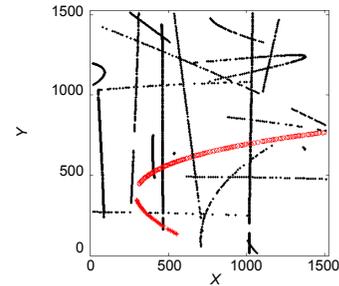




利用超大视场光电望远镜观测 GEO 中的目标识别方法

罗浩^{1,2*}, 毛银盾¹, 于涌¹, 唐正宏¹

¹中国科学院上海天文台, 上海 200030; ²中国科学院大学, 北京 100049



摘要: 为开展地球同步轨道(GEO)空间目标监视监测试验, 上海天文台在 2015 年研制了具有超大视场的“地球同步轨道带动态监视光学系统样机”, 样机的有效视场达到 100 平方度。视场内目标数量众多, 如何从复杂的观测图像中有效识别出 GEO 目标是本文研究的重点。GEO 目标相对地面静止, 恒星相对地面以 15 "/s 的速度运动, 提出相邻帧图像差分与航迹关联结合的方法, 通过相邻帧图像差分法去除大部分恒星虚警, 利用航迹关联确认目标, 并将属于同一个目标的观测点位联结。通过对样机实测数据的处理分析, 验证了该方法的可行性和准确性, 平均每个观测夜晚, 可识别视场内超过 50 个 GEO 目标, 识别准确率超过 95%。

关键词: GEO 目标; 超大视场; 目标识别

中图分类号: V557; TP391

文献标志码: A

A method of GEO targets recognition in wide-field opto-electronic telescope observation

Hao Luo^{1,2*}, Yindun Mao¹, Yong Yu¹ and Zhenghong Tang¹

¹Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to carry out the monitoring experiment of Geo-synchronous orbit (GEO) targets, Shanghai Astronomical Observatory developed an equipment with 100-square-degree field of view, called “optical prototype of Geo-synchronous orbit dynamic monitoring system”. There are a large number of targets in the field of view, how to recognize the GEO targets effectively from the complex observation images is the focus of this paper. GEO targets appear motionless, at a fixed position in the sky, to ground observers. Due to the earth rotation, stars move at a speed of 15 "/s relative to the ground observers. We propose the combination of frame difference method and track correlation method. Frame difference method is used to remove a large number of stars from the images, and track correlation method is used to confirm the GEO targets and connect them from different images. The feasibility and accuracy of the method are verified by the analyses of the observation data. The method can recognize more than 50 GEO targets in the field of view at the same time, and the recognition accuracy exceeds 95%.

Keywords: GEO targets; wide field of view; objects recognition

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.006

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(4): 418-426

1 引言

地球同步轨道(Geo-synchronous orbit, GEO)空间

目标距离地球表面约为 36000 km, 现有雷达技术受到高运行成本制约, 很难作为常规监测手段, 地基光学观测成为主要手段^[1-3]。从上世纪 90 年代起, 西方国家依靠强大的技术支撑, 已先后建立较为完善的高轨 GEO 空间目标监视系统。比较典型的有美国地基光电

收稿日期: 2017-01-04; 收到修改稿日期: 2017-02-24

*E-mail: luoh@shao.ac.cn

深空监视系统(ground-based electro-optical deep space surveillance, GEODSS), 主要用以探测深空目标(轨道高度 5600 km ~ 40000 km)^[4]。

为提高观测效能, 上海天文台在 2015 年研制了具有超大视场的“地球同步轨道带动态监视光学系统样机”, 样机由 4 个口径为 143 mm、焦距为 400 mm 的望远镜单元组成, 每个单元的视场约为 25 平方度, 整个样机的有效视场达到 100 平方度。根据在丽江高美古观测站的试验观测结果, 该系统样机可以显著提高 GEO 目标的观测效能, 能够同时对 27 颗 GEO 目标进行连续监测, GEO 目标的天文定位精度在方位上约为 4", 在俯仰上约为 1"^[5]。

由于样机设备的观测视场大, 并且需要通过增加曝光时间提高对暗弱目标的探测能力, 因此在观测到 GEO 目标的同时, 也会引入大量拖长恒星星象的干扰。平均每幅观测图像有超过 2000 颗恒星星象。如何从众多星象中筛选出 GEO 目标是资料处理的关键问题之一。大部分 GEO 目标并非严格静止不动, 存在多种原因导致的运动。既有由于轨道运动引起的南北方向的周期摆动和东西方向的漂移, 也有比较频繁的轨道机动^[6]。在实测资料处理的过程中发现部分目标轨迹会出现重合和交叉的现象。另外, 观测期间由于天气和设备故障的原因, 有时会出现有效观测数据中断的现象, 如何实现每个 GEO 目标的整晚观测点位的准确关联, 从而进行后续的天文定位和轨道计算, 是资料处理的另一项关键问题。

目前针对光学图像中 GEO 目标的识别方法有: 连续帧图像比较法、形态识别法、数学形态学方法^[7-10]等。还未有针对超大视场光学设备、超多数量“同屏多目标”识别的研究, 本文针对上述两个关键问题, 提出了相邻帧图像差分与航迹关联结合的方法。结合样机的实际特性和实测资料, 开展了 GEO 目标识别试验, 试验结果验证了该方法的有效性。本文第二节介绍观测设备主要参数和观测数据情况, 第三节为数据处理方法, 第四节为 GEO 目标识别的准确性评估, 最后为结束语。

