

基于月面图像的 大气波前倾斜量提取算法的性能分析*

郭 锐, 熊耀恒, 李荣旺, 周 钰

(中国科学院 云南天文台, 昆明 650011)

摘 要: 为了提高月球激光测距试验中的回波光子数, 考虑将自适应光学技术应用于云南天文台 1.2 m 光学望远镜, 以实时校正望远镜跟踪误差和由于大气湍流的影响而造成的到达月球表面的激光束的扩展与漂移效应。针对月面为低对比度扩展源的特点, 利用互相关函数法及绝对差分算法对采集的月面图像进行了大气波前倾斜量的提取。模拟了未去除和去除大气波前倾斜量的月面长曝光图像, 发现去除大气波前倾斜量后的图像对比度较未去除有了相应提高。研究表明: 月球激光测距试验中, 绝对差分算法更适合用来提取大气波前倾斜量。

关键词: 自适应光学; 算法分析; 大气波前倾斜量; 月面图像; 月球激光测距

中图分类号: P228.5 **文献标志码:** A

月球激光测距试验所面临的最大问题是地月距离遥远造成地面望远镜接收到的激光回波光子数太少, 甚至为亚单光子的水平。为了提高回波光子数, 可以将自适应光学技术应用于月球激光测距试验中, 实时探测并校正由于大气湍流的影响而造成的到达月球表面的激光束的扩展与漂移效应^[1-3]。月面为低对比度扩展光源, 基于点源目标的大气波前倾斜量提取算法已不适用。本文将对互相关函数法与绝对差分算法应用于月球激光测距中以提取大气波前倾斜量进行详细的性能分析。

1 扩展源目标的倾斜探测算法

1.1 互相关函数法

互相关函数法(cross-correlation algorithm, CCA)求解波前倾斜量的基本原理^[4]: 在感兴趣的月球扩展源的小区域内先后取一个可分辨的 2 维参考图像 $I_R(x, y)$ 和一系列可分辨的 2 维实际待比对目标图像 $I_1(x, y)$, $I_2(x, y), \dots, I_L(x, y)$, 以参考图像 I_R 和实际待比对目标图像 I_L 间的空间相对位移 $(\delta x, \delta y)$ 为变量, 计算其归一化空间互相关函数

$$C(\delta x, \delta y) = \frac{\iint I_L(x, y) dx dy \iint I_R(x + \delta x, y + \delta y) dx dy}{\left[\iint I_L^2(x, y) dx dy \iint I_R^2(x + \delta x, y + \delta y) dx dy \right]^{1/2}} \quad (1)$$

当参考图像 I_R 和实际待比对目标图像 I_L 的结构为最佳匹配时, 其空间相关函数达到极大值, 故互相关函数的系数是相比较的两个图像间相似性的量度。由于图像的随机运动, 相继时序上所采集的图像的结构也随机变化, 同时引起互相关函数值的变化, 由此可测出目标图像相对于参考图像的位移量级和方向, 进而求解出此位移所表征的波前倾斜量。

假设采集图像所用 CCD 的大小为 $N \times N$ 像素, 而参考图像 I_R 的大小为 $M \times M$, 实际待比对目标图像 I_L 的大小为 $N \times N$, 且 $M \leq N$ 。此时求互相关函数的式(2)中的积分由求和替代

$$C(\delta x, \delta y) = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} I_L(x, y) I_R(x + \delta x, y + \delta y)}{\left[\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} I_L^2(x, y) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} I_R^2(x + \delta x, y + \delta y) \right]^{1/2}} \quad (2)$$

通过计算不同空间位置偏移时参考图像和实际待比对目标图像之间的互相关函数, 然后比较其值的大小, 取其

* 收稿日期: 2008-09-16; 修订日期: 2008-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(10778705)

