

文章编号: 1000-8349(2012)03-394-17

# GEO 空间碎片的光学观测与精密定位

孙荣煜<sup>1,2,3</sup>, 赵长印<sup>1,2</sup>

(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:** GEO 轨道由于其特殊的动力学特性, 有着巨大的应用价值; 然而, GEO 区域没有类似大气阻尼的碎片清除机制, 导致空间碎片的威胁与日俱增。由于地基雷达探测距离的限制, 地基光学观测是 GEO 空间碎片探测的主要手段。介绍了空间碎片光学观测中设备的选取, 观测方案的制定, 以及相关的图像处理算法; 分析了空间碎片精密定位的技术与方法, 并对今后的发展进行了展望。为了更好地了解 GEO 空间碎片的态势, 保障在轨运行航天器的安全, GEO 空间碎片光学观测方法的研究是一个需要长期深入的课题。

**关键词:** 空间碎片; 同步轨道; 光学观测; 图像处理

**中图分类号:** P173      **文献标识码:** A

## 1 引 言

空间碎片又称轨道碎片, 是指宇宙空间中除正常工作的飞行器外所有人造物体, 大到报废的卫星整体, 小到发动机点火产生的粉末, 都属于空间碎片的范畴<sup>[1, 2]</sup>。迄今为止, 人类所进行的空间发射已经超过 4000 次, 送入轨道并曾被跟踪观测过的物体超过 26 000 个, 多于 1/3 的物体至今仍遗留在轨道上。目前可被地面观测设备观测并定轨的目标超过 9 000 个, 其中只有约 6% 为仍在工作的在轨航天器。据相关模型估计, 目前的空间碎片总量在数十万至数百万之间<sup>[3]</sup>。

空间碎片由于尺寸大小的不同, 对在轨航天器造成的威胁存在质的差别。因此, 根据尺寸将空间碎片分类如下:

- (1) 大尺寸空间碎片 —— 尺寸为米级及以上的空间碎片, 比如报废的卫星整体, 以及使用过的火箭末级载荷。由于尺寸较大, 该类空间碎片具有较高的能量和破坏力, 能被地面观测设备直接探测。

收稿日期: 2012-03-07; 修回日期: 2012-04-26

资助项目: 国家自然科学基金(11033009)

- (2) 中等尺寸空间碎片——尺寸介于毫米级与分米级间的碎片, 这类碎片大多由于航天器爆炸解体, 或者航天器间的碰撞所产生。这类碎片对在轨运行的航天器具有一定的危险性, 且由于相对尺寸较小, 很难被地面观测设备直接探测。
- (3) 小尺寸空间碎片——尺寸在毫米级以下的空间碎片。比如航天器表面剥落的油漆碎片, 发动机喷射的固体燃料粉末。虽然单个碎片的质量很小, 但在空间碎片中占有很大的比重。

空间碎片的存在不仅严重威胁着在轨航天器的正常运行和安全, 还会对有限的轨道资源构成潜在的危害。其中, GEO (Geosynchronous Orbit, 地球同步轨道) 是一种非常珍贵的资源, 虽然 GEO 的碎片密度远小于低轨的碎片密度, 但 GEO 没有类似大气阻尼这样的碎片清除机制, 因此, GEO 的碎片在轨时间长, 数目增长快, 对人类航天活动具有潜在的危险性。由于 GEO 轨道高度大 (约为 36 000 km), 雷达的探测功率随距离衰减快, 地基雷达很难实现对高轨碎片的探测, 因此, 地面光学观测是 GEO 碎片探测的主要手段<sup>[4]</sup>。

从 20 世纪 90 年代开始, 世界上主要的航天大国先后将地面光学设备应用于 GEO 空间碎片的观测研究<sup>[5-15]</sup>。GEO 空间碎片的光学观测包括搜索策略的制定, 动目标检测与识别, 目标的精密定位与轨道确定, 以及目标的编目处理。近年来, 将空间目标视为非质点, 通过基于时间序列的测光观测以及多波段的同时观测, 研究空间目标的相关物理特性, 开始成为主要的研究内容之一<sup>[16, 17]</sup>。

本文分为 3 个主要部分。第 2 章介绍了 GEO 空间碎片的运动特性, 以及基于目标运动特性的观测理论与方法; 第 3 章介绍了 GEO 空间碎片实测图像的处理流程, 以及经典的空间目标 CCD 测量方法, 并进行讨论; 第 4 章讨论了 GEO 空间碎片精密定位研究的最新进展。最后进行展望。

## 2 GEO 空间碎片的运动特性及观测方法

### 2.1 GEO 空间碎片的运动特性

典型的 GEO 轨道具有轨道倾角  $i = 0^\circ$ , 轨道平运动周期为 1 d 等特征, 相应的典型 GEO 轨道的理论半长径为 42 164 km<sup>[18]</sup>。事实上, 由于存在多种摄动因素的影响, GEO 轨道的空间碎片存在东西向与南北向的漂移<sup>[19-22]</sup>。GEO 轨道的主要摄动因素为地球的非球形引力摄动, 日月的三体摄动, 以及光压摄动。其中, 与地理经度相关的田谐摄动中的  $J_{22}$  项, 与 GEO 轨道发生 1:1 共振, 使 GEO 区域存在东经  $75^\circ$  与西经  $105^\circ$  两个稳定平衡点, 同时轨道半长径产生长期周期的变化<sup>[23]</sup>; 日月的三体摄动使 GEO 轨道平面存在为约 53 a 的长期进动<sup>[24]</sup>, 进动导致轨道倾角存在幅度约  $15^\circ$  的周期变化, 如图 1 所示; 光压摄动使得轨道偏心率存在一定的振荡, 从而影响 GEO 轨道的地心距, 并使其产生约 75 km 的变化<sup>[2]</sup>。因此, 定义 GEO 轨道带为中心距地心 42 164 km, 纬度方向宽  $15^\circ$ , 径向宽度为 150 km 的区域, 如图 2 所示。