2 观测设备与数据

系统样机由 4 个尼康定焦镜头组成, 分别安装在 4 个赤道仪上, 如图 1 所示。镜头口径为 143 mm, 焦距约为 400 mm, 分别配备 1 台科学级 CCD 相机, 像素阵列为 3056 pixels × 3056 pixels, 采用 Binning2 模式

时像素尺寸为 24 μm, 单个像素对应的空间张角约为 12"。单个望远镜单元的视场约为 5° × 5°, 样机总视场为 100 平方度。



图 1 样机实物图。

Fig. 1 Photo of the prototype.

由于 GEO 目标相对于台站几乎不动或运动缓慢, 因此在望远镜指向固定的情况下, 采用凝视观测模式。露光时间设置为 6 s~10 s, 视场内的 GEO 目标星象基本呈圆形, 恒星星象拖长约 10 pixels, 如图 2 所示。

利用拖长的恒星星象作为参考星, 对 GEO 目标实施天文定位。经过两个月的持续观测, 排除天气因素, 共得到 35 天的有效观测数据。

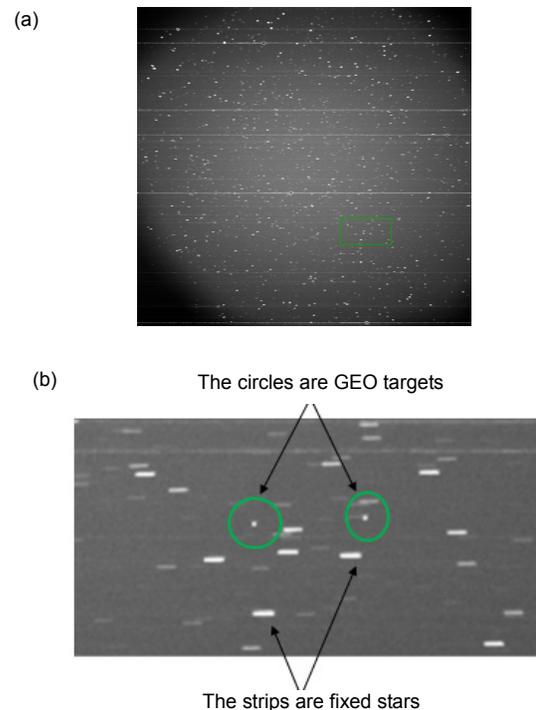


图 2 (a) 观测图像示例. (b) 图局部放大, 其中拖长星象为恒星, 圆形为 GEO 目标。

Fig. 2 (a) Example of observation image. (b) Partial enlarged view, the long figures are fixed stars, and the circular figures are GEO targets.

3 数据处理方法

为了减少数据处理时间,目前对4个观测单元的图像采用并行独立处理的方案。GEO目标识别的过程分为三步:

- 1) 对观测图像作预处理,抑制天光背景的不均匀性和亮星拖尾,识别观测图像中的所有星象;
- 2) 利用相邻帧图像差分法,剔除观测图像中大部分恒星星象以减少误识别机率和计算量,筛选出疑似GEO的目标星象;
- 3) 利用航迹关联法,进一步确认GEO目标星象,同时,将归属于同一个GEO目标的观测点位联结起来,以执行后续的天文定位和轨道计算。

3.1 观测图像预处理

在月光、薄云和天空背景光等不良条件影响下,天空背景的不均匀性在大视场望远镜中显得尤为突出。传统的平场改正做法并不能完全消除观测图像的背景不均匀性,这非常不利于后续的星象检测。图像背景的不均匀主要占据了整个场景图像的低频空间,根据这一特点,通过中值滤波法将观测图像中的高频噪声(星象)过滤,仅保留低频信号。将原始图像除以低频信号,达到抑制背景不均匀的目的。

假设待处理图像为 m pixels \times n pixels 大小,用 x 和 y 两个变量分别来表示某个像元在整幅图中所处的行、列值, $I(x, y)$ 表示读取 CCD 图像时,每个像元的强度值矩阵(实际大小为 $m \times n$)。设置长度为奇数 L 的长窗口, $L=2K+1$, K 为正整数, K 需大于所有星象的直径以保证在滤波后的图像中没有未被滤掉的星象存在。观测图像中恒星在 x 方向拖长,因此选择 y 方向逐列进行滤波计算,每个像元在滤波后的值用 $I'(x, y)$ 表示:

$$I'(x, y) = \text{med}(I(x, y - K), \dots, I(x, y), \dots, I(x, y + K)) \quad (1)$$

其中: $x \in (1, m)$, $y \in (K, n - K)$ 。

$I'(x, y)$ 即为观测图像中的低频信号,将原始图像 $I(x, y)$ 除以 $I'(x, y)$ 即可抑制其背景不均匀性。

CCD 相机在曝光之前需要进行电荷清零,曝光之后需要进行电荷读出。由于 CCD 相机没有配备快门,在图像清零和读出过程中,亮星仍会在 CCD 敏感区产生较多的电荷,从而造成观测图像中的亮星拖尾,干扰了后续的星象检测。为了去除亮星拖尾的影响,我们计算了每行像素的灰度值均值 $H(i)$ 和均方差 $\sigma_{I(i)}$,

