

强天光背景下基于超完备字典的自适应光学天体目标的检测方法

张艳艳, 孙原良, 龚 信, 梅 永

南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044

摘要 针对稀疏域对强天光背景下天体目标的探测问题,在充分利用天光背景和光斑信号组成成分的形态差异性的基础上,分别建立了天光背景和信号目标的超完备字典,以区分图像中的天光背景区域与光斑信号区域。该方法能够在抑制强天光背景的同时积累更多的信号能量,改善信噪比。仿真及实验结果表明,此处理方法能够较好地提取出光斑信号,且与减阈值算法相比,其处理后质心偏差、均方根值及峰谷值都较小。

关键词 大气光学; 自适应光学; 天光背景; 稀疏表示; 超完备字典

中图分类号 TN919.8 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0101006

Detection of Adaptive Optics Celestial Targets Under Strong Skylight Background Based on Over-Complete Dictionary

Zhang Yanyan, Sun Yuanliang, Gong Xin, Mei Yong

Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract Aiming at the detection of celestial targets under strong skylight background using sparse domain, the over-complete dictionary of skylight background and target signal is established respectively to distinguish the skylight background area and target area, which based on the difference between skylight background and target signal in their morphological components. The signal energy is accumulated while in suppressing the background, and the signal to noise ratio is also improved. Simulation and experimental results show that the target can be well subtracted, while the centroid deviation, the root mean square and peak-valley values of the centroid are small compared with the subtracting threshold method.

Key words atmospheric optics; adaptive optics; skylight background; sparse representation; over-complete dictionary

OCIS codes 010.1080; 010.1290; 200.4560

1 引 言

自适应光学(AO)是实时补偿由大气湍流或其他因素造成的成像过程中波前畸变的前景技术^[1],但其探测受天光背景及噪声影响较大,只能工作在极弱背景光条件下,通过对点目标进行质心提取,完成天体目标观测的任务。在强天光背景条件下,天光光强是目标光光强的几十到几百倍,现有的波前传感器不能工作,自适应光学系统也就不能完成对天体目标的波前畸变校正过程。

针对白天 AO 系统应用问题,Beckers 等^[2]提出了利用超窄带滤波技术的主动波前探测方法,以发射激光的后向散射或反射光作为信标,通过时间选通和快门控制等技术来进行波前探测,得到了部分实验结果。Gonglewski^[3]单独讨论了视场光阑对天光背景的限制问题,但对解决强天光背景条件下波前探测效果不是很明显。中国科学院光电技术研究所李超宏等^[4-6]提出了通过视场偏移哈特曼波前传感器(FSWFS)来探测

收稿日期: 2016-07-28; **收到修改稿日期:** 2016-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(61071164)、江苏省气象探测与信息处理重点实验室项目(KDXS1405)、江苏省高校基金重大项目(12KJA510001)、江苏省 2016 大学生实践创新计划(201610300254)、江苏高校优势学科 II 期建设工程资助项目

作者简介: 张艳艳(1983—),女,博士,讲师,主要从事信号处理方面的研究。E-mail: 002243@nuist.edu.cn

强天光背景中目标信号畸变波前信息,突破了 AO 系统在强噪声条件下的应用。以上方法在很大程度上提高了自适应光学系统的探测能力,扩展了系统的应用环境及工作时段,但在实际应用中仍需要较强的信噪比(SNR)才能取得较好的效果,而搭建此类庞大的光学系统难度较大且成本较高。

本文充分分析了强天光背景下自适应光学系统光斑目标和天光背景的特点,提出了一种在稀疏域中去除天光背景噪声的方法。利用天光背景及光斑信号的形态差异,分别建立光斑信号和天光背景信号的超完备字典,根据稀疏表示理论,两个字典仅能稀疏表示相对应的信号源,而对于其他信号稀疏表示效果较差,以此区分天光背景与光斑目标,并在稀疏域中设计天光背景的抑制方法。

2 光斑目标及噪声分析

自适应光学图像一般包括三部分:目标、背景及噪声。其用 $f(x, y)$ 表示^[6-7], 则:

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_n(x, y) + f_B(x, y), \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 是所观测或采集到的包含弱小目标的实际图像的灰度, $f_T(x, y)$ 是有效目标信号的灰度分布, $f_n(x, y)$ 是噪声的灰度分布, $f_B(x, y)$ 是背景的灰度分布,主要是指天光背景。噪声图像 $f_n(x, y)$ 是传感器产生的各类噪声总和,其中天光背景噪声是最主要的误差源之一,自适应光学系统中天光背景噪声在不考虑系统装配误差等造成的不均匀时,在整靶面较为均匀,略有起伏。

在光学成像系统中,天体目标光分布一般呈高斯点扩散模型,每个像素的灰度大小均通过像点二维能量分布函数在该像素范围的面积来表示。因此,光斑信号通常为光斑小目标信号,分布特点符合二维高斯模型:

$$f_T(x, y) = \frac{V_0}{2\pi\sigma_A^2} \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\sqrt{2}\sigma_A}\right)^2 - \left(\frac{y-y_0}{\sqrt{2}\sigma_A}\right)^2\right], \quad (2)$$

式中 σ_A 表示光斑的等效高斯宽度, V_0 表示光斑的峰值强度, (x_0, y_0) 表示光斑中心点的坐标,通过调节 (x_0, y_0) 、 V_0 、 σ_A 参数来模拟生成光斑图像。

在强天光背景下进行天文观测,天光背景在 AO 系统内的光学辐射分布是消除较强天光背景的前提。白天天光背景亮度一般约为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 如果按照平均 $0.55 \mu\text{m}$ 波长转换成光子流密度则为 $6.5 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 对应亮度为 $6.5 \times 10^7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。因此,对一定接收孔径而言,其天光转化而来的光子流密度为

$$p_{pd} = 6.5 \times 10^7 \cdot \frac{d_{\text{object}}}{l^2} \cdot \frac{1}{2.35 \times 10^{-11}} \cdot s, \quad (3)$$

式中 2.35×10^{-11} 为 $1''^2$ 所对应的球面度。一般条件下白天天光背景到接收孔径的光照度可以描述为 $E_{\text{r-sky}} = 10 \cdot \frac{d_{\text{object}}}{l^2} \times 206$, 单位为 lm/m^2 , 其中 d_{object} 为目标尺寸对应面积, s 为光接收口径的球面面积,有效光通量为 206 lm 。

3 图像稀疏表示原理

根据调和理论,图像信号的稀疏性表述如下^[8]:离散信号 f 可以由基函数集合 $\{\varphi_k\}_{k \in N}$ 线性地表示为

$$f = \sum_{k \in N} c_k \cdot \varphi_k, \quad (4)$$

式中非零系数项 c_k 越少,图像的表示就越稀疏有效。超完备字典是一种全新的信号表示理论^[9],用超完备的冗余函数库取代完备的基函数,字典中的元素被称为原子。Liu 等^[9]提出了基于主成分分析(PCA)的弱小目标检测方法,其中目标的训练样本采用高斯灰度模型。汪海洋等^[10]采用 2D-PCA 构建了红外图像的背景模型,以提取前景目标。赵佳佳等^[11]提出将稀疏域运用于弱小目标的检测中,根据高斯灰度模型构造超完备高斯字典,并在稀疏域中进行弱小目标检测,且取得了较好的检测效果。崔丽洁等^[12]提出了基于奇异值分解(SVD)进行背景抑制和粒子滤波的小弱目标检测,使用 SVD 滤波器抑制红外图像背景,并采用粒子滤波估计运动状态。

4 基于超完备字典的强天光背景下光斑图像去噪方法

由于天光背景及光斑信号的形态差异较大,因此分别建立了天光背景及光斑信号的超完备字典,并在建立的目标信号的超完备字典中分别对图像进行稀疏分解,此时字典和信号存在对应关系,相当于在各自对应的原子上具有最稀疏的分解,然后利用追踪(MP)算法搜索最稀疏的表示,达到区分混合信号的目的。

