

基于多核 CPU 的太阳自适应图像斑点重建技术

唐若林^{1,2,3}, 田雨^{1,2}, 钟立波^{1,2}, 饶长辉^{1,2}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 地基太阳高分辨力成像中, 自适应光学系统补偿了图像中心等晕区的像差, 需要斑点图像重建技术用来产生全视场衍射极限分辨率的图像。一个从 Matlab 程序移植而来的 C 语言程序被设计用于加速处理。该程序采用斑点干涉法重建图像的傅里叶振幅和斑点掩膜法重建图像的傅里叶相位。使用 OpenMP 进行加速, 使核心间共享了部分内存资源, 图像按子块进行并行计算。移植过程中程序算法上进行了必要的优化并移除了大量的冗余计算。程序使用英特尔 ICC 编译器编译, 运行在一个 12 核的 Linux 服务器上。一张 1280 pixel × 1280 pixel 的图像可以在 31 s 内重建完成。相对于单核运行, 加速比最高可以达到 10.66。单台服务器上相对于并行接口获得更好的扩展性。

关键词 图像处理; 图像重建技术; 斑点干涉法; 斑点掩膜法; 并行计算

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061001

Adaptive Solar Speckle Image Reconstruction Based on Multi-Core CPU

Tang Ruolin^{1,2,3}, Tian Yu^{1,2}, Zhong Libo^{1,2}, Rao Changhui^{1,2}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In solar ground-based high resolution imaging, the speckle image reconstruction is used to yield diffraction-limited resolution for partially corrected images with the solar adaptive optics system. The C language program which adopts speckle interferometry to reconstruct the Fourier amplitudes and speckle masking to reconstruct the Fourier phase is generated from Matlab procedure. The speckle image reconstruction is based on the multi-core central processing unit architecture. The C program is parallelized by OpenMP, and the program is partitioned by sub-image. In addition, the redundancy calculating is removed. This program is compiled by Intel ICC and run on a 12 cores server with Centos 7.0. As a result, a 1280 pixel × 1280 pixel object image can be reconstructed from 100 speckle images within 31 s. Compared with the program run on single core, the speedup is around 10.66. The scalability is better than the program that parallelized by message-passing interface is single server.

Key words image processing; image reconstruction techniques; speckle interferometry; speckle masking; parallel computing

OCIS codes 100.3010; 110.1080; 110.3010

1 引言

大气湍流限制了地基空间望远镜的成像分辨率。自适应光学系统和图像重建技术通常用于提升成像质

收稿日期: 2017-01-20; **收到修改稿日期:** 2017-02-20

基金项目: 中国科学院国防科技创新基金项目(YJ16K006)

作者简介: 唐若林(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像并行计算方面的研究。E-mail: tangruolin@sina.com

导师简介: 饶长辉(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn(通信联系人)

量。目前,大型望远镜一般都配备有自适应光学系统。传统自适应光学系统只能在图像中心等晕区内补偿像差使成像接近衍射极限。在太阳观测中,目标是扩展目标,传统自适应光学系统不能在全视场内获得衍射极限图像。所以需要利用图像重建技术获得全视场的高分辨力图像。基于斑点干涉法和斑点掩膜法的图像重建技术具有较高的图像重建精度,长久以来被广泛应用在天文图像的事后处理中,但是由于算法的数据量及计算量较大,重建耗时长也一直限制了算法的普遍应用。

1970年,Labeyrie^[1]提出了斑点干涉法,利用连续的短曝光图像重建出了星体图像的傅里叶振幅。1977年 Weigelt^[2]提出了斑点掩膜法,利用三次相关算法来重建目标的相位。1984年,von der Lühe^[3]通过谱比法得到大气湍流的相干长度,进而可以得到重建时的斑点传递函数。2008年,Wöger等^[4-5]开发了图像重建软件 KISIP 用于重建太阳图像,从 100 张斑点图中重建一张 1024 pixel×1024 pixel 的图像需要耗时 23 s。程序运行在 18 个节点的计算集群上,每个节点配有 2 个英特尔双核处理器(3 GHz)和 4 GB 内存。2014年,Li等^[6]利用 555 个计算核心重建一张 1280 pixel×1280 pixel 的图像需耗时 18 s。

