

## 光电跟踪系统中扩展目标的成像对比度分析

黄健, 邓科, 蒋大钢, 张鹏, 朱彬, 么周石

(电子科技大学航空航天学院, 成都 611731)

**摘要:** 分析了影响大气层内扩展目标成像对比度的主要因素, 研究了整体倾斜校正对扩展目标对比度影响的数学关系, 并分析了采用绝对差分算法提取整体相位倾斜的复杂度优化问题。采用快速倾斜镜对成像光束整体倾斜进行校正能够提高扩展目标的成像对比度, 降低后端数字图像处理的难度, 进一步减少目标识别和跟踪所需要的时间, 对提高低对比度目标的光电跟踪效率具有参考意义。

**关键词:** 光电跟踪; 特征识别; 低对比度; 扩展目标; 倾斜校正; 绝对差分算法

**中图分类号:** TN29      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0006-04

## Analysis for Image Contrast of Extended Objects in Photoelectric Tracking System

HUANG Jian, DENG Ke, JIANG Da-gang, ZHANG Peng, ZHU Bin, YAO Zhou-shi

(School of Astronautics & Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The main factors that have effect on image contrast of extended objects in atmosphere were analyzed. The influence of tilt removal to the image contrast was mathematically investigated, and the optimization of using the absolute difference algorithm for obtaining the tilt was studied. Tilt removal of imaging beam by using a fast steer mirror could enhance the image contrast of extended object, facilitate the later digital image processing, and reduce the time cost for target recognition and tracking, thus it is valuable for improving the photoelectric tracking efficiency of low-contrast extended object.

**Key words:** photoelectric tracking; feature recognition; low contrast; extended object; tilt removal; absolute difference algorithm

### 0 引言

在大气层内对低对比度扩展目标进行光学识别和跟踪的首要措施是增强目标对比度<sup>[1-2]</sup>。影响目标对比度的主要因素包括光学成像像差和背景噪声, 其中像差使得成像模糊, 降低了目标图像本身的对比度, 背景噪声则淹没图像, 降低了探测图像的对比度。因此可以分别采用硬件和软件相结合的方法来进行对比度增强: 首先通过硬件系统校正大气湍流和目标运动产生的动态像差, 提高目标的对比度; 其次对目标图像进行数字图像处理, 实现对比度增强。采用软硬件结合的方式增强图像对比度, 能够增强后端数字图像的处理效果, 降低处理的时间。

大气湍流像差中的倾斜成分、目标运动产生的倾斜以及控制系统的抖动残差3个因素都会引起成像光束的相位整体倾斜误差, 并通过引起目标图像整体动态平移叠加使得目标图像被扩展和模糊, 进而导致对比度下降, 因此, 与倾斜相关的长曝光图像对比度下降的原因在于短曝光图像的时序平均。通过对低对比度扩展目标成像光束的动态倾斜进行校正, 能够提高光学成像的对比度。

采用绝对差分算法能够快速有效地提取目标的整体倾斜信息, 并采用快速倾斜镜对整体倾斜进行充分校正即可显著改善目标成像对比度<sup>[3-5]</sup>, 该技术首先应用于进行太阳表面观测的太阳自适应光学望远镜系统, 能够显著提高太阳表面黑子和米粒结构的成像对比度。1995年成功应用于天文观测并得到了很好的长曝光像<sup>[6]</sup>, 2000年, 美国在其国立太阳天文台的真空塔式望远镜上进行了太阳表面米粒结构图像观测实验, 结果表明, 该方法可提高对比度20%~30%<sup>[7-8]</sup>。在此原理基

收稿日期: 2015-01-13

修回日期: 2015-03-04

基金项目: 装备预研基金(9140A05020113DZ02062)

作者简介: 黄健(1981—), 男, 贵州遵义人, 博士, 讲师, 研究方向为光电跟踪, 自由空间光通信。

基础上,本文讨论将绝对差分算法应用于近地飞行扩展目标的光电跟踪方法与跟踪性能,通过对整体倾斜与对比度的关系,以及绝对差分算法的复杂度进行数学分析,研究扩展目标成像对比度改善的优化性能,对实现飞行末端扩展目标的快速识别和跟踪具有重要意义。