作者简介: 郭 锐(1977—), 男, 硕士, 助研, 主要从事月球激光测距方面的研究; guorui@ynao.ac.cn。

极大值所对应的空间位置偏移量作为探测波前倾斜的信号。

设互相关函数为极大值 $C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max})$ 时, 所对应的空间位移为 $(\delta x_{\max}, \delta y_{\max})$, 为了使求出的波前倾斜量具有亚像素的精度, 可对已经求出的互相关函数值运用 2 次插值法来达到目的。围绕互相关函数为极大值的附近取 3 点, 例如, 对 x 轴取 $C(\delta x_{\max} - 1, \delta y_{\max}), C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max})$ 和 $C(\delta x_{\max} + 1, \delta y_{\max})$, 对 y 轴取 $C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max} - 1), C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max})$ 和 $C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max} + 1)$, 由 3 点的数值可以决定一条 2 次曲线。

$$\begin{aligned} T_x &= \delta x_{\max} + \frac{1}{2} \frac{C(\delta x_{\max} - 1, \delta y_{\max}) - C(\delta x_{\max} + 1, \delta y_{\max})}{C(\delta x_{\max} - 1, \delta y_{\max}) + C(\delta x_{\max} + 1, \delta y_{\max}) - 2C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max})} \\ T_y &= \delta y_{\max} + \frac{1}{2} \frac{C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max} - 1) - C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max} + 1)}{C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max} - 1) + C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max} + 1) - 2C(\delta x_{\max}, \delta y_{\max})} \end{aligned} \quad (3)$$

有了实时的波前倾斜量, 就为实时改正波前倾斜的快速倾斜镜 (tip-tilt mirror) 提供了驱动信号。

1.2 绝对差分算法

绝对差分算法 (absolute difference algorithm, ADA) 对图像间相对运动的探测基于对图像间绝对差分值的计算。通过计算不同位置偏移时参考图像和实际待比对目标图像之间绝对差分值的和, 比较其值的大小, 然后取极小值时所对应的位置偏移作为探测波前误差的信号^[5]。具体过程如下: 对月面上满足系统等晕角的一个感兴趣的特定小区域采集一幅 $N \times N$ 像素的可分辨的 2 维参考图像 $I_R(x, y)$, 然后按时间序列, 在满足大气湍流变化的时标内采集一系列同区域的 2 维实际待比对目标图像 $I_1(x, y), I_2(x, y), \dots, I_L(x, y)$ 。对参考图像 $I_R(x, y)$, 在其中取一个 $M \times M$ 像素的参考窗口, $M \leq N$ 。用此参考窗口与待比对图像在不同位置进行比较, 通过下面的公式求出不同位置 $M \times M$ 像素的待比对目标图像与参考窗口之间的绝对差分值

$$D(\delta x, \delta y) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} |I_R(x + \delta x, y + \delta y) - I_L(x, y)| \quad (4)$$

在 $D(\delta x, \delta y)$ 取极小值时, 将其所对应的位置偏移 $(\delta x_{\min}, \delta y_{\min})$ 解算出来。同样, 使用 2 次插值法可以以亚像素的精度求出绝对差分为极小值时所对应的波前倾斜量为

$$\begin{aligned} T_x &= \delta x_{\min} + \frac{1}{2} \frac{D(\delta x_{\min} - 1, \delta y_{\min}) - D(\delta x_{\min} + 1, \delta y_{\min})}{D(\delta x_{\min} - 1, \delta y_{\min}) + D(\delta x_{\min} + 1, \delta y_{\min}) - 2D(\delta x_{\min}, \delta y_{\min})} \\ T_y &= \delta y_{\min} + \frac{1}{2} \frac{D(\delta x_{\min}, \delta y_{\min} - 1) - D(\delta x_{\min}, \delta y_{\min} + 1)}{D(\delta x_{\min}, \delta y_{\min} - 1) + D(\delta x_{\min}, \delta y_{\min} + 1) - 2D(\delta x_{\min}, \delta y_{\min})} \end{aligned} \quad (5)$$

2 月面数据采集及预处理

为了考查两种算法用于月面图像提取波前倾斜量时的性能, 我们于 2006 年 11 月至 2007 年 2 月利用云南天文台 1.2 m 地平式望远镜对月面反射器 Apollo 11, Apollo 15 所在区域进行了月面图像采集。图像采集用 61 单元自适应光学系统所配备的精跟踪 CCD, 该 CCD 像元数为 128×128 , 每个像元对应 0.51 arcsec 的区域^[6]。每帧图像的曝光时间根据大气湍流的变化时标可取 0.5 或 1.0 ms, 一次采集数千帧至两万帧不等。