所有的 $H(i)$ 构成一个序列,计算该序列的均值 H_{mean} 和均方差 σ_H :

$$H(i) = \frac{\sum_{x=1}^m I(x, i)}{m}, \quad (2)$$

$$\sigma_{I(i)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (I(x, i) - H(i))^2}{m}}, \quad (3)$$

$$H_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n H(i)}{n}, \quad (4)$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H(i) - H_{\text{mean}})^2}{n}}, \quad (5)$$

将 $H(i)$ 亮于阈值(取 $H_{\text{mean}} + 3\sigma_H$)的“行”判断为亮星拖尾所在行,即式(6)中 $G(i)$ 。进一步地,将 $G(i)$ 中亮于阈值(取 $H(i) + 3\sigma_{I(i)}$)的像素,保留原有灰度值,即保留星象;对于小于阈值的像素,赋值为整幅图像的背景均值,达到去除亮星拖尾的目的,式(6)中的 $H'(i)$ 为去除拖尾后的图像。

$$H'(i) = \begin{cases} H(i), & H(i) \leq H_{\text{mean}} + 3\sigma_H \\ G(i), & H(i) > H_{\text{mean}} + 3\sigma_H \end{cases}, \quad (6)$$

$$G(i) = \begin{cases} I(x, i), & I(x, i) > H(i) + 3\sigma_{I(i)} \\ I_{\text{background}}, & I(x, i) \leq H(i) + 3\sigma_{I(i)} \end{cases}. \quad (7)$$

图 3(a)为原始观测图像示例,图 3(b)为经过处理之后的图像。可见,观测图像中背景的不均匀性和亮星拖尾得到有效抑制,星象的信噪比显著提高。

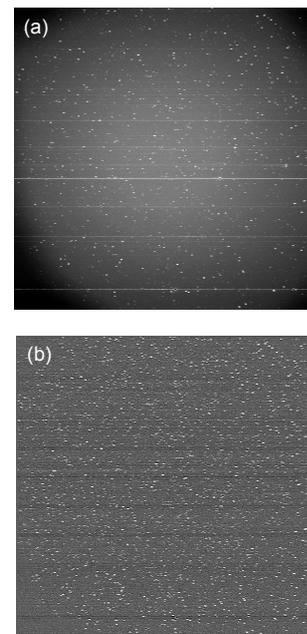


图 3 原始观测图像(a)和经过处理之后的图像(b).

Fig. 3 Observation images before (a) and after (b) the pretreatment.

然后, 利用连通域法^[11]识别观测图像中的所有星象, 得到星象的量度坐标 (X, Y) 、长度、宽度、灰度值和信噪比。判断星象数量, 如小于设定阈值, 则认为该帧观测图像无效(可能被云或雾污染), 不参与后续计算。

3.2 相邻帧图像差分

赤道带恒星相对地面观测者的运动速度约为 $15''/s$, 在连续帧观测图像上, 拖长恒星星象表现为匀速直线运动, 速度约为 $v=1.25$ pixel/s。为方便处理观测数据, 安装望远镜及相机时, 已将相机调整至合适位置, 使恒星的运动方向平行于 X 轴。根据恒星的匀速运动特征, 利用相邻帧图像差分法可以去除观测图像上的恒星背景, 从而筛选出疑似的 GEO 目标, 步骤如下:

1) 对于第 i 帧观测图像, 选择相邻的第 $i-1$ 帧观测图像, 根据两帧图像的观测时刻间隔 $t_i - t_{i-1}$, 计算恒星星象的位移量 dx , 即 $dx = v(t_i - t_{i-1})$;

2) 将第 $i-1$ 帧图像上所有星象位置在 x 方向平移 dx 得到 $\{(X, Y)'_{(i-1,k)} | k=1 \sim N_{i-1}\}$, 与第 i 帧图像中的星象 $\{(X, Y)_{(i,j)} | j=1 \sim N_i\}$ 经行匹配, 计算匹配系数 $D(j)$:

$$D(j) = \begin{cases} 1, & \text{if } |(X, Y)_{(i,j)} - (X, Y)_{(i-1,k)}| < T \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (8)$$

其中 T 为匹配阈值, 与观测精度有关, 一般取 $T=1$ 个像素。恒星星象的匹配系数一般为1, 由于 GEO 目标短时间内几乎静止不动, 经过平移之后, 第 $i-1$ 和第 i 帧图像中的 GEO 目标星象位置会错开, 因此匹配系数为0;

3) 以同样的方式操作第 i 帧图像和第 $i+1$ 帧图像, 挑选出疑似 GEO 目标星象;

4) 对于第 i 帧图像中的某颗星象, 在第2)步和第3)步中均被认为是疑似 GEO 目标的, 参加后续的航迹关联计算。

相邻帧图像差分过程如图4所示, 中间沿水平方向的图像依次为连续拍摄的3幅观测图像, 编号1~9的星象为自西向东依次分布在天空中的恒星, 编号A、B的星象为 GEO 目标。1号星象为最靠西的恒星星象, 因恒星相对地面观测者自东向西运动, 1号星象最先离开视场。将第 $i-1$ 帧图像整体向左平移 $dx_1 = v(t_i - t_{i-1})$ 并与第 i 帧图像匹配, 可以看到, 第 i 帧图像中2~7号星匹配成功, 因此作为恒星被剔除, A、B和8号星因作为疑似目标保留。对于这两次的匹