在太阳七波段成像观测中^[7],每天会产生约 2 TB 的数据。在没有采用并行计算时,数据的处理速度无法跟上数据的采集速度。过去,每天采集的图像不能在一天中处理完成。使用 Matlab 软件重建一张 1280 pixel×1280 pixel 的图像需耗时将近一天。随着观测数据量的增长,需要引入并行计算来满足数据的处理需求,陈冰倩等^[8]利用多核 CPU 平台作为波前处理,陈骁等^[9]对激光雷达进行了仿真加速。为了实现图像的实时处理需要,使用多核 CPU 并行计算。

本文程序运行在一台配有英特尔至强 E5-2670 CPU(12 核,主频 2.3 GHz)和 16 GB 内存的 Linux 服务器上。单台服务器不需要通过网络进行数据传输,并易于程序优化。过去,一般按核心数将一个服务器虚拟成对应数量的计算节点,这样,同一台机器上的每一个节点都被孤立起来。然而将每台服务器认为是一个计算节点可以使核心间共享数据和缓存,获得更好的加速比。本文在介绍斑点干涉法、斑点掩膜法的基础上,给出了基于 OpenMP 的并行划分以及并行结果。

2 基本原理

由于大气湍流的立体分布,不同方向的光线受到的湍流扰动不同。大视场高分辨力重建中,首先需要按照等晕区的尺寸将图像分割成不同子块,然后通过各个子块分别重建再拼接组合成大视场重建结果。考虑到快速傅里叶变换(FFT)的计算效率,子块的大小应选为 2 的幂次方。

2.1 傅里叶振幅重建

Labeyrie 提出斑点干涉法^[1],认为短曝光图像含有目标的高频信息,一段连续的短曝光图像可以重建图像的傅里叶振幅。短曝光图像的傅里叶变换表示为

$$I_i(\mathbf{f}) = O(\mathbf{f})S_i(\mathbf{f}), \quad (1)$$

式中 $I_i(\mathbf{f})$ 为图像的傅里叶变换, $S_i(\mathbf{f})$ 为光学传递函数, $O(\mathbf{f})$ 为目标的傅里叶变换。将(1)式变形为

$$\langle |I_i(\mathbf{f})|^2 \rangle = |O(\mathbf{f})|^2 \langle |S_i(\mathbf{f})|^2 \rangle, \quad (2)$$

式中 $\langle |I_i(\mathbf{f})|^2 \rangle$ 表示 $|I_i(\mathbf{f})|^2$ 的平均值。

$$\langle |O_i(\mathbf{f})|^2 \rangle = \frac{|I(\mathbf{f})|^2}{\langle |S_i(\mathbf{f})|^2 \rangle}, \quad (3)$$

式中 $\langle |S_i(\mathbf{f})|^2 \rangle$ 为系统的斑点传递函数,可以通过理论计算或实测得到。与夜天文不同,太阳观测没有激光导星和参考光。因此,光学传递函数只能从图像中得到。当大气湍流统计特性满足 Kolmogorov 谱的情况下,可以通过大气湍流的相干长度 r_0 计算得到。von der Lühe 提出使用谱比法计算 r_0 ,谱比定义为

$$\epsilon(\mathbf{f}) = \frac{|\langle I_i(\mathbf{f}) \rangle|^2}{\langle |I_i(\mathbf{f})|^2 \rangle} = \frac{|\langle S_i(\mathbf{f}) \rangle|^2}{\langle |S_i(\mathbf{f})|^2 \rangle}. \quad (4)$$

对应于不同 r_0 的一系列的 $S(\mathbf{f})$ 和 $\epsilon(\mathbf{f})$ 作为基准被生成。斑点图像的 $\epsilon(\mathbf{f})$ 可以从图像中得到。匹配斑点图的 $\epsilon(\mathbf{f})$ 和基准 $\epsilon(\mathbf{f})$,最相近的基准 $\epsilon(\mathbf{f})$ 被认为是图像的 $\epsilon(\mathbf{f})$ 。同时,也得到斑点图的 $\langle |S_i(\mathbf{f})|^2 \rangle$ 。在太阳自适应图像重建中,针对自适应光学成像特性将图像按照环形分割成若干区域,可认为自适应光学系统在每个环上都子块矫正到相同的质量,同一环上的子块 r_0 相同。将环形数据处理完再

