

文章编号 1004-924X(2024)01-0111-14

## 适应大范围星场密度变化的恒星辨识与抑制

杨禹凯<sup>1,2,3</sup>, 谷 健<sup>4</sup>, 王建立<sup>1,2,3</sup>, 刘俊池<sup>1,2\*</sup>

- 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 吉林省智能波前传感与控制重点实验室, 吉林 长春 130033;
- 中国人民解放军 63768 部队, 陕西 西安 710200)

**摘要:**大视场光学望远镜是中高轨目标搜索的重要设备,在搜索图像中除中高轨目标外还存在恒星目标,对恒星目标进行辨识与抑制是中高轨目标检测的必要环节之一。考虑银道面附近天区、曝光时间差异以及多云遮挡等因素的影响,图像中的星场密度变化区间非常大,传统的恒星辨识方法在计算准确性与实时性方面均存在局限性,导致恒星虚警、计算超时等情况的发生。为解决该问题,提出了一种基于惯性坐标时域相对不变性的恒星辨识与抑制方法。推导了地平坐标系与惯性坐标系的数学转换关系,并由此构建了恒星辨识模型;在不同的静态系统误差条件下,量化分析了恒星目标的惯性坐标时域相对不变性;最后,开展了恒星辨识与抑制算法的仿真与实验验证。仿真与实验结果表明:在时间间隔为 10 s、静态系统误差为 10" 的条件下,恒星的惯性坐标最大相对差异为 0.51"(赤经),0.16"(赤纬),其时域相对不变性满足恒星辨识需求,辨识过程完全不依赖星场密度。经 100 圈次中高轨目标实测图像验证,本文方法未出现恒星虚警及中高轨目标检测缺失的现象。

**关键词:**目标检测;恒星辨识与抑制;中高轨目标搜索;惯性坐标系

**中图分类号:**TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243201.0111

## Identification and suppression of stars under large range of star field density variation

YANG Yukai<sup>1,2,3</sup>, GU Jan<sup>4</sup>, WANG Janli<sup>1,2,3</sup>, LIU Junchi<sup>1,2\*</sup>

- Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
- Jilin Provincial Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control, Changchun 130033, China;
- 63768 Unit of PLA, Xi'an 710200, China)

\* Corresponding author, E-mail: liujunchi703@163.com

**Abstract:** The large field optical telescope is an important equipment for the search of medium-high orbit targets. However, stellar targets also appear in the search images. Thus, the identification and suppression of stellar targets is a necessary step in the detection of medium-high orbit targets. Considering the influence of the sky area near the galactic plane, difference in exposure time, and cloudy occlusion, the varia-

收稿日期:2023-06-05;修订日期:2023-07-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10133009)

tion in the star field density within the image is very large. The traditional star identification method has limitations in the calculation accuracy and real-time performance, which leads to the occurrence of false alarm of stars and calculation timeout. To solve these problems, this study proposes a method of star identification and suppression based on the relative invariance of inertia coordinates in time domain. First, the mathematical transformation relationship between the horizon coordinate system and the inertial coordinate system is derived, and the star identification model is constructed accordingly. Then, the time domain relative invariance of the inertial coordinates of the stellar target is quantitatively analyzed under different static system errors. Finally, the star identification and suppression algorithm was verified via simulation and experiment. As a result, the maximum relative difference in the inertial coordinates of stars is 0.51" (right longitude) and 0.16" (declination) when the time interval is 10" and the static system error is 10". Thus, the time domain relative invariance meets the requirements regarding star identification, and the corresponding process is completely independent of star field density. The proposed method was also verified considering 100 measurement images of medium-altitude orbit objects, and no false alarm of stars and missing detection phenomenon of medium-altitude orbit objects were observed.

**Key words:** target detection; identification and suppression of stars; search of GEO and MEO; inertial coordinate system

## 1 引 言

随着航天科技的发展,越来越多的航天器被送入太空,逐渐拥挤的太空环境对航天器在轨运行安全构成很大威胁。为避免航天器、空间碎片<sup>[1]</sup>等发生碰撞,同时掌握重点航天器的在轨运行状态,利用地基光学望远镜<sup>[2]</sup>对目标进行观测并生成高精度的定位与测光信息,是有效的空间监视<sup>[3-4]</sup>手段之一。

中高轨目标的搜索效率<sup>[5-6]</sup>与视场大小正相关,因此中高轨望远镜的光学视场普遍较大。大视场望远镜在搜索中高轨目标时,图像中除中高轨目标外还存在恒星目标。恒星与中高轨目标在图像中呈点状或线状<sup>[7]</sup>,除此之外再无附加的轮廓特征,因此普遍基于速度差异对目标与恒星进行辨识<sup>[8]</sup>。在某种程度上,恒星速度辨识就等同于恒星辨识。中高轨目标最有效的搜索方法是凝视搜索,在指定的搜索天区,望远镜保持固定的方位与俯仰指向,图像中的大量恒星呈现同向匀速直线运动,而目标则相对静止或缓慢运动,因此计算恒星速度<sup>[9]</sup>,并对具有此速度的目标进行抑制,是中高轨目标成功检测的必要环节之一。

银河是位于银河系平面上的一条明亮的带状结构,由数十亿颗恒星及星际物质组成,在观

测银道面附近天区时,图像中的恒星密集程度非常高<sup>[10]</sup>。当存在云雾遮挡等恶劣条件时,视场中可探测的恒星数量非常少<sup>[11]</sup>。由此可见,在中高轨目标搜索过程中,恒星场密度的变化区间非常大,这给恒星或恒星速度辨识带来了很大的难度,直观表现为恒星或恒星速度辨识失败,进而导致恒星虚警情况的发生。因此,研究适应大范围星场密度变化的恒星辨识与抑制方法,对提升中高轨目标检测具有重要意义。

当前,恒星抑制方法主要有图像差分法<sup>[12]</sup>、Top-hat变换法<sup>[13]</sup>和全局航迹关联法<sup>[14]</sup>。其中,图像差分法容易出现恒星边缘残像;Top-hat变换法需依据恒星及中高轨目标在图像中的空间分布选取合适的结构算子,工程实现较难;全局航迹关联法相对成熟,具有较高的稳定性。然而,前述恒星抑制方法均依赖于恒星速度的准确辨识。现有的恒星速度辨识方法主要有灰度投影法<sup>[15]</sup>、傅里叶梅林法<sup>[16]</sup>、速度众数法<sup>[17]</sup>,以及基于天文定位的惯性坐标关联法<sup>[18]</sup>。这些恒星速度辨识方法均要求视场中存在适量的恒星,恒星数量过少,则计算存在失效风险;恒星数量过多,灰度投影法会计算失效;当视场内存在突出的云雾、杂光特征时,傅里叶-梅林法会计算失效。

针对当前方法的局限性,本文在惯性坐标关

联法的基础上,拟基于地平坐标系与惯性坐标系的数学转换关系计算恒星在图像中的惯性坐标,并由此实现恒星辨识。该方法可行性的前提是:在存在静态系统误差的条件下,恒星惯性坐标计算值与真值存在较大差异,但相邻图像帧的恒星惯性坐标计算值的时域相对差异较小,满足恒星辨识需求。该方法不依赖天文定位过程,解决了稀疏星场下天文定位失效引起的恒星辨识失败问题,并大幅缩短了运算时间。

