

文章编号 1004-924X(2015)增-0762-07

多特征相关的漂移扫描 CCD 星图目标识别

杨会玲^{1,2*}, 孙慧婷¹, 柳红岩¹, 何 昕²

(1. 苏州科技学院 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215000;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高同步卫星定轨系统中卫星星图的目标识别精度, 分析了漂移扫描 CCD 星图特征, 提出了一种基于多特征相关的同步卫星目标识别算法。该算法利用形态学滤波抑制星图背景并消除背景的不均匀性; 在星图背景均匀分布的基础上, 分析局部区域的像素值、对比度和线性相关 3 种特征的相关度, 基于相关度选取最佳阈值, 根据最佳阈值分割同步卫星目标与恒星背景, 提取目标像素, 识别同步卫星目标。通过对同步卫星星图进行处理, 结果表明, 该方法能有效消除背景恒星对目标识别的影响, 减少目标识别的误检率, 精确识别同步卫星目标, 满足同步卫星定轨的可靠性、稳定性与准确性要求。

关键词: 星图; 目标识别; 漂移扫描 CCD; 同步卫星目标提取; 形态学滤波; 多特征相关性

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0762

Target recognition based on multi-feature correlation from star image taken by drift-scan CCD

YANG Hui-ling^{1,2*}, SUN Hui-ting¹, LIU Hong-yan¹, HE Xin²

(1. Faculty of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of
Science and Technology, Suzhou 215000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 281109685@qq.com

Abstract: To improve the detection precision of a geostationary satellite orbit determination system, a target recognition method based on local region multi-feature correlation was proposed by analyzing the characteristics of a star image taken by a drift-scan CCD. A morphological filter method was used to suppress the background of star image and eliminate its non-uniformity. After homogenizing the image background, the correlation coefficients of three features(pixel values, contrast ratios and linear correlation) in local region were analyzed. On the basis of correlation coefficients, the optimal threshold was determined to isolate the pixels of the satellites and the background stars and ultimately to identify the pixels of the satellite targets. The star images of geostationary satellite were processed, the experimental results show that this method removes the influence of background stars on target

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-06-07.

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No. KYLX15_1311)

recognition, decreases error detection rate and accurately detects geostationary satellite targets. It can fulfill the requirement of reliability, stabilization and accuracy of geostationary satellite orbit determination.

Key words: star image; target recognition; drift-scan CCD; geostationary satellite recognition; morphology filter; multi-feature correlation

1 引言

对同步卫星进行天文观测时,通常利用 CCD (Charge Coupled device) 漂移扫描技术。这是因为在 TDI (Time-Delay Integration) 模式时漂移扫描 CCD 光电子的并行转移速度与同步卫星投影速度相同,所以漂移扫描 CCD 可以跟踪同步卫星进行拍摄^[1]。同步卫星定轨的主要操作步骤为:漂移扫描 CCD 先采用凝视模式对恒星进行拍摄,然后利用 TDI 模式对同步卫星进行跟踪拍摄,将恒星作为参考星归算同步卫星轨道^[2]。凝视模式拍摄时恒星在星图中表现为圆星象,同步卫星表现为拖尾星象;TDI 模式拍摄时恒星在星图中表现为拖尾星象,同步卫星表现为圆星象。漂移扫描 CCD 按凝视模式→TDI 模式→……→TDI 模式→凝视模式的顺序交替拍摄恒星背景与同步卫星目标,通过提取并识别背景恒星目标与同步卫星目标对恒星目标进行识别,并归算 CCD 底片模型,再利用 CCD 底片模型计算同步卫星轨道参数坐标。采用 CCD 漂移扫描技术能够克服光学望远镜仪器误差对卫星与恒星背景的影响,提高同步卫星的定轨精度。