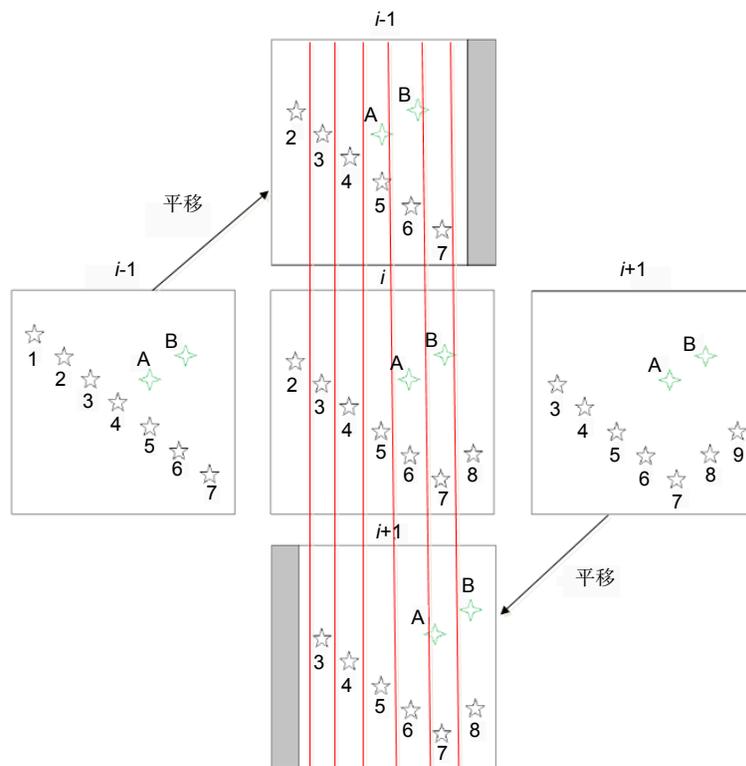


图4 相邻帧图像差分法示意图。

Fig. 4 Sketch map of frame difference method.

配, A、B星两次均被认为是疑似的 GEO 目标, 因此被筛选出来参与后续的航迹关联计算。当然, 实际观测图像的处理情况并非如此理想, 分析下来, 有两类疑似 GEO 目标星象参与后面的航迹关联计算; 1) 误检测出的恒星星象; 2) 真实的 GEO 目标星象。

图 5 为观测图像计算示例。图 5(a)为原始观测图像, 为方便查看已将图像二值化; 图 5(b)为经过相邻帧图像差分法处理后的图像, 从图中可以看出, 相邻帧图像差分法可以去除大部分恒星星象, 但仍存在部分虚警。图 5(b)的局部放大图中上面 4 个星象为 GEO 目标星象, 左下星象为虚警。将所有观测图像按此方法处理, 得到疑似 GEO 目标, 据统计, 平均每幅观测图像约有 60 个包括真实 GEO 目标在内的疑似目标, 远小于视场内原有的上千颗星象。目标数量的减少显著降低了航迹关联的计算量, 提高了效率, 降低了航

迹关联的错误率。

3.3 航迹关联

航迹关联是多目标跟踪技术中最为重要和困难的问题, 其任务是, 在航迹建立之后, 将新得到的一批疑似目标点与已有的航迹进行关联, 判断每一个观测点的航迹属性, 或是发现并建立新的目标航迹。在多目标航迹关联的过程中, 其实质是通过航迹的维持对多目标实现连续跟踪。

GEO 目标的运动形式多样, 但在整个观测夜晚, 每颗 GEO 目标的视运动轨迹表现为一条连续的曲线。我们分别统计了轨道倾角为 0° 和 15° 的 GEO 目标在一个周期内方位和俯仰方向的加速度, 如图 6(a), 6(b)和图 7(a), 7(b)所示。可见, 前者在方位和俯仰方向的最大加速度不超过 $1.5 \times 10^{-4} \text{''/s}^2$, 后者不超过 $4 \times 10^{-4} \text{''/s}^2$ 。样机采样间隔为 30 s, 即使对于 10 个连续观测点位,