## 2 现有方法局限性分析

### 2.1 恒星抑制方法

#### 2.1.1 图像差分法

基于已知的恒星速度对图像序列进行配准,然后采用图像差分法对恒星进行抑制。图 1(a)、1(b)为凝视模式下拍摄的两帧连续图像,图像差分法得到的恒星抑制效果如图 1(c)所示。从图中不难发现,图像差分法处理后,恒星边缘仍存在残像,这些残像会干扰目标航迹关联。

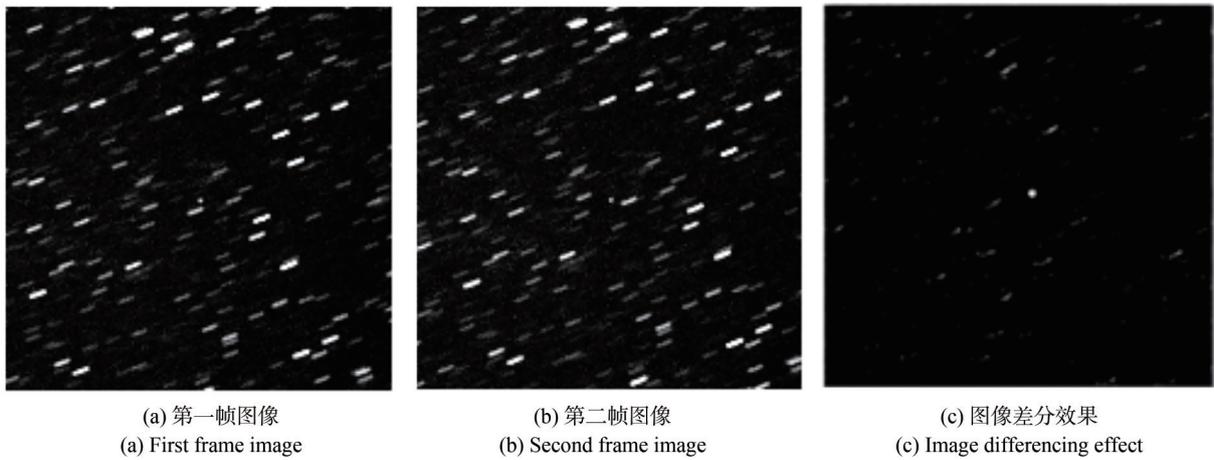


图 1 图像差分恒星抑制  
Fig. 1 Stellar suppression with image differencing method

#### 2.1.2 Top-hat 变换法

基于形态学的 Top-hat 变换法广泛应用于图像背景抑制领域。依据恒星速度及曝光时间选取合适的结构元素对原始图像做灰度开运算,得到仅包含恒星的背景图像,并利用图像差分处理原图和背景,实现恒星抑制。Top-hat 处理过程如下:

$$f_{\text{Top-hat}} = f - (f \ominus b_{\text{element}}) \oplus b_{\text{element}} = f - f \circ b_{\text{element}}, \quad (1)$$

式中: $f$ 为输入图像, $b_{\text{element}}$ 为结构元素, $f_{\text{Top-hat}}$ 为恒星抑制处理后的图像。Top-hat 变换的恒星抑制效果受限于选取的结构元素。凝视模式下,恒星速度在图像域中直观表现为匀速直线,恒星星象呈拉线状,如图 2 所示。

#### 2.1.3 全局航迹关联

基于已知的恒星速度对图像中恒星及中高轨目标构成的数据集进行多帧匹配,判断每一

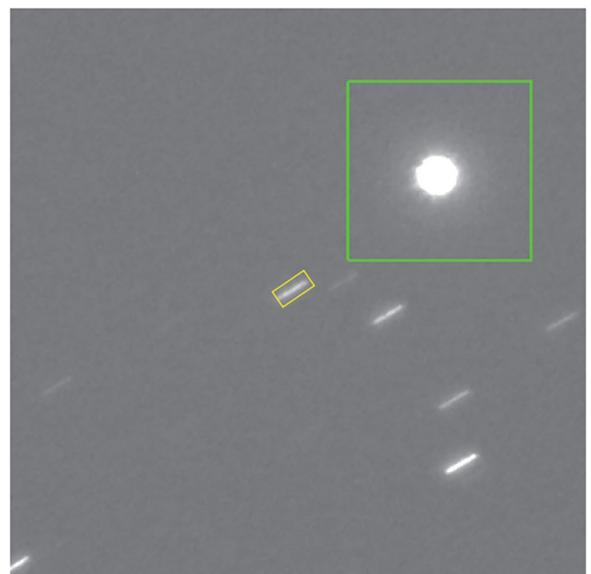


图 2 结构元素选取需参考的空间分布  
Fig. 2 Spatial distribution in consideration for selecting structuring element

个观测目标点的航迹属性,将航迹满足恒星速度约束的目标点视为恒星进行抑制。算法流程如图 3 所示。

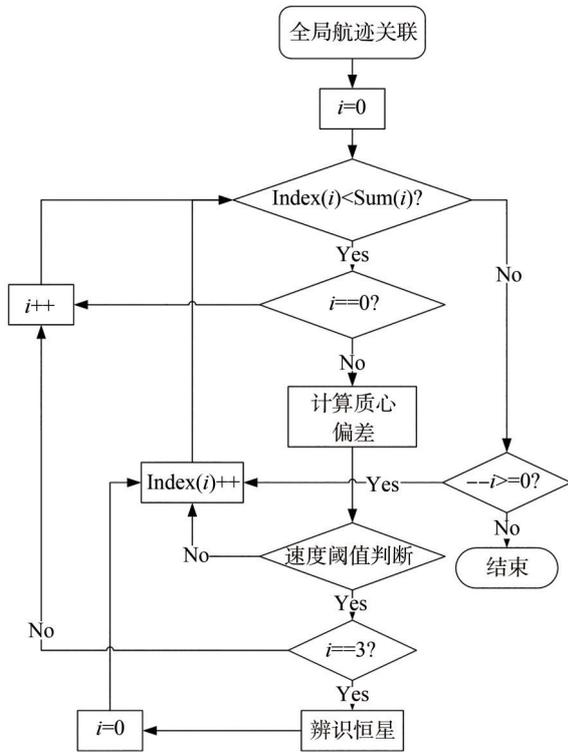


图 3 全局航迹关联算法流程

Fig. 3 Flow chart of global track association algorithm

### 2.1.4 局限性分析

(1) 图像差分法:由图 1(c)可知,因地基光学望远镜存在抖动等外部因素的影响,恒星在相邻两帧间的光度信息并不一致,灰度分布存在差异。帧差处理结果会出现恒星边缘残像,中高轨目标搜索可能出现虚警。

(2) Top-hat 变换法:结构算子需小于图像中最小恒星且大于最大中高轨目标的尺寸需求。选取过小会导致中高轨目标被抑制,过大则导致恒星残留。

(3) 全局航迹关联:该方法是基于点集的数据处理,不依赖图像中的灰度分布及空间信息,相对成熟,具有较高的稳定性。在图像坐标系下,受像旋影响,视场边缘与视场中心的恒星速度存在偏差,在进行航迹关联时可能导致恒星残留,为抑制视场边缘的恒星需进一步放大阈值,但存在目标被视为恒星而抑制的风险。

## 2.2 恒星速度辨识方法

### 2.2.1 灰度投影法

利用相邻帧的灰度投影曲线进行互相关计算得到恒星速度,过程如下:

$$rProj(i) = G_k(i) - \frac{\sum_{i=0}^M G_k(i)}{M}, \quad (2)$$

其中: $M$ 表示图像总行数, $rProj(i)$ 表示第*i*行的行灰度投影。基于行灰度投影计算互相关函数:

$$R_{\text{height}}(\omega) = \sum_{i=0}^{M-2m} [(rProj_{\text{cur}}(i+\omega-1) - rProj_{\text{ref}}(i+m))]^2, \quad 1 \leq \omega \leq 2m+1, \quad (3)$$