同步卫星目标识别是同步卫星定轨技术中的关键问题,同步卫星目标在成像面上面积较小,且星图背景复杂,为同步卫星的识别带来了一定的困难。文献[3]提出基于 OTSU 算法识别星图目标,即通过能量投影确定目标区域与噪声区域,利用最大类间方差法提取目标与噪声点,利用多帧叠加剔除噪声。此方法能够识别星图目标,但无法减小恒星背景对同步卫星目标识别的影响,而且随着背景恒星数量的增多,在处理过程中会引入更多噪声,很难达到同步卫星精确定轨要求。文献[4]提出通过模拟星图去除恒星背景的目标识别方法,即根据拍摄参数生成对应视场的模拟星图,接着利用模拟星图形成掩模,去除实拍星图的恒星背景。此方法关键在于高精度的星图模

拟,而在同步卫星实际观测中,天文望远镜对星空的指向为粗指向,故无法精确模拟星图,且在星图模拟过程中需修正星体赤道坐标,这会增加同步卫星目标识别的计算量。

针对这些问题,本文提出一种多特征相关分析的同步卫星目标识别方法,首先利用形态学滤波抑制背景,其次计算局部区域之间的灰度值、对比度与线性相关等特征值之间的相关度,设定最佳阈值分离同步卫星目标与恒星目标,提取目标像素并计算目标中心坐标,最后通过坐标关联,剔除虚假目标,从而实现同步卫星目标的精确识别。

2 形态学滤波背景抑制

在对同步卫星进行观测时,由于月光或薄云的影响,星图背景亮度分布不均匀,如下图 1 所示。从而难以检测出处于较亮星图背景中的同步卫星目标,尽管可以采用多项式拟合方法拟合背景消除背景不均匀性^[5](如图 2 所示),但星图背景亮度依然较高,不利于后续同步卫星的目标提取,所以,需先对星图背景进行抑制,增强目标与背景的亮度对比度。

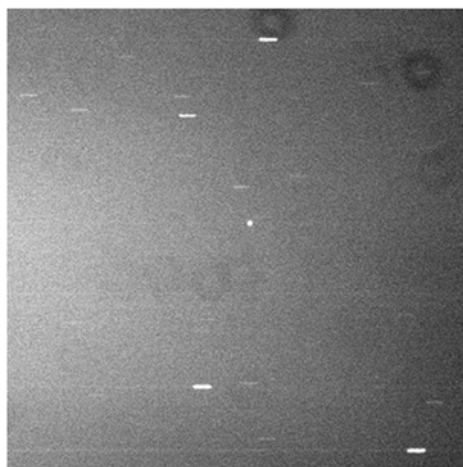


图 1 背景不均匀星图

Fig. 1 Star image with non-uniformity background

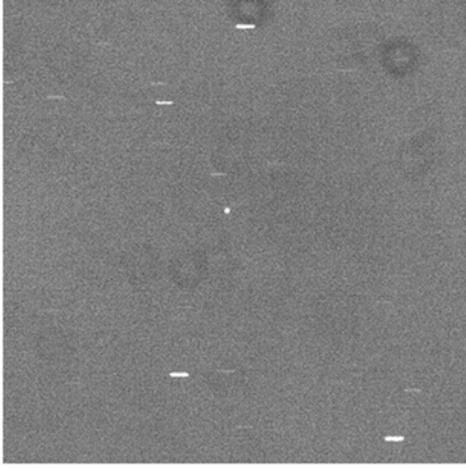


图 2 多项式拟合后的星图

Fig. 2 Star image after polynomial fitting

常用的背景抑制方法为中值滤波、高通滤波与形态学滤波等^[6],其中中值滤波不易处理背景复杂的星图;高通滤波是通过增强星图的高频部分进行滤波,在增强星点目标的同时可能会增强噪声目标,形态学滤波可以增强目标而且能够很大程度上提高信噪比,降低虚警率,所以本文利用形态学滤波抑制星图背景。

形态学的基本运算为腐蚀膨胀,设原始图像信号为 $f(x, y)$,结构元为 $b(p, q)$,形态学腐蚀与膨胀公式分别为式(1)与式(2):

$$(f \ominus b)(x, y) = \min\{f(x+p, y+q) + b(p, q) \mid (x, y) \in D_f; (p, q) \in D_b\}, \quad (1)$$

$$(f \oplus b)(x, y) = \max\{f(x-p, y-q) + b(p, q) \mid (x, y) \in D_f; (p, q) \in D_b\}, \quad (2)$$