引入自适应光学系统的校正信息,从而得到更符合自适应光学成像特重建结果。

2.2 傅里叶相位重建

Weigelt 提出可以使用斑点掩膜法重建目标的傅里叶相位^[2],使图像达到衍射极限分辨率。双频谱 $B(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ 是图像的三次相关,定义为

$$B(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \langle I_i(\mathbf{u})I_i(\mathbf{v})I_i(-\mathbf{u} - \mathbf{v}) \rangle, \quad (5)$$

将(1)式代入(5)式可得:

$$\|B(\mathbf{u}, \mathbf{v})\| = \frac{O(\mathbf{u})O(\mathbf{v})O(-\mathbf{u} - \mathbf{v})}{|O(\mathbf{u})O(\mathbf{v})O(-\mathbf{u} - \mathbf{v})|}, \quad (6)$$

式中 $\|B(\mathbf{u}, \mathbf{v})\|$ 表示 $B(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ 的相位。一般来说 \mathbf{v} 是一个各分量都小于 5 的二维向量。将(6)式变形,可以表示 $O(\mathbf{u})$ 和 $B(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ 之间的关系

$$\|O(\mathbf{u})\| = \left\langle \frac{\|B(\mathbf{u}, \mathbf{v})\|}{\|O(\mathbf{v})\| \|O(-\mathbf{u} - \mathbf{v})\|} \right\rangle, \quad (7)$$

式中 $O(\mathbf{u})$ 是埃尔米特矩阵, $O(0)$ 的值被设为 0。将初值代入(7)式,傅里叶相位可以从低频到高频依次重建完成。利用双频谱数据的对称性,对数据进行映射,使得串行版本程序速度提高一倍。

2.3 并行化

Matlab 串程序由 Zhong 等^[10-11]研究设计,其步骤包括:图像分割、子块对齐、 r_0 计算、傅里叶振幅重建、傅里叶相位重建和子块拼接。在单台服务器上,使用 OpenMP 并行串程序效率非常高。不同于 Message-Passing Interface (MPI),OpenMP 可以使各个核心同时访问共享内存,这样可以节约数据传输的时间、减小内存的使用带宽,也不需要设置控制节点。图 1 为程序框图。