### 1 整体倾斜与成像对比度的关系

对低对比度目标的光学跟踪,需要通过长曝光积分才可能对目标进行特征识别。因此,对比度下降主要是对短曝光图像的叠加引起的,在此,首先忽略光学系统像差和高阶相位畸变的影响,则目标的短曝光像是理想成像。采用矩阵描述目标图像,则长曝光成像过程的一般描述为

$$I_1(m, n) = \sum_{k=1}^N I_s[m - x(k), n - y(k)] \quad (1)$$

式中: $I_1$ 为长曝光图像的强度; $(m, n)$ 为像素位置; $I_s$ 为短曝光像强度; $x(k), y(k)$ 为短曝光图像相对于参考位置的平移; $N$ 为叠加图像的数量。

图像的对比度可定义为

$$\gamma = \frac{\delta I}{\bar{I}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\delta I$ 为该幅图像的强度的起伏均方根值; $\bar{I}$ 为图像的平均强度;图像既可以是短曝光图像,也可以是长曝光图像,分别对应求解短曝光或长曝光图像的对比度。

整体倾斜引起的图像模糊是平移短曝光图像的线性叠加引起的,因此,可以通过对成像光束的整体倾斜进行实时校正,提高长曝光图像的对比度。基于相位倾斜校正的成像跟踪系统结构如图1所示,该系统的主要倾斜校正结构包含常平架以及其负载的快速倾斜镜两部分,常平架实现低速大范围的倾斜校正,快速倾斜镜实现高速小动态范围的倾斜校正,目标倾斜探测信号用于对常平架和快速倾斜镜进行卸载控制<sup>[9]</sup>。对实际系统而言,常平架实现运动跟踪和视场保持,快速倾斜镜校正大气湍流以及平台振动产生的高频动态倾斜。

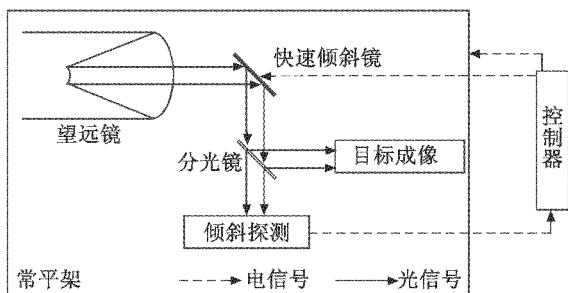


图1 基于相位倾斜校正的成像跟踪系统结构示意图

Fig. 1 Scheme of image tracking system based on tilted phase correction

经过倾斜校正后,在任意方向上定义的笛卡尔坐

标系下残余倾斜均服从高斯分布,因此,经过倾斜校正后的长曝光图像的对比度变化由平移量的方差决定。

根据对比度的定义可知,任意两幅图像平移叠加以后形成的新图像的强度起伏方差为

$$D(I_1 + I_2) = D(I_1) + D(I_2) - 2COV(I_1, I_2) \quad (3)$$

式中: $I_1, I_2$ 分别表示平移前后的图像强度; $COV(I_1, I_2)$ 为 $I_1$ 和 $I_2$ 的协方差。其中

$$COV(I_1, I_2) = E(I_1 I_2) - E(I_1)E(I_2) \quad (4)$$

通常条件下,以天空为背景的低对比度图像的背景均匀性比较好,可以视为高斯白噪声,在求均值时噪声的作用可以忽略,因此,包含背景的全幅图像的协方差仅与计算目标区域的协方差值相关,协方差计算方法如图2所示。

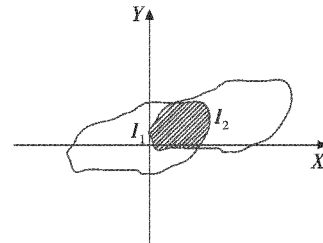


图2 平移图像的协方差计算

Fig. 2 Covariance calculation of image translation

扩展目标的形态通常是非对称的,平移图像的协方差同时受到平移的方向和距离的影响,协方差的大小取决于图像的重叠区域值。因此,倾斜像差引起的图像对比度下降与目标本身的形态以及强度分布有关,通常难以建立正确的运动目标消模糊的特征函数,应该对成像过程中的倾斜进行实时校正以提高对比度。另外,当图像偏移很大,导致相邻图像没有重叠部分时,协方差的值将趋于其极小值 $D(I_1) + D(I_2) - 2E(I_1)E(I_1)$ 。