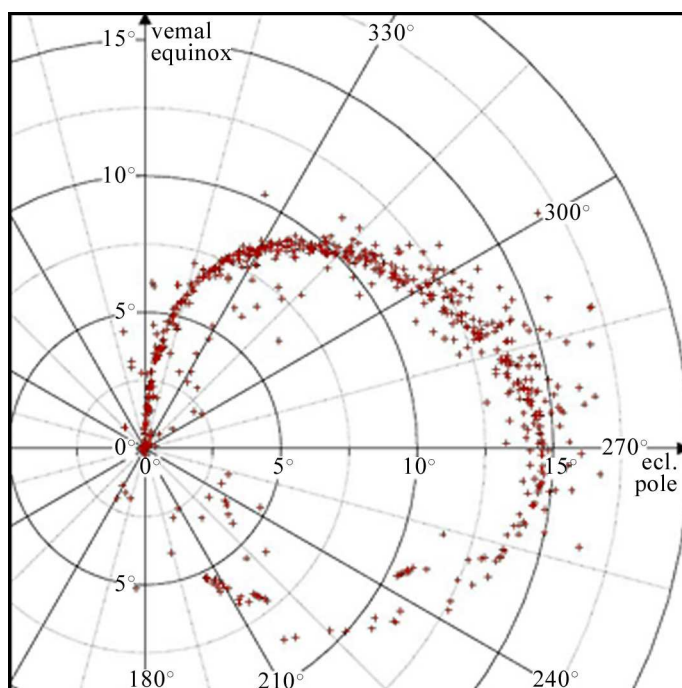


图 1 2006 年 4 月已编目 GEO 目标的轨道倾角相对升交点经度的分布关系<sup>[2]</sup>

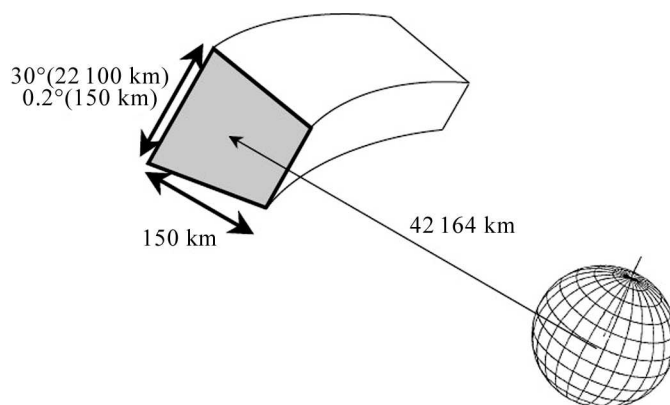


图 2 GEO 带区域的定义<sup>[2]</sup>

## 2.2 GEO 空间碎片的观测设备

GEO 空间碎片本身不能发光, 但由于其反射太阳光且能被地面光学设备所接收, 使得地基光学观测成为 GEO 空间碎片探测的有效手段之一。从 20 世纪 90 年代起, 一些国家与组织先后建造了一批设备以专门用于 GEO 空间碎片的观测, 比较典型的有美国的 NASA CCD Debris Telescope (CDT), the NASA funded Michigan Orbital Debris Survey Telescope (MODEST), 欧洲的 the TAROT Telescope, ESA 1-m telescope, Campo Catino telescope,

以及俄罗斯的 ISON (International Scientific Optical Network) 网内多台设备。专用于空间碎片观测的望远镜通常为施密特式, 后端配备有高灵敏度的大阵列 CCD 探测器, 望远镜系统具有视场大, 光力强, 帧频高等特点。相比遥远的恒星, 空间碎片距离地球很近, 因此, 使用较小口径的望远镜, 就能实现对 GEO 空间碎片的观测, 如 NASA CCD Debris Telescope (CDT), 口径仅为 32 cm, 视场为  $1.7^\circ \times 1.7^\circ$ , 可以探测到 GEO 轨道带最小约 30 cm 的碎片, 并能对 GEO 区域的空间碎片进行日常观测和数据库编目<sup>[25]</sup>。

按机架类型分类, 空间碎片观测望远镜有赤道式、地平式与水平式三种<sup>[26]</sup>。其中赤道式机架由于结构复杂, 造价昂贵, 且观测时在极区存在盲区, 使用较少; 其余两种机架为空间碎片观测望远镜所广泛采用。

CCD 探测器是望远镜系统的重要组成部分<sup>[27]</sup>, 它将望远镜收集的光子转化成电子, 量化并输出。常用的 CCD 按图像读出方式可分为全帧 CCD、行间转移 CCD 和帧转移 CCD 三种<sup>[28]</sup>。由于空间碎片的观测需要极高的帧频(极限情况下可达到每秒数帧), 探测器前端往往不使用机械快门, 全帧 CCD 因此而产生的拖尾<sup>[29]</sup>降低了图像质量, 给后端的识别定位带来困难, 应当予以消除<sup>[30]</sup>。近年来, 由于漂移扫描概念的提出, 以及相关技术的发展, 漂移扫描读出的 CCD 也被用于 GEO 空间碎片的观测<sup>[31]</sup>。交替使用 CCD 的漂移扫描模式与凝视模式, 不但减小了观测强度, 而且由于突破了传统 CCD 对曝光时间的限制, 较小口径的望远镜就能实现对 GEO 空间碎片的高精度观测<sup>[32]</sup>。

GEO 空间碎片观测关注的 CCD 主要参数指标有<sup>[33, 34]</sup>尺寸、像元大小以及噪声<sup>[35]</sup>等。在光学系统确定的前提下, 空间碎片探测望远镜应选取高量子效率, 低读出噪声, 高帧频的 CCD, 同时还应兼顾视场与空间分辨率。视场过小不利于目标的搜寻与定位, 空间分辨率过低引起的欠采样问题, 会降低目标的定位精度, 对目标的探测不利, 但可通过图像重构满足精度需求<sup>[36-39]</sup>。

### 2.3 GEO 目标的搜索方法

由于 GEO 空间碎片相对地面测站的视运动速度很小, 可认为短时间内, 空间碎片相对地面测站静止; 因此, 观测时, 关闭望远镜的跟踪系统, 对指定天区曝光。GEO 目标在 CCD 靶面上的像成点状, 由于来自目标源的信号收集在较少的像元内, 可使探测目标的信噪比最大化<sup>[2, 40-42]</sup>。相应地, 视场中背景恒星的像随曝光时间不同而变化, 当曝光时间较短时, 恒星星像也成点状; 曝光时间较长时, 恒星星像拉成长条形状。实测 5 000 ms 曝光图像的部分截图如图 3 所示, 视场中央呈点状的星像即为目标, 其余拉成长条状的星像即为背景恒星, 观测设备为紫金山天文台盱眙观测站的施密特望远镜, 口径为 1.2 m, 视场为  $2^\circ \times 2^\circ$ 。识别视场中的空间碎片星像时, 给定星像的长

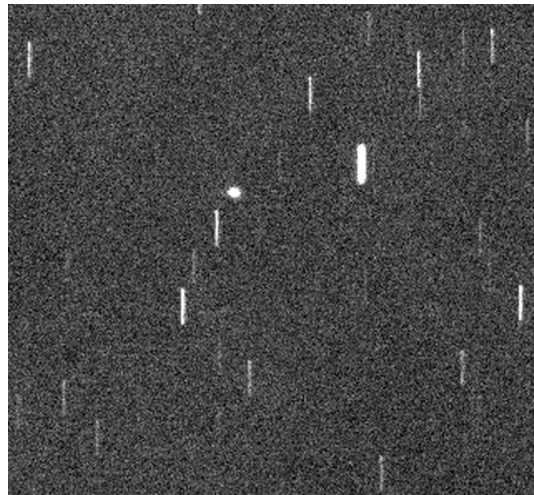


图 3 GEO 空间碎片实测图像



宽比作为判据即可。该种观测方法简便易行,有利于 GEO 空间碎片的探测和定位,为多个国家及组织所广泛采用,例如 IADC(the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, 机构间空间碎片协调委员会)组织针对 GEO 区域的全球性光学联合观测时,采用的就是该种观测方法。