利用两种算法进行波前倾斜量提取之前, 须对所采集的月球表面原始图像进行平场改正。采集月面数据当天傍晚须拍摄平场数据, 对所采集的不同方位的平场数据做叠加并且求平均以取得最佳平场数据, 图像平场处理程序用 Matlab 编写。

3 波前倾斜量的计算

用 Matlab 编写了两种算法的程序, 可以选择图像序列中的任一帧作为参考, 根据需要选择参考窗口的区域及大小, 自由规定一次计算的图像数量, 计算结束后可以输出序列图像相对于参考图像在两个方向经过 2 次插值后的波前倾斜量。

对 2006 年 12 月 8 日北京时间 2:00 所采集的月面数据进行波前倾斜量的提取。在经过预处理的序列图像中选用第一幅图像做为参考图像, 在参考图像中 Apollo 15 月面反射器所在位置附

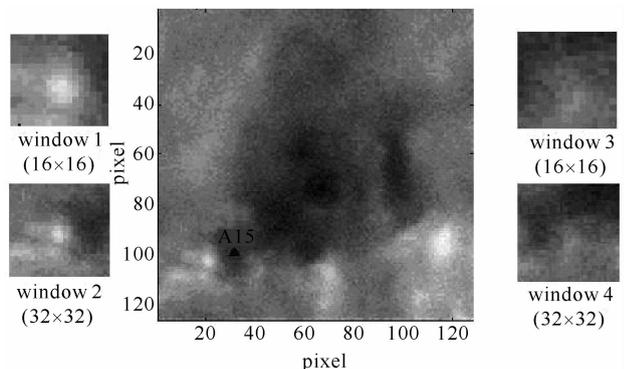


Fig. 1 Image of lunar surface near Apollo 15 retroreflector and 4 reference-window images

图 1 Apollo 15 反射器附近月面图像及 4 个参考窗口图像

近(满足等晕角的要求)的 2 个点分别选取大小为 16×16 像素、 32×32 像素的 4 个参考窗口,窗口 1 与窗口 2 中心相同,窗口 3 与窗口 4 中心相同,如图 1 所示。利用互相关函数法与绝对差分算法程序在后续图像中找出与之最相近的图像并求取两个方向的波前倾斜量。图 2 至图 5 给出了 4 个参考窗口由两种算法求出的一个方向的波前倾斜量曲线以及两种算法的差值曲线。表 1 列出了 4 个窗口去除倾斜量前后的对比度。

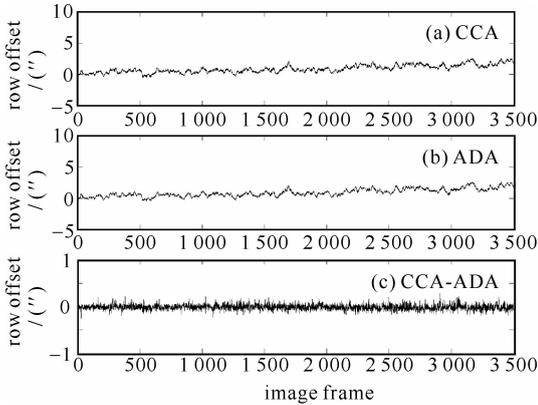


Fig. 2 One-dimensional tip-tilts of window 1 computed by the two algorithms and their difference.

$$\text{Mean}_{\text{CC-AD}} = -0.0147, \text{Variance}_{\text{CC-AD}} = 0.0558$$

图 2 两种算法得到的参考窗口 1 的 1 维波前倾斜量曲线及其差值曲线, $\text{Mean}_{\text{CC-AD}} = -0.0147, \text{Variance}_{\text{CC-AD}} = 0.0558$