在图像分割部分,首先要选出图像质量最好的一张作为参考图。实际中可能采用不同的图像评价算法,

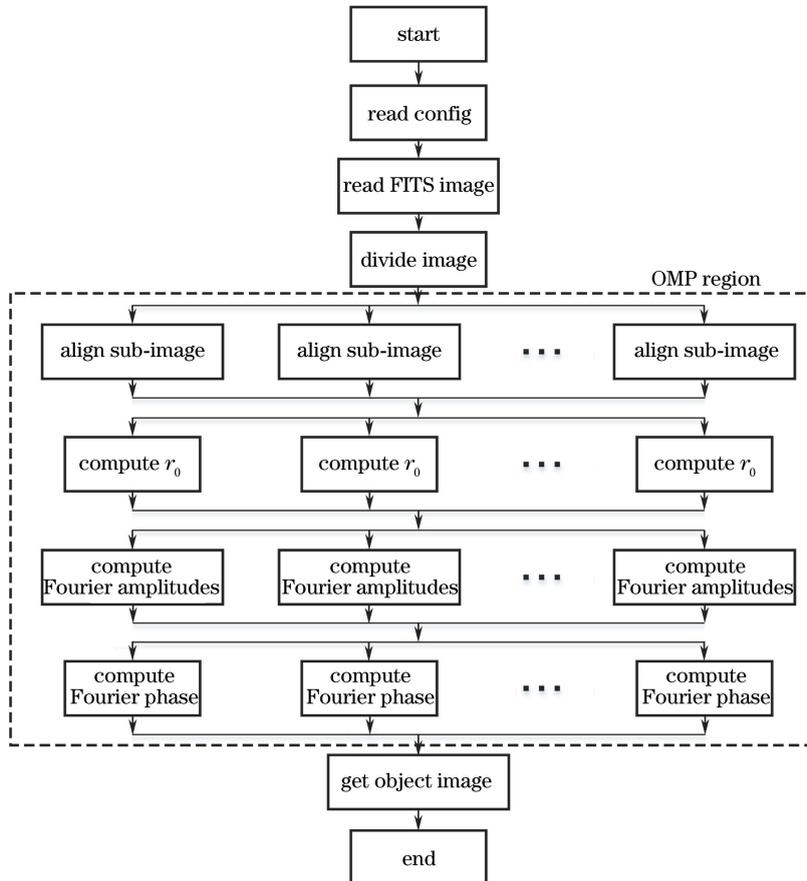


图 1 程序框图

Fig. 1 Program chart

有的算法含有循环依赖,不容易并行,所以本文采用每张图片的评价作为一个并行单元。选出参考图后,将剩余的图片 and 参考图对齐,将图片划分成若干个子块,子块需要再次向参考图对齐。

经自适应光学系统补偿后的斑点图像,一般认为在距离自适应光学系统锁定区级相等的同一个环形区域得到自适应光学系统的校正能力相同,并且在计算谱比值及斑点传递函数时需要引入自适应光学系统的校正信息。单独计算每个子块的 $\epsilon(f)$ 后求得环形区域平均的 $\epsilon(f)$,取平均 $\epsilon(f)$ 对应的传递函数进行振幅重建,图像子块的傅里叶振幅独立地进行重建。并且,子块级并行的结果优于子块内部并行。每个子块最大只有 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,但是 12 个核心同时访问一个子块图像生成双频谱会因为缓存一致性和内存读取原子性的原因,导致读取效率降低。

傅里叶相位重建中生成双频谱占用了整个程序 70% 的时间,如果使用一个核心计算一个子块的相位,随着核心数的增加内存带宽的资源不能相适应。每一个双频谱的生成要访问 6 个浮点数的傅里叶相位和 4 个整型的双频谱索引。本文提出所有的核心共享一个双频谱索引的并行方法,双频谱索引只需生成一次,在程序运行中不会改变。在多核 CPU 中,所有的核心共享一个 L3 缓存,共享一个双频谱索引可以减少对内存带宽的使用。双频谱生成时对内存的访问是非连续的,关闭 CPU 的行预取进而节约不必要的内存带宽占用。虽然理论上每个子块的运行时间相同,但还是需要使用动态调配的方法进行任务分配,这是因为操作系统会占用若干个核心进行系统调用。

最后将重建完成的子块拼接成目标图像,因为相邻子块中有一半的重叠区域,因此选择子块内部的矩阵加法作为并行任务单元,适当提高任务单元的大小,以去除可能出现的伪并行,以达到理想的加速比。

3 实验结果

程序使用英特尔 ICC 编译器编译,运行在一台配有英特尔至强 E5-2670 v3(2.3 GHz, 12 核)和 16 GB 内存的 Linux 服务器上。

本文利用 100 张斑点图重建出一张目标图像。图 2 为斑点图和重建后的图像。使用英特尔 VTune Amplifier 软件测试程序的运行时间和加速比。结果如图 3 所示,圆点表示子块大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$,三角形表示子块大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。