根据形态分形理论,不同形态的源信号在超完备字典组合中,有且仅有一个字典能对这个源信号进行稀疏分解,而其他字典对其稀疏分解均得不到稀疏的解^[13-16],即

1) 对于任意信号 f_k ,存在过完备字典 $g_k(N \times L_k)$,使得:

$$\alpha_k^{\text{opt}} = \underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \|\alpha\|_1, \quad \text{s.t.} \quad f_k = g_k \alpha, \quad (5)$$

存在稀疏解(也即 $\|\alpha_k^{\text{opt}}\|_0$ 非常小),即 g_k 能够稀疏表示 f_k 。

2) 对于任意信号 $f_l, k \neq l$,则:

$$\alpha_l^{\text{opt}} = \underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \|\alpha\|_1, \quad \text{s.t.} \quad f_l = g_k \alpha, \quad (6)$$

得到的解稀疏度较差,不是最优解。因此, f_l 在过完备字典 g_k 中不能够稀疏表示出。

同样,对于由多个源信号线性组合而成的多源目标信号,则假设每个源信号对应一个能稀疏分解它的超完备稀疏字典,且该字典对其他源信号不能稀疏分解。

根据以上理论,首先建立光斑信号的超完备字典,之后分别将天光背景及光斑信号在此超完备字典中进行稀疏分解,此时由于字典和光斑信号存在对应关系,天光背景和波前信号在字典中的分解形式不相同,最终提取出波前信号,去除天光背景。

利用形态成分的稀疏字典进行强天光背景下天体目标检测,分为两步:训练各子字典并分解;光斑目标的检测。具体的步骤如下:

1) 在实测图像序列中,分别训练目标和背景的超完备形态成分字典;

2) 将训练得到的字典分为目标字典和背景字典;

3) 将光斑依次划分成 $N \times N$ 的图像子块,分别在背景字典和目标字典中提取各图像子块的目标和背景成分,计算各图像子块在目标字典及背景字典中的稀疏系数。如果图像子块在目标字典的稀疏表示系数值较大,则说明此图像块包含目标。反之,则不包含目标,为背景区域;

4) 判断的依据是通过设定一个阈值,并将残差的均方值与此阈值进行比较:

$$\begin{cases} s_k, & \text{if } R_{\text{es}}^2 < T \\ \text{back}, & \text{if } R_{\text{es}}^2 > T \end{cases} \quad (7)$$

上述分类过程也是一个稀疏分解过程,可描述为

$$\hat{\alpha}_i = \underset{A}{\operatorname{argmin}} \|d_i - DA\|_2^2 \quad \text{s.t.} \quad \|A\|_0 \leq k_0, \quad (8)$$

式中 d_i 是训练字典中的每个原子, D 为各子字典。

根据以上描述,具体步骤如下:

1) 建立目标和天光背景超完备字典;

2) 分别计算各图像子块在字典中的分解原子 d_i ,得到分解系数 $\hat{\alpha}_i$;

3) 重构原子 $\tilde{d}_i, \tilde{d}_i = D_{\text{Gaussian}} \cdot \hat{\alpha}_i$;

4) 求解残差原子 $d_i - \tilde{d}_i$;

5) 计算残差的均方值,并设定阈值 T 以判断该原子属于目标原子还是背景原子。

5 实验结果及分析

5.1 目标字典的生成

根据以上分析,光斑信号通常为小目标信号,采用二维高斯模型构造光斑信号的超完备字典,将样本图像展开为 $m^2 \times 1$ 的一维列向量,将此向量构建为一个矩阵:

$$D = [s_1, s_2, s_3, \dots, s_n] \in R^{m^2 \times n}, \quad (9)$$

设样本的数目为 n , 称该矩阵 \mathbf{D} 为超完备字典, 矩阵中的每一列 s_i 为超完备字典中的一个原子。图 1 是根据(2)式仿真生成的样本图像及完备字典中的部分原子示意图, 仿真条件如下: 图像大小为 $41 \text{ pixel} \times 41 \text{ pixel}$, 光斑中心 (x_0, y_0) 坐标为 $(20, 20)$, 峰值 500 ADU ($1 \text{ ADU} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$), 等效高斯宽度为 $\sigma_A = 1.25 \text{ pixel}$, 这样模拟出的目标光斑在 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 内集中了 80% 以上的能量, 可以看出, 与实际的目标较为接近。图 1(b)是其对应的三维能量谱图, 图 1(c)是根据以上原理, 调节各参数所生成的字典中的部分原子。

