

基于图像叠加的 GEO 目标探测方法*

孙荣煜^{1,2,3†} 平一鼎^{1,2} 赵长印^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 为了满足地球同步轨道 (Geosynchronous Orbit, GEO) 空间目标的探测要求, 克服长时间曝光 CCD 像元出现饱和溢出的情况, 提出使用多帧连续曝光图像叠加的方法, 增加图像的存储范围, 同时提升目标的信噪比, 保证系统的探测能力. 实验结果表明, 利用 10 帧连续图像叠加的方法, 可以有效消除像元饱和的情况, 提升目标信噪比约 3.2 倍, 提升探测能力近似 2.5 星等, 且序列图像的底片常数精度可靠, 用底片常数的均值计算目标位置, 精度符合要求. 结果验证了使用图像叠加方法探测 GEO 目标的可行性.

关键词 航天器, 技术: 图像处理

中图分类号: P 123; **文献标识码:** A

1 引言

为了观测暗弱的 GEO 空间目标, 最直接的解决途径是提高望远镜的口径, 但是现有的大口径望远镜一般都有其专门用途, 无法提供足够的观测时间, 而专用于 GEO 空间目标观测的大口径望远镜制造周期长、成本高, 难以在短期内实现广泛布点.

如果使用较小口径的望远镜观测 GEO 目标, 需要足够长的曝光时间^[1]. 但是, 专用的空间目标观测望远镜像元比例尺大, 单位时间 CCD 像元接收的光子数多. 因此, 很短的曝光时间 CCD 就会超出线性范围甚至饱和溢出, 影响图像质量和计算精度. 为了解决这一问题, 本文提出采用短曝光图像叠加的方法^[2], 虽然降低了单帧图像的曝光时间, 但是提高了目标观测的总有效时间. 这样不仅能防止 CCD 过饱和, 又能保证目标的探测效率和精度.

本文首先从原理上分析图像叠加方法对目标信噪比的影响, 然后用一系列不同曝光时间的实测图像进行叠加试验. 通过分析叠加后图像的特性, 验证了使用连续短曝光图像叠加的方法, 不仅可以避免 CCD 像元饱和, 还能保证对目标的探测能力.

2011-10-19 收到原稿, 2011-11-29 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (11033009, 10903030) 资助

† rysun@pmo.ac.cn

2 基本原理

2.1 长曝光原理

天文观测所用的科学级 CCD 拥有大增益和动态范围、量子效率高、噪声低等特点,其主要噪声来源为光子噪声、暗电流噪声和读出噪声 [3]. 定义信噪比 (SNR) 为测量信号与全部测量噪声的比,对于单次长曝光,信噪比模型为 [4]:

$$S/N = \frac{S}{\sqrt{S + N_{\text{sky}} + N_{\text{noise}}^2 + N_{\text{dark}}^2}}, \quad (1)$$

其中 S 为目标源的信号, N_{sky} 为天光背景的计数,两者与曝光时间呈线性增长关系, N_{noise} 为读出噪声, N_{dark} 为暗电流噪声,与曝光时间呈均方根增长关系. 因此,不难发现,信噪比与曝光时间呈均方根关系,随着曝光时间的增加,目标信噪比也随之增加,如图 1 所示.

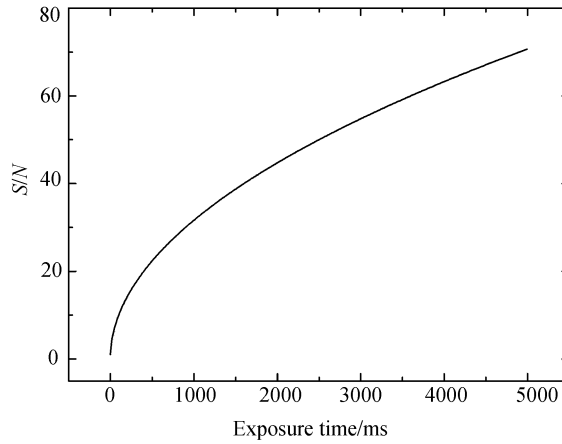


图 1 信噪比与时间的增长关系

Fig. 1 Relation between SNR and time

为了保证 GEO 目标的探测效率,增加单次曝光的时间是一种解决途径.随着曝光时间的增加,信噪比随之增加,有利于目标的探测识别与定位计算.但对空间目标观测而言,较长时间的曝光就会使系统超出线性范围,甚至出现像元饱和和溢出的情况,最终影响图像的质量和计算精度,因此,单次长曝光在观测中的使用受到限制.