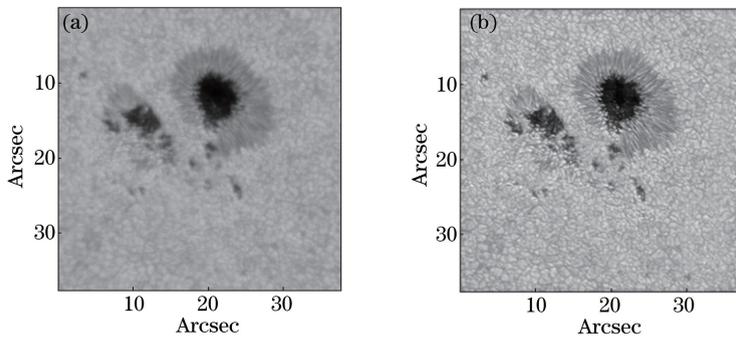


图 2 (a) 斑点图像和 (b) 重建目标图像

Fig. 2 (a) Speckle image and (b) reconstructed object image

如图 3 所示,随着 CPU 核心数的增加,运行时间减少,相对的加速比也增大。用 12 核处理 $1920 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$ 图像,子块选取为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 时程序的最大加速比为 10.66。串行时间为 1.4 s,理论加速比为 11.73,加速效率为 90.8%。在图 3(c)中,当核心数为 9,子块大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 时,子块的数量是核心数的整数倍。所以程序能达到很理想的加速比 8.43,比 10 核时的加速比 8.39 还要高。

4 分析与讨论

与 KISIP 程序^[4-5]相比,KISIP 程序使用 MPI 方法进行并行。在单台服务器上,KISIP 程序使用一个核心作为控制核心,其他核心作为子核心,因此 KISIP 在运行时需要损失一个核心的计算资源。本文程序和 KISIP 程序的运行时间和加速比对比如图 4 所示。在同样的硬件条件下,选用同样的斑点图像和子块大小,

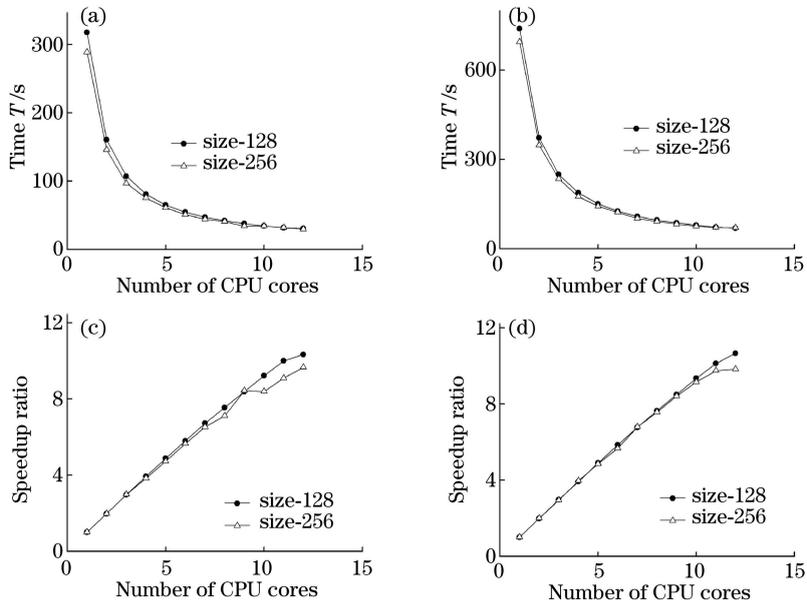


图3 程序运行时间、加速比和核心数的关系。(a) 1280 pixel \times 1280 pixel 图像的运行时间;(b) 1920 pixel \times 1920 pixel 图像的运行时间;(c) 1280 pixel \times 1280 pixel 图像的加速比;(d) 1920 pixel \times 1920 pixel 图像的加速比

Fig. 3 Elapsed time and speedup ratio with different numbers of CPU cores. (a) Elapsed time of 1280 pixel \times 1280 pixel speckle image; (b) elapsed time of 1920 pixel \times 1920 pixel image; (c) speedup ratio of 1280 pixel \times 1280 pixel image; (d) speedup ratio of 1920 pixel \times 1920 pixel image

KISIP 的最大加速比为 8.40, 本文程序的加速比达到 9.66。忽略控制核心的影响, 程序 11 核的加速比为 9.10, 也略高于 KISIP 程序的加速比。将单台计算机看作是一个整体, 可以节约带宽资源、提高加速比。