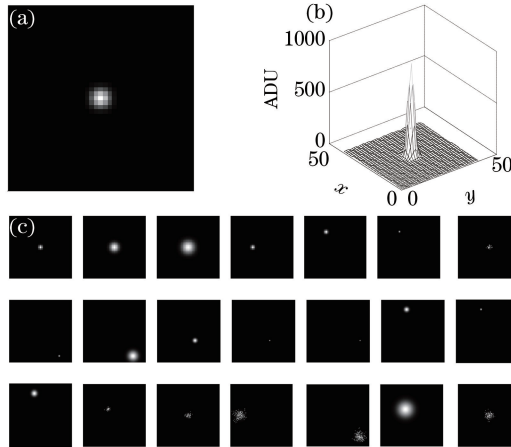


图 1 部分目标原子示意图。(a) 字典中某原子; (b) 原子的三维能量图; (c) 字典的部分原子

Fig. 1 Schematic of partial target atom. (a) An atom in the dictionary; (b) three-dimensional energy map of the atom; (c) partial atoms of the dictionary

5.2 天光背景超完备字典的生成

天光背景超完备字典通过在图像序列中, 随机选取训练样本训练形成。选取不同信噪比、不同强度天光背景信号的超完备字典原子, 如图 2 所示, 其中, 背景的选取方法为先选取一帧图像的四个边角区域, 然后对此四个区域的灰度值求平均值, 得到平均天光背景图像子图像。从图 2 中可以看出, 天光背景区域灰度有起伏, 但相对光斑信号较为平稳, 不同强度的天光背景仅在平均灰度值上有差别, 其他形态基本相同。

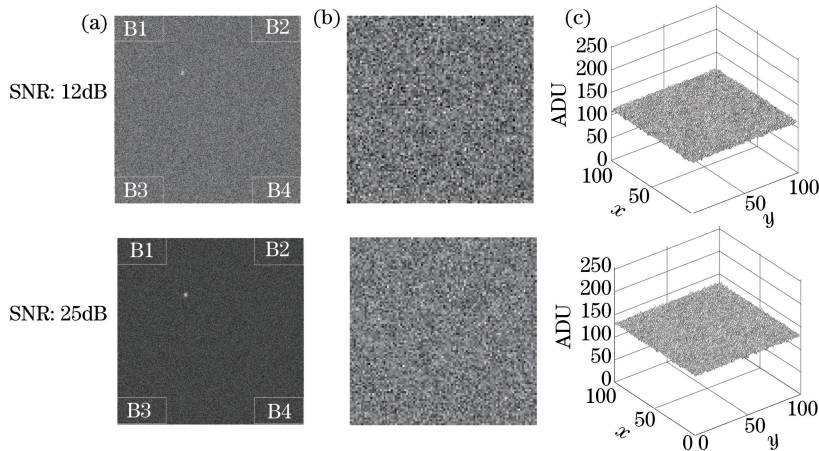


图 2 不同信噪比下背景子字典。(a) 原始图像; (b) 生成的相应背景原子; (c) 背景原子的三维图

Fig. 2 Sub-dictionary of the background with different signal to noise ratios. (a) Original images;

(b) corresponding background atoms generated from the original image; (c) three-dimensional of the background atoms

5.3 结果及分析

从实验室环境中选取含有不同天光背景水平的波前光斑图像, 将图像分别在目标超完备字典和背景超完备字典中进行稀疏分解, 如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出, 天光背景较强, 光斑信号淹没, 图 3(b)通过减阈值算法进行处理, 可以看出, 减阈值后信噪比略有提高, 但由于背景及噪声起伏较大, 仍有较大的背景残