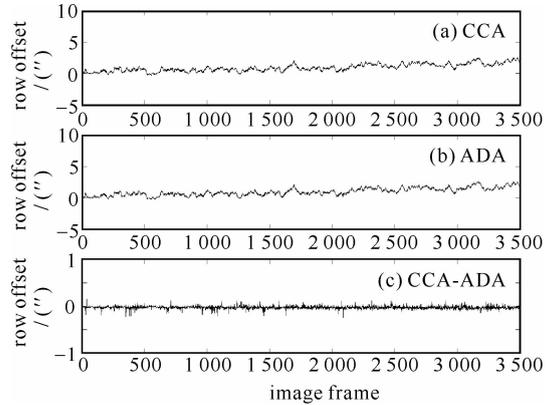


Fig. 3 One-dimensional tip-tilts of window 2 computed by the two algorithms and their difference.

$$\text{Mean}_{\text{CC-AD}} = -0.0254, \text{Variance}_{\text{CC-AD}} = 0.0290$$

图 3 两种算法得到的参考窗口 2 的 1 维波前倾斜量曲线及其差值曲线, $\text{Mean}_{\text{CC-AD}} = -0.0254, \text{Variance}_{\text{CC-AD}} = 0.0290$

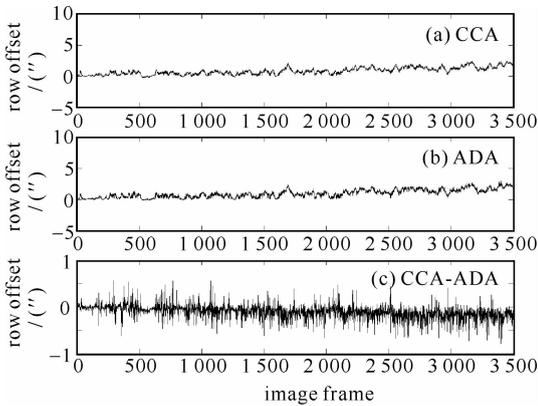


Fig. 4 One-dimensional tip-tilts of window 3 computed by the two algorithms and their difference.

$$\text{Mean}_{\text{CC-AD}} = -0.1013, \text{Variance}_{\text{CC-AD}} = 0.1376$$

图 4 两种算法得到的参考窗口 3 的 1 维波前倾斜量曲线及其差值曲线, $\text{Mean}_{\text{CC-AD}} = -0.1013, \text{Variance}_{\text{CC-AD}} = 0.1376$

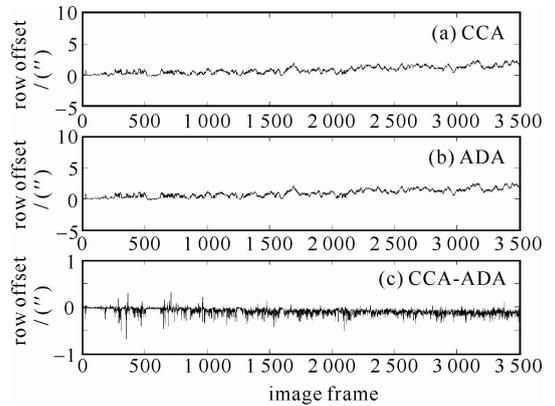


Fig. 5 One-dimensional tip-tilts of window 4 computed by the two algorithms and their difference.

$$\text{Mean}_{\text{CC-AD}} = -0.0925, \text{Variance}_{\text{CC-AD}} = 0.0658$$

图 5 两种算法得到的参考窗口 4 的 1 维波前倾斜量曲线及其差值曲线, $\text{Mean}_{\text{CC-AD}} = -0.0925, \text{Variance}_{\text{CC-AD}} = 0.0658$

表 1 4 个窗口去除倾斜量前后的对比度

Table 1 Image contrasts of four windows before and after tip-tilt being compensated

window	short-exposure	open-loop, long-exposure	close-loop, long-exposure (CCA)	close-loop, long-exposure (ADA)
1	29.97%	23.10%	24.77%	24.73%
2	29.97%	23.10%	24.47%	24.52%
3	26.38%	20.09%	21.20%	21.29%
4	26.38%	20.09%	21.24%	21.37%