其中: $rProj_{\text{cur}}$ 与 $rProj_{\text{ref}}$ 表示相邻两帧图像的行灰度投影, $m$ 是固定值,表示最大间隔行数,两帧间隔行数随 $\omega$ 的变化而变化。存在 $\omega_{\min}$ 使 $R_{\text{height}}(\omega)$ 最小,此时 $rProj_{\text{cur}}$ 与 $rProj_{\text{ref}}$ 的灰度投影相似度最高,两帧间隔行数 $(\omega_{\min}-m-1)$ 即为图像垂直方向上的偏移量 $v_y$ ;同理,可求得图像在水平方向上的偏移量 $v_x$ 。 $(v_x, v_y)$ 即为恒星速度。

### 2.2.2 傅里叶-梅林

通过计算图像序列在频域的相位差,表征相邻两帧图像的相对位置关系,由相位相关技术求得帧间的偏移量从而获得恒星速度,算法过程如下:

$$f_2(x, y) = f_1(x - dx, y - dy) \quad (4)$$

$$F_2(u, v) = e^{-j2\pi(udx + vdy)} F_1(u, v)$$

其中: $f_1(x, y)$ , $f_2(x, y)$ 为相邻两帧图像在空域上的灰度分布, $(dx, dy)$ 为图像在水平与垂直方向上的偏移量, $F_1(u, v)$ , $F_2(u, v)$ 分别表示 $f_1$ , $f_2$ 对应的傅里叶变换,仅存在相位上的不同。计算两帧图像的互能量谱:

$$\frac{F_1(u, v) F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v) F_2^*(u, v)|} = e^{j2\pi(udx + vdy)}, \quad (5)$$

其中 $F_2^*(u, v)$ 为 $F_2(u, v)$ 的复共轭。平移理论表明,互能量谱的相位等于图像间的相位差,对它进行傅里叶反变换,得到冲击函数 $\delta(x-dx, y-dy)$ 。此函数在平移位置处有明显的尖锐峰值,其余位置处的值趋近于零,峰值处对应的偏移量即为恒星速度。

### 2.2.3 速度众数法

对相邻两帧图像中恒星与中高轨目标所构成的数据集进行关联计算,得到速度分布直方

图,其中频率最高的对应值即为恒星速度,算法流程如下:

#### 算法 1. 速度众数法

**输入:** 相邻帧中的目标数据集合:  $Point_1, Point_2$

第  $m$  帧中第  $n$  个目标的质心在图像中

的像素坐标:  $posx_{mn}, posy_{mn}$

速度集合  $vecSpd$

**输出:** 速度众数:  $v_x, v_y$

```

1: initialize:  $i=0, j=0$ 
2:   for  $i = 0 : Point_1.size() - 1$  do
3:     for  $j = 0 : Point_2.size() - 1$  do
4:       计算两帧中任意两目标的质心
       在水平与垂直方向上的偏差:
        $dx_{2j,1i} = abs(posx_{2j} - posx_{1i})$ 
        $dy_{2j,1i} = abs(posy_{2j} - posy_{1i})$ 
       将  $(dx_{2j,1i}, dy_{2j,1i})$  加入  $vecSpd$ 
5:     end for
6:   end for
7:  $v_x, v_y$  为  $vecSpd$  出现次数最多的对应值

```

#### 2.2.4 基于天文定位的惯性坐标关联法

惯性坐标系是一种相对固定的坐标系,其基准面是天赤道,具有相对于地球的位置和方向相

对固定的特殊性质,在地球上以惯性坐标系来描述恒星的位置时,可以忽略短时间内恒星的位置变化。

在惯性坐标系下定位图像中的恒星多采用星表匹配方法,利用天文定位技术,将观测视场内的恒星与预先建立的恒星数据库进行匹配。基于匹配结果。计算得出该帧图像所对应的实际天球区域位置信息,并由此反算得到恒星速度。

#### 2.2.5 局限性分析

前述恒星速度计算方法在图 4 所示星场密度变化或云雾遮挡的场景下存在相应的局限性。

(1)灰度投影法:在星场密度变化的场景中,互相关函数难以反映图像在水平和垂直方向上的全局变化,计算会失效。

(2)傅里叶-梅林法:时间复杂度相对较高,难以满足对中高轨目标搜索的实时性需求。另外,在云层遮挡等因素而导致图像中恒星数量较少的情况下,相邻帧之间的整体运动特性不再以恒星为主导,计算会失效。

(3)速度众数法:在视场中恒星数量较少的情况下,恒星的运动特性难以形成显著的统计特征,计算会失效。此外,在星场密度较高的情景下,该方法耗时较长。

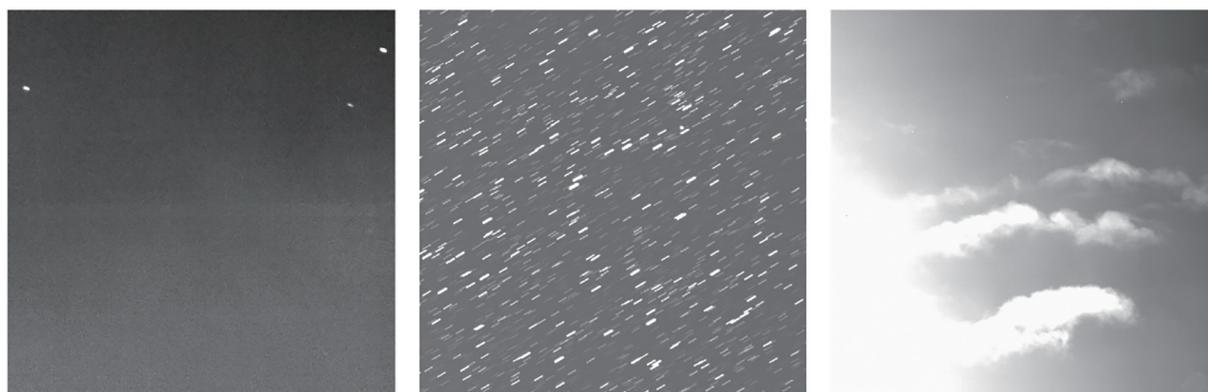


图 4 星场密度稀疏、密集及云雾遮挡场景下的实测图像

Fig. 4 Measured images for sparse stellar density, dense stellar density, and cloud cover scenes

(4)基于天文定位的惯性坐标关联法:高精度天文定位依赖于观测视场内充足的参考恒星。在视场中恒星较少的情况下,匹配精度难以满足要求,存在计算失效的风险。

### 3 算法原理

本文基于天文学原理,推导地平坐标系和惯性坐标系之间的数学转换关系,计算恒星在图像

中的惯性坐标并通过相邻两帧图像的关联匹配实现恒星辨识与抑制。相较于传统的天文定位方法,该方法具有更好的稳定性和高效性,能够解决稀疏星场下天文定位失效引起的恒星辨识失败问题,同时能大幅缩减计算时间,满足实时性需求。

### 3.1 计算目标在惯性坐标系下的赤经赤纬

#### 3.1.1 球极坐标系转换原理

天文学中通常使用球极坐标系来定义坐标,如图 5 所示。其中,  $r$  为点  $P$  和原点的距离,  $\theta$  为  $r$  和  $z$  轴的夹角,  $\varphi$  为  $r$  在  $xy$  平面上的投影逆时针方向与  $x$  轴的夹角。  $r$  为 1 时,笛卡尔坐标系与球极坐标系之间的转换如下:

