www.scichina.com

tech.scichina.com



4179 号小行星地基光学观测的天文定位研究

卢晓猛^{©©*}, 王建峰[®], 毛永娜[®], 王汇娟[®]

- ① 中国科学院光学天文重点实验室(国家天文台), 北京 100012;
- ② 中国科学院大学, 北京 100049
- * E-mail: lxm@nao.cas.cn

收稿日期: 2013-02-03; 接受日期: 2013-03-12 国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

摘要 在嫦娥二号卫星近距离观测 4179 号小行星的过程中,为确定小行星的精确运行轨道,使用地基光学望远镜对该小行星进行了观测.观测期间 4179 号小行星较暗(视星等为10.3~19.8 星等)且其运动速度与恒星不同,凝视观测小行星时背景恒星能量分布不符合理想的 PSF 轮廓,传统天文定位方法一般定位精度只能达到单轴 2".通过优化背景恒星质心计算方法,4179 号小行星的定位精度提高至优于单轴 1".

关键词 小行星 天文定位 数据处理

嫦娥二号卫星在完成绕月探测和日-地拉格朗日L2 点科学探测任务后,将对深空 4179 号小行星(Toutatis: 图塔蒂斯)进行近距离飞越探测.为保证飞越探测的成功实施,需要测定小行星的轨道,以计算其在飞越时刻的精确位置.小行星精确轨道的测定需要基于长期监测数据积累和高精度的天文定位方法实现. 2012 年 5~12 月,中国科学院国家天文台兴隆站 2.16和 0.5 m望远镜、紫金山天文台盱眙站 0.4 m和云南天文台丽江站 2.4 m望远镜等 3 个台站的 4台设备参与了 4179 号小行星观测任务,共获得 175 组高质量观测图像,为复核确认和自主确定小行星的高精度轨道提供了有效数据支持.

小行星的视亮度伴随太阳-小行星-地球三者的相对距离和角度发生变化.根据计算在 2012 年 5~12月,4179号小行星的 V 波段亮度从 19.8 星等增亮至10.3 星等,运动速度为-1.1~19.6"/min(赤经)和-0.27~8.2"/min(赤纬).为了获得足够高的信噪比(≥10)以提取小行星的精确位置,基于理论计算,使用兴隆 0.5 m望远镜进行观测时需要的曝光时间将随目标的逐渐

变亮而从1000 s逐渐减小至10 s量级. 小行星与恒星之间有一个相对运动速度, 因此当望远镜以小行星的速度进行跟踪观测时, 能保障在长时间曝光下小行星依然是一个点像, 但此时视场中背景恒星星像将不同程度拖长. 尤其在曝光时间超过百秒时, 背景恒星的拖长现象比较明显.

小行星位置的精确测量一直是一个难点. 小行星的天文定位研究历史悠久, 目前已有许多共享程序可以提供小行星的位置和轨道等信息, 并提供超过 100000 颗小行星的编目查询, 但是大部分程序都不能提供高精度的测量位置^[1]. 测量位置精度不高的主要原因是小行星和恒星相对观测者的运动速度不同, 因此跟踪观测小行星时, 小行星可被视作距离观测者无限远的点源, 经过大气层和光学系统衍射后在 CCD 靶面上成为面像, 星像能量分布符合点扩散函数(Point Spread Function, PSF)^[2]. 同时, 视场内背景恒星因与望远镜间存在相对运动而呈现拖长星像,一般图像处理方法无法准确拟合拖长星像位置^[3, 4]. 本文对传统天文定位方法进行了拓展并研发了相应

软件, 实现在监测过程中对 4179 号小行星的高精度 位置测量.

1 天文定位原理

现代天文定位方法最早由 John^[5]和 Jean^[6]提出, 经由 Chris^[7]和 Dustin 等人^[8]的发展形成, 其工作流程 一般分为以下几个步骤.

- 1) 建立实测星图: 提取 CCD 图像中星像的质心和仪器星等, 建立观测星图(图 1(a)).
- 2) 建立导星星图:根据望远镜转台的中心指向和光学系统参数、CCD相机参数,由星表数据建立导星星图(图 1(b)).星表中的参考星位置需要经过历元转换、光行差、大气折射等计算由平坐标转换为测站视坐标.
- 3) 星图匹配:使用星图匹配方法建立观测星图和导星星图的匹配关系,由匹配关系计算研究目标的空间位置.图 1 描述建立匹配关系后计算观测星图中编号 4 目标的位置.