留,目标尚未较好提取。图 3(c)和图 3(d)所示为目标和天光背景超完备字典对图像进行稀疏分解的结果,可以看出,在目标超完备字典中,目标区域能量聚集,形成较明显的峰值。对比背景超完备字典的稀疏分解可以看出,在对应处有较明显的峰谷值,此处与目标超完备字典中的峰值正好相反。本文阈值 T 取 0.6,从图 3(e)中可以看出,经过算法处理后,天光背景几乎被滤除,光斑信号保留,缺点是光斑信号滤除不完整,略有变形。

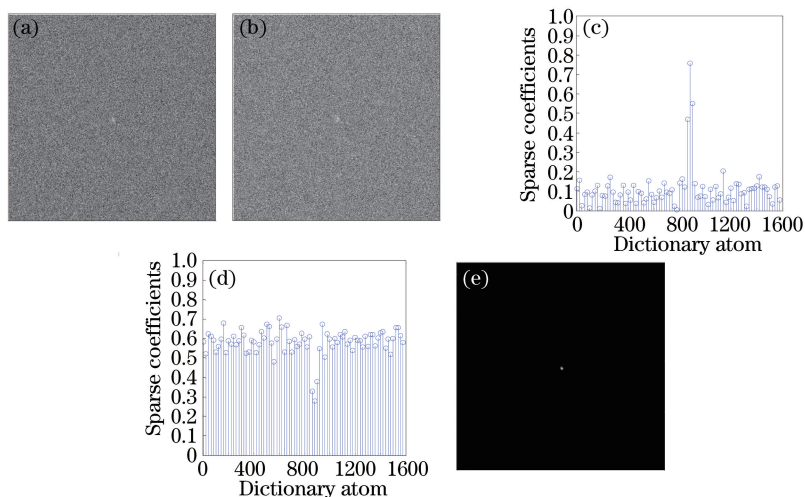


图 3 (a) 原始含有较强天光背景的光斑图像; (b) 减阈值效果图; (c) 目标超完备字典稀疏分解系数;
(d) 天光背景超完备字典稀疏分解系数; (e) 处理后效果图

Fig. 3 (a) Original spot image under strong skylight background; (b) effect picture after subtracting the threshold;
(c) decomposition coefficients in the target over-complete dictionary; (d) decomposition coefficients in
the skylight background over-complete dictionary; (e) effect picture after processing

为了验证算法的有效性,另选择夏克-哈特曼图像进行实验,并将算法处理效果与减阈值算法进行了对比,如图 4 所示。实验中,目标样本大小为 $16 \text{ pixel} \times 16 \text{ pixel}$, 阈值 $T = 0.6$, CCD 靶面大小为 $768 \text{ pixel} \times 484 \text{ pixel}$, 子孔径大小为 $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$, 微透镜阵列尺寸为 $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$, 有效子孔径数 400, 每个子孔径为边长为 0.51 mm 的方孔, 实验中, 每一个子孔径对应焦面 19 pixel 。图 4(a) 是采集到的含有较强天光背景图像, 从图 4(a) 中可以看出, 信噪比为 18.90 dB , 图 4(b) 是经过减阈值处理后的效果图, 可以看出经过减阈值处理后仍有较强的噪声残留, 处理后的信噪比约为 24.56 dB , 略有提高。图 4(c) 是采用本文方法处理后的结果, 可以看出个子孔径光斑提取效果较好, 且天光背景噪声滤除较为干净, 此时信噪比约为 48.56 dB 。

