系统焦面上所获得传输光束的像斑随机抖动,光强随机起伏,即同一光源发出的通过略微不同路径的光线之间发生随机干涉^[2];信标光在大气中传输,相当于信标光被大气信道调制,虽然现阶段学术界还没有提出具体的大气信道模型,但是这种调制会给成像引入许多频率分量,使 Airy 斑的形状破碎并造成到达角随机起伏,即大气会对 Airy 斑引入随机频率噪声。迄今为止已经有不少学者对此提出补偿方案^[2-9],比如采用高帧 CCD 传感器的质心算法、Zernike 模式复原法等。CCD 是一种典型的积分器件,可对曝光时间内的光能进行积分,由于有限小的曝光时间对入射波前梯度起调制作用,所以在时域拥有平滑作用^[4]。从频域角度讲,Airy 斑的像可以用一阶贝塞尔函数近似,由一阶贝塞尔函数自身特性可知,Airy 斑绝大部分的能量集中在低频部分。信标光在指向时 Airy 斑的低频部分起主要作用,即可将其看成一个低频窄带信号;然而湍流所引入的是一个全频段的噪声信号。文献[3-4]中提高采样频率来完成时域平滑,从而滤除高频分量,提高信标光标定的信噪比。可见该低通滤波器的平滑能力与 CCD 采样频率直接相关。但 CCD 面积与采样频率这两个指标在制造原理上相互制约,当使用 CCD 做视场光阑时,在保障视场大小的同时其帧频无法做得太高,即该低通滤波器的截止频率无法做得较低。在满足各态历经性条件下,湍流将引入全频带范围的随机噪声,经过低通滤波后,通带范围内的噪声依然会被保留,成像显示质心依然有低频扰动并且扰动的幅度较大。本文针对这

一问题,提出了一种基于序列信息圆心拟合的带通滤波方法,通过 Hartmann-Shack(H-S)局部波前畸变传感器对最大序列信息出现的频点进行探测与反馈,进而实时调整带通滤波器的截止频点。该平滑方法根据大气信道对信标光调制这一特点进行自适应滤波,可以更进一步地提高信标光所传递的序列信息量。

2 高帧频序列信息拟合模型

从信息论的角度讲,序列视频所传递的信息包括两个方面:一是单帧自身所携带的灰度信息量,二是序列间光流运动所传递的信息量。在有限序列中出现运动光流的概率记作 P_m ,每一帧相对于有限序列,运动光流像素出现的概率为 $\{P_o(t_0), P_o(t_1), \dots, P_o(t_n)\}$,静止的光流像素出现的概率为 $\{P_s(t_0), P_s(t_1), \dots, P_s(t_n)\}$,其中: n 代表有限序列长度。 $P_m = P_o$ (噪声概率) + P_i (目标运动概率)。序列间运动区域和静止区域所传递的序列信息量分别为:

$$I_o(t) = - \sum_{t=n}^n \log_2 P_o(t), \quad (1)$$

$$I_s(t) = - \sum_{t=0}^n \log_2 P_s(t), \quad (2)$$

$$I_{\text{total}}(t) = I_o(t) + I_s(t), \quad (3)$$

其中 $I_o(t)$ 所传递的信息量包括 CCD 固有的电子噪声、信标光激光器自身噪声以及大气信道所引入的随机噪声(random noise)等,则 $I_o(t) = I_{\text{rand}}(t) + I_{\text{other}}(t)$ 。大气信道对信标光起调制作用,图 1 便是 Airy 斑被大气调制的结果,可见大气信道所引入的这种噪声远大于其它噪声。虽然这种调制在空间域对指向信息影响较大,但是在时间域的影响却不明显,因为 $I_{\text{rand}}(t) \gg I_{\text{other}}(t)$,只需成功捕获 $I_{\text{rand}}(t)$ 便可以成功获得原始对准信息。

当光斑运动较明显时,序列所传递的信息量主要是由光斑运动轨迹不确定度产生的。当光斑相对静止时,序列所传递的信息量主要是由噪声不确定度而产生的。为了提高获取序列采样信息