星图匹配是实现高精度天文定位至关重要的一步,常用的星图匹配方法: 三角形匹配算法、匹配组算法和栅格算法等^[7-9]. 三角形算法因其结构简单、单一计算量小,是目前使用最广泛、工程领域应用最广的算法,但在全天识别或多星匹配时存在过多冗余和重复计算,使得计算量变大,同时该算法单独使用时易产生误匹配. 匹配组算法的优点是参与匹配的星数越多,特征维度和唯一性就越高,正确匹配的可能性就越大;缺点是对观测数据质量要求高,观测条件不好极易导致匹配失败. 栅格算法的优点是采用二值化搜索模式、算法速度非常快;缺点是易受图

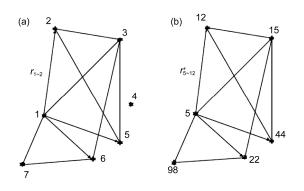


图 1 天文定位原理(a) 观测星图; (b) 导星星图

像中噪声的影响. 综合考虑以上 3 种方法的优缺点, 在对 4179 号小行星的天文定位方法实现中, 本文融 合三角形匹配算法和匹配组算法, 在保证匹配成功 率的前提下尽可能提高处理速度.

传统天文方法一般使用二维高斯轮廓拟合提取星像质心. 4179号小行星天文定位方法与传统天文定位方法最大的区别在于星像质心位置和流量的计算(图 2). 传统天文定位方法适用于在恒星能量分布符合 PSF 轮廓时,由已知恒星位置计算未知恒星位置.但在小行星观测中,由于小行星和恒星相对观测者的速度差异,小行星星像能量分布符合 PSF 轮廓,但恒星呈现拖长星像。本文提出的方法是根据拖长星像的能量分布建立数学模型,通过提高拖长星像的质心计算精度保证小行星的定位精度. 地基光学望远镜观测中,构成星像的像元和星像轮廓提取,以及质心计算受到多种噪声的影响[4],因此准确仿真和计算星像的流量是验证算法的关键.

2 算法验证

根据光学望远镜衍射定理和小行星的相对运动规律,假设恒星拖长星像的能量分布符合线型弥散的 PSF 函数,由此进行仿真实验以验证算法.

2.1 仿真星像

以下为拖长星像的流量计算公式:

$$f_{\tau}(x', y') = b(x', y')$$

$$+\frac{\Phi}{L}\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\int_{-L/2}^{+L/2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}\{(x'-l)^2+(y')^2\}\right] dl, (1)$$

其中 (x', y') 是 CCD 图像坐标; b(x', y') 是 CCD 图像采集的背景流量,包含 CCD 相机的本底和暗电流、天空背景等; $\boldsymbol{\phi}$ 是星像的测光流量; L 是星像拖尾长度,

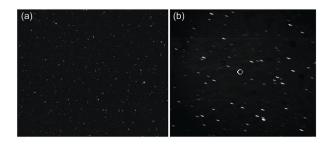


图 2 恒星观测和小行星观测的星像差异 (a) 恒星观测; (b) 小行星观测

由小行星与恒星的相对运动速度、曝光时间和 CCD 像元张角决定.

表 1 列出兴隆 0.5 m 望远镜的主要性能参数,以及 4179 小行星的主要观测参数.

本文首先依据表 1 中系统性能参数和(1)式生成 10000 颗仿真星像来验证拖长恒星星像质心计算精度.

仿真星像生成条件: 长度 10~50 pixels, 宽度 3~5 pixels, 拖尾方向与图像 X轴夹角-90~~+90~, 信噪比 5~50.

仿真星像生成公式:

$$f_{T}(x,y) = b(x,y)$$

$$+ \frac{\Phi}{L} \frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{((x-x_{0})\sin\theta + (y-y_{0})\cos\theta)^{2}}{2\sigma^{2}}\right]$$

$$\left(\operatorname{erf}\left[\frac{(x-x_{0})\cos\theta + (y-y_{0})\sin\theta + L/2}{\sqrt{2}\sigma}\right]\right)$$

$$-\operatorname{erf}\left[\frac{(x-x_{0})\cos\theta + (y-y_{0})\sin\theta - L/2}{\sqrt{2}\sigma}\right], \quad (2)$$

其中 $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{z} e^{-t^{2}} dt$ 为误差项; θ 是拖尾方向相对图像 X 轴的倾角.

2.2 对比验证

使用算法计算拖长星像的质心位置并统计其与理论质心位置的偏差,生成统计偏差与信噪比的关系图(图 3)和统计偏差与星像拖长度的关系图(图 4),以评估不同条件生成的拖长星像对定位结果的影响.

2.3 仿真结果

对仿真星像(图 5)进行算法验证可以得到以下 结论.

1) 定位误差随信噪比提高而降低. 当积分信噪

表 1 兴降 0.5 m 望远镜性能参数和观测参数

参数	数值
口径	0.5 m
焦比	F/8
CCD 像元数	1340×1300
CCD 像元尺寸	20 μm×20 μm
像元空间张角	1.03×1.03"/pixels
大气视宁度	2~3"
曝光时间	10~1800 s
背景恒星拖尾长度	5~50 pixels

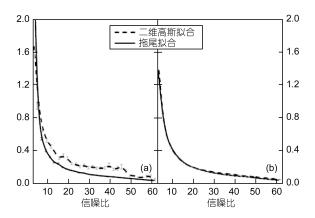


图 3 定位误差及不确定度随信噪比变化 (a) 纵坐标为定位误差; (b) 纵坐标为不确定度

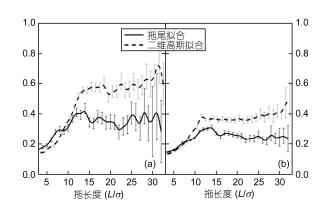


图 4 定位误差及不确定度随拖尾度的变化 (a) 纵坐标为定位误差; (b) 纵坐标为不确定度

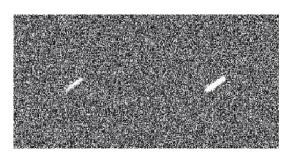


图 5 使用(2)式生成的仿真星像. 长度 30 pixels, 宽度 4 pixels, 信噪比 30, 60, 倾角 40°

比大于 20 时定位误差达到 0.2 pixels.

