



DOI: 10.12086/oe.2018.170730

自适应光学图像事后重建技术研究进展

鲍华^{1,2}, 饶长辉^{1,2*}, 田雨^{1,2}, 钟立波^{1,2}, 陈浩^{1,2,3}, 龙潇^{1,2,3}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: 为进一步提高自适应光学系统的成像质量, 本文针对目前广泛使用的盲解卷积, 相位差法和斑点重建技术开展了深入研究; 详细分析了以上三种技术的各自特点、应用场景和处理对象, 并结合自适应光学系统的特点, 有针对性的加以算法改进; 实验采用自适应光学人眼视网膜细胞图像和自适应光学太阳黑子图像进行算法验证, 结果表明经改进后的图像处理技术可以有效提高自适应光学图像的质量和分辨力, 较好的满足了自适应光学系统对图像事后处理的需求。

关键词: 自适应光学; 图像重建; 盲解卷积; 相位差法; 斑点重建

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

引用格式: 鲍华, 饶长辉, 田雨, 等. 自适应光学图像事后重建技术研究进展[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170730

Research progress on adaptive optical image post reconstruction

Bao Hua^{1,2}, Rao Changhui^{1,2*}, Tian Yu^{1,2}, Zhong Libo^{1,2}, Chen Hao^{1,2,3}, Long Xiao^{1,2,3}¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to further improve the imaging quality of the adaptive optical system, the widely used image reconstruction technologies at present, including blind deconvolution, phase diversity and speckle imaging, are extensively researched in this paper. The characteristics, application scenes and processing objects of each technology are analyzed in detail and the algorithms are improved reasonably combined with the characteristics of the adaptive optical imaging system. Experimental results of in vivo human retinal cell image and sunspots image, proved that the improved technologies can effectively increase the quality and resolution of adaptive optical images, and satisfy the needs of adaptive optics system for image post-processing.

Keywords: adaptive optics; image reconstruction; blind deconvolution; phase diversity; speckle imaging

Citation: Bao H, Rao C H, Tian Y, *et al.* Research progress on adaptive optical image post reconstruction[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170730

收稿日期: 2017-12-27; 收到修改稿日期: 2018-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(11178004, 11727805)

作者简介: 鲍华(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究自适应光学图像事后处理及相位差法波前探测。E-mail: hbao@ioe.ac.cn

通信作者: 饶长辉(1971-), 男, 博士, 研究员, 主要从事大口径高分辨力光学成像望远镜技术研究和系统研制工作。

E-mail: chrao@ioe.ac.cn

1 引言

光电成像过程中来自目标的光信号受大气湍流、望远镜像差等外界影响,会使入射光束的波前产生畸变,从而大大降低光学成像系统的分辨力以及成像质量;自上世纪 50 年代,人们提出了自适应光学技术(adaptive optics, AO),有效改善了光学系统的成像质量,已成为天文学地基望远镜克服大气湍流影响的必备技术^[1-3]。但是受限于波前传感器的探测精度,变形镜的有限校正能力,以及控制回路的有限带宽,AO 系统对波前畸变的校正是部分的、不完全的,其校正后的结果依然存在残余像差的影响,为进一步提高 AO 系统的图像质量,服务于 AO 系统的图像事后处理方法一直是该领域的研究热点^[4-5]。

目前常用的图像事后处理方法主要包括盲解卷积、斑点重建和相位差法等,其中盲解卷积技术采用单帧或少数几帧退化图像就可以完成图像重建,对成像系统和处理对象没有特殊要求,实际运用最为灵活,但该方法需要大量的先验信息对算法的求解加以约束,否则难以获得理想的处理结果;斑点重建利用大气湍流的统计特性分别重建目标的相位和振幅,已大量运用于太阳高分辨力图像事后处理,但该方法需要用到大气湍流的统计信息,通常需要上百帧短曝光退化图像才能完成一次图像重建,因此要求成像过程中目标不能出现明显变化;相位差法是一种基于波前像差探测的图像复原技术,通过同时采集同一目标经不同光学通道的一组或多组短曝光图像,不仅可以重建出退化目标的清晰图像,还可以获得导致目标退化的畸变波前,重建结果的可靠性得到较大提高,但该技术需要一套额外的成像装置,而且算法对系统参数比较敏感,在工程运用中还存在一些技术难点。

综上所述,以上三种技术都有各自特点,适用于不同应用场景和处理对象,但是在 AO 系统中要得以成功运用还需要有针对性地加以改进。首先 AO 系统可以校正大部分波前畸变,降低图像重建算法的求解范围,其次 AO 系统的波前残差可以作为一个重要的先验信息对迭代优化算法进行约束,并且闭环图像的信噪比得到较大提升,有助于提高图像重建算法的抗噪能力;但另一方面 AO 系统的引入会导致大气湍流模型的变化,影响残余像差的分布,以及在大视场图像中等晕区对传统图像重建算法的限制。后续的章节中,将分别对这三种方法的基本原理、实现过程,以及在 AO 系统中实际运用的研究进展进行详细阐述。

2 盲解卷积算法

光学成像系统中图像降质模型可以采用如下数学公式表示:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

其中: $g(x, y)$ 为获得的目标观测图像, $h(x, y)$ 为卷积核, $f(x, y)$ 则是需要求解的目标原始图像, $n(x, y)$ 表示随机噪声,“*”则表示空域循环卷积算子。

由式(1)可知,图像复原问题从物理上讲是完成在噪声影响下的解卷积问题(deconvolution),即对记录数据进行求逆的过程,作为目前应用最为广泛的图像事后处理方法,解卷积算法在 AO 图像高分辨力重建领域一直处于主导地位。根据有无波前信息,解卷积算法可以划分为直接波前解卷积(deconvolution wavefront sensor, DWFS)^[6]和盲解卷积(blind deconvolution)。若 h 已知,则对 f 复原就是一种确定性的(deterministic)解卷积,利用直接的解卷积算法即可求解,如逆滤波、Wiener 滤波和改进的固定点图像复原算法等^[7];若 h 未知或是部分未知,对 f 复原则是一个盲或者半盲解卷积问题^[8-10]。