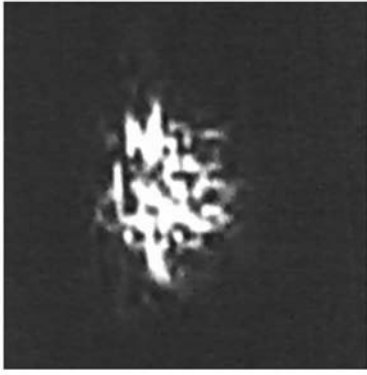


图 1 激光散斑

Fig.1 Laser speckle

的实时性,其简易的序列信息计算公式如下:

$$M(x,y) = |f(x,y) - f_{n/2}(x + \Delta x_{n/2}, y + \Delta y_{n/2})| \times \dots \times |f_{n/2-1}(x + \Delta x_{n/2-1}, y + \Delta y_{n/2-1}) - f_n(x + \Delta x_n, y + \Delta y_n)|, \quad (4)$$

其中, $f(x,y)$ 代表所开 CCD 窗口中光流整体的运动情况。

经上式计算后获取序列采样信息 $M(X_i, Y_i)$, 为了进一步提升实时性, 则通过阈值判决获取特定频带内的序列采样空间 (X_i, Y_i) , 最终采用圆心拟合的方式取代质心算法, 即在遵循最小二乘原则前提下, 寻找一个理想圆使其趋近于所有的采样点, 使所有采样点到圆上距离最优。最终完成对序列图像信息均方误差的统计, 并且根据圆心拟合的方法使其趋近于最小。

采样空间 $(X_i, Y_i), i \in (1, 2, 3 \dots N)$ 中心到圆心距离为:

$$d_i^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2,$$

点 (X_i, Y_i) 到圆边缘的距离与半径平方差为:

$$X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c,$$

对其求平方和

$$Q(a,b,c) = \sum [(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)]^2. \quad (5)$$

求 a, b, c , 使 $Q(a, b, c)$ 的值最小。

平方差 $Q(a, b, c)$ 必然大于 0, 因此函数存在大于或等于 0 的极小值, 极大值为无穷大。

$F(a, b, c)$ 对 a, b, c 求偏导, 令其等于 0。

得到极值点, 比较所有极值点的函数值即可得到最小值。

$$\begin{cases} \partial Q(a,b,c)/\partial a = 0 \\ \partial Q(a,b,c)/\partial b = 0 \\ \partial Q(a,b,c)/\partial c = 0 \end{cases}$$

解上述 3 个方程。

令

$$C = (N \sum X_i - \sum X_i \sum X_i)$$

$$D = (N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i)$$

$$E = N \sum X_i^3 + N \sum X_i Y_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum X_i$$

$$G = (N \sum Y_i^2 + \sum Y_i \sum Y_i)$$

$$H = N \sum X_i^3 Y_i + N \sum Y_i^3 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum Y_i$$

其中

$$Ca + Db + E = 0,$$

$$Da + Gb + H = 0,$$

则

$$a = (HD - EG) / (CG - D^2), \quad (6)$$

$$b = (HC - ED) / (D^2 - GC), \quad (7)$$

$$c = - \frac{\sum (X_i^2 + Y_i^2) + a \sum X_i + b \sum Y_i}{N}. \quad (8)$$

可见, 有效序列长度 n 的选取直接影响检测的有效性与可靠性(当前帧的输出不仅与当前的输入有关还与以前 n 帧图像的输入有关), 两者相互矛盾。

3 Hartmann-Shack 波前探测补偿系统

H-S 传感器在测量波前畸变时效果较好, 阵列透镜 L 将被测波前 $\phi(x, y)$ 分成许多子波前, 每个子波前均会聚于阵列探测器 D 上。计算机可以从 D 的输出信号中计算出子波前斜率, 还可以得到每个子波的能量及整个波面的质心。为进行实时校正, 引入基准平面波 ϕ_1 作为参考。H-S 传感器的测量信号为每个子透镜光斑的质心。

$$x_c = \sum_i I_{ij} x_i / \sum_i I_{ij}, \quad (9)$$

$$y_c = \sum_i I_{ij} y_i / \sum_i I_{ij}, \quad (10)$$

式中: I 是探测器上 (i, j) 像元的光功率, (x_i, y_i) 是 (i, j) 像元的坐标, 再由 (x_c, y_c) 算出波前斜率信号:

$$g_x = x_c / f', \quad (11)$$

$$g_y = y_c / f'. \quad (12)$$

根据 Zernike 模式法进行波前计算, 获得子

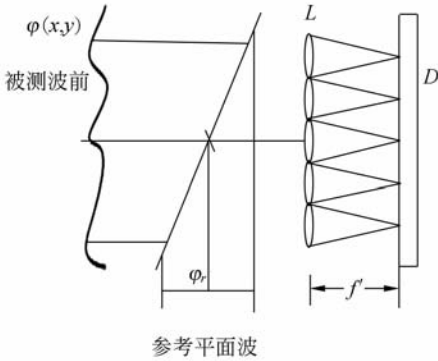
孔径上的波前斜率与孔径上波前像差间的关系如式(13)^[5]:

$$g_{ai} = \int W_i(r) [\nabla \varphi(r, y) \cdot \mathbf{a}] dr, \quad (13)$$

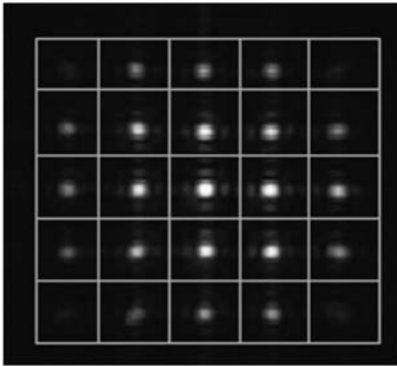
式中 $W_i(r)$ 是第 i 个子孔径的归一化权重函数, ∇ 为斜率算子, \mathbf{a} 为测量放线单位向量。子孔径波前斜率与 Zernike 多项式系数间的关系为:

$$g_{ai} = \sum_{k=1}^p a_k \int W_i(r) \partial z_k(r) / \partial a dr, \quad (14)$$

其工作原理与光斑效果如图 2 所示;



(a) 工作原理
(a) Operating principle



(b) 指示光斑(5×5)
(b) Indicate spot(5×5)

图 2 Hartmann 工作原理与光斑

Fig. 2 Hartmann Principle and spot diagram

4 序列波前补偿方案

当有限序列过短时并不能满足其过程的各态历经性,需要增加序列长度使信标光有机会获得与通带相匹配的频率分量。因此,不但增加了计算量同时也降低了灵敏度。

根据 H-S 传感器可以对局部波前到达角进行精确测量这一特性,对其探测结果在时间轴上进行微分,获得局部波前的变化斜率,从而得知该区域的信标光在大气信道调制下所获得的最佳局部判决阈值 T_n ,即根据序列的相关程度对阈值进行设定。因此将局部波前变化斜率作为反馈来确定子带通滤波器的截止频率,可以在序列较短情况下获得较大的序列信息,在提高灵敏度的同时降低运算量。

光轴定位流程如图 3 所示。第一步,在光轴不超出视场的前提下将全反射镜偏转一个随机角度 $\alpha/2$,然后采用 CCD 高斯质心算法计算脱靶量并记录 20 组读数,根据读数求均方值获得真实脱靶量 (X, Y) ,进而获得光轴的偏移角 α 。第二步,启动湍流池等待其升温并达到指定的工作状态。切换相机不同的工作模式,分别采用传统质心算法、序列信息拟合算法与本文算法进行光轴定位。由于湍流闪烁效应的存在,其检测结果存在波动,分别记录 20 组数据 (x_n, y_n) ,然后将 (X, Y) 作为本次测量的算术平方值计算其脱靶量的均方根值 (RMS) 并根据结果反算光轴定位误差角 δ 。若还需要检测,则需要将湍流池关闭等待冷却后再重复第一步,即第一步是为了获得无湍流调制时的光轴偏移角并作为基准,第二步则是获得不同算法在湍流影响下所检测的光轴偏移角及其偏移角误差。

测试原理框图如图 4 所示,采用 810 nm 波长的半导体激光器模拟信标光,光束经过准直透镜

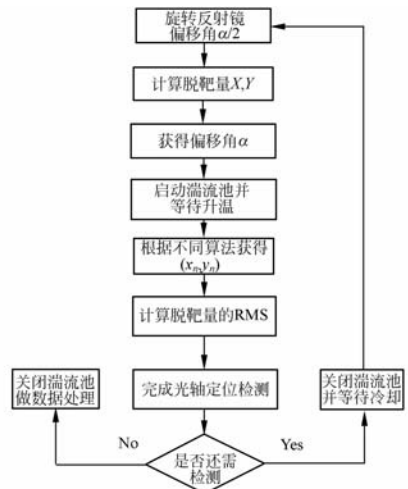


图 3 检测流程图

Fig. 3 Processes of testing

和扩束透镜后形成扩束后的平行光进入大气湍流池。最终通过分光镜分别被 Hartmann 相机和高帧频 CCD 相机接收。波前处理器将探测到的波前信息反馈给高帧频 CCD 相机的检测处理器,根