为了模拟分析算法的性能,将序列图像进行直接叠加与去除倾斜量的叠加,对应自适应光学系统开环长曝光与闭环长曝光两种情况^[7],利用图像的对比度来比较图像去除倾斜量与未去除倾斜量的效果。对比度定义为 $C = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$,其中, I_{\max}, I_{\min} 分别为图像灰度的最大值与最小值。利用 Matlab 编写了序列图像叠加程序。为了便于比较,叠加后的长曝光图像采用相同大小。窗口 1 和窗口 2 的长曝光图像大小为 32×29 像素,窗口 3 和窗口 4 的长曝光图像大小为 32×32 像素。叠加后的长曝光图像如图 6、图 7 所示。

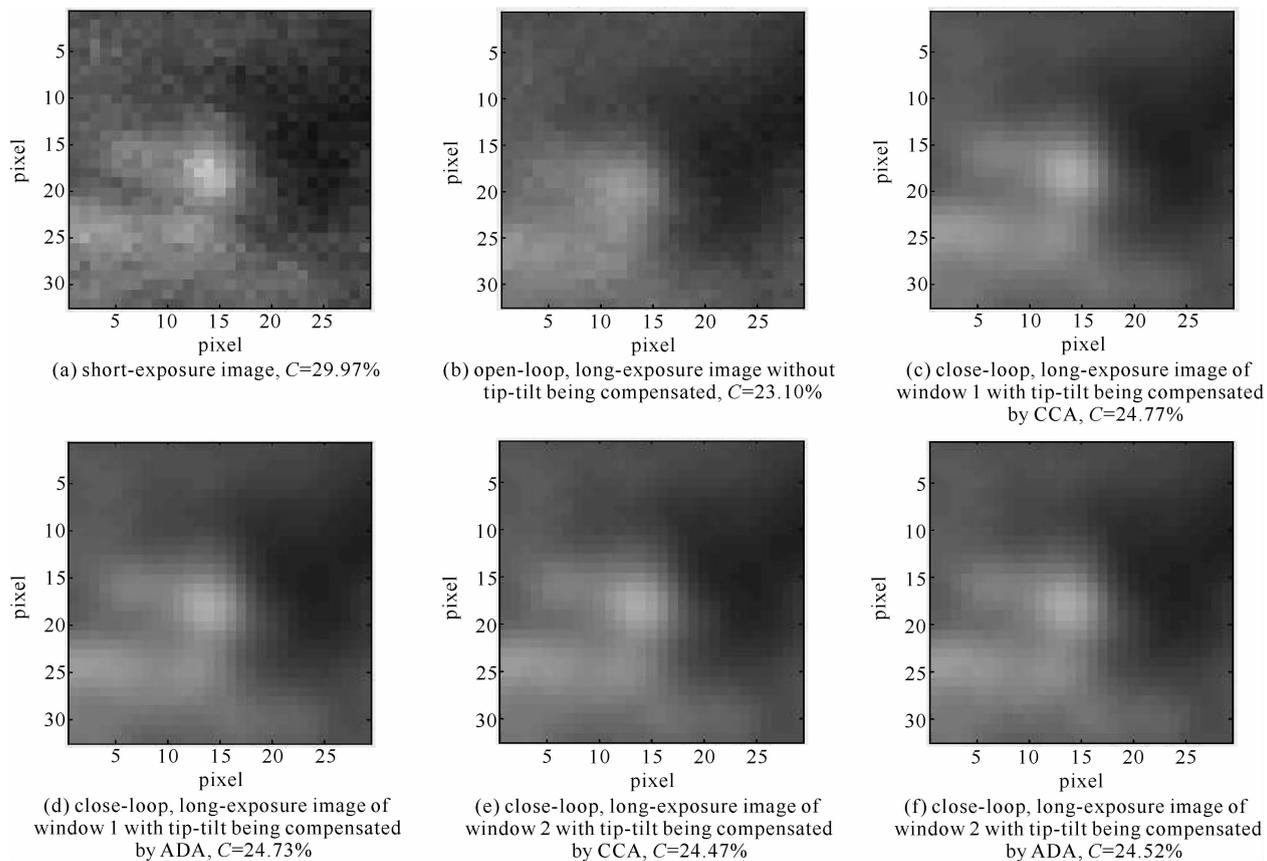


Fig. 6 Short-exposure image and long-exposure images with and without tip-tilt being compensated for window 1 and 2