在光学成像系统中, h 可以使用点扩散函数(point spread function, PSF)来代替。PSF 作为一种数学公式描述了理想光源下的光束经过光学路径所发生的畸变。通常情况下图像是由许多点源发出的光与 PSF 卷积后叠加所组成的。因此确定了 PSF 就可以使用其逆函数与实际观测到的图像进行解卷积,从而将真实图像复原出来。而实际系统中找出精确的点扩散函数几乎是不可能的,真实的光学系统在不同的空间点可能有不同的 PSF,同时 PSF 可能非线性,无法用有理函数的形式表达出来,因此对 PSF 的估计精度将决定图像后处理问题结果的优劣。

盲解卷积算法克服了斑点图像重建技术与 DWFS 算法的缺点,直接利用降质图像对原始目标与代表波前扰动的点扩散函数进行估计。但盲解卷积算法存在着极大的不确定性,其主要问题在于方程严重病态,且未知数多于方程个数,导致其稳定性较差,点扩散函数的不确定性太大,难以收敛到真实解,因此盲解卷积算法的成败关键在于如何充分利用 PSF 和图像的先验信息来约束方程的解。迄今为止,人们已提出了多种盲解卷积算法,包括迭代盲解卷积算法^[5]、非负支撑域受限递归逆滤波算法^[9]、全变差正则化盲图像复原算法^[11]、最大似然估计盲解卷积算法^[12]、模型参数估计盲解卷积算法^[13]以及多帧盲解卷积算法^[14]等。

针对 AO 系统中残余像差复杂且难以确定的特点,提出了一种新的多帧迭代盲解卷积算法^[15-16]。该算法最大特点在于有稳定的收敛性,经证明可以保证在参与解卷积算法的降质图像数量足够多的情况下,整个迭代过程一定能收敛。而实践运用中,算法的收敛速度也较快,通常在 20 次迭代以内就可以得到满意的结果,该算法的另一特点是所使用的先验知识只有正性限制与频带限制,而这两项先验实际光学系统中是一定能够确定的,因此该算法有较强的通用性。算法流程图如图 1 所示。

在上述工作基础上,结合 AO 系统特性,利用哈特曼传感器测得的波前残差信息计算初始的 PSF 估计值,提出了增量维纳滤波迭代盲解卷积算法^[17]。该算法有效地解决了人眼视网膜自适应光学系统成像模糊的问题,获得了人眼视网膜的高分辨图像,图 2 中展示了在泛光照明下人眼视网膜自适应光学共焦扫描检眼镜的盲解卷积复原效果,其中图 2(a)是自适应光学系统采集的闭环图像,图 2(b)是盲解卷积算法的重建结果。该算法的优点在于计算量小,易于实时化,可以充分利用图像和 PSF 的先验信息,使算法能够正确

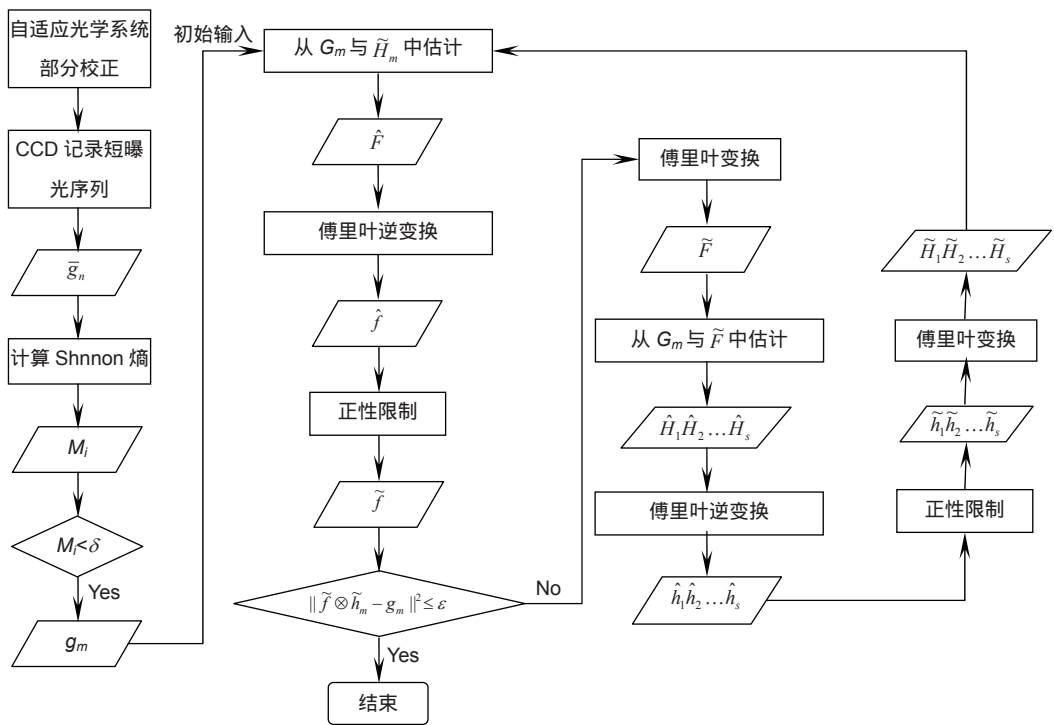


图 1 多帧迭代盲解卷积算法流程图

Fig. 1 Flow chart of multi-frame iterated blind deconvolution

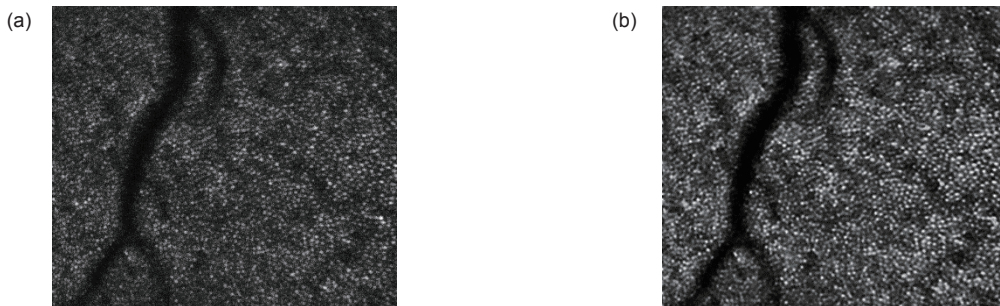


图 2 人眼视网膜图像的盲解卷积复原。(a) AO 闭环校正后的图像; (b) 盲解卷积复原图像

Fig. 2 Retinal image restoration. (a) Degenerated image obtained by AOSLO; (b) Corresponding image reconstructed by blind deconvolution