据波前曲率的变化量调整相应的局部判决阈值 T_n 。根据式(5)计算出序列信息 $M(x, y)$, 并与相应区域的判决阈值相比较获得信标序列采样空间, 最终通过公式(6),(7),(8)拟合出指示中心。

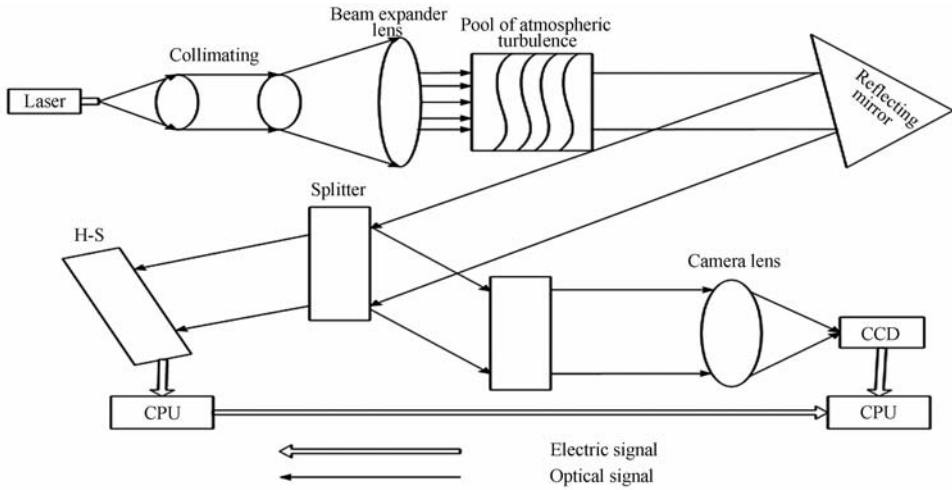


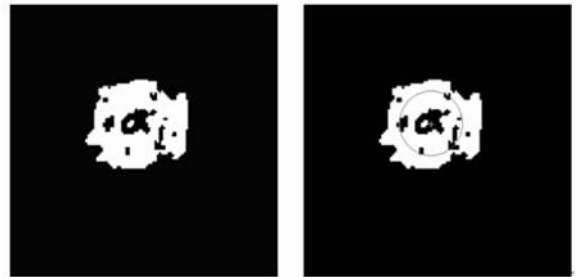
图4 测量系统原理图

Fig. 4 Block diagram of measuring system

5 实验、对比与分析

5.1 实验与结果

在没有波前反馈信息时,将有效序列长度定为 10 帧并采用全局判决阈值 T ,按照圆心拟合后的检测效果如图 5 所示(a,b 分别为拟合前与拟合后的信标序列采样空间,并不是光斑的灰度图像)。



(a)原始图像 (b)拟合后的图像
(a) Original image (b) Fitted image of (a)

图6 局部判决检测效果

Fig. 6 Effects of local decision detection

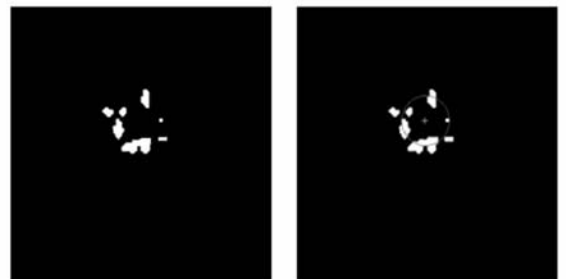


(a)原始图像 (b)拟合后的图像
(a) Original image (b) Fitting image of (a)

图5 全局判决检测效果

Fig. 5 Effects of global decision detection

相反采用一个 5×5 的 H-S 传感器做局部波前反馈,根据实时反馈的波前信息估算出局部判



(a)原始图像 (b)拟合后的图像
(a) Original image (b) Fitted image of (a)