- 2) 若以表述星像的拖长度,则时可以采用高斯拟合计算星像质心,结果与拖尾法没有显著差异,时高斯或质心法计算质心误差快速增加.
- 3) 对星像拖长轮廓卷积后再计算质心, 比传统 方法计算精度能够提高 0.5~1 倍.

曝光起始时间	曝光时间 (s) -	精密星历 (°)		定位结果 (°)		误差 (")	
(h m s)		赤经	赤纬	赤经	赤纬	赤经	赤纬
11 48 59.315	900	290.5062	-22.5772	290.5064	-22.5771	-0.72	0.36
12 04 34.049	600	290.5030	-22.5777	290.5033	-22.5775	-1.08	0.72
12 14 34.377	600	290.5005	-22.5781	290.5004	-22.5780	0.36	0.36
12 24 34.690	600	290.4981	-22.5785	290.4979	-22.5785	0.72	0.00
12 35 16.096	600	290.4955	-22.5789	290.4950	-22.5790	1.80	-0.36
12 45 16.409	600	290.4930	-22.5793	290.4932	-22.5794	-0.72	-0.36
12 55 16.737	600	290.4906	-22.5796	290.4908	-22.5798	-0.72	-0.72
13 05 17.034	600	290.4882	-22.5800	290.4881	-22.5799	0.36	0.36
13 15 17.346	600	290.4857	-22.5804	290.4859	-22.5804	-0.72	0.00
13 25 17 659	600	290.4833	-22 5808	290.4830	-22 5808	1.08	0.00

表 2 4179 小行星 2012 年 9 月 4 日观测数据定位与精密星历

3 实测验证

以 2012 年 9 月 4 日观测数据进行验证, 赤经方向 (恒星拖长方向)误差为 0.3~1 pixels, 赤纬方向误差为 0.2~0.7 pixels. 使用星图匹配算法进行拟合得到 4179 小行星的定位结果, 与精密星历比对(表 2), 证实定位精度达到单轴 1", 比传统算法提高约 1 倍精度.

4 总结

小行星探测与研究是天文学中非常活跃的一个领域,嫦娥二号卫星在本次拓展任务就抵近观测了4179号小行星.但由于小行星一般体积较小、亮度相

对较暗,且与恒星视运动速度不同,传统小行星定位 算法无法精确计算背景参考恒星星像的质心位置, 因此不能得到高精度的定位结果.

本文分析了传统算法用于小行星天文定位的缺陷,依据背景参考恒星的能量分布特征建立了优化模型. 优化模型通过对构成恒星星像的能量积分的办法,提高星像质心的计算精度,并结合三角匹配算法和匹配组算法,获得了高精度的小行星天文定位结果. 仿真实验和实测数据证明, 优化模型相比传统方法能够提高 0.5~1 倍定位精度, 赤经和赤纬方向定位精度都优于 1". 本文结果与最新小行星高精度定位研究结果非常接近[10,11].

参考文献

- 1 Bowell E L G. Asteroid astrometry. ASP Conference Series, 2005, 338: 147
- 2 Rachel N, Caleb K, Justin M, et al. Multi-scale optics for enhanced light collection from a point source. Optics Letters, 2010, 35: 2460-2462
- 3 Peter V, Robert J, Larry D, et al. Improved asteroid astrometry and photometry with trail fitting. PASP, 2012, 124: 1197–1207
- 4 Mario C, Andrea M, Steven R. Error statistics of asteroid optical astrometric observations. Icarus, 2003, 166: 248-270
- 5 John L. History of astronomy. 1997, ISBN 0-8153-0322-X
- 6 Jean K. Fundamentals of astronomy. 2004, ISBN 0-521-64216-7
- 7 Chris H. New Algorithms for Automated Astrometry. Dissertation of Masteral Degree. Toronto: University of Toronto, 2004
- 8 Dustin L, David W, Keir M, et al. Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images. Astron J, 2010, 139: 1782
- 9 Zhao Z. Research of Star Preprocess and Matching Technology in Astronomical Navigation. Dissertation of Masteral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. 27–30
- James J. Development of an Observational Error Model, and Astrometric Masses of 28 Asteroids. Dissertation of Doctoral Degree. Townsville: James Cook University, 2010
- 11 Steven R, James B, David G. Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations. Icarus, 2010, 210: 158–181