式中: D_f, D_b 分别代表 f 与 b 的定义域。基于腐蚀膨胀,对 f 与 b 进行开运算与闭运算,开运算与闭运算的公式分别为公式(3)与公式(4):

$$f \circ b(x, y) = (f(x, y) \ominus b(x, y)) \oplus b(x, y), \quad (3)$$

$$f \bullet b(x, y) = (f(x, y) \oplus b(x, y) \ominus b(x, y)). \quad (4)$$

开运算可滤除小于结构元的小目标和大于结构元的大目标部分边缘,留下大目标内部与大面积起伏背景,将原值减去开运算值则可抑制背景,背景抑制的公式为:

$$F(x, y) = f(x, y) - (f \circ b)(x, y). \quad (5)$$

结构元的选取非常重要,需从形状与大小两方面考虑结构元的选取,由于漂移扫描 CCD 星图中同步卫星目标较小,其面积小于 $10 \text{ pixel} \times 10$

pixel,且形状为点状,所以结构元的形状选取为正方形,大小设定为 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 。

3 同步卫星目标识别

在 TDI 模式下拍摄的星图进行形态学滤波后,同步卫星目标与恒星目标明显亮于背景,故通过对同步卫星目标区域与其局部背景区域进行多特征相关度分析,即可提取出同步卫星目标像素,差异相关度越大,则越可能存在潜在同步卫星目标。具体步骤为按顺序计算每个像素的局部区域多特征相关度,确定同步卫星目标区域,利用阈值分割法提取目标像素,利用坐标关联识别出真正的同步卫星目标。设像素坐标为 (i, j) ,以该像素为中心,建立大小为 $M \times N$ 的局部区域,将此局部区域与其周围大小相同的 8 个区域相比较,8 个相邻区域分布示意图如图 3 所示,其中心区域为 X ,8 个相邻区域分别为 $Y_1 \sim Y_8$ 。局部区域大小应包含整个同步卫星目标,但不能过大,接近目标大小即可,所以对于同步卫星定轨系统拍摄的星图,局部区域大小设定为 10×10 。

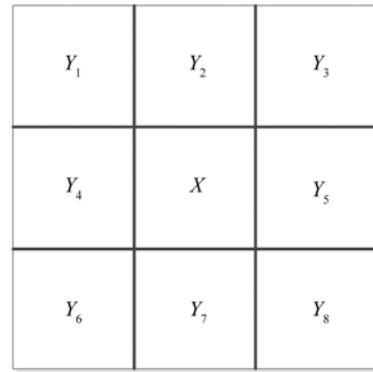


图 3 8 邻域分布示意图

Fig. 3 Mapping scheme of 8 neighborhood

3.1 多特征相关分析

多特征相关分析首先分析中心区域与其周围区域的多特征相似相关度,其次分析其差异相关度。对于同步卫星定轨系统,多特征主要包含 3 种,分别为灰度值特征,对比度特征与线性相关特征,多特征相似相关度为 (Similarity Correlation Coefficient, SCC) 的计算公式为:

$$SCC = \left[\frac{2\bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \right] \left[\frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \right] \left[\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y} \right], \quad (6)$$

式中 $\bar{x}$, $\bar{y}$, σ_x^2 , σ_y^2 , σ_{xy} 的计算公式分别为:

$$\bar{x} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M \times N} x_i, \quad (7)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M \times N} y_i, \quad (8)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{M \times N - 1} \sum_{i=1}^{M \times N} (x_i - \bar{x})^2, \quad (9)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{M \times N - 1} \sum_{i=1}^{M \times N} (y_i - \bar{y})^2, \quad (10)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{M \times N - 1} \sum_{i=1}^{M \times N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}). \quad (11)$$