2.2 叠加原理

使用连续 M 张图像进行叠加时,叠加后图像中目标源信号与天光背景都变为单帧图像的 M 倍,由于各帧图像获取时的 N_{noise} 与 N_{dark} 相互独立,不难证明经叠加后:

$$\begin{aligned} N_{\text{noise_stack}}^2 &= M \times N_{\text{noise}}^2, \\ N_{\text{dark_stack}}^2 &= M \times N_{\text{dark}}^2. \end{aligned} \quad (2)$$

因此, 叠加后图像的信噪比计算公式为

$$\begin{aligned} S/N_{\text{stack}} &= \frac{M \times S}{\sqrt{M \times S + M \times N_{\text{sky}} + M \times N_{\text{noise}}^2 + M \times N_{\text{dark}}^2}} \\ &= \sqrt{M} \times S/N_{\text{single}}. \end{aligned} \quad (3)$$

叠加 M 张图像, 信噪比的提高倍数为 M 的均方根. 由于 CCD 的暗电流噪声与读出噪声具有随机误差的特点, 叠加图像时, 这些噪声不会精确对应相加. 考虑到空间目标观测的曝光时间较短, CCD 噪声远未饱和, 因此, 图像叠加对目标信号的增加大于对噪声的增加, 能显著地提高目标的信噪比^[5], 同时, 叠加后的图像与相同时间的长曝光图像相比, 具有更大的灰度范围, 像元不易饱和溢出, 有利于星像的识别与定位.

相应地, M 倍时间的长曝光图像信噪比计算公式为

$$S/N_{\text{long}} = \frac{M \times S}{\sqrt{M \times S + M \times N_{\text{sky}} + N_{\text{noise}}^2 + M \times N_{\text{dark}}^2}}. \quad (4)$$

当单张图像的曝光时间足够长时, 光子信号的噪声占主导地位, 可以忽略读出噪声与暗电流噪声. 叠加后的图像与等时间的长曝光图像信噪比相等, 均提高了 $\sqrt{M}$ 倍, 如 (5) 式所示:

$$S/N_{\text{long}} = S/N_{\text{stack}} = \frac{M \times S}{\sqrt{M \times S + M \times N_{\text{sky}}}} = \sqrt{M} \times S/N_{\text{single}}. \quad (5)$$

而当叠加后图像的累积总曝光时间较短时, 读出噪声占主导地位, 光子噪声和暗电流噪声可忽略. 单次长曝光效果优于多次短曝光叠加, 前者信噪比为后者的 $\sqrt{M}$ 倍, 因此, 曝光时间的选择尤为重要.

$$\begin{aligned} S/N_{\text{long}} &= \frac{M \times S}{N_{\text{noise}}}, \\ S/N_{\text{stack}} &= \frac{M \times S}{\sqrt{M \times N_{\text{noise}}}} = \frac{S}{N_{\text{noise}}} \times \sqrt{M}, \\ S/N_{\text{long}} &> S/N_{\text{stack}}. \end{aligned} \quad (6)$$

3 观测与处理方法

3.1 观测方法

为了验证图像叠加对目标信噪比的提升, 针对某给定的 GEO 目标, 选取多个曝光时间采集图像. 观测采用的光学镜头口径为 500 mm, 视场 $1.9^\circ \times 1.9^\circ$, CCD 靶面规格为 1024×1024 , 工作模式为全帧转移, 每秒最多可读出 9 帧, 像元的比例尺为 $6.68''$, 图像存储位数为 14.