图 6 短曝光图像和未去除倾斜量与去除倾斜量的长曝光图像(窗口 1 和 2)

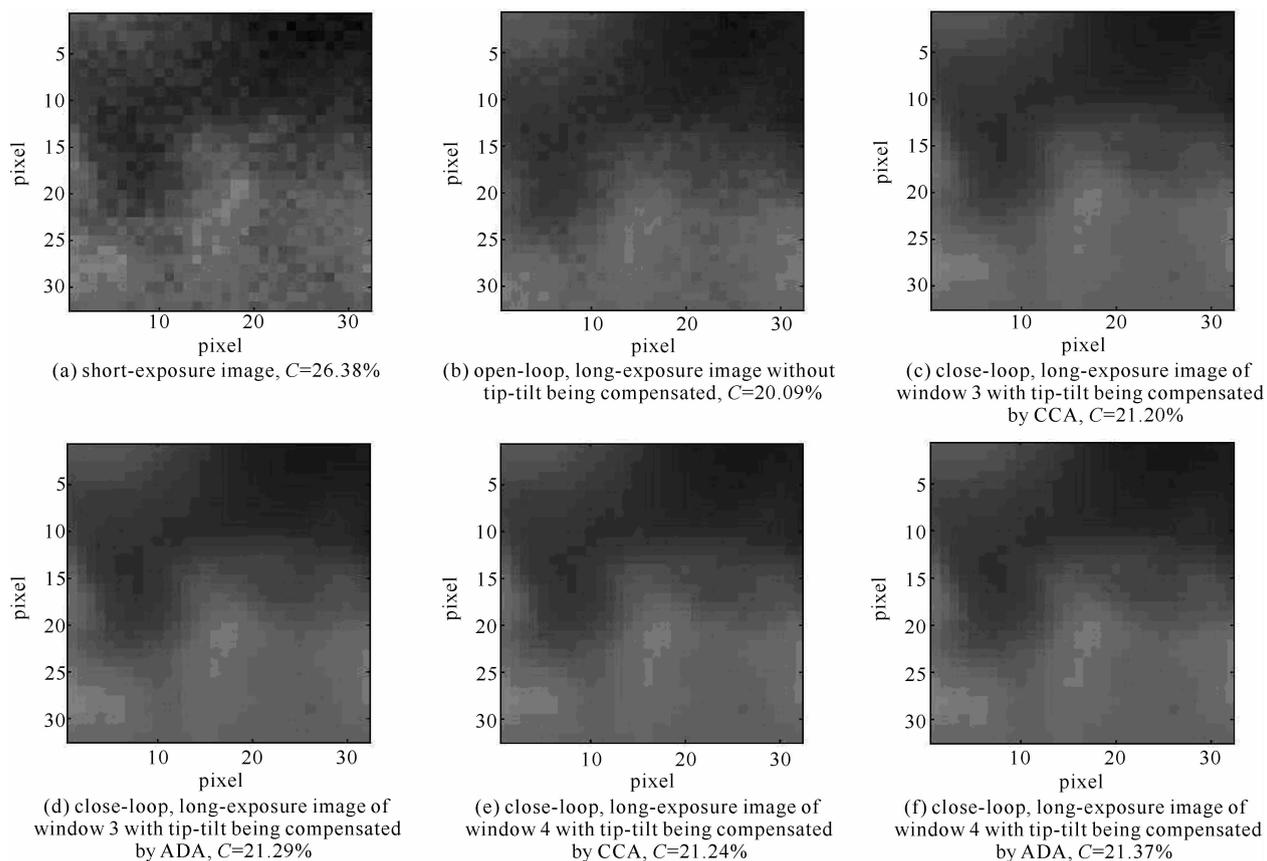


Fig. 7 Short-exposure image and long-exposure images with and without tip-tilt being compensated for window 3 and 4