和快速的收敛。

到目前为止，我们已经设计出了一套完整的解卷积算法框架；该框架可以在不同情况下以最优的选择实现对 AO 图像的快速重建，并在多套自适应光学望远镜获取的图像上进行了充分验证。

3 相位差法

相位差法(phase diversity, PD)最早由 Gonsalves 于 1979 提出^[18]，是一种基于波前像差探测的图像事后复原技术，与其它图像重建技术相比，PD 不仅可以重建出退化目标的清晰图像，还可以获得导致目标退化的畸变波前，算法原理确保重建结果的可靠性较其它方法有较大提高，因此受到国内外广泛研究和关注^[19]。PD 技术的基本原理是在最小二乘或极大似然估计下定义目标函数，并利用非线性最优化原理求解式(2)：

$$E = \sum_{k=1}^K \sum_f |D_k(f) - O(f)H_k(f)|^2, \quad (2)$$

其中： f 表示频域坐标， $D(f)$ 、 $O(f)$ 和 $H(f)$ 分别对应 CCD 采集的存在相位差异的退化图像、重建目标图像和对应点扩散函数的傅里叶变换。

在相位差法技术的发展过程，1994 年 Löfdahl^[20] 最早将 PD 技术用于太阳观测的高分辨力图像重建，而 Paxman、Schulz 和 Fienup 等也相继开展了相关技术研究^[21-23]，并发展出基于多帧盲解卷积和线性约束的相位差斑点法(phase-diversity speckle, PDS)，1998 年 Vogel^[24] 等利用反演问题的相关理论，提出了算法的快速数值解法，2002 年 Löfdahl^[25] 利用 SVST 望远镜对太阳进行观测时，使用 PDS 技术对图像进行重建，取得了很好的处理效果；在波前像差检测方面，1994 年 Kendrick^[26] 等人通过实验验证了相位差波前检测方法用于检测拼接型望远镜系统的连续像差和非连续像差检测的可行性，1998 年 Löfdahl^[27] 等将相位差波前检

测方法用于 Keck II 拼接主镜拼接误差的检测。

近年我国多家研究单位，如中国科学院光电技术研究所、中国科学院云南天文台、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所以及北京理工大学等，也相继开展了 PD 技术的理论基础和天文观测中的应用研究。其中，云南天文台刘忠等利用晶体的偏振原理设计了一种适用于目标偏振特性不明显的 PD 成像装置，并通过数值仿真的方法研究了离焦误差对复原精度的影响^[28]；中科院光电所李斐、鲍华等对 PD 成像系统、误差消除和算法分析开展了大量工作^[29-31]；长春光机所王建立、王斌等将 PD 技术用于光学系统像差检测和夜天文观测，取得了较好的处理结果^[32-33]。目前 PD 技术的理论研究相对充分，但是在实际工程应用中还存在一些技术难点，首先 PD 技术需要一套额外的成像装置，使数据采集满足同一目标和同时性的要求，并且系统离焦量必须准确测量。针对上述问题，我们开展了相位差法成像系统设计和系统离焦量准确测量等相关技术研究。

目前常用的 PD 光学成像系统存在一些局限，例如传统方法利用两个 CCD 分别采集焦面和离焦面图像^[32]，需要对两个相机的参数进行准确标校；并且焦面和离焦面图像之间可能存在相互旋转，因此还需要对两路图像进行几何标定^[33]；另一种常见的 PD 成像装置是采用分光微棱镜组合的方式实现焦面和离焦面光束投射到一个 CCD 靶面，但微棱镜组合的光程差通常是固定的，无法提供逐渐可调的离焦量，并且分光棱镜组合存在多个反射面，对微光学元件的加工提出很高要求。为克服目前使用的 PD 成像系统在工程中运用的不足，我们设计了一种采用中心开孔反射镜的单 CCD 相位差法成像装置，光路结构如图 3 所示。

该装置由光束匹配系统(1)、成像透镜(2)、分光镜(3)、反射镜(4)、带有小孔的反射镜(5)、反射镜(6)、平移机构(7)和(8)，以及光电探测器(9)组成。其中焦面

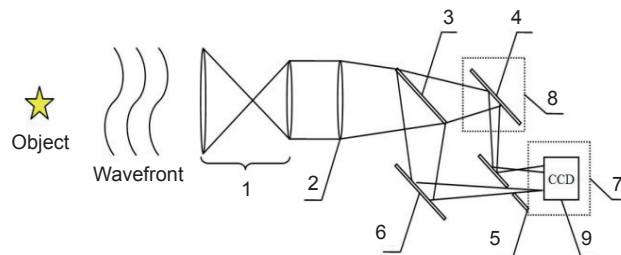


图 3 单 CCD 相位差法成像装置光路结构

Fig. 3 Optical path structure of single CCD phase diversity imaging device

光束通过反射镜(5)预留的小孔到达光 CCD 靶面；离焦面光束通过反射镜(4)增加其到达 CCD 靶面的光程差，获得同一目标的离焦面像。该装置结构简单稳定、系统离焦量及成像区域可以任意调整，较好的满足了 PD 技术对数据采集的需求。

根据 PD 算法的数学原理，要求尽可能精确地获得离焦面光学通道的离焦量大小，系统离焦量准确与否，成为 PD 算法成败的关键因素。目前用于 PD 技术的离焦量测量方法，通常采用测量光程差距离的方式进行计算^[33]，公式如下：

$$\varphi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Delta d}{8(F/D)^2} (x^2 + y^2), \quad (3)$$