为了对应短曝光序列与相应的长曝光, 并分析不同噪声的主导区域, 考虑到 CCD 相机允许的单帧最长曝光时间为 5 s, 因此, 从 10 ms 开始至 100 ms, 每增加 10 ms 选取一个曝光时间, 选取 10 组; 从 200 ms 开始至 1 500 ms, 每增加 100 ms 选定一个曝光时间, 选取 14 组; 最后从 2 s 至 5 s 每隔 0.5 s 选取一个曝光时间. 实验总共选取了 31 个不同

的曝光时间, 每个曝光时间连续采集 10 帧图像, 共获得 310 幅观测图像. 为了提高目标的原始信噪比, 图像采集时关闭望远镜跟踪, 使 GEO 目标在视场中央呈点状像. 当曝光时间较短时, 恒星的像也呈点状, 而较长的曝光时间会使恒星的像拉成长条状.

3.2 处理方法

获取图像后, 将 10 帧短曝光图像叠加为一幅图像, 叠加时每个像元精确对应. 随后分析叠加后图像中目标信噪比的改善程度, 验证图像叠加的方法能提高对目标的探测能力. 由于选取的 GEO 目标自身存在旋转, 光度随时间变化, 因此计算叠加前图像的背景读数、噪声读数以及目标的信噪比时, 取 10 帧图像求得这些数据的均值. 叠加后图像的数据则直接分析叠加生成的单帧图像得到. 验证图像的底片定位精度时, 计算视场中恒星的赤经、赤纬^[6], 与星表中的观测历元数据比较, 统计 10 帧短曝光图像中恒星位置残差的均值和底片常数的均方差. 由于短时间内设备指向变化很小, 因此底片常数变化也很小, 取序列图像底片常数的均值, 以及连续曝光的中间时刻, 就能实现叠加后图像中目标位置的计算.

4 实测结果及分析

4.1 叠加效果

实测的曝光 5 s 图像、短曝光 500 ms 图像及 10 帧 500 ms 叠加的图像如图 2、图 3(a) 及图 3(b) 所示.

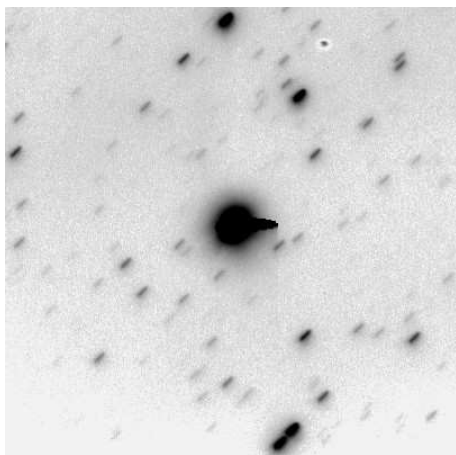


图 2 曝光 5 s 图像

Fig. 2 Image with 5 s exposure

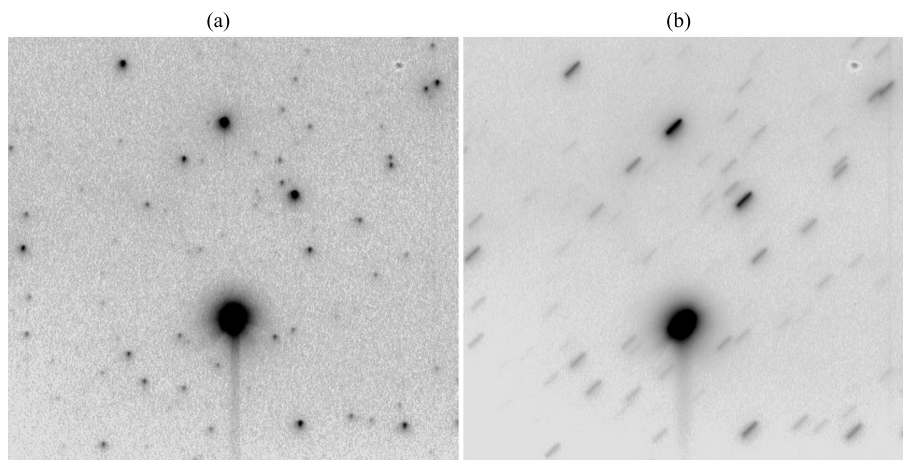


图 3 (a) 曝光 500 ms 图像; (b) 10 帧 500 ms 叠加后图像

Fig. 3 (a) Image with 500 ms exposure; (b) Stacked image of ten images with 500 ms exposure

从图 2 可以发现, 曝光时间 5 s 的图像中, 存在严重过饱和的星像, 其形态出现较大扭曲. 图 3 中, 单帧 500 ms 曝光图像无严重过饱和的情况, 10 帧 500 ms 图像叠加后, 等效曝光时间也为 5 s, 但图像中无严重过饱和和像元, 星像形态良好. 对应的过饱和星像 3 维分布如图 4~5 所示.