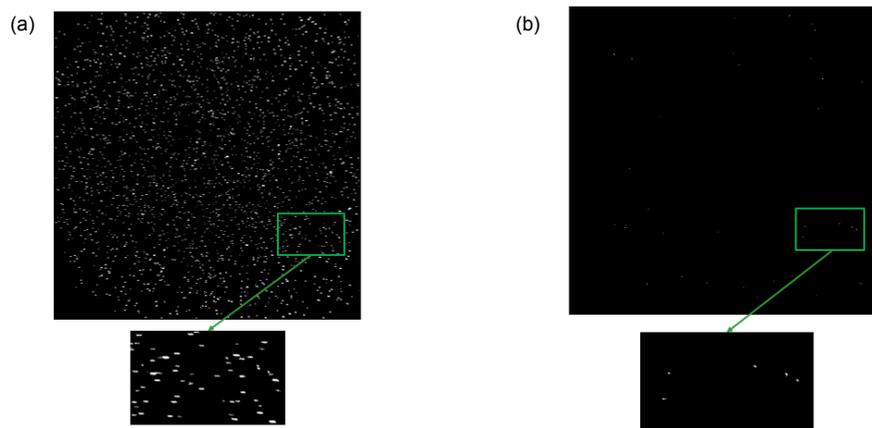


图 5 利用相邻帧图像差分法去除恒星虚警后的观测图像。(a) 原始观测图像(二值化)。(b) 经过相邻帧图像差分法处理后的图像。

Fig. 5 Observation images before and after using frame difference method to remove the stars. (a) Original observation image (binarized). (b) The image processed by the frame difference method.

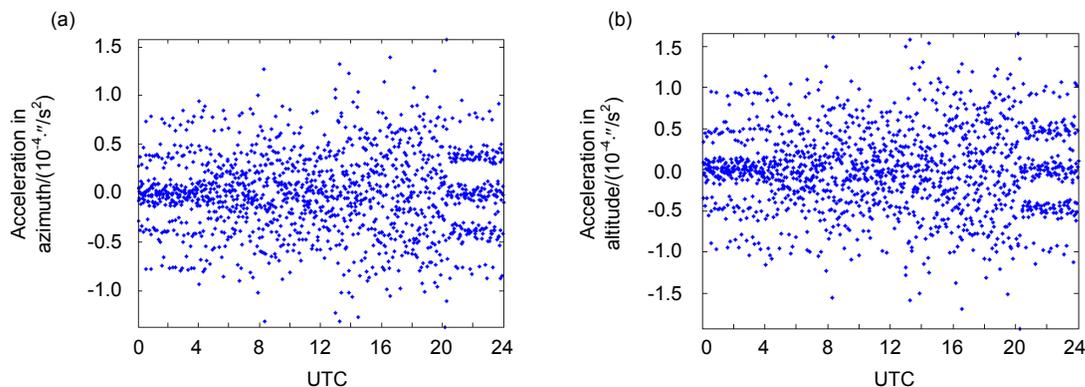


图 6 轨道倾角为 0° 的 GEO 目标的视运动加速度。(a) 在方位方向的视运动加速度。(b) 在俯仰方向的视运动加速度。

Fig. 6 Acceleration of a GEO target with an inclination angle of 0 degree. (a) Acceleration in azimuth. (b) Acceleration in altitude.

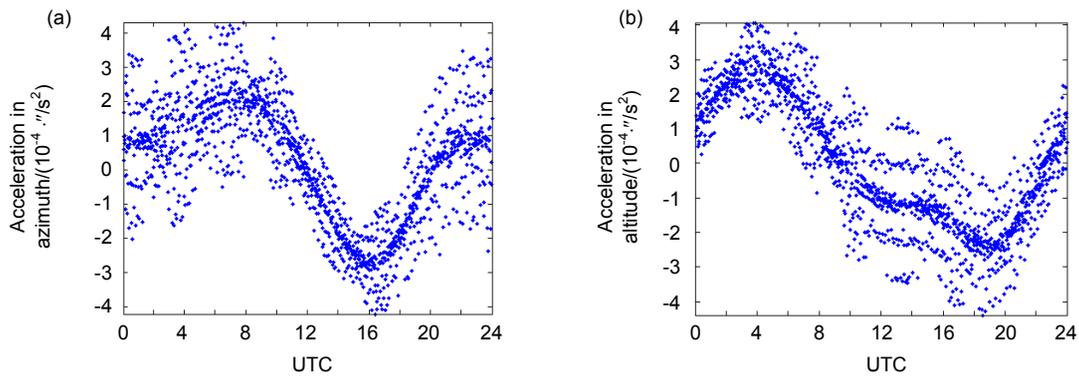


图7 轨道倾角为 15° 的 GEO 目标的视运动加速度. (a) 在方位方向的视运动加速度. (b) 在俯仰方向的视运动加速度.

Fig. 7 Acceleration of a GEO target with an inclination angle of 15 degrees. (a) Acceleration in azimuth. (b) Acceleration in altitude.

这段时间内的 GEO 视速度变化量不超过 $0.12''/s$, 即小于 $0.01 \text{ pixel}/s$, 可近似认为是线性运动。依据该特征, 对于连续观测的图像, 采用线性外推并关联疑似 GEO 目标, 只有能够建立稳定航迹的点才能确认为 GEO 目标。而对于因天气或设备故障造成的观测中断情况, 此时目标轨迹会出现较大空缺, 如果仍采用线性外推, 可能会造成很大的偏差, 甚至干扰其它目标。目前处理策略是, 采用航迹中断之前的若干点位(本文取 10 个点)拟合非线性运动方程, 然后外推至中断结束时刻, 进行外推值与实测点位的关联匹配。通过航迹关联不仅可以进一步去除虚警, 而且还可以将归属于同一个 GEO 目标的观测点位联结起来, 从而执行后续的天文定位和轨道计算。