式中： F 为成像系统焦距， D 为成像系统口径， λ 为光波波长， $(x,y) \in [-1,1]$ 为归一化坐标， Δd 为离焦面光学通道的光程差。

由上述分析可知，传统离焦量测量技术依赖于光栅尺等精密工具测量 CCD 平移距离，但是该方法机构复杂、过程繁琐并且精度不高。根据式(3)可知，假设成像系统参数 $\lambda = 632.8 \mu\text{m}$ ， $F = 300 \text{ mm}$ ， $D = 16 \text{ mm}$ ，为获取 $PV = 1.0 \lambda$ 的离焦量，需要光程差 $\Delta d = 1.78 \text{ mm}$ ，如果光程差的测量仅产生 0.2 mm 误差，会导致离焦波面的 PV 产生大于 10% 的偏差，这将使得 PD 技术无法正确探测波前和复原图像；另一方面，实际系统中 CCD 的移动轴和系统光轴不可避免地存在一定夹角，因此 CCD 的平移距离不可能等于真实的光程差，传统离焦量测量技术难以用于实际工程。基于上

述考虑，我们提出了一种结构简单、操作灵活、计算结果更加准确可靠的光学测量方法。

根据傅里叶光学原理可知，光瞳面和成像面光场存在傅里叶正-逆变换关系，广义光瞳函数 $P(\mathbf{u})$ 定义如下：

$$P(\mathbf{u}) = A(\mathbf{u}) \exp(j(\phi(\mathbf{u}))), \quad (4)$$

式中： j 为虚数单位， $\phi(\mathbf{u})$ 为波前相位， $A(\mathbf{u})$ 为孔径函数，在不考虑闪烁的情况下一般假设光瞳是清澈的，即 $A(\mathbf{u})$ 在光瞳内为 1，在光瞳外为 0。当目标为非相干光源时，成像系统的 PSF 可采用如下公式计算：

$$h(\mathbf{x}) = |F\{P(\mathbf{u})\}|^2, \quad (5)$$

式中 $F\{\}$ 表示傅里叶变换。

测量过程采用平行光入射成像系统，计算过程与传统 GS 算法一致，但是在迭代过程中利用离焦面光学通道仅包含离焦相差这一先验信息，结合 Zernike 多项式的正交性，对迭代过程加以约束，从而大大提高算法的测量精度，算法流程如图 4 所示。

实验采用液晶空间光调制器产生 $PV = 1.5 \lambda$ 的离焦相差，通过本文方法测得的离焦相差 $PV = 1.43 \lambda$ ，相对误差仅为 4.6%，测量精度优于 $1/20 \lambda$ 精度，可以保证 PD 算法的参数需求。在上述工作基础上，我们在 37 单元太阳自适应光学平台上初步开展了相位差法图像重建实验，图 5(a)为太阳黑子自适应光学闭环图像，图 5(b)为相位差法重建结果，图 5(c)为相位差法探测的残余波前像差。

根据重建结果可以看到，太阳黑子的精细结构得

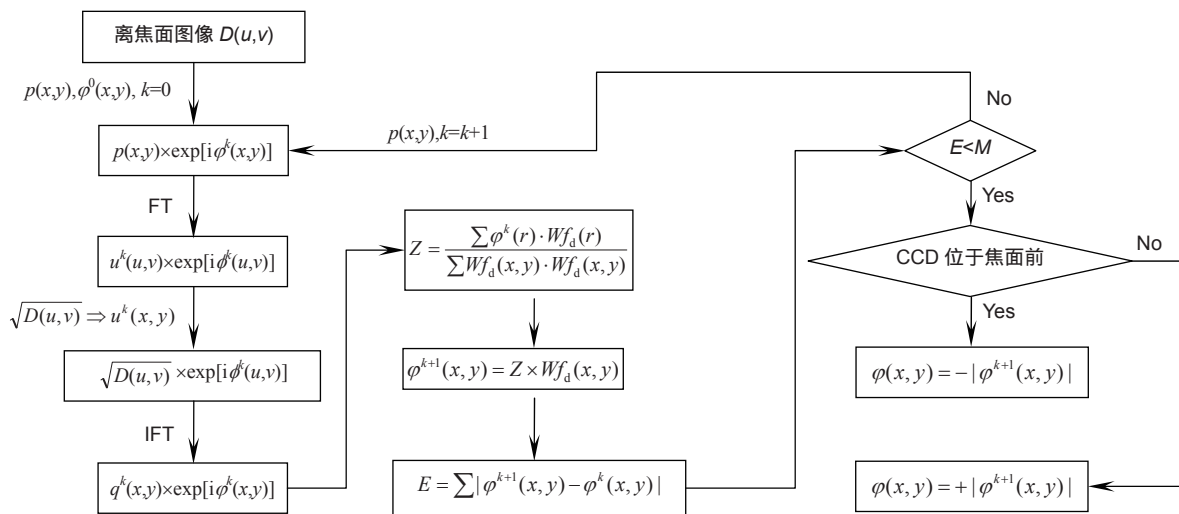


图 4 相位差法系统离焦量光学测量算法流程图

Fig. 4 Flow chart of optical measurement algorithm for defocus

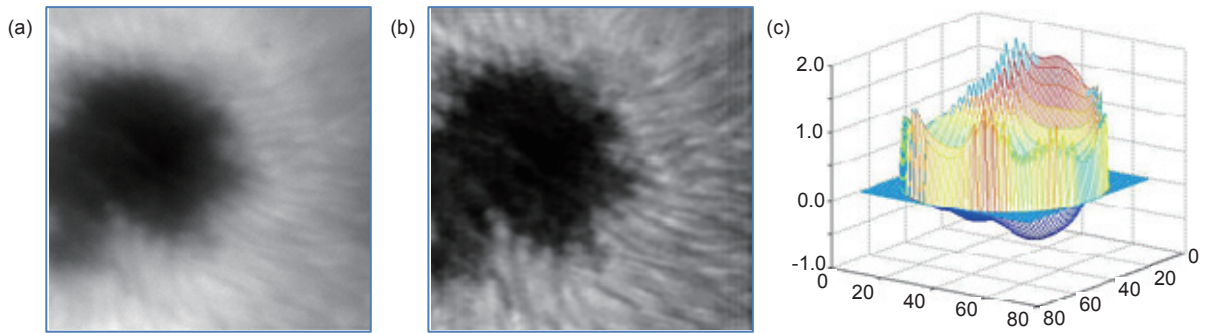


图 5 太阳黑子 AO 图像 PD 重建结果。(a) 自适应光学图像; (b) PD 重建图像; (c) PD 探测相差

Fig. 5 Phase diversity reconstruction. (a) Sunspot image from AO system; (b) Corresponding image restored by PD; (c) Wavefront residual aberration restored by PD