其中: x_i 与 y_i 分别表示 X 区域与 Y_n 区域的像素灰度值, 公式(6)的第一个元素表示灰度平均值与 X 区域灰度或 Y_n 区域灰度的相似程度特征, 其范围为 $(0, 1)$; σ_x 与 σ_y 可分别视为 X 区域与 Y_n 区域各自的对比度, 所以第二个元素表示 X 区域与 Y_n 区域之间的相似度特征, 其范围也为 $(0, 1)$; 第三个元素为代表 X 区域与 Y_n 区域之间的线性相关特征, 其取值范围为 $(-1, 1)$ 。

在实际应用中, 一般增加一些常数来调整上述 3 个特征值, 所以 SCC 可调整为:

$$SCC(X, Y_n) = g^2(x, y) c^2(x, y) s(x, y), \quad (12)$$

其中:

$$g(x, y) = \frac{2\bar{x}\bar{y} + c_1}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + c_1}, \quad (13)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + c_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2}, \quad (14)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + c_3}{\sigma_x\sigma_y + c_3}. \quad (15)$$

其中: $SCC(X, Y_n)$ 表示 X 与其第 n 个邻域 Y_n 的局部区域多特征相似相关度。在实际同步卫星定轨应用中, c_1 , c_2 与 c_3 分别设为 0.001, 0.001, 1。已知 X 与 Y_n 两局部区域之间的相似相关度, 即可求出中心区域与其邻域之间的差异相关度 (Difference Correlation Coefficient, DCC), DCC 的计算公式为:

$$DCC = 1 - \frac{1}{8} \sum_{n=1}^8 SCC(X, Y_n). \quad (16)$$

3.2 坐标关联剔除虚假目标

得到每个像素的 DCC 之后, 可通过设定阈值来提取同步卫星目标像素, 阈值 $T = k_{\max}(DCC)$ $k \in (0, 1)$, 若像素的 DCC 大于阈值, 则该像素属于同步卫星目标像素, 反之, 则属

于背景像素。 k 的取值非常重要, 若 $k > 0.8$ 或 $k < 0.3$, 则所提取的目标中可能包含较多的噪声点, 所以 k 的最佳取值为 $(0.3, 0.8)$ 。对于同步卫星定轨系统, 根据经验值, k 取 0.6。提取出目标的所有像素后, 利用质心法计算所有目标的中心坐标。

星图中同步卫星目标特征满足三个条件: 第一同步卫星为圆形星象; 第二同步卫星目标较小, 大小不超过 10×10 且不小于 2×2 ; 第三同步卫星目标像素总数大于 4^[8]。在提取过程中, 若某些噪声点满足其中的两个条件, 系统就可能将其误认为同步卫星目标, 所以需要对提取结果进行筛选, 去除噪声点。由于漂移扫描 CCD 在 TDI 模式下进行多次拍摄时, 同步卫星相对于漂移扫描 CCD 静止, 每次拍摄, 星图中同步卫星目标的坐标也几乎不变, 所以可以通过坐标关联法去除噪声点。具体为设前一帧星图所提取的目标的坐标为 (x, y) , 后几帧星图目标坐标为 (x_n', y_n') , 若满足 $|x - x_j'| < 0.01$ 且 $|y - y_j'| < 0.01$, 则该目标为同步卫星目标, 反之为噪声点。

根据局部异同分析算法特性可知, 在此无法计算图像边缘像素的 DCC。同步卫星定轨系统观测同步卫星时, 天文望远镜通过接收预报指向信号使得每次拍摄同步卫星时保证同步卫星目标不会处于 CCD 视场边缘位置, 所以星图边缘中不会出现目标像素, 所以在此不需要计算边缘像素的 DCC, 可将其直接赋零。

4 实验结果

为了验证本文提出的同步卫星目标识别算法的有效性, 利用其对漂移扫描 CCD 拍摄的星图进行处理。天文望远镜 CCD 相机按照漂移扫描模式对同一同步卫星目标连续 3 h 轮番跟踪观测,