借鉴多级假设检验思想^[12, 13], 本文采用如下方法进行航迹关联计算, 流程如图 8 所示, 具体步骤描述如下。

3.3.1 数据读取和参数初始化

1) 读取疑似 GEO 目标数据, 主要包括观测时刻 $T(i)$ 和量度坐标 $X(i,j)$ 和 $Y(i,j)$, 其中 i 为图像帧数, j 为该帧图像上的疑似 GEO 目标序号。

2) 定义有关的航迹参数, 说明如下:

ntrack: 当前已建立的航迹数量;

track_id(i, j): GEO 目标点位的航迹归属;

(L_x, L_y), (V_x, V_y): 航迹新进点位的位置和速度;

nmiss: 航迹丢失的点位数, 当航迹恢复时, 该值清零;

attribute: 航迹属性, 规定: 0—航迹正常, 1—航迹建立异常, 2—航迹中断异常, 3—观测中断引起的航迹丢失。

3.3.2 航迹建立

当 i 大于等于 3 时, 判断第 $i-2$ 和 $i-1$ 幅图像的观测时间间隔 $T(i-1)-T(i-2)$ 是否小于设定阈值 (本文取 300 s , 在此时段内认为是 GEO 点位作匀速直线运动); 如小于, 则进一步判断航迹归属参数 track_id 为 0 的点 $\{(X, Y)_{(i-2,*)}\}$ 和 $\{(X, Y)_{(i-1,*)}\}$ 之间的距离是否小于

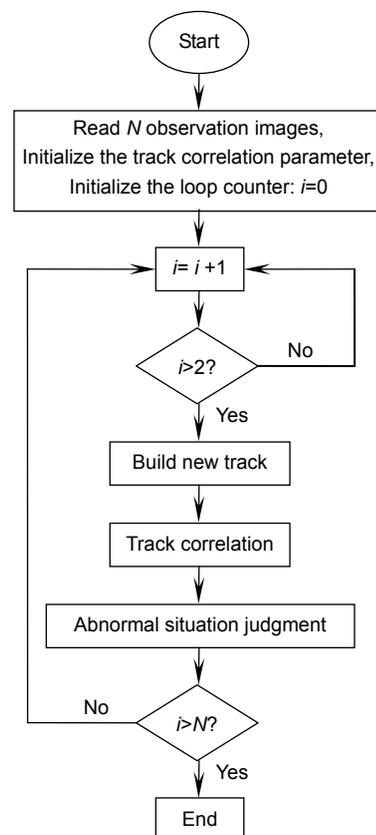


图8 航迹关联算法流程.

Fig. 8 Flow chart track correlation method.

最大运动距离阈值;如小于,则新建一条航迹,标记上述两点的航迹归属参数,记录该航迹最新点位的位置(L_x, L_y)和速度(V_x, V_y)。

3.3.3 航迹匹配

1) 判断第 $i-1$ 幅和第 i 幅图像的观测时间间隔 $T(i)-T(i-1)$ 是否小于设定阈值。如小于,则将当前航迹根据其新进点的位置(L_x, L_y)和速度(V_x, V_y),线性外推至 $T(i)$ 时刻,得到预测点的位置;如观测时间间隔大于设定阈值,则采用当前若干点位拟合非线性多项式进行外推,得到预测点的位置;

2) 将预测点与第 i 帧所有疑似 GEO 目标点进行匹配,对于小于设定阈值的点,赋予相应的航迹归属参数,更新位置和速度参数,若有多个候选目标点小于阈值,则根据最邻近原则选取;否则,认为航迹丢失。当丢失点数大于设定阈值时,则认为航迹中断,此时存在以下两种情况:

(a) 如航迹最后一点在视场边缘处,则认为目标出视场,保留该目标的航迹,标记航迹属性为 0;

(b) 如航迹最后一个点在视场非边缘处,则进一步判断该航迹点数是否大于设定阈值,如大于,则为航迹中断异常;如小于,则认为航迹建立错误,删除航迹。

3.3.4 异常情况判断

1) 航迹建立异常:正常情况下,航迹建立于观测初期(如前 10 幅观测图像)。对于在观测期间建立的航迹,需要判断目标出现的位置,如果出现在视场边缘,则认为是新目标进入;否则,标记为 1 号异常;

2) 航迹中断异常:航迹在非视场边缘处丢失,如 3.3.3 中的 2)下的(b)所述,标记为 2 号异常;

3) 观测中断引起的航迹丢失:当相邻两幅图像的观测时间间隔大于设定阈值时,利用当前该航迹上的若干点拟合非线性多项式(本文取二阶),然后外推至中断结束时刻进行点位匹配,如匹配失败,则标记为 3 号异常。

通过上述航迹关联计算,可以为每个疑似 GEO 目标点位赋予航迹归属参数 $track_id$,具有相同非 0 参数的点位属于同一目标。

以 2016 年 1 月 1 日 2 号单元观测数据为例,整夜共 1245 幅观测图像,通过航迹关联计算共检测出 22 个目标,观测从 13:15:56.913(UTC)中断,中断时长 757.45 s。将该观测夜内该单元识别出的 GEO 目标叠加,如图 9 所示,其中每一条连续点代表一个 GEO 目