为了使设备对 GEO 空间碎片的探测能力最大化,保证空间碎片的探测效率,观测时,曝光时间的选择至关重要。随着曝光时间的增加,图像中目标的信噪比也增加。过少的曝光时间使得图像中目标的信噪比过低,难以探测与定位;而当曝光时间过长时,由于专用的空间碎片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,星像发生饱和溢出的情况,影响图像的质量和计算精度。因此,可使用叠加短曝光序列图像的方法探测 GEO 空间碎片,不但保证了图像质量,通过提高有效曝光时间,还保证了对目标的探测效率与精度<sup>[43, 44]</sup>。

### 3 数据处理与目标定位

数据处理是通过处理实际观测的图像,达到目标识别与定位的目的,最终得到 GEO 空间碎片观测时刻的位置资料,用于定初轨或轨道改正。图像处理算法有以下要求<sup>[45]</sup>:

- (1) 快速性,单帧图像的处理过程包括图像预处理、目标识别与位置计算等,其处理时间必须短于望远镜曝光时间的间隔,否则无法实时性地监测空间碎片。由于空间碎片的观测需要较高帧频,因此,对图像处理算法的运算时间有一定要求。
- (2) 稳健性,针对单帧图像,在无任何先验背景信息的情况下,能适应不同的观测条件,例如视场中有云,图像噪声较大等,得到图像准确的背景信息。
- (3) 可靠性,空间碎片观测图像的处理结果,应有较低的虚警率,较高的目标探测效率。

GEO 空间碎片观测图像的处理流程包括图像预处理,目标检测,背景阈值计算,星像质心计算与天文定位<sup>[28, 46]</sup>。

#### 3.1 图像预处理

传统的图像预处理包括本底扣除与平场校正两方面<sup>[33, 34]</sup>。本底为望远镜曝光零秒获得的图像,即无信号输入时,CCD 输出的信号。本底由工作栅偏压作用下产生的电荷引起,由于不同的位阱得到的电子数不同,本底具有非均匀性,影响目标的质心计算结果,必须在数据处理时予以扣除。平场由望远镜光学系统的不均匀性,以及靶面上 CCD 像元间感光效率不同引起。本底和平场使得实测图像中像元的读数与真实值之间存在差异,在一定程度上影响了图像处理结果。在 GEO 空间碎片观测图像的处理过程中,本底与平场校正与否,对目标的定位精度没有影响<sup>[47]</sup>,但是,如果研究对象为空间碎片的高精度光度信息,则需要进行改正。

#### 3.2 目标检测

目标检测是空间碎片观测图像处理过程中至关重要的一个环节<sup>[48-50]</sup>。目标检测分离出图像中的恒星与空间目标,以便进行后续的精确定位工作。目标检测在保证目标探测效率的

同时, 应尽可能降低虚警率。针对 GEO 空间碎片的观测图像, 视观测方案不同, 主要有以下几种目标识别方法:

- (1) 掩码方法, 首先获得望远镜观测时刻的指向, 然后读取星表, 将视场中恒星的位置计算至观测时刻, 模拟生成背景星场。最后用观测图像减去模拟生成的星场, 从残留的星像中即可识别出空间目标<sup>[2]</sup>。
- (2) 连续帧图像比较, 通过求连续帧图像的中值图像, 获得目标信息。由于 GEO 空间碎片观测时相对测站静止, 在序列图像中位置基本不变, 而背景恒星存在周日视运动, 在序列图像中的位置发生移动; 因此, 通过对连续帧图像求中值, 即可通过 GEO 碎片与背景恒星运动特性的不同, 实现目标识别<sup>[28]</sup>。
- (3) 形态识别, 对于较长时间的曝光 (数秒即可), GEO 目标在 CCD 靶面上成点状像, 背景恒星的像拉成长条; 因此, 参考曝光时间, 简单地给定星像长宽比的阈值, 就能实现 GEO 目标的识别。
- (4) 数学形态学方法, 数学形态学建立在集合论的基础之上<sup>[51]</sup>, 其本质在于使用一定形态的结构元素度量和提取图像中对应的几何形状, 达到分析和识别图像的目的。对于较长时间的曝光图像, GEO 目标与背景恒星存在几何形态上的差异, 使用形态学算子对图像做卷积, 消除图像中的长条形状星像, 保留点状星像, 就能实现目标的探测<sup>[45]</sup>。

### 3.3 背景阈值计算

CCD 图像阈值<sup>[52, 53]</sup>用于分割 CCD 图像, 区分图像中的背景与目标, 图像中 ADU 计数大于或等于阈值的像元认定为恒星或空间目标, ADU 计数小于阈值的像元认定为天光背景。CCD 图像阈值的计算方法很多, 算法复杂度与时间消耗也不同, 主要有全局背景阈值和局部背景阈值两类。

- (1) 全局背景阈值。针对整幅 CCD 图像, 设置统一的常数, 作为背景判据。全局阈值法的优点是计算简便, 运算速度快。但 GEO 空间碎片观测设备视场大, 视场内天光背景可能存在较大起伏, 导致图像中不同区域的背景亮度不一样; 与此同时, 为了提高图像的读出速率, 往往采用多通道读出技术, 也使得图像不同区域的背景读数存在差异; 因此, 使用全局统一的阈值判据, 极易影响空间目标的探测效率与位置精度。
- (2) 局部背景阈值。将图像中不同区域的背景设置为不同的值。设置方法为将整幅图像人为地分为若干小块, 每块较小局部区域的阈值设为常数; 也可以将背景设置为随位置变化的函数, 例如 SExtractor 软件<sup>[54]</sup>, 使用 3 次样条的插值方法, 计算背景函数。相较全局背景阈值, 局部背景阈值具有较高的精度, 有利于目标的识别探测。

由于实测图像中目标星像的连通域具有一定的像元数, 且噪声出现的概率随星像占据像元数的增加而减小, 因此, 引入星像连通域的像元个数作为另一判据, 能准确地剔除分割出的噪声虚景, 提高目标的探测效率。由于图像中的噪声符合高斯分布, 由概率理论可知<sup>[55]</sup>, 将图像背景阈值设为背景均值与背景方差的 3 倍之和, 正确识别目标和噪声的概率大于 99.7%。

### 3.4 星像质心计算

针对分割出的星像连通域, 计算星像质心的方法主要有以下3种<sup>[27]</sup>:

- (1) 修正矩方法, 通过求目标星像连通域的一阶矩, 确定目标的质心, 并将目标的质心视为中心。如(1)式所示:

$$\begin{cases} X = \frac{\sum_{i \in S} I_i x_i}{\sum_{i \in S} I_i}, \\ Y = \frac{\sum_{i \in S} I_i y_i}{\sum_{i \in S} I_i}. \end{cases} \quad (1)$$

其中  $S$  为星像像元的集合,  $I_i$  为  $(x_i, y_i)$  处, 像元读数减去背景阈值所得值,  $X, Y$  即为修正矩方法计算出的目标质心。