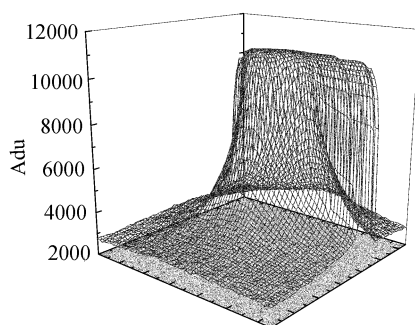


图 4 5 s 曝光图像中星像 3 维分布图

Fig. 4 3D surface of star in 5 s exposure image

对于单次曝光, 图像的灰度数据存储范围为 $0 \sim 8192$, 较长时间的积分 (如积分时间 5 s), 图像中 Adu (Analog/Digital Unit, 模数转换单位) 峰值读数约 11 000 的恒星像元已经大量过饱和, 严重影响了星像形态. 10 幅短曝光图像叠加后, 图像灰度存储范围为 $0 \sim 81920$, 对于等效 5 s 的曝光时间, Adu 峰值读数达 60 000 的星像仍能维持良好的形态. 图像叠加可以增加像元灰度存储的范围, 既能维持足够长的有效曝光时间, 又能有效防止星像过饱和, 提高图像质量.

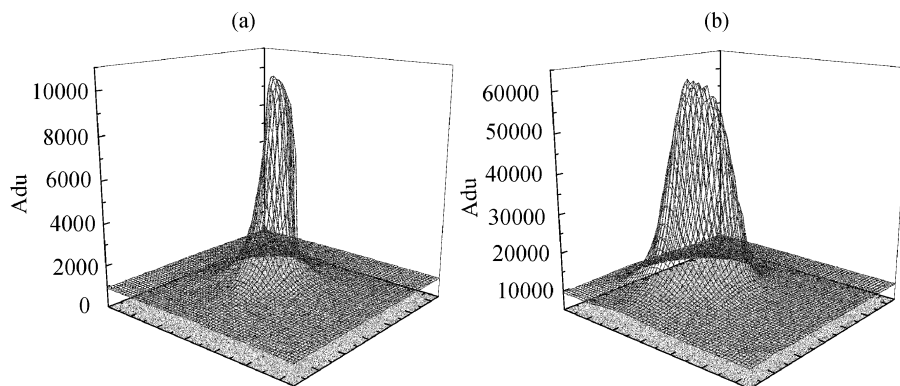


图 5 (a) 500 ms 图像中星像 3 维分布图; (b) 10 帧 500 ms 图像叠加后星像的 3 维分布图

Fig. 5 (a) 3D surface of star in 500 ms exposure image; (b) 3D surface of star in stacked image

4.2 背景与噪声

不同曝光时间图像的背景读数与噪声读数见图 6, 图像的实测背景读数与曝光时间成严格线性关系, 系统对背景的响应具有非常良好的线性度. 噪声读数与曝光时间成两段线性关系, 噪声曲线在 100 ms 与 500 ms 区间的斜率大于在 600 ms 至 5 s 区间的斜率. 因此, 当曝光时间少于 500 ms 时, 图像的读出噪声占主导地位, 噪声随时间的增加率较大, 叠加后目标信噪比不如相同时间的长曝光; 曝光时间大于 500 ms 时, 进入光子噪声占主导的区域, 噪声的增长曲线斜率下降, 有利于图像叠加.