标在该观测夜内的运动轨迹。图中红色星号和圆圈应是同一目标的轨迹,但因观测中断无法通过线性或非线性外推进行关联,标记为 3 号异常,交由人工处理。

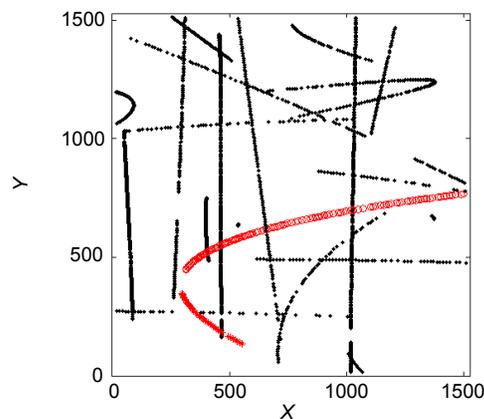


图 9 GEO 目标叠加图。

Fig. 9 GEO target overlay graph.

4 实测数据准确性评估

因观测图像数量多,采集频率较高,且在航迹关联计算时,处理每幅图像之前都会进行航迹新建操作。因此,整个计算过程中基本不存在漏判,只存在多判、误判的情况。为了评估 GEO 目标识别的准确性,我们将每晚识别出的 GEO 目标点位轨迹绘制出来,根据目标连续运动的特征,进行逐一核查。

表 1 列出试验期间所有观测数据的 GEO 目标识别的准确性统计,斜杠前的数字为识别目标数,斜杠后数字为误判目标数。样机的 GEO 目标识别整体准确率超过 95%。

从表 1 可以看出 1、2、3 号单元几乎没有误判,误判主要集中在 GEO 目标最多的 4 号单元。对于轨道倾角较大的 GEO 目标,运动速度相对较快,运动特征明显,在航迹关联计算中基本没有误判。对于轨道倾角较小的 GEO 目标,由于其几乎静止不动,运动特征不明显,如发生航迹交叉则通过星象流量值(Flux)和信噪比(SNR)来区分,当这两项参数区别不明显时,则容易出现误判情况,如图 10 所示。

图 10(a)~10(f)拍摄跨度约为 2 h,该范围内共有 3 颗 GEO 目标,靠下的 2 颗目标在图 10(a)~10(c)幅图像中缓慢靠近,在图 10(d)中星象发生重合,在图 10(e)~10(f)中缓慢分开。目前这些误判还需要辅以人工核查手段,如何更准确、自动化地识别 GEO 目标将是后续工作的重点。

表 1 GEO 目标识别准确性统计.

Table 1 Statistics of GEO target recognition accuracy.

观测日期	1号单元	2号单元	3号单元	4号单元	总数	误判数	误判率/%
2015-12-11	16/0	23/1	17/0	23/1	79	2	2.53
2015-12-12	14/0	19/0	12/0	24/2	69	2	2.90
2015-12-13	11/0	18/0	20/1	33/2	82	3	3.66
2015-12-15	15/0	22/0	16/0	30/0	83	0	0.00
2015-12-16	12/0	16/0	11/0	14/0	53	0	0.00
2015-12-17	12/0	18/0	17/0	19/2	66	2	3.03
2015-12-18	15/0	19/0	18/0	26/2	78	2	2.56
2015-12-19	20/0	24/0	22/0	23/2	89	2	2.25
2015-12-20	14/0	14/0	15/0	20/1	63	1	1.59
2015-12-21	20/0	25/0	19/0	35/5	99	5	5.05
2015-12-22	15/0	21/0	13/0	23/2	72	2	2.78
2015-12-23	22/0	22/0	20/0	27/2	91	2	2.20
2015-12-24	16/0	20/0	16/0	29/2	81	2	2.47
2015-12-25	7/0	9/0	7/0	13/0	36	0	0.00
2015-12-26	13/0	16/0	15/0	24/0	68	0	0.00
2015-12-27	15/0	16/0	12/0	26/0	69	0	0.00
2015-12-31	12/0	12/0	9/0	18/0	51	0	0.00
2016-01-01	25/1	18/0	18/0	29/4	90	4	4.44
2016-01-02	18/0	17/0	18/0	32/2	85	2	2.35
2016-01-03	17/0	24/0	19/0	31/0	91	0	0.00
2016-01-04	19/0	21/2	23/0	34/3	97	5	5.15
2016-01-05	17/0	15/0	18/0	26/3	76	3	3.95
2016-01-06	18/0	16/0	14/0	23/4	71	4	5.63
2016-01-07	15/0	13/0	13/0	23/4	64	4	6.25
2016-01-08	18/0	13/0	17/0	28/3	76	3	3.95
2016-01-09	10/0	10/0	3/0	13/1	36	1	2.78
2016-01-10	21/0	19/0	23/0	30/3	93	3	3.23
2016-01-11	20/0	18/0	20/0	28/4	86	4	4.65
2016-01-12	19/0	16/0	13/0	25/3	73	3	4.11
2016-01-13	17/0	14/0	19/0	26/5	76	5	6.58
2016-01-14	19/0	19/0	17/0	25/4	80	4	5.00
2016-01-15	18/0	17/0	14/0	32/6	81	6	7.41
2016-01-16	18/0	15/0	21/0	19/0	73	0	0.00
2016-01-17	28/0	20/0	21/0	32/0	101	0	0.00
2016-01-18	19/0	14/0	10/0	23/1	66	1	1.52