表 1 天文望远镜参数

Tab. 1 Parameters of astronomical telescope

参数	数值
望远镜口径/m	0.8
焦距/mm	3 445
CCD 比例尺/(mm · pixel ⁻¹)	0.024
星图尺寸	1 528 × 1 528
望远镜视场/(°)	0.5° × 0.5

每轮之间相隔时间大于 10 min,每轮中 TDI 模式进行 3 次拍摄,每个模式相隔 3 s 曝光。天文望远镜参数如表 1 所示。

表 1 实验平台为 Intel core i7 处理器,4 GB 内存,软件开发操作系统为 Windows 7,使用 Visual Studio 2012 编译器。图 4 为较典型的一轮星图的处理结果,图 4(a)、(b)、(c)分别为 TDI 模式拍摄的连续 3 帧同步卫星星图,图(d)、图(e)、图(f)表示上述 3 帧星图进行形态学滤波后的输出结果,图(g),图(h),图(i)表示进行多特征相关操作后的星图,从图中可以看出,多特征相关可以有效消除背景恒星对目标识别的影响,精确识别同步卫星目标。

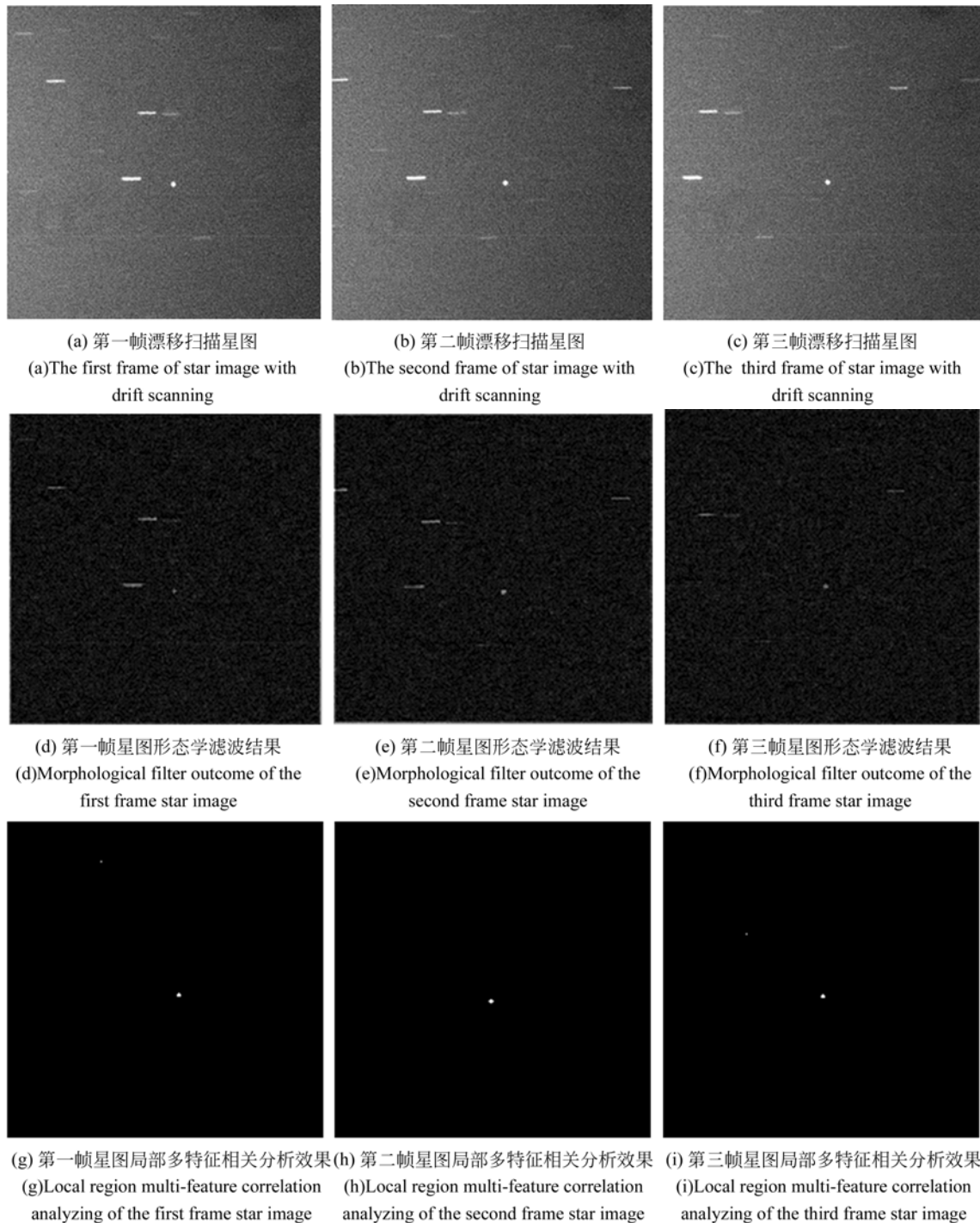


图 4 同步卫星目标识别结果

Fig. 4 Recognition results of synchronous satellite