- (2) PSF 函数拟合法, 使用现有模型函数拟合星像的 PSF 轮廓, 函数的拟合结果即为星像的质心, 通常的拟合方法有 Gauss 函数拟合, Lorentz 函数拟合, Moffat 函数拟合等。以二维 Gauss 函数拟合为例<sup>[56]</sup>, 使用如下 Gauss 函数形式, 拟合星像的灰度分布, 并以 Gauss 函数的中心作为星像质心。

$$G(x, y) = B + H \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2R^2} \right], \quad (2)$$

其中  $B$  代表背景,  $H$  为 Gauss 函数的峰值,  $R$  为 Gauss 函数的标准差。 $(x_0, y_0)$  为待定星像的中心坐标, 可用读数最高的像素坐标或矩方法获得的中心位置作为计算初值。

- (3) 中值方法, 将星像中心定义为星像一维累积分布函数平分时的坐标值<sup>[57]</sup>, 计算方法如下: 先求二维图像在  $x$  方向的一维灰度分布曲线及累积分布函数,

$$Q(X) = \sum_x M(x) = \sum_x \sum_y G(x, y). \quad (3)$$

搜索满足下式的  $x_0$ , 即为星像的  $x$  方向坐标,

$$Q(x_0) = \frac{1}{2}(Q(x_{\max}) - Q(x_{\min})). \quad (4)$$

计算累积分布函数中的  $x_0$  时, 需要进行插值, 实验表明三次插值结果即可满足精度要求,  $y$  方向处理同  $x$  方向。

研究表明, 对于近圆形的星像, 二维 Gauss 函数拟合法精度最高, 修正矩方法其次, 中值法精度最低<sup>[58]</sup>; 其中修正矩方法对暗星像有较好的定位精度<sup>[57]</sup>, 且算法的复杂度低, 计算速度最快, 在早期的图像处理方法中占据优势。对于拉长的星像, 使用特殊函数做 PSF 拟合, 所得质心的精度最高, 修正矩方法其次<sup>[47]</sup>; 然而, 由于空间碎片观测望远镜视场大, 导致碎片星像欠采样严重, 同时兼顾数据处理的实时性, 空间碎片星像的质心计算通常使用修正矩方法。

### 3.5 天文定位

天文定位<sup>[46]</sup>是利用 CCD 图像中空间目标相对背景恒星的位置, 由恒星的位置计算目标的位置。其实质为利用视场中的恒星, 建立图像中实测坐标  $(x, y)$  与赤道坐标  $(\alpha, \delta)$  的映射关系, 然后通过映射关系, 由目标在图像中的质心坐标  $(x_0, y_0)$  计算其观测时刻的赤道坐标。具体计算时, 引入定义在切平面上的理想坐标系<sup>[59]</sup>, 理想坐标  $(\xi, \zeta)$  与实测坐标的理论值  $(x, y)$  一一对应, 使用 CCD 像元比例尺及靶面的旋转角即可换算; 同时, 理想坐标还存在与赤道坐标  $(\alpha, \delta)$  的一一对应关系, 其中  $(\alpha_0, \delta_0)$  为图像中心对应的赤道坐标。

$$\begin{cases} \xi = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} \\ \zeta = \frac{\sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} \end{cases} \quad (5)$$

若已知理想坐标  $(\xi, \zeta)$ , 赤道坐标  $(\alpha, \delta)$  计算公式如下:

$$\begin{cases} \tan(\alpha - \alpha_0) = \frac{\xi}{\cos \delta_0 - \zeta \sin \delta_0} \\ \tan \delta = \frac{(\zeta \cos \delta_0 + \sin \delta_0) \cos(\alpha - \alpha_0)}{\cos \delta_0 - \zeta \sin \delta_0} \end{cases} \quad (6)$$

天文定位的具体流程如下:

- (1) 根据望远镜指向及设备视场, 读取星表, 将星表中的恒星从星表平位置计算至历元视位置, 具体计算时改正自行、周年光行差与大气折射即可<sup>[60]</sup>。找出观测图像中的恒星, 根据恒星的历元视位置  $(\alpha_i, \delta_i)$ , 计算其理想坐标  $(\xi_i, \zeta_i)$ , 最后得到其实测坐标的理论值  $(x_i, y_i)$ 。
- (2) 将由星表计算的恒星位置理论值  $(x_i, y_i)$  与图像中恒星的实测位置  $(x, y)$  匹配。在望远镜指向准确的情况下, 在恒星位置的理论值  $(x_i, y_i)$  邻域内搜索匹配, 通常设置长宽为 5~20 像素的矩形区域即可。邻域匹配法所需时间少, 对于帧频较高的空间碎片监测, 应用广泛。当望远镜指向受相关误差因素影响, 准确度不高时, 可以通过视场中多个恒星之间的几何构形进行匹配<sup>[61, 62]</sup>。
- (3) 建立恒星理想坐标的理论值  $(\xi_i, \zeta_i)$  与 CCD 靶面坐标实测值  $(x, y)$  之间的映射。由于存在望远镜像差和 CCD 安装偏差等误差因素, 理想坐标与实际量度坐标间的关系无法精确严格地推导, 通常使用多项式表示, 即底片模型。GEO 空间碎片观测中使用的底片模型一般有六常数模型、十二常数模型、四常数模型、二十常数模型以及考虑径向与切向畸变的十常数模型<sup>[47]</sup>等。

- 1) 六常数模型, 六常数模型的转换包括了坐标原点差, 坐标轴方向差和坐标尺度差, 没有考虑非线性的差异项。使用六常数模型求解需要 3 个或以上定标星。映射方程



形式如下:

$$\begin{cases} \xi = a + bx + cy \\ \zeta = d + ex + fy \end{cases} \quad (7)$$

- 2) 四常数模型, 需要两个及以上定标星, 在 CCD 图像  $x$  与  $y$  方向比例尺相同的假设下, 是简化的六常数模型。映射方程形式如下:

$$\begin{cases} \xi = a + bx + cy \\ \zeta = d - cx + by \end{cases} \quad (8)$$

- 3) 十二常数模型, 相比线性的六常数模型, 多考虑了如底片不垂直光轴, 切点坐标与光轴实际方向不一致, 望远镜像差等非线性差异项。使用十二常数求解至少需要 6 颗定标星。映射方程形式如下:

$$\begin{cases} \xi = a_1 + b_1x + c_1y + d_1x^2 + e_1xy + f_1y^2 \\ \zeta = a_2 + b_2x + c_2y + d_2x^2 + e_2xy + f_2y^2 \end{cases} \quad (9)$$

- 4) 二十常数模型, 相比十二常数模型, 加上了望远镜畸变所引起的三次项影响。求解至少需要 10 颗定标恒星。映射方程形式如下:

$$\begin{cases} \xi = a_1 + b_1x + c_1y + d_1x^2 + e_1xy + f_1y^2 + g_1x^3 + h_1x^2y + i_1xy^2 + j_1y^3 \\ \zeta = a_2 + b_2x + c_2y + d_2x^2 + e_2xy + f_2y^2 + g_2x^3 + h_2x^2y + i_2xy^2 + j_2y^3 \end{cases} \quad (10)$$