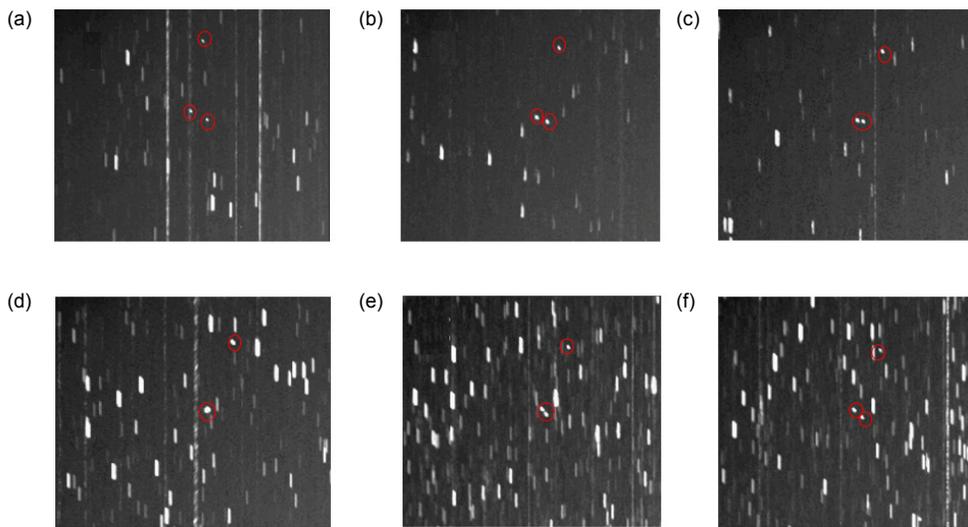


图 10 轨迹缓慢交叉目标示意图.

Fig. 10 Sketch map of the targets with slow track intersection.

5 结束语

为提高地球同步轨道带目标的监视效能,上海天文台在 2015 年研制了一套具有超大视场的光学系统样机。本文基于该光学系统样机在丽江高美古观测站所采集到的 35 天的观测数据,利用相邻帧图像差分与航迹关联结合的方法,开展了 GEO 目标识别试验,初步实现了大视场光电望远镜中的 GEO 目标自动识别。根据实测数据的结果统计,GEO 目标识别的整体准确率超过 95%,误判主要发生在运动速度慢(航迹特性弱)、视亮度接近、航迹交叉的目标上,如何解决该问题将是后续工作的重点。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(11573055)。

参考文献

- 1 Wu Lianda. Track and detection of satellites and space debris[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2012: 264.
吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨道和探测[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012: 264.
- 2 Molotov I, Agapov V, Titenko V, et al. International scientific optical network for space debris research[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(7): 1022–1028.
- 3 Li Dongyuan. The foreign ground-based electro-optic detecting system to the space targets[J]. *Electro-Optic Warfare & Radar Passive Countermeasures*, 2003(1): 9–11.
李东源. 国外的地基对空间目标光电探测系统浅析[J]. 光电对抗与无源干扰, 2003(1): 9–11.
- 4 Jeas W C, Anctil R. The ground-based electro-optical deep space surveillance /GEODSS/ system[J]. *Military Electronics/Countermeasures*, 1981, **7**: 47–51.
- 5 罗浩, 毛银盾, 于涌, 等. 地球同步轨道带动态监视光学系统样机及试观测结果[J]. *空间科学学报*, 2017, **37**(3). DOI: 10.11728/cjss2017.03.350.
- 6 Wu Gongyou, Wang Jiasong, Liu Fang, et al. Determine GEO satellite statues with long term TLE data[C]// China Satellite Navigation Conference, 2013.
吴功友, 王家松, 刘芳, 等. 利用长期 TLE 数据判定同步轨道卫星状态[C]// 第四届中国卫星导航学术年-S3 精密定轨与精密定位, 2013.
- 7 张晓祥. 空间目标光学观测研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- 8 Sun Rongyu, Zhao Changyin. Optical survey technique for space debris in GEO[J]. *Progress in Astronomy*, 2012, **30**(3): 394–410.
孙荣煜, 赵长印. GEO 空间碎片的光学观测与精密定位[J]. *天文学进展*, 2012, **30**(3): 394–410.
- 9 Huang Zongfu, Sun Gang, Chen Zengping. Stellar targets suppression in image sequences for space targets detection[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, **18**(7): 799–804.
黄宗福, 孙刚, 陈曾平. 空间目标检测序列图像中恒星目标抑制[J]. *中国图象图形学报*, 2013, **18**(7): 799–804.
- 10 Chi Jiannan, Fu Ping, Wang Dongshu, et al. A detection method of infrared image small target based on order morphology transformation and image entropy difference[C]// Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, China, 2005, **8**: 5111–5116.
- 11 Li Yifang, Liu Jinglin. Measurement for area based on connected regions arithmetic[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, **8**(9): 2492–2494.
李仪芳, 刘景琳. 基于连通域算法的区域测量[J]. *科学技术与工程*, 2008, **8**(9): 2492–2494.
- 12 Tzannes A P, Brooks D H. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(2): 570–586.
- 13 Blostein S D, Huang T S. Detecting small, moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, **39**(7): 1611–1629.