本文利用误检率评价识别效果,误检率表示所提取的目标中噪声点数量所占的比例^[9]。根据漂移扫描 CCD 的同步卫星观测原理可知,在同一轮拍摄中,由于漂移扫描 CCD 在 TDI 模式时光电子的并行转移速度与同步卫星投影速度相同,所以每轮 TDI 模式下拍摄的星图中同步卫星几乎无位移,而噪声点却是随机出现,坐标无规律排列,图 5 与图 6 分别为同步卫星定轨系统对同一目标连续进行 10 轮拍摄后,所提取所有目标横纵坐标的排列结果。从图 5 与图 6 可见,同步卫星目标全部被成功识别,误检率为 0,且每轮中三帧连续星图的目标坐标相差较小,满足同步卫星目标识别要求。

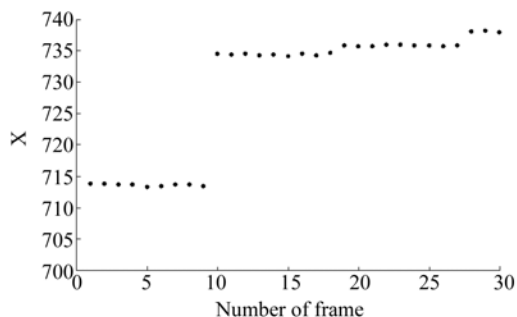


图 5 目标横坐标分布图

Fig. 5 Distribution map of targets' X-coordinate

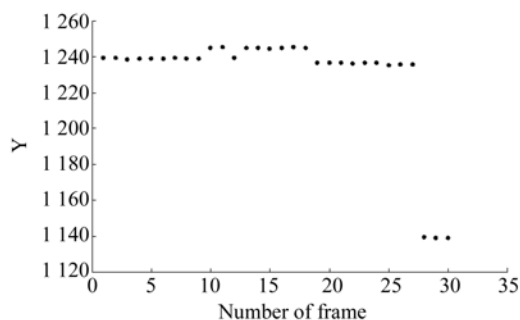


图 6 目标纵坐标分布图

Fig. 6 Distribution map of targets' Y-coordinate

5 结 论

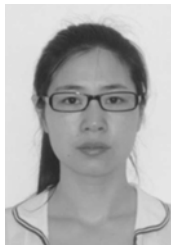
本文分析了漂移扫描 CCD 星图的特征并对 TDI 模式下拍摄的同步卫星目标进行识别。采用本文算法对源移扫描 CCD 拍摄的星图进行处理。结果显示利用局部区域多特征相关分析方法能够精确识别同步卫星目标,且减少目标提取的误检率,满足同步卫星精确定轨要求。此方法能够减小恒星背景对目标识别的影响,具有较高的实用性、稳定性与准确性。

参考文献:

- [1] SABBAY C N, COPPI P, OEMLER A. Data acquisition for a 16 CCD drift-scan survey [J]. *The Astronomical Society of the Pacific* (S0004-6280), 1998, 110(751): 1067-1080.
- [2] 毛银盾. CCD 漂移扫描系统的建立及在同步卫星观测中的应用 [D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2007.
- MAO Y D. Establishment of CCD drift-scan system and observing and positioning for GSS with it [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 2007.
- [3] 李飞. 基于 OTSU 算法的近红外星图目标提取 [J]. *红外*, 2015, 36(4): 30-33.
- LI F. Extraction of near-infrared star target based on OTSU algorithm [J]. *Infrared*, 2015, 36(4): 30-33.
- [4] 李振伟, 张涛, 孙国明. 星空背景下空间目标的快速识别与精密定位 [J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(2): 590-598.
- LI ZH W, ZHANG T, SUN G M. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 590-598. (in Chinese)
- [5] 毛银盾, 唐正宏, 陶隽, 等. 漂移扫描 CCD 用于地球同步轨道卫星观测的初步结果 [J]. *天文学报*, 2007, 48(4): 475-487.
- MAO Y D, TANG ZH H, TAO J, *et al.*. Preliminary results of GSS' optical observation with CCD drift-scan mode [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2007, 48(4): 475-487. (in Chinese)
- [6] 丁云, 卢海涛, 张国华, 等. 基于稀疏环决策的天空背景红外弱小目标检测算法 [J]. *电光与控制*, 2015, 22(4): 32-35.
- DING Y, LU H T, ZHANG G H, *et al.*. Sparse ring decision based algorithm for detecting infrared dim target against sky background [J]. *Electronic Optics & Control*, 2015, 22(4): 32-35. (in Chinese)
- [7] 张会彦. 卫星光学测量方法与精密定轨研究 [D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2014.

- ZHANG H Y. *The Optical Measurement Method and Precise Orbit Determination For the Satellite* [D]. Xi'an: The national center for timing of Chinese Academy of Science, 2014.
- [8] DINC S, BALA A. A Statistical approach for multiclass target detection [J]. *Procedia Computer Science*, 2011,1(6):225-230.
- [9] WANG CH Y, QIN SH Y. Adaptive detection method of infrared small target based on target-background separation via robust principal component analysis [J]. 2015, 69(1):123-135.
- [10] 陈洪,张延鑫,朱祥玲,等. 一种基于背景抑制的星图图像增强方法[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2015,16(2):7-11.
- CHEN H, ZHANG Y X, ZHU X L, *et al.*. Star map enhancement method based on background suppression[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015,16(2):7-11. (in Chinese)
- [11] 尹航,宋新,闫野. 星图的稀疏表示性能[J]. 光学精密工程,2015,23(2):573-281.
- YIN H, SONG X, YAN Y. Performance on sparse representation of star images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(2):573-281. (in Chinese)
- [12] XU W, LI Q, FENG H J, *et al.*. A novel star image thresholding method for effective segmentation and centroid statistics[J]. *Optik*, 2013,124(10),4673-4677.
- [13] 原玉磊,席靓,张文郎. 星点图像的目标提取算法研究[J]. 海军航空工程学院学报,2010,25(6):649-652.
- YUAN Y L, XI L, ZHANG W L. Research on star area extraction algorithm from star image[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2010,25(6):649-652. (in Chinese)
- [14] 李玉峰,郝志航. 星点图像超精度亚像元细分定位算法的研究[J]. 光学技术,2005,31(5):666-671.
- LI Y F, HAO ZH H. Research of hyper accuracy subpixel subdivision location algorithm for star image[J]. *Optical Technique*, 2005,31(5):666-671. (in Chinese)

作者简介:



杨会玲(1976—),女,河南开封人,硕士,讲师,2003年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光电测控与数字图像处理技术方面的研究。E-mail: 281109685@qq.com



孙慧婷(1992—),女,江苏东台人,硕士研究生,2014年于苏州科技学院获得学士学位,主要从事光电测控技术方面的研究。E-mail: 935898831@qq.com