- 5) 考虑径向与切向畸变的十常数模型。形如下式, 其中  $r^2 = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

$$\begin{cases} \xi = A + Bx + Cy + K_1r^2x + K_2r^4x + P_1(r^2 + 2x^2) + P_2xy \\ \zeta = D + Ex + Fy + K_1r^2y + K_2r^4y + P_2(r^2 + 2y^2) + P_1xy \end{cases} \quad (11)$$

研究表明, 对于视场大于  $1^\circ \times 1^\circ$  的望远镜, 畸变产生的三次项对精度有较大影响<sup>[63]</sup>, 在数据处理时应当予以考虑。

需要说明的是, 求解底片模型时, 随着底片常数个数的增加, 为了求解方程组, 需要视场内定标星的个数也随之增加。对于二维问题, 最小二乘法求解  $n$  个底片常数, 参考星应不少于  $(n/2)^2$  个<sup>[59]</sup>, 大大增加了计算的时间。不仅如此, 底片模型对测量精度的影响存在很强的设备依赖性, 最终的测量精度往往不取决于模型阶数的高低, 而是取决于模型是否合适, 是否能准确描述 CCD 图像的成像; 因此, 使用高阶的底片模型, 最终空间目标的定位精度未必优于使用低阶模型。在实际工作中, 为了兼顾数据处理的实时性, 可以选取数目足够的距空间目标星像一定距离内的定标星, 求解低阶底片常数, 既能满足处理时间的需求, 又能达到预期的精度。

- (4) 根据计算出的底片常数模型, 以及空间目标在量度坐标系中的实测位置  $(x_{\text{object}}, y_{\text{object}})$ , 计算目标的理想坐标  $(\xi_{\text{object}}, \zeta_{\text{object}})$ , 再由目标的理想坐标归算赤道坐标  $(\alpha_{\text{object}}, \delta_{\text{object}})$ 。

## 4 空间目标精密定位的研究进展

实际工作过程中, GEO 空间目标的精密定位受很多因素影响, 难以完全按照经典的数据处理方法实现。影响空间目标定位精度的因素主要有:

- (1) 大气扰动。大气的扰动扭曲了星像的形状, 使得星像轮廓成非 Gauss 分布。由于空间碎片观测设备视场较大, 大气扰动造成的星像扭曲随星像在整个视场中的位置而变化, 难以准确地消除; 但是, 大气扰动造成的星像位置误差一般小于  $1''$ , 对于精度要求不是很高的观测, 可以不予考虑。
- (2) 望远镜的力学不稳定性。望远镜的力学不稳定性使得望远镜在跟踪过程中指向发生偏差, 与大气扰动类似。望远镜力学的不稳定使得星像形态发生扭曲, 且图像不同区域的扭曲程度也不相同。
- (3) 机械快门的使用。由于机械快门开闭的速度是有限的, 影响 CCD 在曝光始末时刻的信号接收, 造成星像实际曝光时间发生偏差, 星像像元曝光不均匀, 影响星像的位置计算; 并且, 由于空间碎片观测需要极高的帧频, 机械快门频繁开闭极易损坏, 对望远镜整个系统的维护与稳定不利。
- (4) 望远镜的光学畸变。光学畸变扭曲了星像形状, 降低了星像的信噪比, 对于大视场, 畸变的影响尤其严重。畸变可通过改变目标观测策略及数据处理方法予以改正, 例如使跟踪的目标在视场中央成像。取目标邻近区域的背景恒星计算底片常数, 或直接使用考虑畸变的底片模型计算目标位置。
- (5) 空间目标的欠采样。由于空间碎片的探测需要大视场, 但 CCD 的像元大小有限制, 由此造成的欠采样影响了空间目标的定位精度。
- (6) 图像中的光污染。空间碎片观测过程中存在的影响目标探测定位的光子信号, 例如目标与恒星星像的重叠, 不采用快门造成的拖影等。

### 4.1 空间目标观测中重叠星像的分离

由于 GEO 空间碎片与恒星视运动速度的差异, 在 CCD 的实测序列图像中, 空间目标所成的像极易与恒星星像发生重叠, 如图 4 所示。由 GEO 空间碎片的观测策略可知<sup>[64]</sup>, 较长曝光时间的观测中, GEO 空间碎片所成星像为点状, 背景恒星由于相对 CCD 靶面存在相对运动, 所成像被拉成长条。图像的曝光时间越长, 恒星星像拉长越严重。

星像的重叠导致空间碎片的质心计算发生偏差, 增加了观测弧段中的野值, 降低了空间碎片的定位精度, 严重时导致望远镜对目标的识别失败。由于空间碎片观测图像中的星像轮廓不规则, 使用传统的光度等高图分离重叠星像<sup>[54, 65, 66]</sup>难以成功。

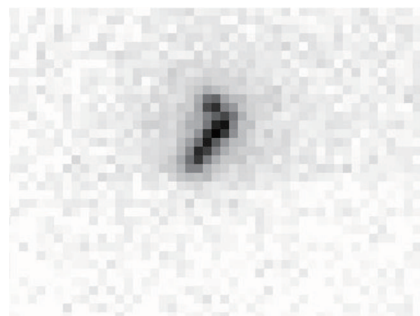


图 4 GEO 空间碎片观测中的重叠星像

鉴于 GEO 空间碎片观测时,背景恒星星像与空间目标具有不同的几何形态,两种基于星像形态不同的分离方法取得了比较好的效果。

- (1) 使用 Gauss 函数卷积方法<sup>[67]</sup>。由于实测图像中, GEO 碎片所成星像为点状,星像基本满足 Gauss 分布;因此,使用 Gauss 函数对重叠星像做卷积可以起到放大作用,同时还能去除噪声的影响。分离效果如图 5 所示,其计算过程如下,设理想 Gauss 二维分布函数为:

$$g(x_i, y_i) = B \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x_i - x_{c2}}{r_2} \right)^2 + \left( \frac{y_i - y_{c2}}{r_2} \right)^2 \right] \right\}; \quad (12)$$

发生重叠的星像中,目标强度分布为:

$$f(x_i, y_i) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x_i - x_{c1}}{r_1} \right)^2 + \left( \frac{y_i - y_{c1}}{r_1} \right)^2 \right] \right\}; \quad (13)$$

两个函数卷积,得到的二维 Gauss 函数为:

$$f(x_i, y_i) * g(x_i, y_i) = AB \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x_i - x_c}{r} \right)^2 + \left( \frac{y_i - y_c}{r} \right)^2 \right] \right\}, \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} x_c = x_{c1} + x_{c2} \\ y_c = y_{c1} + y_{c2} \\ R_c = r_1^2 + r_2^2 \end{cases} . \quad (15)$$

卷积完成后,通过简单的线性平移,即可得到目标位置  $(x, y)$ 。假设重叠星像中目标位置为  $(x_0, y_0)$ ,用于卷积的 Gauss 函数中心为  $(x_g, y_g)$ ,计算方法如下:

$$\begin{cases} x = x_0 - x_g \\ y = y_0 - y_g \end{cases} . \quad (16)$$

图 5(a) 为发生重叠的原始星像, (b) 为重叠星像的 3 维分布, (c) 为重叠星像的等高图, (d) 为分离后的目标星像等高图。从图中不难发现,发生重叠的恒星信号得到抑制,目标分离取得了较好的效果。

