

上海天文台 30 cm 旋转 CCD 漂移扫描望远镜的天体测量精度分析

于 涌, 毛银盾, 李 岩, 唐正宏

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘 要: 使用刚建成的上海天文台安吉天荒平观测站 30 cm 旋转 CCD 漂移扫描望远镜 (CCD 阵列大小为 $1528 \text{ pixel} \times 1528 \text{ pixel}$, 视场约为 $8.4^\circ \times 8.4^\circ$) 观测了 6 个天区 (露光时间为 1 s), 每个天区观测 2 次。基于这批观测资料分析该设备的天体测量精度, 结果表明: 利用“二维修正矩”方法计算星象位置, 噪声对星象位置的影响小于 0.1 pixel (约 $2''$), 最小可达 0.03 pixel (约 $0.6''$)。另一方面, 以高精度的 Hipparcos 星表为参考, 比较 4 种模型的归算结果得出: 该望远镜 CCD 观测的非线性特征明显, 归算时需要用到 3 阶 (20 参数) 模型, 此时 Hipparcos 星单次测量的位置精度为 $1.626''$ 。

关 键 词: 天体测量; CCD; 精度分析

中图分类号: P111.2, TN386.5

1 引 言

近年来, CCD 漂移扫描技术已广泛应用于恒星巡天和地球同步轨道目标的观测^[1-3]。在此基础上, 我们着手研制适用于监测低轨空间碎片的旋转 CCD 漂移扫描光电系统, 从而利用小口径望远镜实现观测低轨空间碎片的功能。不同于地球同步轨道目标, 低轨空间碎片的轨道处于各个方向, 且以不同的速度运动, 因此, 旋转 CCD 漂移扫描技术的观测原理是: 通过旋转相机使 CCD 芯片的列方向与目标的轨道面预报方向一致, 同时, 将预报的目标在 CCD 靶面上的移动速度强加给 CCD 电荷, 由此通过漂移扫描观测模式得到近圆形的目标像斑。与传统电视观测模式相比, 该观测模式可以增加目标的曝光时间, 显著提高信噪比, 提高目标的测量精度。另外, 在用漂移扫描模式观测空间碎片的前后, 短曝光观测背景恒星, 实现空间碎片相对于背景恒星的天文定位, 并借助精密的 GPS 时间系统, 为目标的定轨和编目提供基本观测数据。由上述原理可知, 空间碎片的天文定位精度主要取决于望远镜系统的星象测量精度和由背景恒星观测确定的 CCD 图像底片参数的精度。

目前, 我们研制出一套旋转 CCD 漂移扫描光电系统的试验设备, 望远镜口径为 30 cm, 视场约为 $8.4^\circ \times 8.4^\circ$, 该设备放置于上海天文台安吉天荒平观测站。为了获得理想的天文定位结果, 有必要对该设备的天体测量精度进行分析。本文第 2 章介绍本工作所用观测资料的信息, 第 3 章介绍观测资料的处理方法, 第 4 章和第 5 章分析了噪声对星象位置测量的影响和 CCD 图像的成像模式, 最后为结束语。

收稿日期: 2010-08-10; 修回日期: 2010-09-06

资助项目: 天文联合基金(10878022); 上海市空间导航与定位技术重点实验室 (06DZ22101)

2 观测资料信息

2010年5月2日晚,利用中国科学院上海天文台安吉天荒平观测站30cm旋转CCD漂移扫描望远镜观测了6个天区,观测天区中心的位置列于表1。每个天区观测2次,露光时间均为1s。望远镜的焦距为250mm,焦比约为0.83,CCD阵列大小为1528 pixel \times 1528 pixel,像素尺寸为0.024mm,视场约为 $8.4^\circ \times 8.4^\circ$ 。图1为一幅典型的CCD图像,星象的半高宽度($FWHM$)约为3 pixel,带圆圈的星象为从Hipparcos星表^[4]中证认到的参考星。

表1 6个观测天区中心的位置和参考星数目

天区号	赤经 (J2000) /h min s	赤纬 (J2000)/($^\circ$ ' ")	参考星数目
1	09 01 20.7	05 34 01	130
2	10 02 31.0	13 55 41	136
3	10 56 52.6	20 03 44	128
4	13 01 26.7	28 29 57	173
5	14 32 47.4	29 44 15	148
6	15 28 55.5	28 28 12	134