白天条件下跟踪天空背景中的扩展目标,大气湍流引起的目标图像整体倾斜是导致目标图像对比度下降的重要因素。其整体倾斜角度的方差可表示为

$$\sigma_\theta^2 = 0.17 \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3} \quad (5)$$

式中: $\lambda$ 为成像波长,可见光成像可取可见光波段中间值600 nm; $D$ 为成像系统的光学望远镜口径; $r_0$ 为大气相干长度,白天条件下观察5 km距离的目标时 $r_0$ 的典型值为2~5 cm。假设按照最坏情况估计,当 $r_0 = 2$  cm, $D = 20$  cm时, $\sigma_\theta^2 = 71 \mu\text{rad}^2$ 。导致目标图像整体倾斜的另一个重要因素是跟踪平台的振动 $\sigma_t^2$ ,图像倾斜的总误差 $\sigma^2$ 是大气湍流引起的误差与平台振动引起的误差的合成 $\sigma_t^2 + \sigma_\theta^2$ 。

在不同倾斜残差条件下,对低能见度下飞行弹头的低对比度图像进行对比度分析,为了直观起见,下文分析中由倾斜导致的图像偏移用像素表示。图3显示

了对比度下降程度与图像偏移的关系,其中,倾斜残差用图像平移像素数的均方根值  $\sigma$  来衡量。随着偏移均方根值增大,对比度降低,但是对比度降低的变化率减小,对比度将收敛于极小值,此时对应于两幅图像上目标都没有重叠的情况出现。

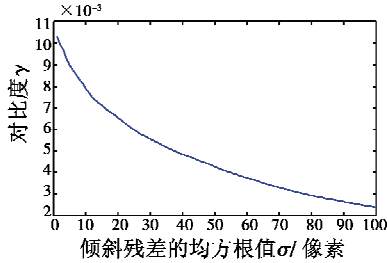


图3 不同倾斜残差下的扩展目标图像对比度

Fig. 3 Image contrasts of extended object for different residual tilts

在实际的光电成像跟踪系统中,扩展目标成像效果不仅受到整体倾斜残差大小的影响,还与目标的形态有关。比如,对于炮弹和导弹这类轮廓比较规整而且不关注轮廓内细节的目标而言,只需要识别其整体轮廓即可对目标进行跟踪,其模糊图像依然能够保持目标本身的形态,整体倾斜导致的图像模糊近似等效于改变了成像放大率。但是,对于飞机这类需要考虑轮廓内部特征细节的目标而言,整体倾斜导致的图像叠加会引起细节模糊,影响目标的识别,因此,扩展目标的跟踪首先必须要抑制由整体倾斜引起的成像模糊。

## 2 绝对差分算法效果与复杂性分析

对扩展目标的倾斜像差进行校正,可采用绝对差分算法和互相关算法进行计算倾斜。其中,绝对差分算法由于运算量小,易于硬件实现而被广泛采用<sup>[10]</sup>。绝对差分算法的实现首先计算不同位置偏移时参考图像和实际图像之间的绝对差分之和,然后比较其大小,取其最小值时所对应的位置偏移作为探测倾斜误差信号。假设参考图像  $I_R$ ,其大小为  $M * M$ ,实时目标图像为  $I_L$ ,其大小为  $N * N$ ,  $M < N$ ,于是,绝对差分用关系式可表示为

$$D_{LR}(u, v) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |I_L(i + u, j + v) - I_R(i, j)| \quad (6)$$

对实时图像中参与比较的区域进行遍历获得不同偏移量下的绝对差分矩阵  $D_{LR}$ ,其中,绝对差分最小值对应的  $u, v$  分别表示  $x$  方向和  $y$  方向的目标图像整体倾斜偏移量。