- (2) 使用数学形态学算子分离星像<sup>[68]</sup>。使用数学形态学算子,配合拟合恒星星像几何形态的结构体,对重叠星像进行卷积,可以消去长条状的恒星星像,保留点状的目标星像。使用 Top-hat 算子,选取 SE 为结构元素对函数  $f(x)$  做变换的定义:

$$\begin{cases} D^{SE}(f(x)) = \max\{f(x+y) : y \in SE\} \\ E^{SE}(f(x)) = \min\{f(x+y) : y \in SE\} \\ O^{SE}(f(x)) = D^{SE}(E^{SE}(f(x))) \\ TH^{SE}(f(x)) = f(x) - O^{SE}(f(x)) \end{cases} . \quad (17)$$

使用形态学算子分离 GEO 空间碎片观测中的重叠星像,效果如图 6 和图 7 所示。

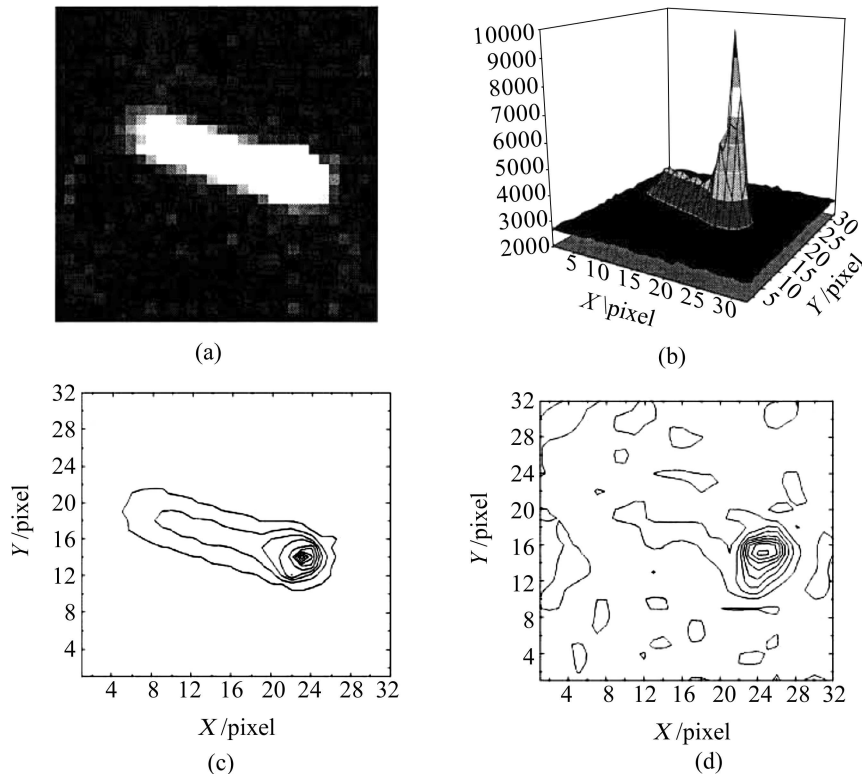


图 5 重叠星像分离效果<sup>[67]</sup>

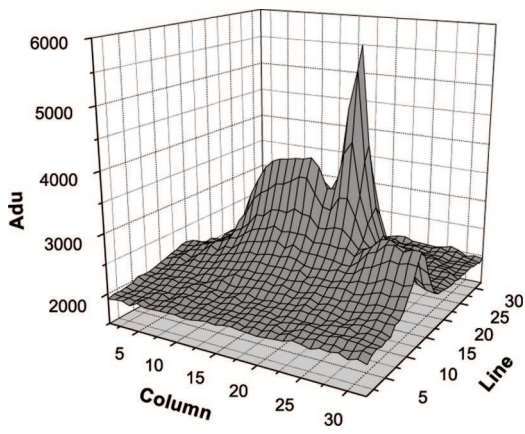


图 6 分离前的重叠星像<sup>[68]</sup>

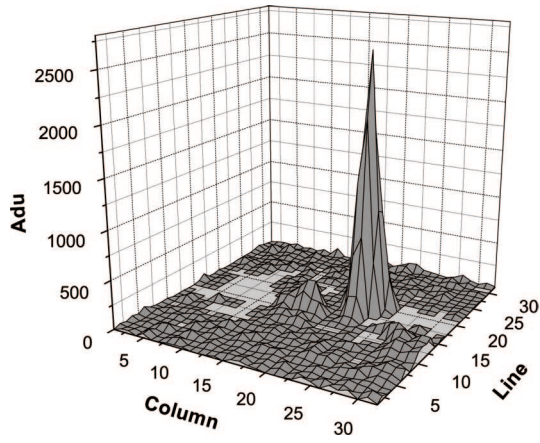


图 7 分离后的重叠星像<sup>[68]</sup>



为了验证星像分离的精度,使用 Iraf 生成模拟的重叠星像,使用该算法进行处理,并计算分离前后星像的质心,与 SExtractor 处理结果比较。结果表明,使用数学形态学算子,分离结果的定位精度优于 SExtractor,该方法高精度地解决了空间碎片观测中的星像重叠问题。

表 1 星像分离的精度比较

	分离前结果		分离后结果		SExtractor 分离结果	
	平均残差	RMS	平均残差	RMS	平均残差	RMS
X(像元)	-0.792	2.423	$4.425 \times 10^{-2}$	0.258	-0.397	2.118
Y(像元)	-1.132	1.276	$-5.659 \times 10^{-2}$	0.244	-0.784	1.229

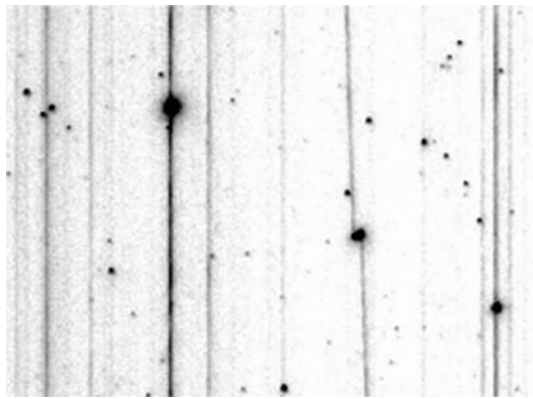


图 8 空间目标观测中的拖尾<sup>[69]</sup>

#### 4.2 空间目标观测中拖尾的处理

如前文所述, GEO 空间碎片观测需要极高的帧频。频繁的开闭会使机械快门使用寿命大大减小,影响设备的正常使用;因此,实际观测中往往拆除快门,使得全帧 CCD 在图像读出时仍处于曝光状态,加上 CCD 相机每次曝光之前都要进行擦除操作,使得视场中较亮的星像在图像中产生横贯整幅图像的亮线,即拖尾,如图 8 所示。拖尾降低了图像质量,增加了虚警数目,严重影响了空间目标的识别率与定位精度。基于拖尾与星像不同的几何形态,使用形态学算子处理拖尾图像<sup>[69]</sup>,取得了