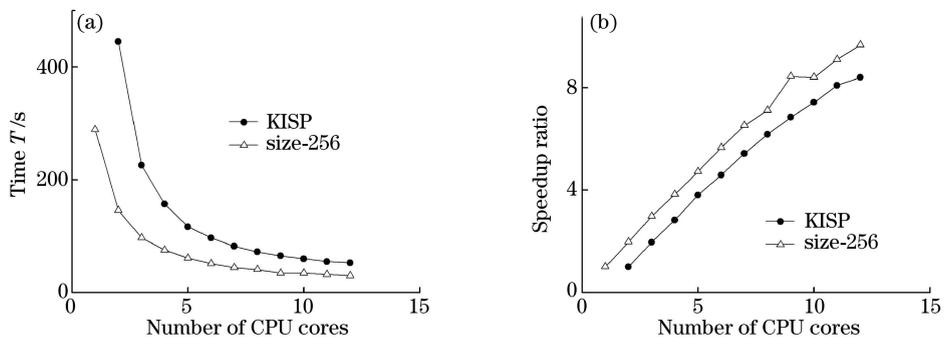


图4 本文程序与 KISIP 程序的运行时间、加速比。

(a) 1280 pixel \times 1280 pixel 图像的运行时间;(b) 1280 pixel \times 1280 pixel 图像的加速比

Fig. 4 Elapsed time and speedup ratio in the KISIP and our program.

(a) Elapsed time of 1280 pixel \times 1280 pixel image; (b) speedup ratio of 1280 pixel \times 1280 pixel image

5 结 论

在全视场范围内重建出达到衍射极限分辨率的目标图像。使用 12 核在 31 s 内完成一张 1280 pixel \times 1280 pixel 图像的重建。与单核运行相比, 加速比最大可以达到 10.66, 并行效率为 90.8%, 达到较理想的加速比。该程序使用单台计算机可以满足观测中 705 nm 和 656 nm 的数据处理任务要求。程序运行时间随图像像素数量线性增长, 且可以处理不同大小的图像。程序将一台计算机看作是一个整体, 并采用 OpenMP 并程序获得共享内存的访问, 节约了内存带宽, 特别是双频谱索引的数据传输。获得了比 KISIP 高的加速比, 以及一个额外核心的计算资源。未来程序将被移植到计算集群上运行, 以获得更高的加速比。

参 考 文 献

- [1] Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analysing speckle patterns in star images[J]. *Astron Astrophys*, 1970, 6(1): 85-87.
- [2] Weigelt G P. Modified astronomical speckle interferometry "speckle masking" [J]. *Optics Communications*, 1977, 21(1): 55-59.
- [3] von der Lühe O. Estimating Fried's parameter from a time series of an arbitrary resolved object imaged through atmospheric turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 1984, 1(5): 510-519.
- [4] Woger F, von der Luhe O. KISIP: a software package for speckle interferometry of adaptive optics corrected sola data [C]. *SPIE*, 2008, 7019: 70191E.
- [5] Woger F, Ferayorni A. Accelerated speckle imaging with the ATST visible broadband imager[C]. *SPIE*, 2012, 8451: 84511C.
- [6] Li X B, Wang F, Xiang Y Y, *et al*. Parallel image reconstruction for new vacuum solar telescope[J]. *Journal of Korean Astronomical Society*, 2014, 47(2): 43-47.
- [7] Rao C, Zhu L, Rao X, *et al*. 37-element solar adaptive optics for 26 cm solar fine structure telescope at Yunnan astronomical observatory[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(10): 966-968.
- [8] Chen Bingqian, He Jiuling, Wang Caixia, *et al*. A correlating Hartmann-Shack wavefront processor using multi-core CPU[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0312001.
陈冰倩, 何杰铃, 王彩霞, 等. 一种使用多核 CPU 的相关哈特曼-夏克波前处理机[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0312001.
- [9] Chen Xiao, Shi Zhiguang, Yang Weiping, *et al*. A fast simulation algorithm of scanning laser radar[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0814002.
陈 骁, 石志广, 杨卫平, 等. 扫描型成像激光雷达仿真加速算法[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0814002.
- [10] Zhong L, Tian Y, Rao C. Speckle image reconstruction of the adaptive optics solar images[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 29249-29259.
- [11] Zhong Libo, Tian Yu, Rao Changhui. Influence of static aberrations on the accuracy of cross spectrum phase reconstruction and the compensated method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0701002.
钟立波, 田 雨, 饶长辉. 静态像差对交叉谱相位复原精度的影响及补偿方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0701002.