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi \sin \theta \\ y = r \sin \varphi \sin \theta \\ z = r \cos \theta \\ x' = r \cos \varphi' \sin \theta' \\ y' = r \sin \varphi' \sin \theta' \\ z' = r \cos \theta' \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $xyz$  坐标系沿  $y$  轴旋转角度  $\chi$  得到的  $x'y'z'$ , 如图 6 所示。

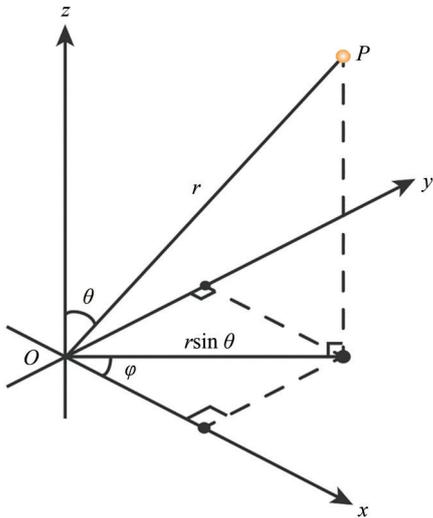


图 5 球极坐标系

Fig. 5 Spherical coordinate system

对应关系如下:

$$\begin{cases} x' = x \cos \chi + z \sin \chi \\ y' = y \\ z' = z \cos \chi - x \sin \chi \end{cases} \quad (7)$$

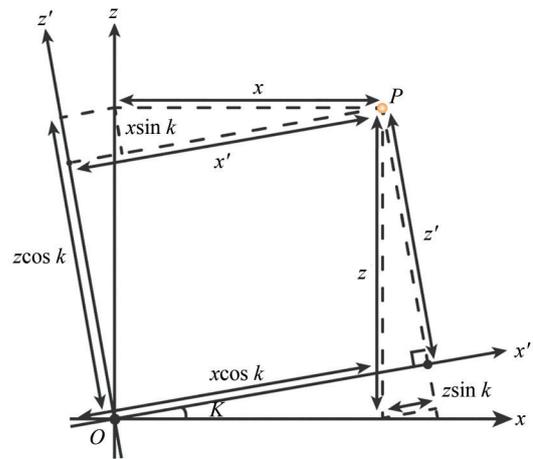


图 6 两球极坐标系转换

Fig. 6 Transformation of two spherical coordinates

将式(6)代入式(7)得到两球极坐标系转换方程:

$$\begin{cases} \cos \varphi' \sin \theta' = \cos \varphi \sin \theta \cos \chi + \cos \theta \sin \chi \\ \sin \varphi' \sin \theta' = \sin \varphi \sin \theta \\ \cos \theta' = \cos \theta \cos \chi - \cos \varphi \sin \theta \sin \chi \end{cases} \quad (8)$$

依据这一变换原理,引入时角坐标系作为中介,实现从地平坐标系到惯性坐标系的连续坐标转换。

#### 3.1.2 地平坐标系转时角坐标系

光线在穿过地球大气时发生折射,目标在观测时的位置会产生偏差。基于测站气压、温度等环境信息,计算大气折射修正值并应用到方位角上,使观测数据更加准确,计算过程如下:

$$A_z = A_{zori} - (60.2 / \tan(A_{zori})) \times R_{AsI} \times (273 \times P / (1013 \times T)) \quad (9)$$

其中:  $R_{AsI}$  表示每角秒对应的弧度值,  $P$  和  $T$  分别表示测站气压和温度。

时角表示观测目标所在子午圈与观测站点所在子午圈之间的角度差,受地球自转影响,恒星的时角随时间匀速增长。如图 7 所示,目标在地平坐标系下的方位角  $A_z$ 、俯仰角  $h$ ,在时角坐标系下的时角  $H$ 、赤纬  $\delta$  以及站址纬度  $\varphi$  与式(8)中的角度有如下关系:

$$\begin{cases} \varphi = -A_z, \varphi' = -H \\ \theta = \pi/2 - h, \theta' = \pi/2 - \delta \\ \chi = 90 - \varphi \end{cases} \quad (10)$$

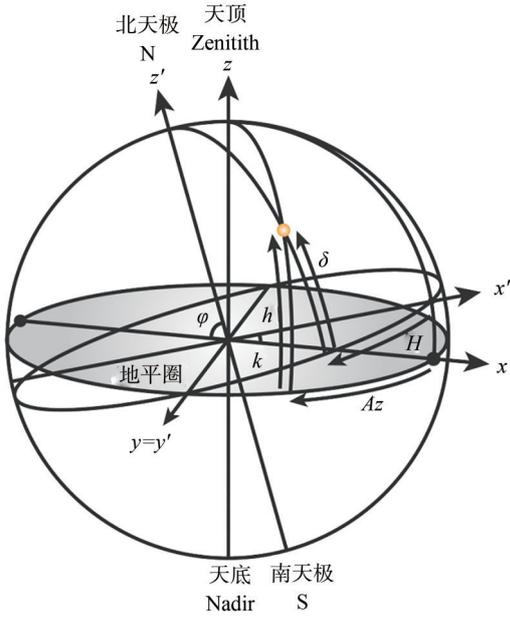


图 7 时角坐标系

Fig. 7 First equatorial system (HA-dec)

将式(10)代入式(8)后化简即可求得目标在时角坐标系下的时角  $H$  与赤纬  $\delta$ :

$$\begin{cases} H = \arctan(\cos A_z \sin \varphi + \tanh \cos \varphi) \\ \delta = \arcsin(\sinh \sin \varphi - \cos A_z \cosh \cos \varphi) \end{cases} \quad (11)$$

### 3.1.3 时角坐标系转惯性坐标系

惯性坐标系中,目标的赤纬值  $\delta$  与时角坐标系下一致。在惯性坐标系(J2000.0)中,赤经定义为从春分点起始,沿逆时针方向至观测目标所在子午圈的夹角,如图8所示。依据曝光中心时刻的北京时与站址经度,计算春分点的时角即地方恒星时  $H_y$ :

$$H_y = S + longitude, \quad (12)$$

$$\begin{cases} T_u = du/365.25 \\ du = j_d - 2451545.0 \\ j_d = 1721013.5 + 367 \times y - \text{int}\left\{\frac{7}{4}\left[y + \text{int}\left(\frac{m+9}{12}\right)\right]\right\} + d + \frac{h}{24} + \text{int}\left(\frac{275 \times m}{9}\right) \end{cases} \quad (15)$$

其中  $j_d$  为所求日期当天时的儒略日数,2451545.0 为 UTC2000 年 1 月 1 日 12 时的儒略日数。由式(12)~式(15)即可求得地方恒星时  $H_y$ 。依据惯性坐标系下赤经的定义,赤经  $\alpha$  为地方恒星时  $H_y$  与时角  $H$  之差,目标在惯性坐标系下的赤经  $\alpha$  与赤纬  $\delta$  表示为:

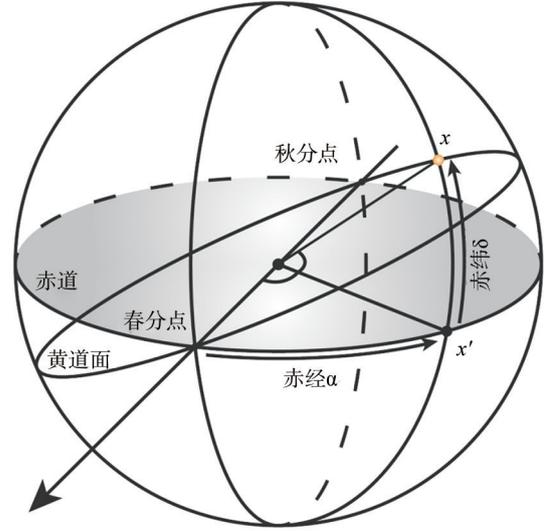


图 8 惯性坐标系

Fig. 8 Second equatorial system (RA-dec)

其中: $S$ 为格林尼治恒星时, $longitude$ 为测站经度。 $S$ 的计算过程如下:

$$\begin{cases} S = S_0 + M(1 + \mu) \\ M = h + m/60.0 + s/3600.0 \\ 1 + \mu \approx \frac{366.2422}{365.2422} \approx 1.0027304336 \end{cases} \quad (13)$$

其中: $S_0$ 为  $d$  日世界时的恒星时, $1 + \mu$  为平太阳日和恒星日的比例关系。 $S_0$ 的计算过程如下:

$$\begin{aligned} S_0 = & 6^h 41^m 50^s.54841 + 8640184^s.812866 \times T_u + \\ & 0^s.0931044 \times T_u^2 - 6^s.2 \times 10^{-6} T_u^3 = \\ & 6.697374558^h + 2400.05134^h \times T_u + \\ & 0^h.000025862333 \times T_u^2 - \\ & 0.00000001722222^h \times T_u^3, \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $T_u$  的计算过程如下:

$$\begin{cases} \alpha = H_y - H \\ \delta = \arcsin(\sinh \sin \varphi - \cos A_z \cosh \cos \varphi) \end{cases} \quad (16)$$

### 3.2 相邻帧关联匹配辨识与抑制恒星

为实时检测与跟踪中高轨目标,地基光学望远镜的图像采集系统帧频较高,连续两帧图像的时间间隔内,恒星在惯性坐标系中的位置信息相对不变。依据 3.1 理论推导,计算图像中恒星及

中高轨目标在惯性坐标系下的赤经赤纬位置信息,对构成的数据集进行相邻帧关联匹配,算法流程如下:

---

#### 算法 2. 惯性坐标关联匹配法

---

**输入:** 相邻帧中的恒星及中高轨目标数据集:  $Point_1$ ,  $Point_2$   
 第  $m$  帧中第  $n$  个目标点的质心在惯性坐标系下的赤经赤纬:  $\alpha_{mn}, \delta_{mn}$   
 阈值:  $dThreshold$   
 速度波门:  $fRadius$

**输出:** 提取出的恒星集合:  $StarBlob$

```

1: initialize:  $i=0, j=0$ 
2: for  $i = 0 : Point_1.size() - 1$  do
3:   for  $j = 0 : Point_2.size() - 1$  do
4:     计算两帧中任意两目标的质心在水平与垂直方向上的偏差:
        $dx_{2j,1i} = abs(posx_{2j} - posx_{1i}); dy_{2j,1i} = abs(posy_{2j} - posy_{1i})$ 
5:     计算两帧中任意两目标在惯性坐标系下的赤经赤纬差值:
        $d\alpha_{2j,1i} = abs(\alpha_{2j} - \alpha_{1i}); d\delta_{2j,1i} = abs(\delta_{2j} - \delta_{1i})$ 
6:     if 像素偏移值小于  $fRadius$ , 且赤经赤纬小于  $dThreshold$ 
7:       将第 1 帧中的第  $i$  个目标与第 2 帧中的第  $j$  个目标视为同一恒星加入  $StarBlob$ 
8:     end if
9:   end for
10: end for

```

---

天球经线在高赤纬区域具有较高密度,随着惯性坐标系中赤纬值的增加,视场中每单位像素所对应的赤经差值逐渐扩大。因此,  $dThreshold$  的设定需结合目标在天球中的纬度信息,即:

$$dThreshold = dThreshInit / \cos(\delta), \quad (17)$$

其中  $dThreshInit$  表示阈值初始值。该算法能辨识出每颗恒星在相邻帧中对应的目标点,将辨识得到的恒星数据集  $StarBlob$  从原有集合中剔除实现恒星抑制。

## 4 惯性坐标系时域相对不变性验证

静态系统误差是由地基望远镜在观测过程中的指向偏差引起的,导致图像中的恒星和中高轨目标在地平坐标系下的方位角和俯仰角与真实值存在偏差。因此,根据 3.1 计算得出的结果会有不可忽视的绝对误差。然而,相邻图像帧的恒星惯性坐标计算值的时域相对差异较小,满足恒星辨识需求,具有时域相对不变性。

设测站地理位置为经度  $125^{\circ}23'13.2''$ 、纬度  $43^{\circ}51'0.72''$ ,曝光中心时刻为北京时间 2023 年 3 月 16 日 13 时 39 分 0 秒,环境信息为温度  $10^{\circ}\text{C}$ 、气压  $102\text{ kPa}$ 。依据 3.1 计算流程,确定地平坐标系中天球地平以上不同方位角  $A_z$  和俯仰角  $h$  位置处的恒星在惯性坐标系下的赤经  $\alpha$  与赤纬  $\delta$ 。

对固定的方位角  $A_z$  及俯仰角  $h$ ,分别在静态系统误差为  $2'', 5'', 10''$  的条件下,保持时空和测站环境信息不变。根据相同的计算过程,得到此时对应方位角  $A_z'$ 、俯仰角  $h'$  位置处的恒星在惯性坐标系下的赤经  $\alpha'$  及赤纬  $\delta'$ ,与理论真值  $\alpha, \delta$  之差即为绝对误差。结果如图 9 和表 1 所示。

相邻两帧图像的时间间隔为  $10\text{ s}$  时,计算下一曝光中心时刻地平坐标系下相同位置处的恒星在惯性坐标系下的赤经  $\alpha''$  及赤纬  $\delta''$ ,与  $\alpha'$  及  $\delta'$  之差即为相对差异,结果如图 10 和表 2 所示。

分析结果显示,恒星在惯性坐标系下的赤经、赤纬绝对误差与静态系统误差呈正相关。尽管绝对误差的平均值稳定在个位量级,其标准差却相对较大。在各个方位角和俯仰角的组合条件下,绝对误差的波动范围较广,最大误差值甚至高达数百角秒。因此,静态系统误差对计算结果的影响显著,不可忽视。而恒星在惯性坐标系下赤经、赤纬的相对差异均值稳定在  $10^{-3''}$  数量级,标准差稳定在  $10^{-5''}$  数量级,最大值仅为  $0.5''$ ,连续两帧图像中,同一恒星在惯性坐标系下的位置信息相对差异很小。这一结果验证了惯性坐标系具有良好的时域相对不变性,满足恒星辨识需求,同时证明了本研究所提恒星辨识与抑制方法的可行性。