较好的效果。

处理前后的恒星星像等高图如图 9 所示,空间目标星像的等高图如图 10 所示。图 10(a)为目标由于自身亮度较大而产生拖尾,10(d)为目标星像与恒星拖尾发生混叠。其中图 9(a),10(a),10(d)为受拖尾影响的原始星像等高图,图 9(b),10(b),10(e)为使用 Tophat 算子处理的结果,图 9(c),10(c),10(f)为使用 Spread Tophat 算子处理的结果。

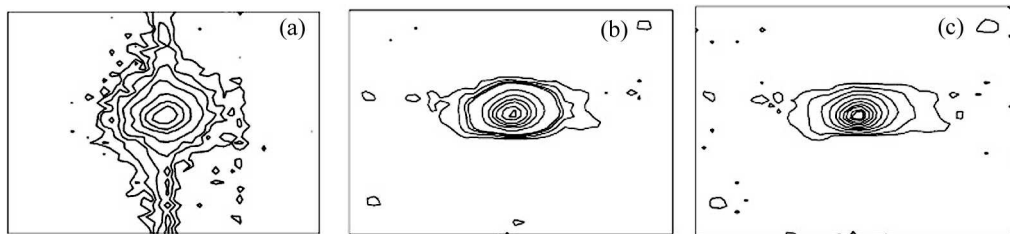


图 9 恒星拖尾的处理<sup>[69]</sup>

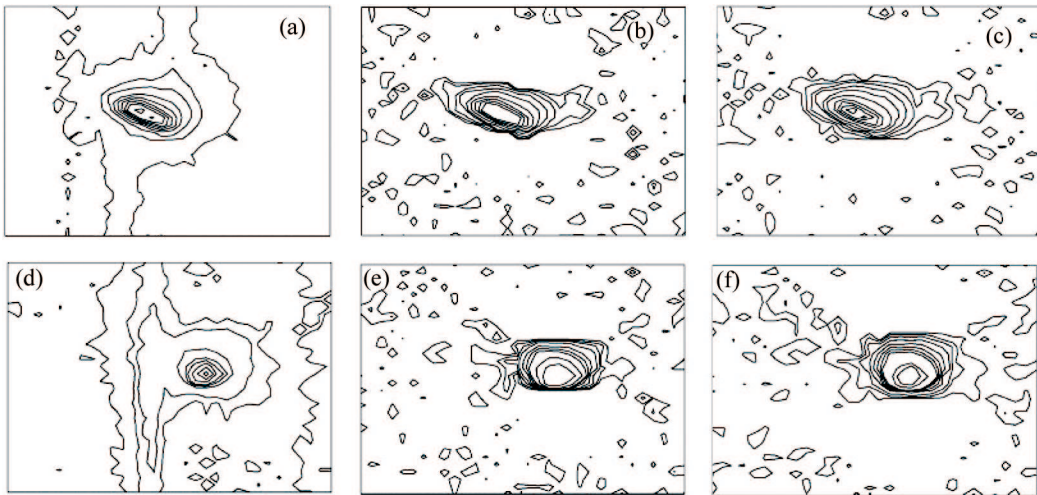


图 10 卫星拖尾的处理<sup>[69]</sup>

研究表明,使用形态学方法,较好地消除了图像中背景恒星及空间碎片的拖尾,提高了图像的质量;降低了虚警率,提高了拖尾恒星与空间目标的信噪比及探测率;最终提升了背景恒星与空间碎片的定位精度。

## 5 展 望

地基光学观测是 GEO 空间碎片探测的主要手段,虽然探测技术和方法都已日臻完善,但仍有很多新产生的问题有待解决,是一个必须长期研究的课题。展望 GEO 空间碎片精密定位技术的发展,重点有以下几方面:

- (1) 欠采样图像的重建。实测图像的欠采样,极大影响了 GEO 空间的定位精度。考虑到目标在图像上的质心精度约为像元比例尺的  $1/2$ <sup>[28]</sup>,以像元尺度为  $10''$  的 CCD 为例,观测 GEO 区域,由于质心误差带来的原始定位误差为百米量级。因此,有必要研究欠采样图像重建的方法,使用连续帧的欠采样图像,重构高分辨率观测图像。这样的工作已在 HST 的数据处理中实现<sup>[36, 37]</sup>。通过欠采样图像的重建,牺牲部分时间分辨率,换取目标的空间分辨率,最终提高目标观测弧段的定位精度。
- (2) 暗弱目标的识别与精密定位。对于 GEO 区域尺寸较小的空间碎片(尺寸在 10 cm 左右),受探测距离和望远镜光力的影响,目前尚难以探测编目。空间碎片观测望远镜的口径不可能无限地增大,且大口径望远镜造价昂贵,维护成本高,难以广泛布点;因此,如何利用现有的设备,实现暗弱 GEO 目标的探测,是值得研究的课题。暗弱目标体现在观测图像上即信噪比很低的源,例如信噪比约 1 的目标,如何区分出这些目标与噪声,并精密地确定其位置,值得深入研究。现有处理方法是进行单帧图像滤波以提高目

标源的信噪比, 或者通过序列图像叠加提升目标的总有效曝光时间<sup>[43]</sup>等。

- (3) 目标灰度质心的确定。现有研究表明, 矩方法计算星像灰度质心的精度不如PSF函数拟合方法; 因此, 基于目标星像轮廓的先验信息, 寻找合适的函数, 拟合星像轮廓并确定质心<sup>[70]</sup>, 可以有效提高空间目标的定位精度。
- (4) 高效率的实时图像扫描算法。空间目标观测需要较高的帧频, 因此, 需要快速、准确和高效的数据处理算法, 以实时处理观测数据。由于空间目标观测暂时不考虑目标的光度信息, 因此, 如何快速地识别目标, 并准确地提取目标质心, 计算赤道坐标, 值得深入研究。