以复原，图像对比度由处理前的 2.16% 提升至重建后的 3.15%，上述实验表明，我们设计的单 CCD 相位差法成像装置和系统离焦量光学测量技术，已经较好地满足相位差法图像重建技术在实际工程中的需求。

4 斑点图像重建算法

斑点图像重建方法是一种以短曝光图像的统计信息为基础的方法，这种方法本质上是通过目标斑点图进行某种形式的统计处理来得到高分辨重建像的方法^[34]。实现高分辨重建最关键的是采用的统计方式首先要保证统计结果中保留目标的高频信息，其次是可以计算或实测得到所采用的统计方法的传递函数。

斑点重建算法主要包括两大部分，一是目标傅里叶振幅的重建算法，另一部分则是目标傅里叶相位重建算法。斑点重建算法的发展历程主要包括，1970 年 Labeyrie 提出利用目标的一系列短曝光图像的平均功率谱获得目标傅里叶振幅的方法，这种方法被称为“斑点干涉术”(speckle interferometry)^[34]。1973 年 Knox 和 Thompson 提出了一种使用目标斑点图互相关谱进行相位重建的方法^[35]，称为“KT 算法”或“交叉谱算法”。

1977 年 Weigelt 提出的斑点掩模方法(speckle masking)同样可以得到目标的傅里叶相位信息^[36-37]，由于使用的是目标斑点图的双频谱(bispectrum)统计方法，又称为“双频谱算法”。斑点图像重建主要依赖以上方法及其改进算法进行目标的高分辨重建^[38-41]。斑点图像重建算法流程如图 6 所示。

中国科学院光电技术研究所从 2011 年开始利用斑点图像重建算法开展了一系列针对太阳图像重建方面的研究工作^[42-44]。由于在斑点图像重建算法中目标的傅里叶相位重建算法成熟，且 AO 校正不会改变相位重建算法的理论基础，因此基于自适应校正的斑点图像重建的重点在于目标的傅里叶振幅重建。已知短曝光情况下图像的傅里叶变换可以表示为

$$I_i(f) = O(f)S_i(f), \quad (6)$$

其中： $O(f)$ 为目标的傅里叶变换， $S_i(f)$ 为短曝光 OTF。

按照 Labeyrie 的统计方法，多帧短曝光图像频域幅值的平方的系统平均为

$$\langle |I_i(f)|^2 \rangle = |O(f)|^2 \langle |S_i(f)|^2 \rangle. \quad (7)$$

由此可得到目标的功率谱

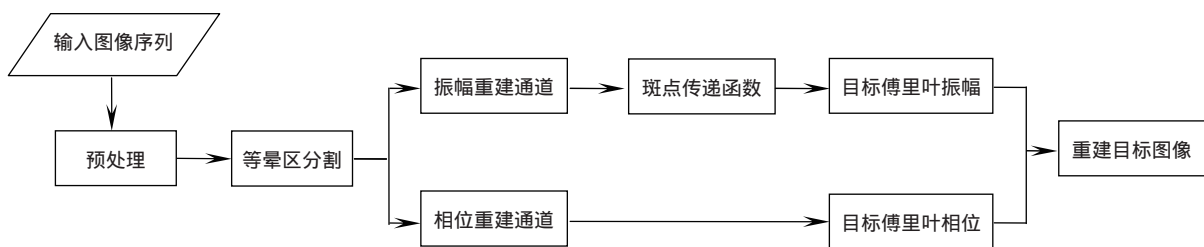


图 6 斑点图像重建算法流程图

Fig. 6 Flow chart of speckle image reconstruction algorithm

$$|O(f)|^2 = \frac{\langle |I_i(f)|^2 \rangle}{\langle |S_i(f)|^2 \rangle} \quad (8)$$

式中： $\langle |S_i(f)|^2 \rangle$ 为斑点传递函数。从计算公式中可以看出，为获得目标的傅里叶振幅，需要已知成像系统的斑点传递函数。

作为整个成像系统的点扩散函数平均功率谱的斑点传递函数，由整个系统的像差的统计特性决定。在残余像差的统计特性满足 Kolmogorov 谱，也就是自适应系统开环的情况，可以通过大气湍流的相干长度获得斑点传递函数的理论计算公式。而当系统闭环时，残余像差的统计特性发生变化，传统的斑点传递函数无法用于目标功率谱高精度的复原，因此需要采用新的斑点传递函数。

在分析了 AO 校正后光学传递函数和点扩散函数的性质与残余波前统计信息关系的基础上，利用两个分别在点扩散函数晕的宽度上和对应斯特列尔比概率分布意义上等效的相干长度值，分别用于斑点传递函数低频和高频处幅值的计算，最终得到新的斑点传递函数计算公式。

$$STF(f) = \begin{cases} |\langle S_i^{\rho_0}(f) \rangle|^2 & , f \leq f_c \\ 0.342 \left(\frac{\rho_0'}{D} \right)^2 M_{tel}(f) & , f > f_c \end{cases} \quad (9)$$

其中： ρ_0' 是点扩散函数晕的宽度意义上等效的相干长度值， ρ_0 可以预测点扩散函数的中心强度的概率分布。 f_c 的值取为当 $|\langle S_i^{\rho_0}(f) \rangle|^2$ 开始小于 $0.342 \left(\frac{\rho_0'}{D} \right)^2 M_{tel}(f)$ 的频率值。两个等效相干长度可以通过系统残余像差的统计特性计算得到。并且两个等

效相干长度的计算公式分别为

$$\rho_0' = 0.286 j^{-0.362} \left(\frac{3.44}{coef(j)} \right)^{\frac{3}{5}} r_0, \quad (10)$$

$$\rho_0 = \left(\frac{0.134}{coef(j)} \right)^{\frac{3}{5}} r_0, \quad (11)$$

其中 $coef(j)$ 为 AO 系统校正前 j 项 Zernike 像差情况下残余像差方差的系数。

$$\Delta_j = \sum_{i=j+1}^{\infty} \langle |a_i|^2 \rangle = coef(j) \left(\frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (12)$$