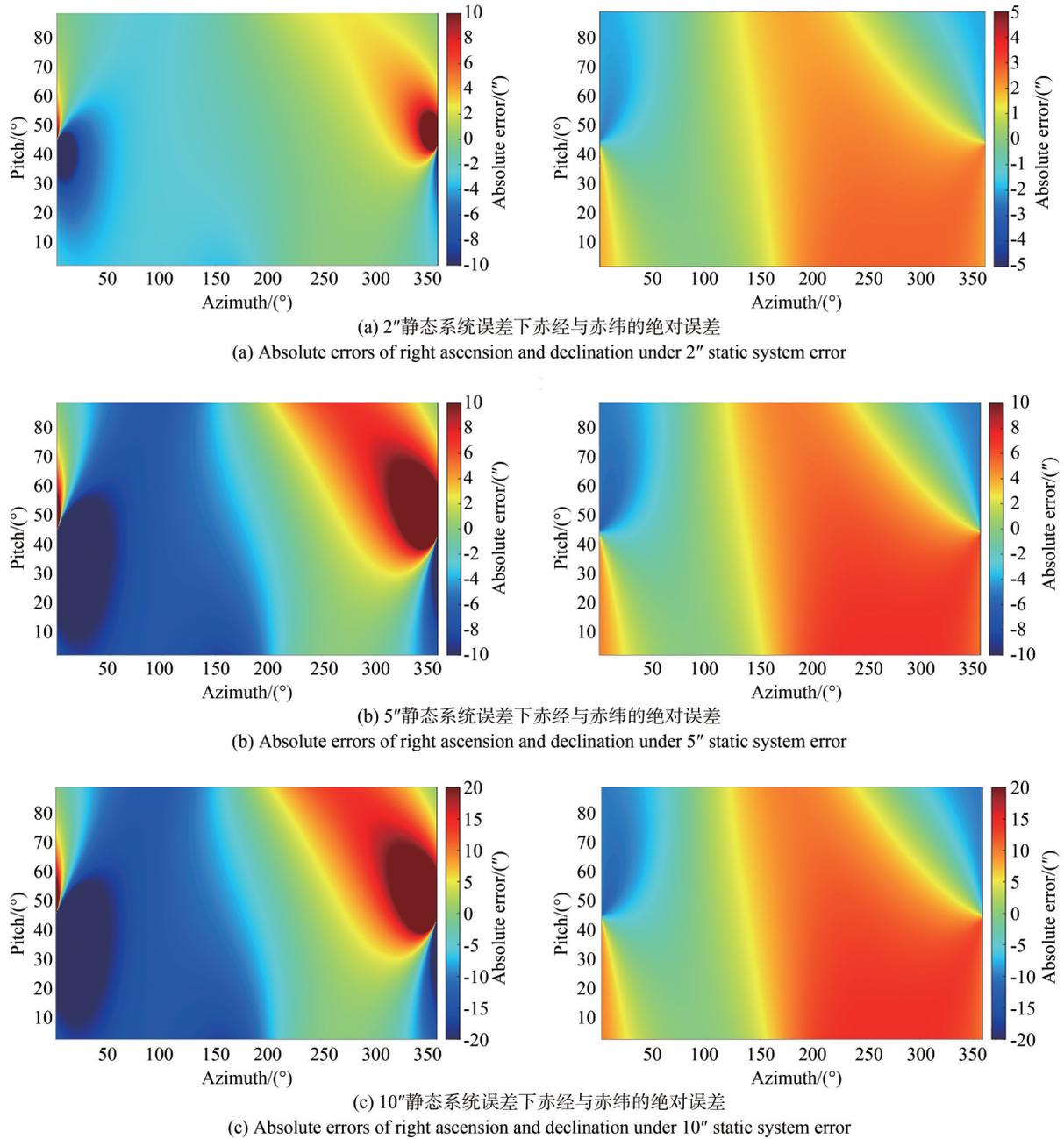


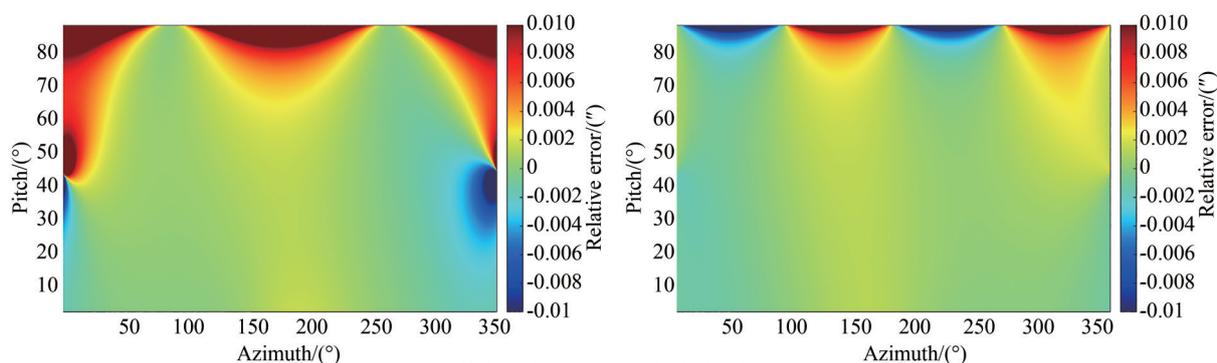
图9 静态系统误差为 2'', 5'', 10'' 条件下的赤经及赤纬的绝对误差

Fig. 9 Absolute errors of right ascension and declination under condition of static system errors of 2'', 5'' and 10'', respectively

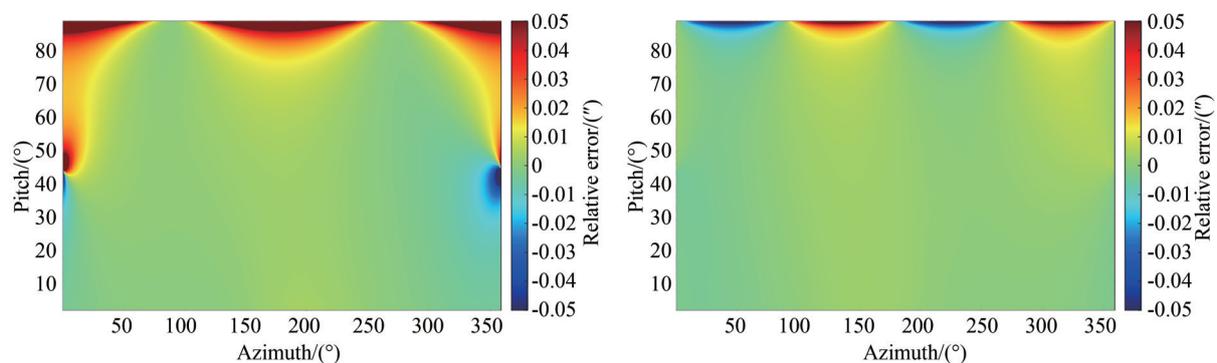
表 1 静态系统误差为 2'', 5'', 10'' 条件下的赤经及赤纬的绝对误差

Tab. 1 Absolute errors of right ascension and declination under condition of static system error of 2'', 5'' and 10'' (")