绝对差分算法是按像素进行运算,因此精度即为单位像素,可以采用二次曲线插值拟合使倾斜探测具有亚像素精度,这样,  $x$  方向和  $y$  方向的整体倾斜信号

$T_x$  和  $T_y$  可表示为

$$\begin{cases} T_x = u_{\min} + \frac{1}{2} \frac{D_{LR}(u_{\min} + 1, V_{\min}) - D_{LR}(u_{\min} - 1, V_{\min})}{D_{LR}(u_{\min} + 1, V_{\min}) + D_{LR}(u_{\min} - 1, V_{\min}) - 2D_{LR}(u_{\min}, V_{\min})} \\ T_y = v_{\min} + \frac{1}{2} \frac{D_{LR}(u_{\min}, V_{\min} + 1) - D_{LR}(u_{\min}, V_{\min} - 1)}{D_{LR}(u_{\min}, V_{\min} + 1) + D_{LR}(u_{\min}, V_{\min} - 1) - 2D_{LR}(u_{\min}, V_{\min})} \end{cases} \quad (7)$$

式中,由整体倾斜像差导致的对比度下降程度仅与目标成像位置偏移有关,根据对比度的定义可知,经过理想倾斜校正后由  $N$  帧短曝光图像累加形成的目标长曝光图像对比度值为

$$\gamma = \left( \delta \sum_{k=1}^N I_k \right) / \sum_{k=1}^N I_k \times 100\% = \frac{\delta(N * I)}{N * \bar{I}} \times 100\% = \frac{\delta I}{\bar{I}} \times 100\% \quad (8)$$

当倾斜校正良好时,长曝光图像的对比度与包含的短曝光图像帧数(曝光时间)无关,曝光时间仅改变了目标图像的亮度。在倾斜被充分校正的条件下,可直接对短曝光图像进行数字图像处理,这有利于降低跟踪系统延时。

应用绝对差分算法提取目标成像整体倾斜信息的工作流程如图4所示。

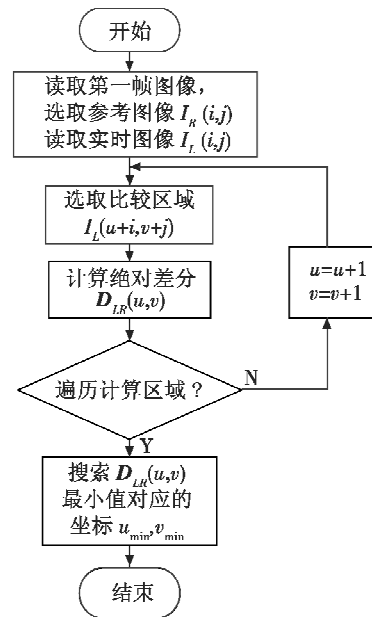


图4 绝对差分算法工作流程图

Fig. 4 Flow chart of absolute difference algorithm

采用天空背景下的飞机图像对绝对差分算法提取倾斜的效果进行了仿真,输入动态扰动导致的短曝光图像偏移均方根值为5像素,实时图像大小150像素×200像素,匹配模板大小50像素×50像素,长曝光像采用20帧短曝光像叠加。图5所示为倾斜校正前后的成像效果对比,为了增强图像的可视效果,在不改变对比度的基础上对短曝光像进行了图像亮度增强。

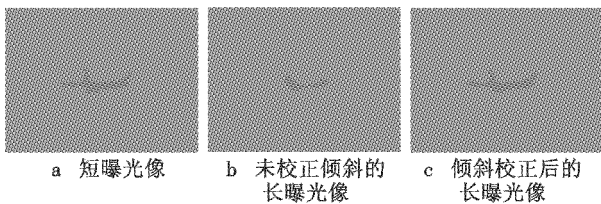


图5 绝对差分算法探测并校正倾斜前后的成像效果对比  
Fig.5 Comparison of images before and after correcting

仿真结果显示,绝对差分算法提取倾斜的精度非常高,经过插值拟合后,绝对差分算法提取的短曝光像倾斜均方根值与图像扰动的均方根值的相对误差约为0.7%,并且该过程对高斯白噪声不敏感。短曝光成像的对比度为2.2%,未进行倾斜校正的长曝光像的对比度为1.6%,经过倾斜校正的长曝光像对比度增强为2.0%。

绝对差分算法的复杂度可以从算法进行单次运算的运算量来衡量。绝对差分算法的单次运算量  $M^2(N-M+1)^2$  与实际图像和模板图像的大小  $M$  和  $N$  有关。而在实际系统中实际图像的大小  $N$  取决于硬件设计参数,往往与跟踪系统的视场、角速度、角加速度、角度分辨率、图像传感器的帧频等参数有关,在本文中可以被视为一个不变量。参考图像的大小取值  $M$  也存在限制:一方面  $M$  要大于目标图像的轮廓,避免在多目标和复杂背景下由于目标特征不完善引起的虚警概率升高;另一方面  $M$  不宜过大,以保证在求取绝对差分矩阵时参考图像的移动距离大于整体倾斜引起的目标成像漂移。