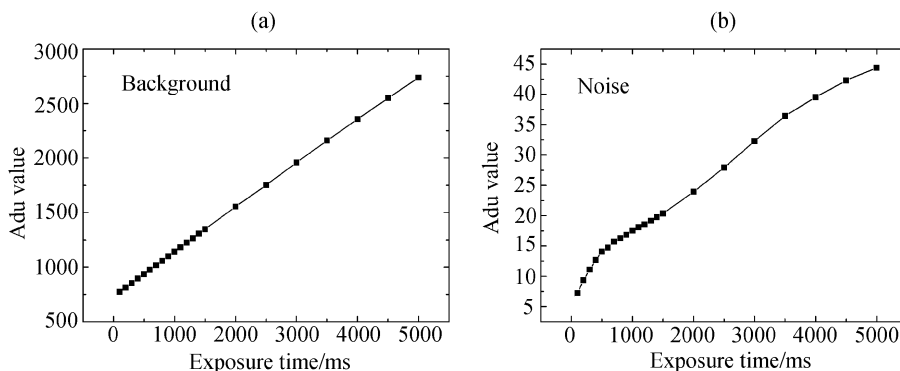


图 6 图像背景 (a) 与噪声读数 (b) 随时间变化关系

Fig. 6 Temporal variations of background (a) and noise (b)

4.3 目标信噪比分析

短曝光 500 ms 图像、10 帧 500 ms 曝光叠加后图像以及单次长曝光 5 s 图像如图 7、图 8(a)、图 8(b) 所示, 视场中央标出的星像即为目标. 对于单次长时间的曝光, 空间目标的星像也出现了饱和溢出的情况, 影响目标位置的计算精度. 采用连续多帧短曝

光图像叠加的方法, 有效避免了这种情况, 同时保证对目标的探测能力.

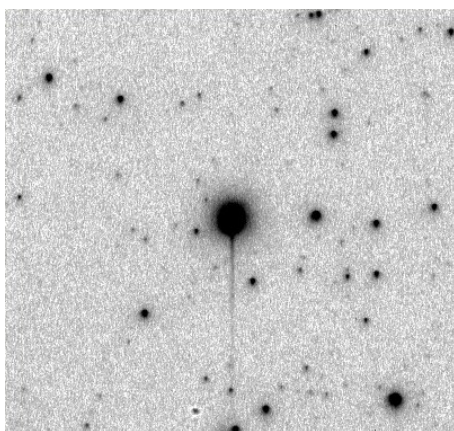


图 7 单帧 500 ms 曝光图像

Fig. 7 Image with 500 ms exposure

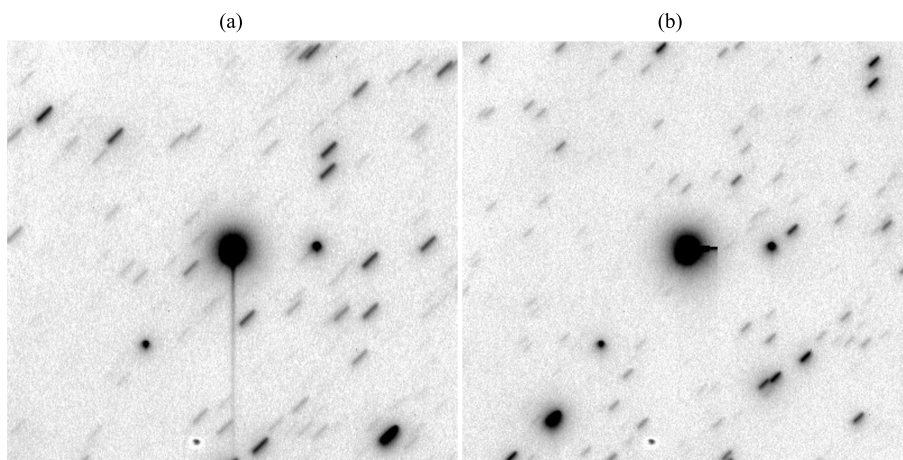


图 8 (a) 10 帧 500 ms 曝光叠加图像; (b) 单帧 5 s 曝光图像

Fig. 8 (a) Stacked image of 10 images with 500 ms exposure; (b) Image with 5 s exposure

不同曝光时间对应的单帧图像及叠加后图像中目标的信噪比如图 9(a) 所示, 经图像叠加后, 目标信噪比的提高倍数如图 9(b) 所示.

从图 9 不难发现, 增加曝光时间和叠加短曝光图像都能提高目标信噪比. 10 帧短曝光图像叠加后, 目标信噪比平均提高了 3.2 倍左右. 整个叠加过程提高了系统的极限探测星等, 10 帧图像叠加探测星等近似提高了 2.5 星等. 信噪比的提升保证了对目标的探测能力, 提高了目标的定位精度.