### 参考文献:

- [1] 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
- [2] Thomas Schildknecht. *Astron Astrophys Rev*, 2007, 14: 41
- [3] 李语强, 熊耀恒. *天文研究与技术*, 2006, 3: 21
- [4] Molotov I, Agapov V, Titenko V. *Adv Space Res*, 2008, 41: 1022
- [5] Schildknecht T, Ploner M, Hugentobler U. *Adv Space Res*, 2001, 28:1291
- [6] Rykhlova L V, Bagrov A V, Barabanov S I, et al. *Adv Space Res*, 2001, 28:1301
- [7] Schildknecht T, Musci R, Flohrer T. *Adv Space Res*, 2008, 41:1039
- [8] Porfilio M, Piergentili F, Graziani F. *Adv Space Res*, 2004, 34:921
- [9] Schildknecht T, Musci R, Ploner M, et al. *Adv Space Res*, 2004, 34:901
- [10] Seitzer P, Smith R, Africano J, et al. *Adv Space Res*, 2004, 34:1139
- [11] Alby F, Boer M, Deguine B, et al. *Adv Space Res*, 2004, 34:1143
- [12] Musci R, Schildknecht T, Ploner M. *Adv Space Res*, 2004, 34:912
- [13] Musci R, Schildknecht T, Ploner M. *Adv Space Res*, 2005, 35:1236
- [14] Hebert T, Africano J, Stansbery E. *Adv Space Res*, 2001, 28:1283
- [15] Laas-Bourez M, Wailliez S, Deleffie F, et al. *Adv Space Res*, 2012, 49:603
- [16] Vovchik Y, Blahodyr Y, Lohvynenko O. *Adv Space Res*, 2001, 28:1309
- [17] Papishev P, Karavaev Y, Mishina M. *Adv Space Res*, 2009, 43:1416
- [18] Hugentobler U. *Astrometry and Satellite Orbits: Theoretical Considerations and Typical Applications*, 1998
- [19] 刘林, 胡松杰, 王歆. *航天动力学引论*. 南京: 南京大学出版社, 2006
- [20] 刘林. *人造地球卫星轨道力学*. 北京: 高等教育出版社, 1992
- [21] 刘林. *航天器轨道理论*. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [22] Beutler G. *Methods of celestial mechanics: basic principles and applications*. Berlin: Springer, 2004
- [23] 刘林, 廖新浩, 赵长印. *天文学进展*, 1991, 9:298
- [24] Allan R R, Cook G E. *Proc.R.Soc.Lond.A*, 1964, 280: 97
- [25] Jarvis K S, Yhum T L, Jorgensen K, et al. NASA ISC report JSC-29537, 2002
- [26] 程景全. *天文望远镜原理和设计*. 北京: 中国科学技术出版社, 2003
- [27] 冒蔚, 季凯帆. *CCD 天体测量学*. 昆明: 云南科技出版社, 2003
- [28] 张晓祥. 空间目标光学观测研究. 博士学位论文. 2007
- [29] 黄宗福, 王宏义, 韩建涛, 等. *信号处理*, 2010, 24: 607
- [30] 董文娟, 王宏义, 黄宗福, 等. *信号处理*, 2009, 25: 807
- [31] 毛银盾, 唐正宏, 郑义劲, 等. *天文学进展*, 2005, 23: 304
- [32] 毛银盾, 唐正宏, 陶隽, 等. *天文学报*, 2007, 48: 475
- [33] 李东明, 金文敬, 夏一飞, 等. *天体测量与方法: 历史, 现状和未来*. 北京: 中国科学技术出版社, 2006

- [34] Budding E, Demircan O. Introduction to Astronomical Photometry. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [35] 王书宏, 胡谋法, 陈曾平. 光电技术应用, 2007, 28:731
- [36] Lauer T R. The Astronomical Society of the Pacific, 1999, 111: 227
- [37] Fruchter A S, Hook R N. The Astronomical Society of the Pacific, 2002, 114: 144
- [38] Houde M, Vaillancourt J E. The Astronomical Society of the Pacific, 2007, 119: 871
- [39] Starck J L, Murtagh F. Astronomical Image and Data Analysis. Berlin: Springer, 2006
- [40] Olmedo E, Sannchez-Ortiz N, Guijarro N, et al. Adv Space Res, 2011, 48: 535
- [41] Frank L A, Sigwarth J B. A&A. 1990, 228: 522
- [42] Schildknecht T, Hugentobler U, Verdun A. Adv Space Res, 1995, 16: 47
- [43] 孙荣煜, 平一鼎, 赵长印. 基于图像叠加的 GEO 目标探测方法. 天文学报 (已接收)
- [44] 王鸣浩, 陈涛, 王建立, 等. 光学精密工程, 2009, 17: 92
- [45] Laas-Bourez M, Blanchet G, Boer M, et al. Adv Space Res, 2009, 44: 1270
- [46] 黄坤仪, 秦道. 人造卫星照相观测和资料处理. 北京: 科学出版社, 1982
- [47] Kouprianov V. Adv Space Res, 2008, 41: 1029
- [48] Boehnhardt H, Babion J, West RM. Astron.Astrophys, 1997, 320: 642
- [49] Montojo F J, Moratalla T L, Abad C. Adv Space Res, 2011, 47: 1043
- [50] Fruh C, Schildknecht T. Adv Space Res, 2012, 49: 594
- [51] Matheron G, Serra J. In:Proceedings of VIth International Symposium on Mathematical Morphology, 2002: 1
- [52] 刘海波, 沈晶, 郭算, 等. Visual C++ 数字图像处理技术详解. 北京: 机械工业出版社, 2010
- [53] Gonzalez RC, Woods RE. Digital Image Processing 2nd ed, 北京: 电子工业出版社, 2010
- [54] Bertin E, Arnouts S. A&AS, 1996, 117: 393
- [55] 丁月蓉. 天文数据处理. 南京: 南京大学出版社, 1998
- [56] Chiu L T G. AJ, 1977, 82: 842
- [57] Stone R C. AJ, 1989, 97: 1227
- [58] 李展, 彭青玉, 韩国强. 天文学报, 2009, 50:340
- [59] 赵铭. 天体测量学导论. 北京: 中国科学技术出版社, 2006
- [60] 夏一飞, 黄天衣. 球面天文学. 南京: 南京大学出版社, 1995
- [61] Groth E. AJ, 1986, 191: 1244
- [62] Kumar M, Mortari D, Junkins J. Acta Astronautica, 2010, 66: 508
- [63] 彭青玉, 涂兵. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 1126
- [64] Flohrer T, Schildknecht T, Musci R. Adv Space Res. 2008, 41: 1010
- [65] Irwin M J. MNRAS, 1985, 214: 575
- [66] Beard S M, MacGillivray H T. MNRAS, 1990, 247: 311
- [67] 平一鼎. 天文学报. 2008, 49: 321
- [68] Sun R Y, Zhao C Y, Zhang Y P. A method of separating blended images in space debris observation. Sci China Phys Mech Astron(accepted)
- [69] 孙荣煜, 赵长印, 平一鼎, 等. 天文学报, 2012, 53: 80
- [70] Abad C, Docobo J A, Lanchares V, et al. A&A, 2004, 416: 811



## Optical Survey Technique for Space Debris in GEO

SUN Rong-yu<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Chang-yin<sup>1,2</sup>

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In view of the special dynamical characteristics of geosynchronous orbits, the GEO ring is a unique environment for application. However, in this region there is no natural removal mechanism for space debris, which has been recognized as an increasing threat for space operations. Concerning the short detection distance of ground-based radar, ground-based optical survey is the major technique for observing space debris in GEO. The survey techniques for space debris observation are introduced in detail, including specialized hardware, survey strategy proposed and advanced image processing algorithm. Several algorithms are summarized for separating the blended images in optical space debris observation and removing the smear noise in images of camera without shutter, they all work effectively and robustly. Discussions are made in high order precision positioning methods for space debris, and furthermore the development of these methods is outlooked. For enriching the space debris situation in GEO, and protecting the security of active space operations, the technique for optical survey of space debris in GEO should be further studied.

**Key words:** space debris; geosynchronous orbit; optical survey; image processing