图 7 短曝光图像和未去除倾斜量与去除倾斜量的长曝光图像(窗口 3 和 4)

4 算法比较分析

绝对差分算法和互相关函数法的运算量从运算次数来看基本相当,都为 $O[M^2(N-M+1)^2]$,其中 $O()$ 表示运算的阶。但绝对差分算法只有加减运算,而互相关函数法包含乘加运算。从算法的硬件实现角度来讲,含有乘加运算的算法比只含有加减运算的算法占用资源更多,运算延迟更长^[8]。

由图 2 至图 7 及表 1 的结果可以对两种算法的性能进行评估,可以看出:(1)四个窗口根据两种算法所提取的波前倾斜量进行去除倾斜量的叠加所得到的闭环长曝光图像的对比度均比未去除倾斜量所得的开环长曝光图像的对比度高。且闭环长曝光图像的细节要比开环长曝光图像的多。由此可以说明,两种算法可以用来提取基于月面扩展目标的大气波前倾斜量;(2)当参考窗口中包含的月面特征较明显时(窗口 1 和 2),选用较小的参考窗口(窗口 1)已经足够。选用较大的参考窗口(窗口 2)反而会使闭环长曝光图像的对比度下降,这主要是由于选用较大的参考窗口可能会超过等晕区的大小,由此求出的波前倾斜量存在非等晕误差。当参考窗口中包含的月面特征较不明显时(窗口 3 和 4),选用较大的参考窗口(窗口 4)才会使闭环长曝光图像的对比度较好。此时月面特征的不明显对于倾斜量提取的影响要大于等晕区的限制;(3)当参考窗口中的月面特征较明显时(窗口 1),互相关函数法性能较好。当参考窗口中的月面特征不明显或选用较大的参考窗口时,绝对差分算法更适合用来求取大气波前倾斜量。

5 结 论

本文考虑了将自适应光学技术应用于月球激光测距中以实时校正由于大气湍流的影响而造成的到达月球表面激光束的扩展与漂移效应。利用不同大小、包含不同月面特征的窗口对采集的月球表面图像进行了波前倾斜量提取,模拟了去除倾斜量与未去除倾斜量的长曝光图像效果。通过闭环长曝光图像的对比度对两种算法的性能进行了分析对比。通过比较可以看出,月球激光测距中,绝对差分算法更适合用来提取大气波前倾斜量。

在实际应用过程中,考虑到大气湍流的时间特性(大气湍流的“冻结”时间为几 ms),为了满足实时性的要求,必须在一个“冻结”周期内完成月面图像获取、大气波前倾斜量提取并将信号放大传送到倾斜镜完成校正。因此,所采集的单帧月面图像的曝光时间要在满足信噪比的情况下尽量短。另外,考虑到大气湍流的空间特性(大气等晕角为几角秒),图像像元对应的视角不可太大或太小。视角太大则窗口中图像细节少,影响算法的有效运行,造成提取的倾斜量误差较大;视角太小造成待比对图像和参考图像间的偏移像素数增加,增大了算法的运算量,影响倾斜量校正的实时性。

自适应光学技术应用于月球激光测距试验中,是一项全新的尝试。以月面作为参考信标提取大气波前倾斜量的局限性在于当月面反射器附近的月面没有被太阳照亮时不能进行此项试验。解决这一矛盾的方法是采用激光引导星,今后的工作中我们将加以研究。