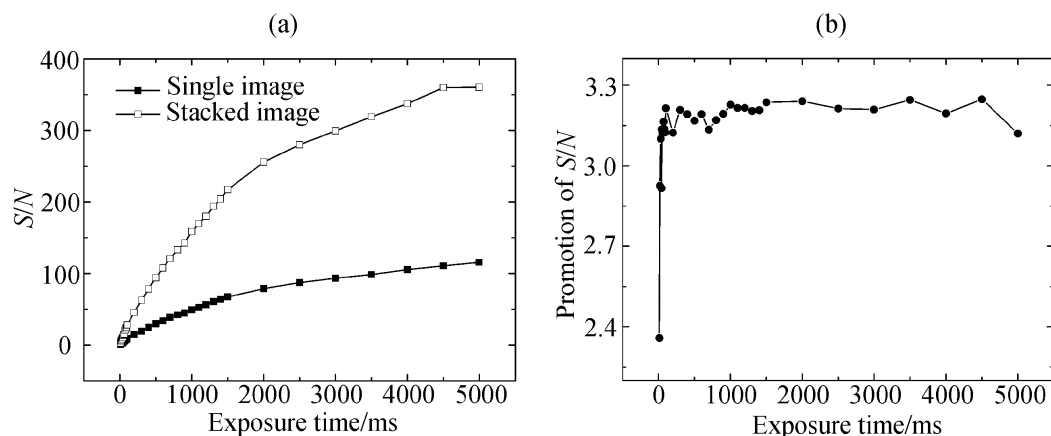


图 9 (a) 目标叠加前后的信噪比; (b) 信噪比经叠加后提高的倍数

Fig. 9 (a) SNR of objects before and after stacking; (b) Distribution diagram of SNR promotion

需要说明的是, 叠加后图像中目标的信噪比不一定优于相同时间的长曝光图像, 这是由于曝光时间较短时, 图像的读出噪声占主要地位. 例如 4 s 长曝光图像中, 目标信噪比为 105.47, 而 10 帧 400 ms 图像叠加后, 有效曝光时间为 4 s, 但目标信噪比仅为 78.5. 然而, 图像叠加的方法保证了图像质量, 因此可以实现更长的累计曝光时间, 提升系统对目标的探测能力. 例如曝光 5 s 的实验图像中, 目标信噪比为 115.46, 但目标星像和恒星星像都已过饱和, 严重影响定位计算, 无法在实际工作中使用; 而 10 帧 700 ms 图像叠加后, 有效曝光时间为 7 s, 目标信噪比为 120.5, 且叠加后图像中星像质量良好, 有利于目标位置的计算.

4.4 底片定位精度

统计序列图像中恒星定位精度的均值, 结果如图 10 所示. 叠加前的短曝光图像中, 恒星赤纬的定位精度优于 $0.2''$, 当曝光时间不超过 3 s 时, 恒星赤经的定位精度也优于 $0.2''$. 随着曝光时间的增加, 恒星赤经的残差呈增大的趋势, 这是由于随着曝光时间的增加, 星像沿赤经方向拉长, 降低了定心精度. 考虑到设备的像元比例尺为 $6.68''$, 叠加前图像的底片常数精度是满足要求的.

计算序列图像的 6 个底片常数的均方差, 如图 11 所示. 随着曝光时间的增加, 图像序列的底片常数变化逐渐增大. 但当曝光时间在 100 ms 和 3 000 ms 之间时, 序列图像的底片常数变化很小, 底片常数中零阶项 a 、 d 的均方根误差在 10^{-6} 量级, 一阶项 b 、 c 、 e 、 f 的均方根误差为 $10^{-9} \sim 10^{-8}$. 序列图像的底片常数弥散不大, 对定位精度的影响小于 $1''$. 因此, 使用序列图像底片常数的均值对目标做天文定位, 结果是可靠的.