仿真结果显示新的斑点传递函数较传统的斑点传递函数能够更好的拟合实际 AO 系统校正后的斑点传递函数，在不同的湍流环境和自适应系统校正能力下均可以得到更高的重建精度。利用上述方法我们对 151 单元地表层自适应校正后图像进行重建，实验结果如图 7、图 8 所示，指定区域的平均对比度从 2.76% 提高到了 7.46%。

5 总结与展望

图像事后处理技术有效地弥补了 AO 系统自身的不足，进一步提高了 AO 图像质量，从而获取逼近衍射极限分辨力的成像结果。尽管上述的三种算法各有差异，但通过在不同的处理对象和应用场景下选择合适的算法，并有针对性地加以改进，这些算法在 AO 系统中都取得了很好的复原效果。随着图像处理的发展，一些新的图像处理理论与技术的出现，如稀疏表示与压缩感知^[45]、卷积神经网络与深度学习^[46]、非局部自相关特性和相关信号的低秩特性等，如何将这

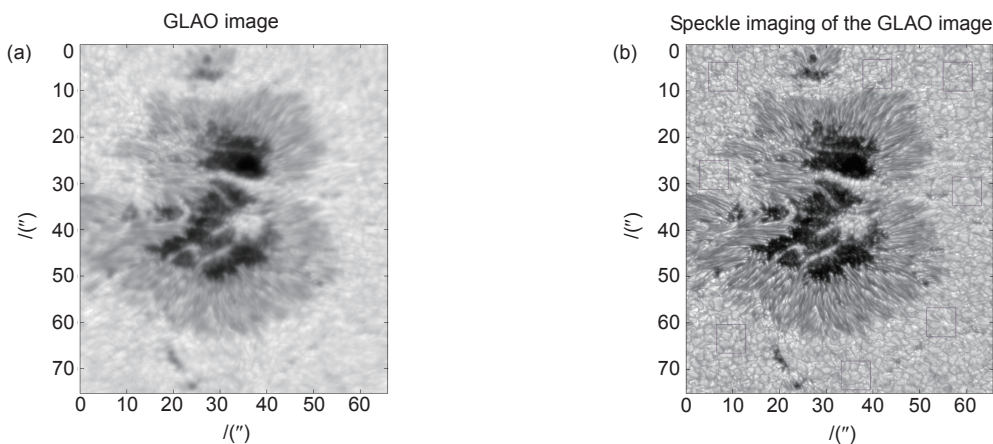


图 7 (a) 自适应光学系统图像；(b) 斑点重建图像

Fig. 7 (a) Image after AO correction; (b) Image reconstructed by speckle reconstruction

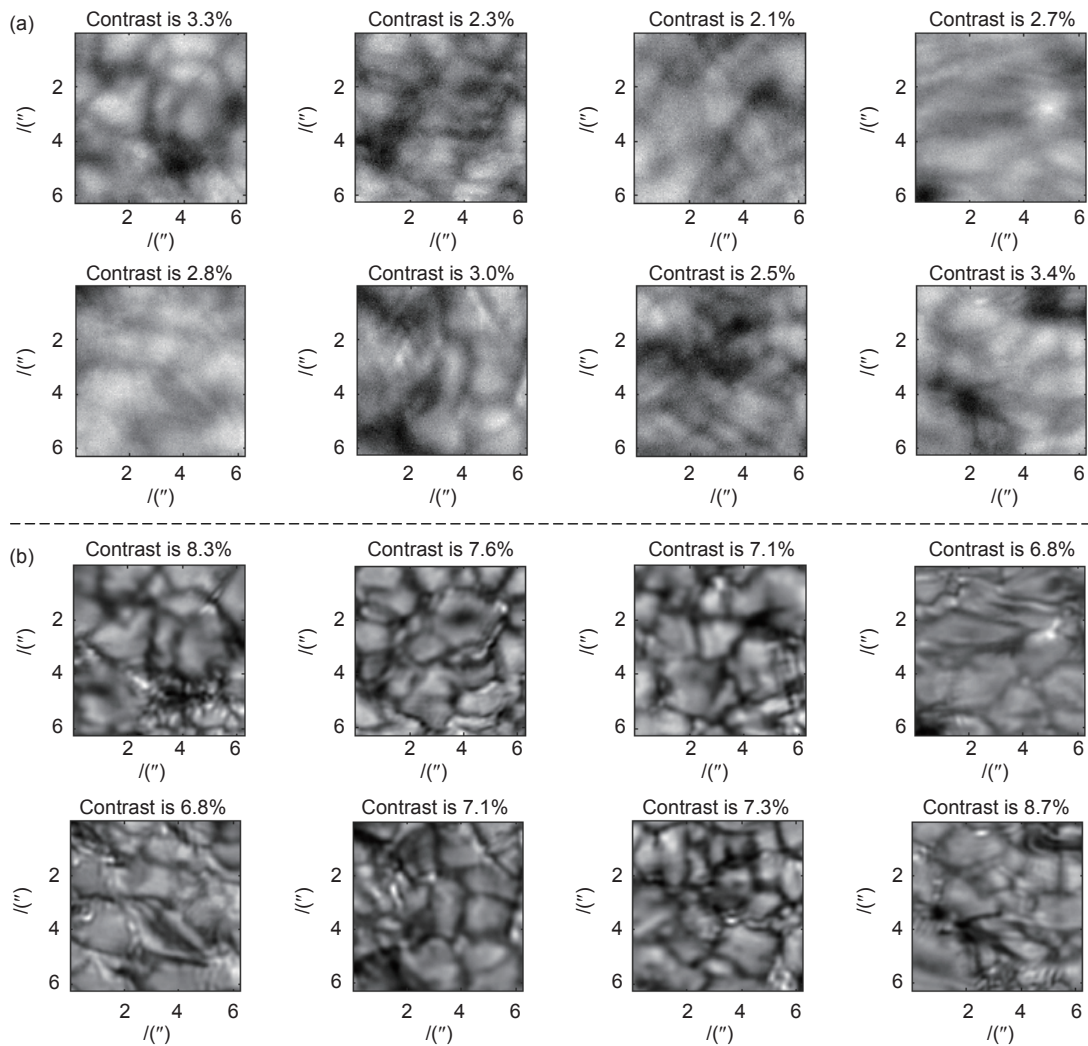


图8 自适应光学系统图像与斑点重建图像相同子区域对比度

Fig. 8 (a) Comparison of different subareas in AO corrected image; (b) Comparison of corresponding subareas in image reconstructed by speckle reconstruction algorithm

新技术融入到 AO 图像事后处理领域，改进现有的算法，提高现有算法的复原效果，将是研究者们下一步的工作重点。此外，伴随着硬件技术的进步，芯片计算能力进一步提升，如何充分利用芯片的计算能力使图像事后处理变得更加实时化，也将是研究热点之一。

参考文献

[1] Babcock H W. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1953, **65**(386): 229–236.