致 谢 本文在采集月面数据过程中得到中科院光电所廖周等人的大力支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Xiong Y H, Feng H S. Applications of adaptive optics in lunar laser ranging[C]//Proc of SPIE. 2003, **4839**:88-93.
- [2] Shelus P J. McDonald observatory lunar laser ranging: Beginning the second 25 years[C]//Proc of the 172nd Symposium of the International Astronomical Union. 1996:409-414.
- [3] Samain E. Milimetric lunar laser ranging at OCA(Observatoire de la Côte dAzur)[J]. *Astron Astrophys Suppl*, 1998, **130**:235-244.
- [4] Von Der Luhe O. A study of a correlation tracking method to improve imaging quality of ground-based solar telescopes[J]. *Astron Astrophys*, 1983, **119**:85-94.
- [5] Ballesteros E, Collados M, Bonet J, et al. Two-dimensional high spatial resolution solar spectroscopy using a correlation tracker. I: Correlation tracker description[J]. *Astron Astrophys Suppl*, 1996, **115**:353-365.
- [6] Rao C H, Jiang W H. Performance on the 61-element upgraded adaptive optics system for 1.2 m telescope of Yunnan observatory[C]//Proc of SPIE. 2004, **5639**:11-20.
- [7] Rao C H, Jiang W H, Ling N, et al. Tracking algorithm for low contrast extended object[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2001, **42**(3):329-338.
- [8] 周维超. 太阳自适应光学系统中低对比度扩展目标相关跟踪系统研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2003:14. (Zhou Weichao. Research on the low contrast extended object correlation tracker for the solar adaptive optics system. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences. 2003:14)

Performance evaluation of atmospheric tip-tilt computing algorithms based on lunar surface images

Guo Rui, Xiong Yaoheng, Li Rongwang, Zhou Yu

(Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)

Abstract: In order to enhance the returned photon numbers in lunar laser ranging, adaptive optics is considered to be applied to the 1.2 m telescope of Yunnan observatory to correct the telescope tracking error and the laser beam jitter caused by the turbulence. According to the low contrast extended character of the lunar surface, atmospheric tip-tilts were computed with cross correlation and absolute difference algorithms based on the collected lunar surface images. Long exposure images of the lunar surface were simulated with atmospheric tip-tilts being and not being compensated. The contrast of the lunar surface images were enhanced when the atmospheric tip-tilts were compensated. It is revealed that the absolute difference algorithm is better in computing the atmospheric tip-tilt in lunar laser ranging.

Key words: adaptive optics; algorithm analysis; atmospheric tip-tilt; lunar surface images; lunar laser ranging

* * * * *

* 简 讯 *

《强激光与粒子束》入编原子能技术类核心期刊

《强激光与粒子束》是由中国工程物理研究院、中国核学会和四川核学会主办的国内外公开出版的科技期刊,1989年创刊,主要报道我国高能激光与粒子束技术领域的基础理论、实验与应用研究的成果和最新进展。内容涉及高功率激光(含高功率微波)与粒子束的产生、传输及其与物质的相互作用。主要栏目:高功率激光与光学、ICF与激光等离子体、高功率微波、加速器技术、粒子束技术和脉冲功率技术。

1996年《中文核心期刊要目总览》(第二版)将《强激光与粒子束》列为物理类、原子能技术类和无线电电子学和电信技术三个类别中文核心期刊;2000年再次入编其第三版三个类别中文类核心期刊;2004年入编其第四版物理学类、原子能技术类中文核心期刊;2008年入编最新版(第五版)之原子能技术中文类核心期刊。

《中文核心期刊要目总览》简介:

北京大学图书馆依据文献计量学的原理和方法,经研究人员对相关文献的检索、计算和分析,以及学科专家评审,已经连续出版了五版《中文核心期刊要目总览》,该书主要是为图书情报部门对中文学术期刊的评估与订购、为读者导读提供参考依据。2008年版(即第五版)已于2008年12月由北京大学出版社出版。为使评价结果尽可能更准确地揭示中文期刊发展变化的实际情况,课题组认真总结了前四版的研制经验,对核心期刊评价的基础理论、评价方法、评价软件、核心期刊的作用与影响等问题进行了深入研究,在此基础上,进一步改进评价方法,使之更加科学合理。第五版核心期刊定量评价,采用了被引量、被摘量、被引量、他引量、被摘率、影响因子、获国家奖或被国内外重要检索工具收录、基金论文比、Web下载量9个评价指标,选作评价指标统计源的数据库及文摘刊物达80余种,统计文献量达32400余万篇次(2003至2005年),涉及期刊12400余种。该版还加大了专家评审力度,5500多位学科专家参加了核心期刊评审工作。经过定量评价和定性评审,从我国正在出版的中文期刊中评选出1980余种核心期刊,分属七大编73个学科类目。(肖燕)