绝对差分算法的单次运算量  $F$  与参考图像大小之间存在优化关系,对  $F$  进行求导运算可知

$$\frac{dF}{dM} = \frac{d(M^2(N-M+1)^2)}{dM} = 2M(N-M+1)^2 - 2M^2(N-M+1) \quad (9)$$

因此单次运算量存在极值,此时  $M$  的取值使得  $\frac{dF}{dM} = 0$ ,即

$$M = \frac{N+1}{2} \quad (10)$$

但是,单次运算量  $F$  在该处取最大值

$$F_{\max} = \left(\frac{N+1}{2}\right)^4 \quad (11)$$

因此,为了提高运算速度,绝对差分算法的单次运算量  $F$  应该在实际系统中取最小值,相应地,参考图像的大小  $M$  的取值应该取其取值范围的边界值。根据整体倾斜强度的不同, $M$  若取目标的轮廓大小,可以避免模板特征缺失引起的计算误差; $M$  若取  $N$  与最大图像偏移的差值,可以避免多余的绝对差分计算过程。最优化模板大小取值用数学形式可表示为

$$M_{\text{optimal}} = \begin{cases} M_0 & F(M_0) < F(N - P_{\max}) \\ N - P_{\max} & F(N - P_{\max}) < F(M_0) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $M_0$  为图像上目标的轮廓大小; $P_{\max}$  为目标最大偏移像素,与倾斜校正残差有关。绝对差分算法单位时间的运算量等于单次运算量与图像帧频的乘积,其中图像帧频要大于大气湍流的“冻结”时间,这个数值一般在毫秒量级,因此倾斜校正系统的图像帧频应该在数百赫兹以上。

### 3 结论

大气层内低对比度扩展目标的成像对比度受到大气湍流、目标运动以及平台振动的影响,采用绝对差分算法对这3个因素共同产生的成像光束整体倾斜进行提取,并通过快速倾斜镜校正对整体倾斜进行实时校正,能够实现扩展目标的对比度增强,同时优化绝对差分计算模板的大小能进一步改善倾斜校正的效率,该方法可以在物理成像过程中改善扩展目标成像对比度,降低后端数字图像处理的难度。绝对差分算法受系统测量噪声的影响小,并且不涉及高延迟的乘法和除法运算,具有增强目标识别性和提高跟踪控制实时性的应用潜力。

### 参考文献

- [1] 张耀,雍杨,张启衡,等.低对比度小目标检测[J].强激光与粒子束,2010,22(11):2566-2570. (ZHANG Y, YONG Y, ZHANG Q H, et al. Detection of dim point target with low contrast [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11):2566-2570.)
- [2] 蔡雷,张世强,关小伟.扩展目标光学特性的理论分析与研究[J].强激光与粒子束,2013,25(7):1671-1674. (CAI L, ZHANG S Q, GUAN X W. Theoretic analysis and experimental study on optical characteristics of extended targets [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7):1671-1674.)
- [3] 彭晓峰,李梅,饶长辉.基于绝对差分算法的相关HS波前处理机设计[J].光电工程,2008,35(12):18-22. (PENG X F, LI M, RAO C H. Design of correlating Hartmann-Shack wavefront processor based on absolute difference algorithm [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(12):18-22.)
- [4] 高文静,侯静,陆启生.有结构扩展目标整体倾斜信息提取有效性实验[J].光电工程,2004,31(11):5-8. (GAO W J, HOU J, LU Q S. The effective experiments for extracting global tilt information of an object with structural extension [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(11):5-8.)