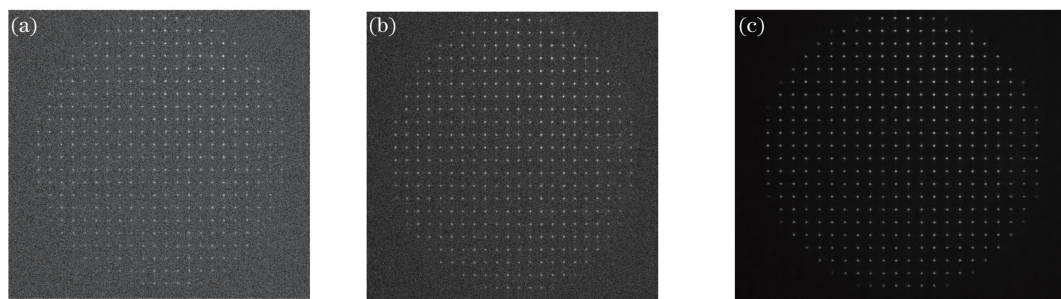


图 4 (a) 含有较强天光背景的夏克-哈特曼图像; (b) 减阈值效果图; (c) 本文算法处理后效果图

Fig. 4 (a) Shack-Hartmann image with high skylight background; (b) effect picture after subtracting the threshold;
(c) effect picture after processing by the proposed method

图 5 是单个子孔径图像处理前后的对比图, 并将其和减阈值算法进行对比, 从图中可以看出, 处理前, 天光背景较强, 光斑被背景淹没, 减阈值算法处理后噪声起伏仍较大, 采用本文算法处理后, 光斑目标提取较好。从图 5 可以看出, 在信噪比较低时, 本文算法较减阈值算法仍然有较大的优势。

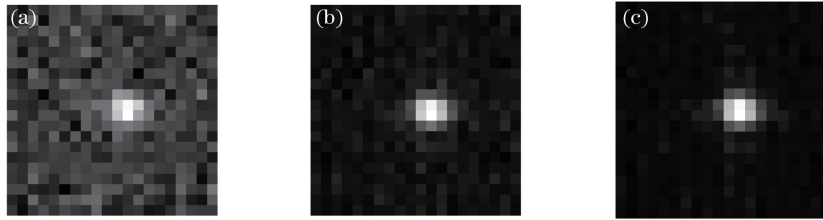


图 5 (a) 处理前单个子孔径图像; (b) 减阈值单个子孔径效果图; (c) 本文算法处理后单个子孔径效果图

Fig. 5 (a) Sub-aperture image before processing; (b) effect picture after subtracting the threshold;
(c) effect picture after processing by the proposed method

另外,对不同信噪比条件下本文算法与减阈值算法处理后质心的均方根(RMS)值及峰谷(PV)值进行比较,如表 1 所示。从表 1 中可以看到,相比于减阈值算法,本文算法处理后的质心起伏较小,说明此算法处理后的精度较好,这也与前面的主观评价结果一致。此外,本文处理算法较减阈值算法处理后图像的信噪比有较大的提高,尤其是在信噪比较低时,处理效果更加明显。

表 1 不同信噪比下减阈值算法与本文算法 RMS 值、PV 值及处理后 SNR 比较

Table 1 Comparison of RMS, PV and SNR after processing for mean variation between subtracting threshold and proposed method under different SNRs

SNR /dB (before processing)	RMS /pixel		PV /pixel		SNR /dB (after processing)	
	Subtract threshold	Proposed	Subtract threshold	Proposed	Subtract threshold	Proposed
10.0214	1.1540	0.6413	2.2940	1.2142	8.7324	19.7645
12.9329	1.0924	0.6139	2.0513	1.0215	11.1290	25.7594
15.7632	0.9078	0.5630	1.8789	0.9562	17.2456	34.9027
17.0781	0.8349	0.5182	1.8029	0.8251	22.8930	36.3924
18.5876	0.6696	0.4592	1.6878	0.6591	24.4532	48.4765
19.5412	0.6244	0.3446	1.4725	0.5691	25.1289	55.9045
20.2680	0.5168	0.3087	1.3545	0.2601	28.4590	63.4914
21.6108	0.4962	0.2523	1.1035	0.1630	30.7492	70.9244
22.4582	0.3550	0.1610	0.7490	0.1025	34.9046	79.4062
24.6209	0.3339	0.0585	0.6832	0.0531	37.8487	85.9375