图7 震荡检测效果

Fig. 7 Instability detection results

决阈值 $T_n(T_1 - T_{25})$, 将有效序列长度定为 4 帧, 最终按照圆心拟合后的检测结果如图 6 所示。

同理在不采用波前反馈时, 仍然将有效序列长度定为 4 帧, 依然采用全局判决阈值 T 的检测方案, 其圆心拟合后的检测结果如图 7 所示。

5.2 结果对比

湍流池冷却后, 波前未受过干扰的平行光直接会聚在 CCD 上, 如图 8 所示。图 7 中采样点数较少, 拟合结果明显存在抖动, 对准的稳态误差为 $10 \mu\text{rad}$ (与质心算法的对准效果相似, 但标准差略低一些)。采用工业 CCD 相机, 焦距为 1.6 m、像元尺寸为 $32 \mu\text{m}$ 、帧频为 720 frame/s, 分辨率为 128×128 。

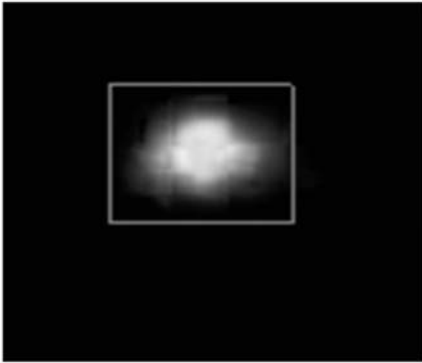


图 8 非散斑效果

Fig. 8 Non-laser speckle

图 6 的定位精度只比图 5 高 $1 \sim 2$ 个 μrad , 但是灵敏度却高出 2.5 倍 (其有效序列长度是前者的 2.5 倍)。具体对比如表 1 所示。

表 1 算法对比

Tab. 1 Algorithm comparison

检测方法	定位精度/ μrad
传统质心算法	8~10
序列信息拟合算法	5~6
本文算法	小于 4

Zernike 模式复原法采用高速倾斜镜补偿低次波前误差, 采用变形反射镜补偿高次波前误差, 从而抵消像差, 使信标光束在像面聚焦提高对准

精度。实验证明此方案可以使对准精度优于 $2 \mu\text{rad}$, 但大气湍流畸变波前包含无穷阶模式的动态像差, 理论上要用无穷阶模式才能准确描述全部的波前信息。但现阶段的变形反射镜只能对二、三阶像差起到很好的补偿效果, 所以就会产生模式阶段误差 σ_{cutting} , 估算其经验公式:

$$\sigma_{\text{cutting}}^2(q) = 0.274q^{-0.8428} (D/r_0)^{5/3}, \quad (15)$$

式中, D 为望远镜口径; r_0 为大气湍流的相干长度。所以在强湍流中接收孔径 D 较小时, 其对准精度依然会受到影响。

5.3 结果分析

当入射波前存在畸变时, 波前上曲率的变化将会改变整个接收面上的光强分布, 即真实光束汇聚成的自由曲面在焦平面前后随机摆动。如果采取全局判决阈值的方法在短时间内无法获取全部的序列信息 (波动频率不在通带的那部分序列信息会被丢失), 只能获得部分与阈值相匹配的序列信息, 效果如图 7 所示, 可见有效序列过短导致许多指示信息没有被检测到, 故造成较为剧烈的抖动。因为该随机过程具有各态历经性, 所以当延长有效序列后就可以获得较为满意的结果, 如图 5 所示。但如此会降低系统的灵敏度 (因为增加了与输出的相关项), 所以又引入 Hartmann 传感器做波前反馈, 通过局部波前畸变的斜率反馈来确定局部判决阈值, 进而获得如图 6 较为理想的输出; 与前文的模型分析结果基本相同。

6 结 论

本文利用 H-S 传感器探测光束波前曲率变化量, 根据每个子镜的反馈来确定局部序列信息判决阈值, 最终为圆心拟合提供了更为可靠、有效的信标序列采样空间。通过哈特曼技术改进了序列信息圆心拟合算法的模型, 实现了高灵敏度、高精度的实时对准。用序列信息拟合对准方式取代灰度信息拟合对准方式, 即根据序列间均方误差最小的检测方法, 成功地回避了强湍流在空间域

引入噪声过大这一难题,并将定位精度提至 $4 \mu\text{rad}$ 。利用自适应光学中 H-S 波前传感技术,改

善了原有算法(序列算法)中灵敏度低、稳定性差、计算量相对较大等问题。

参考文献:

- [1] 姜会林,佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
JIANG H L, TONG SH F. *The System and Technology of the Free Space Laser Communications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
LI X F. *The Principle and Technology of the Satellite-to-ground Laser Communication Links* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [3] 高宽,谭立英,马晶,等. 空间光通信的到达角起伏实验研究[J]. 强激光与粒子束,2007,19(2):177-181.
GAO CH, TAN L Y, MA J, *et al.*. Experimental research of angle of arrival fluctuations in free space optical communications[J]. *High Power and Particle Beams*, 2007, 19(2): 177-181. (in Chinese)
- [4] 高宽,谭立英,马晶,等. 光束在强湍流区中传播的到达角起伏[J]. 强激光与粒子束,2006,18(6):981-894.
GAO CH, TAN L Y, MA J. Angle of arrival fluctuation in moderate to strong turbulence[J]. *High Power and Particle Beams*, 2006, 18(6): 981-894. (in Chinese)
- [5] 李新阳,姜文汉. 哈特曼-夏克传感器的泽尼克模式波前复原误差[J]. 光学学报,2002,22(10):1236-1240.
LI X Y, JIANG W H. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann Shack wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(10): 1236-1240. (in Chinese)
- [6] 杨耀权,施仁,于希宁. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. 光学学报,1999,19(12):1655-1660.
YANG Y Q, SHI R, YU X N. An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on Hough transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(12): 1655-1660. (in Chinese)
- [7] 王丽黎,柯熙政,陈丽,等. 新基于大气激光通信系统的实验测量研究[J]. 光散射学报,2006,17(4):378-383.
WANG L L, KE X ZH, CHEN L X, *et al.*. The testing system for optical power through atmosphere[J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2006, 17(4): 378-383. (in Chinese)
- [8] 赵馨,佟首峰,刘云清,等. 基于四象限探测器的光斑检测跟踪技术[J]. 中国激光,2010,37(7):1756-1561.
ZHAO X, TONG SH F, LIU Y Q, *et al.*. Technology on spot detection and tracking based on four-quadrant detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(7): 1756-1561. (in Chinese)
- [9] 王亚丽,段锦. 空间光通信中激光光斑检测与特征分析[J]. 红外与激光工程,2007,36(7):166-170.
WANG Y L, DUAN J. Laser spot detection and characteristic analysis in space optical communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(7): 166-170. (in Chinese)
- [10] THOMAS W, VORONTSOV M A. Adaptive compensation of atmospheric effects with a high-resolution micro-machined deformable mirror [J]. *SPIE*, 2002, 4825: 14-23.

作者简介:



母一宁(1985-),男,吉林长春人,博士研究生,2008年于沈阳理工大学获得学士学位,主要从事弱信号探测及自动控制方面的研究。E-mail: der0403030420@163.com



于林韬(1972-),男,吉林松原人,副教授,1995年于北京理工大学获学士学位,主要从事超高速率信号检测方面的研究。E-mail: yulintao@cust.edu.cn



刘泉(1982-),女,吉林长春人,博士研究生,讲师,2007年于长春理工大学获硕士学位,主要从事空间相干激光通信技术方面的研究。E-mail: 231909849@qq.com



李平(1958-),女,吉林长春人,教授,1994年于长春光学精密机械学院获硕士学位,主要从事人工神经网络与机器视觉方面的研究。E-mail: liping@cust.edu.cn

●下期预告

月基极紫外(EUV)相机光机结构设计

王智,李朝辉

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033)

为了对地球等离子体层产生的 30.4 nm 辐射进行全方位、长期的监视观测,研制了月基极紫外相机。相机主体采用多层膜单反射镜光学系统以及 30.4 nm 球面光子探测器的结构形式,跟踪机构采用俯仰-方位模式,由步进电机驱动,实现对地球的捕获。针对卫星发射、地月变轨、月表着陆过程中的振动冲击以及月表残酷的温度环境,月基极紫外相机的光机结构主要是考虑环境(力学、温度)适应性进行设计。在基于有限元分析的基础上,月基极紫外相机的光机结构在整机质量 <15 kg 条件下,一阶谐振频率为 49.3 Hz;运动机构在 $-50\sim+80$ °C 内运转自如;在 50 °C 均匀温降载荷作用下反射镜面形精度 RMS 值=13.44 nm(<14 nm),满足相机的技术指标要求。