(下转第24页)

38. (YAO C C, SU T L. Evaluation method of radar emitter threat based on fuzzy MAGDM [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2012, 35(4):34-38.)
- [6] 王睿甲, 王星, 程嗣怡, 等. 机载 RWR/ESM 中改进最近邻算法的分频段辐射源识别[J]. *火力指挥与控制*, 2014, 39(8):883-885. (WANG R J, WANG X, CHENG S Y, et al. Improved nearest neighbor mating algorithm in radar emitter recognition in airborne RWR/ESM [J]. *Fire Control and Command Control*, 2014, 39(8):883-885.)
- [7] 孟祥豪, 罗景青. 基于合成特征参数和脉冲样本图的雷达信号分选[J]. *火力指挥与控制*, 2012, 37(9):50-54. (MENG X H, LUO J Q. Radar signal sorting based on composite characteristic parameter and pulse pattern [J]. *Fire Control and Command Control*, 2012, 37(9):50-54.)
- [8] 旷平昌, 王杰贵, 罗景青. 基于脉冲样本图和 Vague 集的雷达辐射源识别[J]. *宇航学报*, 2011, 32(7):1639-1644. (KUANG P C, WANG J G, LUO J Q. Radar emitter recognition based on pulse sequence pattern and Vague set [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(7):1639-1644.)
- [9] 龚亮亮, 罗景青. 一种基于脉冲样本图的雷达信号特征表述方式[J]. *舰船电子工程*, 2008, 28(2):83-85. (GONG L L, LUO J Q. The expression approach of radar signal character based on the pulse sequence [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(2):83-85.)
- [10] QUAN W, LI P, WU D, et al. A new sorting algorithm for radar emitter recognition [C]//IEEE International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010:407-410.
- [11] 贾朝文, 周水楼. 机载雷达工作模式识别[J]. *电子信息对抗技术*, 2011, 26(1):14-17. (JIA C W, ZHOU S L. Work mode identification of airborne radar [J]. *Electronic Warfare Technology*, 2011, 26(1):14-17.)
- [12] 严利华, 姬宪法, 梅金国. 机载雷达原理与系统[M]. 北京:航空工业出版社, 2010:307-313. (YAN L H, JI X F, MEI J G. *Airborne radar theory and system* [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010:307-313.)
- [13] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (WANG X. *Principles of aircraft electronic countermeasure* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [14] STIMSON G W. 机载雷达导论[M]. 吴汉平, 译. 北京:电子工业出版社, 2005:326-330. (STIMSON G W. *Introduction of airborne radar* [M]. Translated by WU H P. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005:326-330.)
- [15] 朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2版. 北京:航空工业出版社, 2006:63-68. (ZHU B L, ZHU R C, XIONG X F. *Combat aircraft effectiveness evaluation* [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006:63-68.)
- [16] 张杰, 唐宏, 苏凯. 效能评估方法研究[M]. 北京:国防工业出版社, 2009:66-70. (ZHANG J, TANG H, SU K. *Reserch in efficiency assesment* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:66-70.)

(上接第 9 页)

- [5] 郭锐, 熊耀恒, 李荣旺, 等. 基于月面图像的大气波前倾斜量提取算法的性能分析[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(1):47-52. (GUO R, XIONG Y H, LI R W, et al. Performance evaluation of atmospheric tip-tilt computing algorithms based on lunar surface images [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(1):47-52.)
- [6] LUHE O V D, WIDENER A L, RIMMELE T, et al. Solar feature correlation tracker for ground-based telescopes [J]. *Astron Astrophys*, 1989, 224(1-2):351-360.
- [7] 饶长辉, 姜文汉, 凌宁. 低阶模式校正自适应光学系统的补偿效果分析[J]. *光学学报*, 1999, 19(12):1615-1624. (RAO C H, JIANG W H, LING N. Analysis of compensation effectiveness for adaptive optical system used as low-order modes correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(12):1615-1624.)
- [8] 饶长辉, 姜文汉, 凌宁. 扩展目标低阶校正自适应光学系统的补偿效果[J]. *量子电子学报*, 2001, 18(s):70-75. (RAO C H, JIANG W H, LING N. Compensation effectiveness analysis of low-order correction adaptive optical system for extend object [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(s):70-75.)
- [9] 李克玉, 田福庆. 光电跟踪系统的共轴跟踪控制技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(8):2106-2110. (LI K Y, TIAN F Q. On-axis tracking control technology of electro-optical tracking system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(8):2106-2110.)
- [10] 饶长辉, 姜文汉, 凌宁, 等. 低对比度扩展目标跟踪算法[J]. *天文学报*, 2001, 42(3):329-338. (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.)