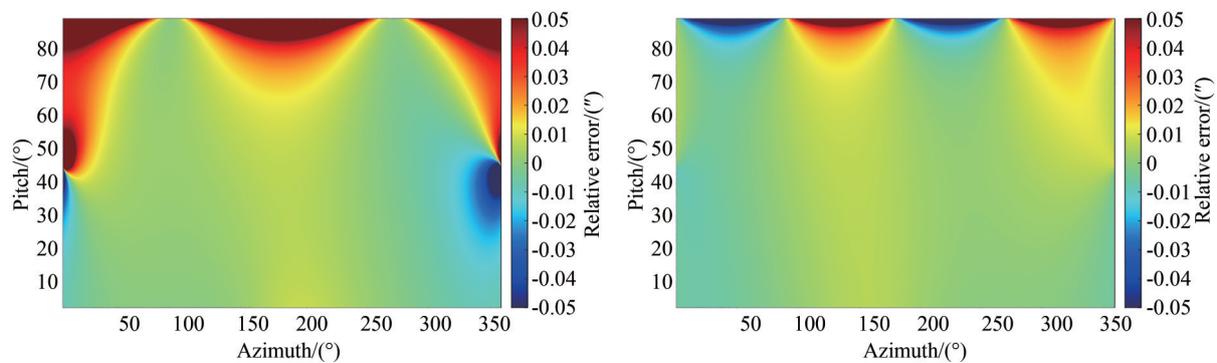
位置	指向偏差	均值	标准差	最小值	最大值
赤经	2	-0.972 8	14.008 9	-130.457 8	179.917 1
	5	-2.432 0	87.556 1	-325.813 4	437.544 3
	10	-4.863 9	350.229 6	-650.525 5	875.926 5
赤纬	2	0.979 0	2.015 9	-2.446 0	2.828 2
	5	2.447 4	12.597 8	-6.114 9	7.070 5
	10	4.894 7	50.391 5	-12.229 9	14.141 1



(a) 2''静态系统误差下赤经与赤纬的相对误差  
(a) Relative errors of right ascension and declination under 2'' static system error



(b) 5''静态系统误差下赤经与赤纬的相对误差  
(b) Relative errors of right ascension and declination under 5'' static system error



(c) 10''静态系统误差下赤经与赤纬的相对误差  
(c) Relative errors of right ascension and declination under 10'' static system error

图 10 不同静态系统误差在时间间隔为 10 s 条件下的赤经及赤纬的相对差异

Fig. 10 Relative differences of right ascension and declination under different static system errors with time interval of 10 s

表 2 10 s 时间间隔条件下赤经及赤纬的相对差异

Tab. 2 Relative differences of right ascension and declination under time interval of 10 seconds (")

位置	指向偏差	均值	标准差	最小值	最大值
赤经	2	0.002 0	$4.927 4 \times 10^{-5}$	-0.091 6	0.102 6
	5	0.005 0	$3.079 6 \times 10^{-4}$	-0.229 2	0.256 5
	10	0.010 0	00.12	-0.459 2	0.512 9
赤纬	2	$5.857 5 \times 10^{-4}$	$8.874 5 \times 10^{-6}$	-0.029 8	0.031 2
	5	0.001 5	$5.546 6 \times 10^{-5}$	-0.074 4	0.078 1
	10	0.002 9	$2.218 6 \times 10^{-4}$	-0.148 8	0.156 1

## 5 实验与结果分析

### 5.1 实验平台

实验平台硬件配置为 Intel Xeon E5-2699 v4 处理器、RTX2080Ti 显卡及 Teledyne Dalsa 公司生产的 Xtium-CL MX4 图像采集卡。在 Linux Ubuntu 16.04 操作系统上基于 Qt 5.12.9 开发框架自研了上位机应用程序,为提高算法的运行效率,利用 OpenCL 与 OpenMP 并行计算框架实现 GPU 与 CPU 双端加速,用户界面(UI)设计简洁易用,数据处理显示面板如图 11 所示。

### 5.2 仿真分析

针对不同星场密度下的连续图像序列,分别采用灰度投影法、傅里叶-梅林法、速度众数法、基于天文定位的惯性坐标关联法及本文所提方法对恒星进行辨识,处理结果如表 3 所示。

由仿真分析结果可知,在星场密度稀疏场景下,仅本文所提方法能有效辨识恒星。在密集星场下,灰度投影法与傅里叶-梅林法失效,基于天文定位的惯性坐标关联法的辨识时间相对较长,而本文所提方法不仅能成功辨识恒星,而且耗时相对较短,实时性能更优。

### 5.3 外场验证

本研究依托某大视场望远镜,视场为  $2.5^\circ \times$



图 11 数据处理软件显示面板

Fig. 11 Display panel of data processing software

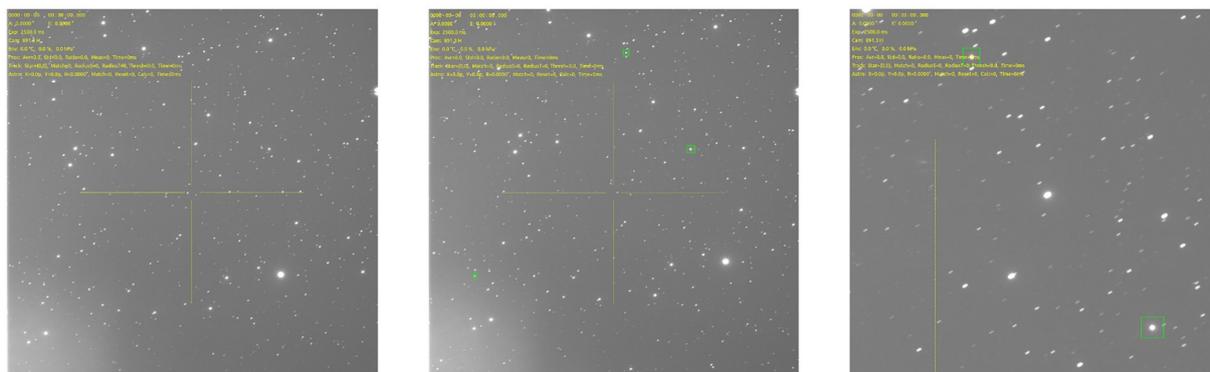
$2.5^\circ$ ,面阵为  $6144 \times 6144$ ,极限探测能力为 17 星等。观测夜气象环境良好,在凝视搜索模式下对指定天区进行观测,实验数据采用拍摄所得的连续图像序列。

为验证本文所提恒星辨识与抑制方法能适应大范围星场密度变化,对星场密度适中、密集、或遭遇云雾遮挡而恒星数量较少 3 种情景下的实测图像各进行 100 圈次验证。结果如图 12 所示,均未发生恒星虚警及中高轨目标检测缺失的现象,证明本方法具有良好的准确性与稳定性。

表 3 各恒星辨识方法在不同星场密度下的处理结果

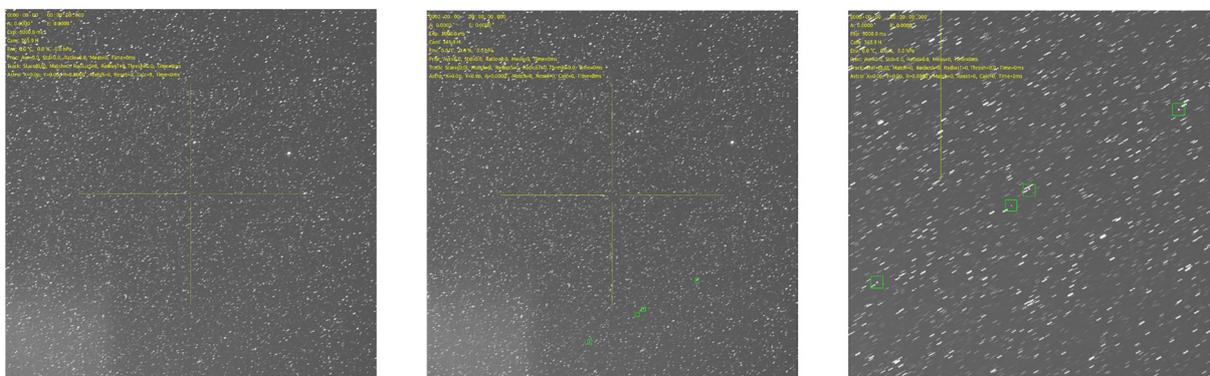
Tab. 3 Processing results of different stellar identification methods under different star field densities