[2] 姜文汉. 高分辨率自适应望远镜[C]//国家高技术计划信息领域信息获取与处理技术主体十周年汇报—自适应光学望远镜技术, 1996: 1–14.

[3] Jiang W H, Zhang Y D, Rao C H, et al. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics, Chinese academy of science[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900106.
姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900106.

[4] Van Noort M, Van Der Voort L R, Löfdahl M G. Solar image restoration by use of multi-frame blind de-convolution with multiple objects and phase diversity[J]. *Solar Physics*, 2005, **228**(1–2): 191–215.

[5] Ayers G R, Dainty J C. Iterative blind deconvolution method and its applications[J]. *Optics Letters*, 1988, **13**(7): 547–549.

[6] Tian Y, Rao C H, Zhang X J. High frequency noise constraint in deconvolution from wavefront sensing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(4): 593–597.
田雨, 饶长辉, 张学军. 波前解卷积方法中的高频噪声抑制[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(4): 593–597.

[7] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital image processing*[M]. Reading, MA: Addison–Wesley, 1992.

[8] Kundur D, Hatzinakos D. Blind image deconvolution[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, **13**(3): 43–64.

[9] Campisi P, Egiazarian K. *Blind image deconvolution: theory and applications*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.

[10] Levin A, Weiss Y, Durand F, et al. Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms[C]//*Proceedings of 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009: 1964–1971.

[11] Perrone D, Favaro P. A clearer picture of total variation blind deconvolution[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and*

- Machine Intelligence*, 2016, **38**(6): 1041–1055.
- [12] Levin A, Weiss Y, Durand F, *et al.* Efficient marginal likelihood optimization in blind deconvolution[C]//*Proceedings of 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011: 2657–2664.
- [13] Molina R, Mateos J, Katsaggelos A K. Blind deconvolution using a variational approach to parameter, image, and blur estimation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(12): 3715–3727.
- [14] Lofdahl M G. Multi-frame blind deconvolution with linear equality constraints[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, **4792**: 146–155.
- [15] Tian Y, Rao C H, Wei K. Adaptive optics image restoration based on frame selection and multi-frame blind deconvolution[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2009, **33**(2): 223–230.
- [16] Tian Y, Rao C H, Rao X J, *et al.* Hybrid deconvolution of adaptive optics retinal images from wavefront sensing[J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, **25**(1): 105–107.
- [17] Li H, Lu J, Shi G H, *et al.* Deconvolution algorithm of retinal images[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2010, **21**(10): 1570–1573.
李昊, 卢婧, 史国华, 等. 视网膜图像的解卷积方法研究[J]. *光子·激光*, 2010, **21**(10): 1570–1573.
- [18] Gonsalves R A. Phase retrieval and diversity in adaptive optics[J]. *Optical Engineering*, 1982, **21**(5): 829–832.
- [19] Wang X, Zhao D Z, Mao H, *et al.* The development of phase diversity[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(3): 454–460.
王欣, 赵达尊, 毛珩, 等. 相位变更方法发展简述[J]. *光学技术*, 2009, **35**(3): 454–460.
- [20] Löfdahl M G, Scharmer G B. Wavefront sensing and image restoration from focused and defocused solar images[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1994, **107**: 243–264.
- [21] Paxman R G, Schulz T J, Fienup J R. Phase-diverse speckle interferometry[C]// *Topical Meeting on Signal Recovery and Synthesis IV, Technical Digest Series 11*. Washington DC: Optical Society of America.
- [22] Seldin J H, Paxman R G. Phase-diverse speckle reconstruction of solar data[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, **2302**: 268–280.
- [23] Paxman R G, Seldin J H, Löfdahl M G, *et al.* Evaluation of phase-diversity techniques for solar-image restoration[J]. *Astrophysical Journal*, 1996, **466**: 1087–1099.
- [24] Vogel C R, Chan T F, Plemmons R J. Fast algorithms for phase-diversity-based blind deconvolution[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, **3353**: 994–1005.
- [25] Löfdahl M G, Scharmer G B. Diverse phase speckle inversion applied to data from the Swedish 1-meter solar telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4853**: 567–575.
- [26] Kendrick R L, Acton D S, Duncan A L. Phase-diversity wave-front sensor for imaging systems[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(27): 6533–6546.
- [27] Löfdahl M G, Kendrick R L, Harwit A, *et al.* Phase diversity experiment to measure piston misalignment on the segmented primary mirror of the Keck II telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, **3356**: 1190–1201.
- [28] Yu X G, Liu Z, Jin Z Y, *et al.* Design of a phase diversity wavefront sensor[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, **7**(1): 55–59.
于学刚, 刘忠, 金振宇, 等. 波前相位差法探测器的设计[J]. *天文研究与技术*, 2010, **7**(1): 55–59.
- [29] Li F, Rao C H. Study on phase diversity wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0804001.
李斐, 饶长辉. 高精度相位差波前探测器的数值仿真和实验研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0804001.
- [30] Li F, Rao C H. Analysis and elimination of errors in phase diversity wavefront sensing system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 599–605.
李斐, 饶长辉. 相位差法波前传感系统自身误差的分析及消除方法[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 599–605.
- [31] Li F, Rao C H. High resolution imaging technique based on phase diversity hybrid method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(2): 029502.
李斐, 饶长辉. 基于相位差混合处理方法的高分辨力成像技术[J]. *物理学报*, 2012, **61**(2): 029502.
- [32] Wang B, Wang Z Y, Wang J L, *et al.* Phase-diverse speckle imaging with two cameras[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(6): 1384–1390.
王斌, 汪宗洋, 王建立, 等. 双相机相位差异散斑成像技术[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(6): 1384–1390.
- [33] Wang J L, Wang Z Y, Wang B, *et al.* Image restoration by phase-diverse speckle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 1165–1170.
王建立, 汪宗洋, 王斌, 等. 相位差异散斑法图像复原技术[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(5): 1165–1170.
- [34] Labeyrie A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by Fourier analysing speckle patterns in star images [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1970, **6**: 85–87.
- [35] Knox K T, Thompson B J. New methods of processing speckle pattern star images[J]. *The Astrophysical Journal*, 1973, **182**: L133.
- [36] Weigelt G, Wirtzner B. Image reconstruction by the speckle-masking method[J]. *Optics Letters*, 1983, **8**(7): 389–391.
- [37] Weigelt G P. Modified astronomical speckle interferometry “speckle masking”[J]. *Optics Communications*, 1977, **21**(1): 55–59.
- [38] Von der Lühe O. Speckle imaging of solar small scale structure. I-Methods[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1993, **268**(1): 374–390.
- [39] Denker C, Mascarinas D, Xu Y, *et al.* High-spatial-resolution imaging combining high-order adaptive optics, frame selection, and speckle masking reconstruction[J]. *Solar Physics*, 2005, **227**(2): 217–230.
- [40] Denker C, Deng N, Rimmele T R, *et al.* Field-dependent adaptive optics correction derived with the spectral ratio technique[J]. *Solar Physics*, 2007, **241**(2): 411–426.
- [41] Wöger F, von der Lühe O. Field dependent amplitude calibration of adaptive optics supported solar speckle imaging[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(33): 8015–8026.
- [42] Zhong L B, Tian Y, Rao C H. 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.
- [43] Zhong L B, Tian Y, Rao C H. Speckle image reconstruction of the adaptive optics solar images[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(23): 29249–29259.
- [44] Zhong L B, Tian Y, Rao C H. Speckle transfer function for partial correction adaptive optics image reconstruction[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(15): 4599–4602.
- [45] Krishnan D, Bruna J, Fergus R. Blind deconvolution with non-local sparsity reweighting[J]. arXiv: 1311.4029, 2013.
- [46] Yan R M, Shao L. Blind image blur estimation via deep learning [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, **25**(4): 1910–1921.