6 结 论

根据图像的稀疏表示理论,提出了一种去除强天光背景的方法,与减阈值算法相比,该算法首先分别建立目标和天光背景超完备字典,然后依次计算测试图像的图像子块在各超完备字典中的表示系数,完成背景子块和目标子块的分类,并确定光斑信号所在的位置,完成提取光斑信号的目的。最后将提出的算法与减阈值算法进行了比较,并对处理后的质心偏差及质心的 RMS 值及 PV 值进行了比较,结果证明了此算法的高精度及有效性。

参 考 文 献

- [1] Jiang Wenhan, Wang Chunhong, Ling Ning, *et al.* 61 element adaptive optical system[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(2): 193-199.
姜文汉, 王春红, 凌 宁, 等. 61 单元自适应光学系统[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 193-199.
- [2] Beckers J M. Multi-conjugate adaptive optics: Experiments in atmospheric tomography[C]. SPIE, 2000, 4007: 1056-1066.
- [3] Beckers J M, Cacciani A. Using laser beacons for daytime adaptive optics[J]. Experimental Astronomy, 2001, 11: 133-143.
- [4] Li C H, Xian H, Rao C H, *et al.* Field-of-view shifted Shack-Hartmann wavefront sensor for daytime adaptive optics system[J]. Optics Letters. 2006, 31(19): 2821-2823.
- [5] Li C H, Xian H, Jiang W H, *et al.* Performance analysis of field-of-view Shack-Hartmann wavefront sensor based on

- splitter[J]. Applied Physics B, 2007, 88(3): 367-372.
- [6] Li Chaohong, Xian Hao, Jiang Wenhan, *et al.* Analysis of wavefront measuring method for daytime adaptive optics[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(7): 4289-4296.
李超宏, 鲜浩, 姜文汉, 等. 用于白天自适应光学波前探测方法分析[J]. 物理学报, 2007, 56(7): 4289-4296.
- [7] Baker K L, Moallem M M. Iteratively weighted centroiding for Shack-Hartmann wave-front sensors [J]. Optics Express, 2007, 15(8): 5147-5159.
- [8] Zhang Yanyan, Rao Changhui, Li Mei, *et al.* The detection error analysis of Hartmann-Shack wavefront sensor based on electron multiplying charge-coupled devices[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5905-5913.
张艳艳, 饶长辉, 李梅, 等. 基于电子倍增电荷耦合器件的哈特曼-夏克波前传感器质心探测误差分析[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5905-5913.
- [9] Liu R, Liu E, Yang J, *et al.* Infrared small target detection with kernel Fukunaga-Koontz transform[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(9): 3025.
- [10] Wang Haiyang, Pan Delu, Xia Deshen, *et al.* Wake detection using 2DPCA of directional polar Fourier spectrum[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1053-1059.
汪海洋, 潘德炉, 夏德深, 等. 基于方向极傅里叶频谱 2DPCA 的尾迹检测 [J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1053-1059.
- [11] Zhao Jiajia, Tang Zhengyuan, Yang Jie, *et al.* Infrared small target detection based on image sparse representation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(2): 156-166.
赵佳佳, 唐峥远, 杨杰, 等. 基于图像稀疏表示的红外小目标检测算法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 156-166.
- [12] Cui Lijie, Zheng Jiangbin, Li Xiuxiu. Detecting small targets based on SVD for background suppression and particle filter[J]. Application Research of Computer, 2011, 28(4): 1553-1556.
崔丽洁, 郑江滨, 李秀秀. 基于 SVD 背景抑制和粒子滤波的弱小目标检测[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(4): 1553-1556.
- [13] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [14] Donoho D. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [15] Wang Qi, Ma Lingling, Li Chuanrong, *et al.* An improved method of dictionary atom selection in compressive sensing hyperspectral reconstruction[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0930002.
汪琪, 马灵玲, 李传荣, 等. 压缩感知光谱重构中的字典原子选取优化方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0930002.
- [16] Ma Yanpeng, Wang Yanan, Wang Yikun, *et al.* Study of single-pixel detection computational imaging technology based on compressive sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1211007.
马彦鹏, 王亚南, 王义坤, 等. 基于压缩感知的单点探测计算成像技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1211007.