星场密度	辨识成功					辨识时间/ms				
	灰度投影法	傅里叶-梅林	速度众数法	天文定位法	本文方法	灰度投影法	傅里叶-梅林	速度众数法	天文、定位法	本文方法
10	否	否	否	否	是	—	—	—	—	1
100	是	是	是	是	是	23	524	15	216	12
500	是	是	是	是	是	36	865	42	258	36
1 000	否	否	是	是	是	—	—	76	328	45
5 000	否	否	是	是	是	—	—	114	426	93



(a) 星场密度适中的原图及验证结果 (第三张为局部放大图)

(a) Original image and validation results under moderate star field density (The third image shows a magnified view of a specific area)



(b) 密集星场的原图及验证结果 (第三张为局部放大图)

(b) Original image and validation results under dense star field density (The third image shows a magnified view of a specific area)



(c) 云雾遮挡条件下恒星稀疏的原图及验证结果 (第三张为局部放大图)

(c) Original image and verification results of sparse stars under cloud occlusion condition (The third image shows a magnified view of a specific area)

图 12 星场密度适中、密集、云雾遮挡恒星稀疏 3 种情景下的实测图像及本文方法验证结果

Fig. 12 Measured images and validation results of proposed method under moderate star field density, dense star field density, and sparse star field density due to cloud or fog obstruction

### 6 结 论

本文提出的基于惯性坐标时域相对不变性

的恒星辨识与抑制方法简洁高效,易于工程实现,在确保实时性的前提下具有较强的外场适应能力。首先,基于理论推导的地平坐标系与惯性

坐标间的数学转换关系计算恒星在图像中的惯性坐标,该方法根本性地解决了在星场密度稀疏、密集或遭遇云雾遮挡等情况下恒星速度辨识

失效,导致恒星抑制效果不理想的问题。实验结果表明,与传统方法相比,该方法在恒星辨识与抑制上具有更高的稳定性和准确性。

#### 参考文献:

- [1] 杨育彬,林琤. 利用天文观测图像对空间碎片目标进行自动识别与追踪[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(2): 209-214.  
YANG Y B, LIN H. Automatic identification and tracking of space debris targets using astronomical observation images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2): 209-214. (in Chinese)
- [2] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.  
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [3] 韩璐瑶,谭焯,刘云猛,等. 在轨实时空间目标检测算法研究[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(6): 122-131.  
HAN L Y, TAN CH, LIU Y M, *et al.* Research on the on-orbit real-time space target detection algorithm[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(6): 122-131. (in Chinese)
- [4] 韩金辉,魏艳涛,彭真明,等. 红外弱小目标检测方法综述[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 3788/IRLA20210393.  
HAN J H, WEI Y T, PENG ZH M, *et al.* Infrared dim and small target detection: a review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 3788/IRLA20210393. (in Chinese)
- [5] 穆靖,李伟华,饶俊民,等. 采用三层模板局部差异度量的红外弱小目标检测[J]. 光学精密工程, 2022, 30(7): 869-882.  
MU J, LI W H, RAO J M, *et al.* Infrared small target detection using tri-layer template local difference measure[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(7): 869-882. (in Chinese)
- [6] 鄂薇,王大轶,邹元杰,等. 复杂空间背景下暗弱目标的快速识别方法[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2022, 52(1): 23-29.  
E W, WANG D Y, ZOU Y J, *et al.* Fast recognition method of dim and weak targets in complex spatial background[J]. *Scientia Sinica (Physica, Me-*
- chanica & Astronomica)*, 2022, 52(1): 23-29. (in Chinese)
- [7] 修建娟,张敬艳,董凯. 基于动力学模型约束的空间目标精确跟踪算法研究[J]. 电子学报, 2021, 49(4): 781-787.  
XIU J J, ZHANG J Y, DONG K. Precise tracking algorithm of space target based on dynamic model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(4): 781-787. (in Chinese)
- [8] 曹城华,武文波,王钰. 基于Radon变换的空间目标运动方向检测[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1678-1685.  
CAO CH H, WU W B, WANG Y. Motion direction detection of space target based on Radon transformation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(7): 1678-1685. (in Chinese)
- [9] 张春华,陈标,周晓东. 运动背景星空图像中小目标的运动轨迹提取算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 524-530.  
ZHANG CH H, CHEN B, ZHOU X. Small target trace acquisition algorithm for sequence star images with moving background[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 524-530. (in Chinese)
- [10] 张波. 绘制银河[J]. 科学世界, 2021(3): 98-109.  
ZHANG B. Drawing the Milky Way [J]. *Newton*, 2021(3): 98-109. (in Chinese)
- [11] 王海群,赵燕青,王一. 基于明亮区域分割的图像去雾算法[J]. 液晶与显示, 2023, 38(5): 636-643.  
WANG H Q, ZHAO Y Q, WANG Y. Image de-fogging method based on bright region segmentation[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(5): 636-643. (in Chinese)
- [12] 柳庆武,胡晓惠,袁麟. 深空可见光图像中弱小运动目标实时检测[J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1614-1617.  
LIU Q W, HU X H, YUAN L. Real time detection for dim moving target in visible optical image of deep outer space[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(7): 1614-1617. (in Chinese)
- [13] 黄宗福,王卫华,韩建涛,等. 一种天文光电图像

- 序列弱小目标实时检测算法[J]. 信号处理, 2010, 26(9):1379-1384.
- HUANG Z F, WANG W H, HAN J T, *et al.* A real-time algorithm for weak small targets detection in astronomical opto-electronic image sequences [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(9):1379-1384. (in Chinese)
- [14] 罗浩, 毛银盾, 于涌, 等. 利用超大视场光电望远镜观测 GEO 中的目标识别方法[J]. 光电工程, 2017, 44(4):418-426, 465.
- LUO H, MAO Y D, YU Y, *et al.* A method of GEO targets recognition in wide-field opto-electronic telescope observation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(4):418-426, 465. (in Chinese)
- [15] 孙辉. 快速灰度投影算法及其在电子稳像中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 412-416.
- SUN H. Fast gray projection algorithm and its application to electronic image stabilization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 412-416. (in Chinese)
- [16] 戴宪策, 谢奇. 基于傅里叶-梅林变换的图像匹配方法研究[J]. 红外技术, 2016, 38(10):860-863.
- DAI X C, XIE Q. Research on image matching algorithm based on Fourier-mellin transform[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(10): 860-863. (in Chinese)
- [17] 李振伟, 张涛, 孙明国. 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):589-599.
- LI ZH W, ZHANG T, SUN M G. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):589-599. (in Chinese)
- [18] 刘德龙, 杨文波, 柳鸣, 等. 精密跟踪型望远镜适配的快速星图匹配[J]. 光学精密工程, 2022, 30(22):2952-2961.
- LIU D L, YANG W B, LIU M, *et al.* Rapid star pattern matching for precisely tracking telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(22): 2952-2961. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨禹凯(1998—),男,湖北荆州人,硕士研究生,2020年于天津大学获得学士学位,主要从事天文图像数据处理方面的研究。E-mail: yangyukai21@mails.ucas.ac.cn

#### 通讯作者:



刘俊池(1988—),男,吉林省吉林市人,博士,副研究员,2011年于吉林大学获得学士学位,2016年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间目标探测与图像处理技术的研究。E-mail: liujunchi703@163.com