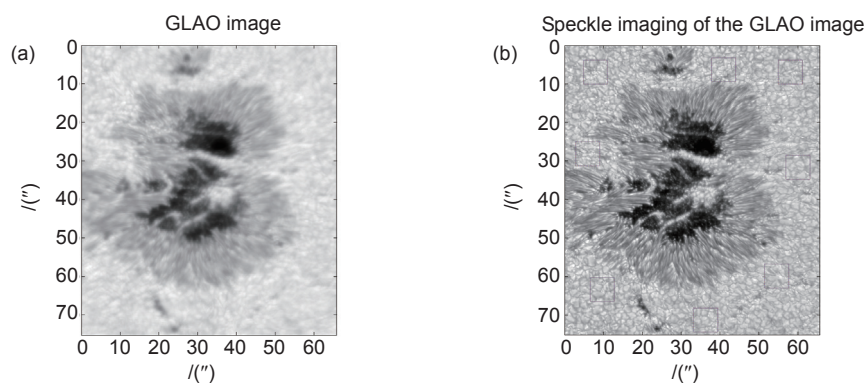
Research progress on adaptive optical image post reconstruction

Bao Hua^{1,2}, Rao Changhui^{1,2*}, Tian Yu^{1,2}, Zhong Libo^{1,2}, Chen Hao^{1,2,3}, Long Xiao^{1,2,3}

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

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

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



(a) Image after AO correction; (b) Image reconstructed by speckle reconstruction

Overview: The light wave from target is influenced by outside factors such as the atmosphere turbulence, the aberration of telescope and so on. To overcome these problems, the adaptive optical (AO) technique was proposed since 1950s. However, restricted by the accuracy of wave-front sensor, the limited correction of deformable mirror and the limited bandwidth of close-loop, wave-front distortion can only be corrected by AO system partially. Therefore, the AO imaging results are still affected by the residual wave-front aberration. To further improve the quality and resolution of AO images, the image post-processing technique is required.

As we know, the AO technique can effectively reduce the wave-front distortion, so as to effectively reduce the range of solutions of image restoration. Furthermore, the residual wave-front aberration is important prior information to guide the optimal iteration process. In addition, the image post-processing will be more robust as the AO images have higher peak-to-signal ratio (PSNR). However, on the other side, the AO technique will change the model of atmosphere turbulence and the statistical distribution of residual aberrations. Therefore, image reconstruction algorithms must take the characteristics of AO system into consideration.

Currently, the major image processing schemes include blind deconvolution (BD), phase diversity (PD) and speckle imaging technologies (SI). BD is one of the most flexible technologies without special requirements for imaging system and processing object, but BD needs prior knowledge about PSF and support region of real targets to restrict the solving procedure. PD is an aberration detection based on image restoration technology, by using a few groups of images acquired from the same object with different optical channels simultaneously. The main challenge of PD is that this technology requires an extra set of imaging equipment, and the algorithm is sensitive to parameters. SI technology uses the statistical characteristics of atmosphere turbulence to reconstruct the phase and amplitude of the imaging target respectively, which has widely been applied to high resolution solar image reconstruction. However, as SI is based on the statistical information of atmosphere turbulence, it needs hundreds of short-exposure images to reconstruct a single image; therefore the imaged object cannot have obviously changing in the imaging procedure.

In order to get acceptable reconstructed AO images, the major three image processing technologies mentioned above have been deeply discussed in this paper, and relevant improvements are proposed to suit AO system characteristics. The high quality processing results of human retinal images and the large field of view of sunspots images have proved our methods are effective and reliable.

Citation: Bao H, Rao C H, Tian Y, *et al.* Research progress on adaptive optical image post reconstruction[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170730

Supported by the National Science Foundation of China (11178004, 11727805)

* E-mail: chrao@ioe.ac.cn