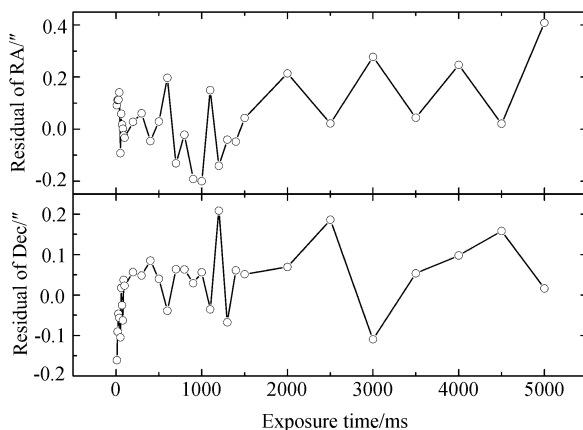


图 10 叠加前图像中恒星的定位精度

Fig. 10 Position precision of stars before stacking

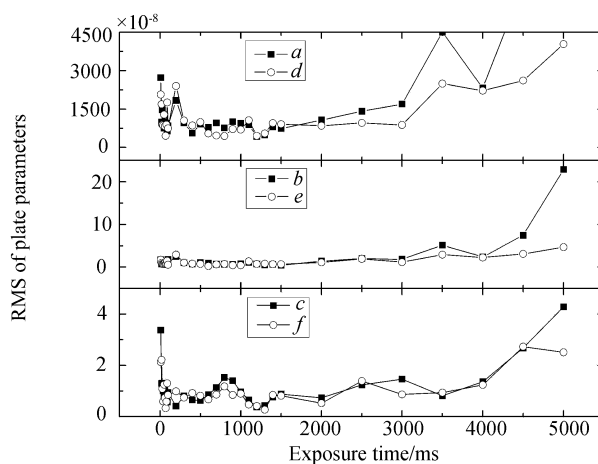


图 11 不同曝光时间的底片常数 RMS

Fig. 11 RMS of plate parameters with different exposure time

5 结论

为了保证对 GEO 空间目标的探测能力, 观测往往需要较长的曝光时间, 而曝光时间的增加使图像中部分星像过饱和, 影响图像质量. 本文研究了通过图像叠加探测 GEO 目标的方法. 叠加连续 10 帧短曝光图像, 可以防止星像饱和. 同时, 由于观测过程中背景噪声的随机性与不饱和性, 目标的信噪比得到了提高, 系统对目标的探测能力得到保证. 通过实验, 10 帧图像经叠加后, 目标的信噪比提升了 3.2 倍, 探测能力近似提升了

2.5 星等. 此外, 实验还对叠加图像底片常数的精度和弥散程度做了分析, 通过分析背景恒星位置的理论值与实测值的残差, 以及序列图像底片常数的变化, 验证了底片常数精度符合要求, 利用底片常数的均值对目标定位是可行的. 使用图像叠加的方法, 不但可以提高图像质量, 增加系统的有效曝光时间, 还能保证对目标的探测能力与定位精度, 在实际工作中具有一定的使用价值.

参 考 文 献

- [1] Schildknecht T. A&ARv, 2007, 14: 41
- [2] 刘海波, 沈晶, 郭耸, 等. Visual C++ 数字图像处理技术详解. 北京: 机械工业出版社, 2010: 45-83
- [3] 王书宏, 胡谋法, 陈曾平. 光电技术应用, 2007, 28: 731
- [4] 吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨道和探测. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 266-293
- [5] 王鸣浩, 陈涛, 王建立, 等. 光学精密工程, 2009, 17: 92
- [6] 李东明, 金文敬, 夏一飞, 等. 天体测量方法. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 70-91

A New Method for Detecting GEO Space Objects with Image Stacking

SUN Rong-yu^{1,2,3} PING Yi-ding^{1,2} ZHAO Chang-yin^{1,2}

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT To meet the needs of detecting GEO (Geosynchronous Orbit) space objects, and prevent the saturation of CCD pixels with long exposure time, a method of stacking series of images with short exposure time is presented. Using the method, the store range of images is enlarged, and the signal to noise ratio (SNR) is promoted, and hence the detection ability of the whole system is improved. The results of experiments demonstrate that the saturation of pixels is eliminated effectively, and the SNR is increased by 3.2 times, and the detection ability is increased by 2.5 magnitude when 10 seriate images are stacked. The location accuracy of stars satisfies the requirement, and using the mean plate parameters for astronomical orientation is reliable. At last the efficiency of the method is proved.

Key words space vehicles, techniques: image processing