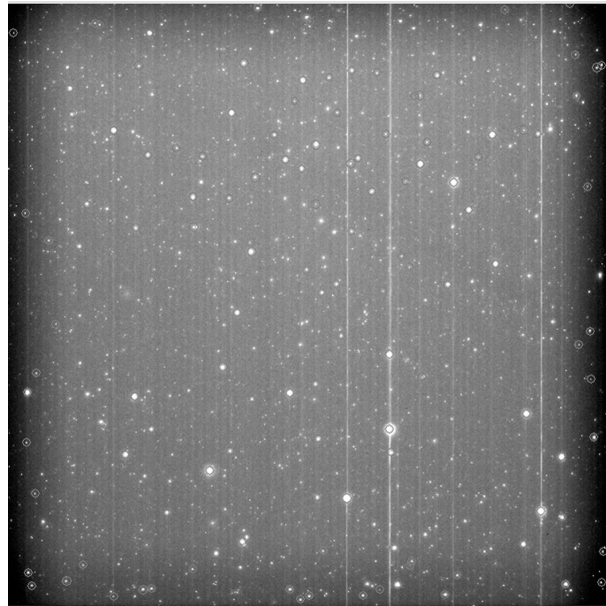


图1 CCD图像示例

3 观测资料处理

首先,利用经典“二维修正矩”方法^[5],提取CCD图像中星象的量度坐标和亮度。这里对每个星象,计算在各自的圆区域内进行,圆区域的半径取8 pixel(约 $2.5 FWHM$)。然后,利用我们独立开发的恒星匹配程序,证认CCD图像上的参考星,其过程为:

(1) 根据CCD图像视场中心的天球位置初值和误差,以及视场的大小,在Hipparcos星表中提取该天区范围内的恒星。按照星等值从小到大的顺序,选择前 n 颗恒星($n \geq 3$)组成

C_n^3 个三角形星座。每个星座作为一个弧长记录保存下来, 包括这 3 颗星的两两间弧长与它们的天球坐标和星等。

(2) 在 CCD 图像的提取结果中, 按照星象的亮度, 选择前 m 颗星象 ($m \geq 3$) 组成 C_m^3 个三角形星座。根据星象的量度坐标、CCD 的像素尺寸和望远镜的焦距, 计算每个三角形星座的弧长, 组成弧长序列。

(3) 逐一比较观测得到的弧长序列与由星表生成的弧长记录, 当三角形的三边弧长一致时, 认为匹配成功, 得到星象对应的天球坐标和星等。

(4) 利用初次匹配得到的参考星, 进行简单的底片参数模型归算, 计算出所有星象的天球坐标。再与 Hipparcos 星表比对, 以识别出更多的参考星。重复此过程, 直至参考星的数量稳定为止。表 1 中的第 4 列示出每个天区证认到的参考星数目。

4 噪声对星象位置测量的影响

我们对同一天区连续观测 2 次, 通过 2 幅图像的共同星, 利用 3 阶多项式拟合消除这 2 幅图像之间的像场平移和较差畸变。之后, 对于每颗共同星, 计算出其 2 组量度坐标的平均值和相应的标准偏差, 标准偏差表征星象位置的重复性, 它反映了噪声对星象位置测量的影响。图 2 绘出标准偏差随亮度的变化情况, 其中横坐标为“以 10 为底的亮度对数”。由于“二维修正矩”方法是以像素的强度为权作位置平均, 相比较而言, 噪声对于亮星的影响小于暗星, 因此, 随着亮度的增加, 星象位置的重复性总体呈现变好的趋势, 最好可达 0.03 pixel 左右 (均值); 当亮度超过 10^4 时, 星象出现电荷溢出, 噪声的影响又相应增大, 此时星象越亮, 饱和区域越容易发生变化, 星象位置的重复性越差。

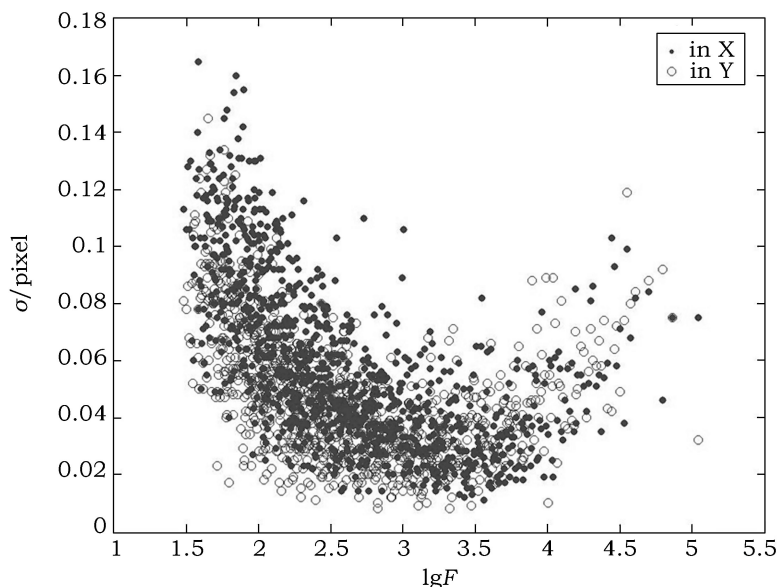


图 2 由 2 组量度坐标计算出的标准偏差随亮度的变化, 其中每个点代表 5 颗星的平均结果

5 CCD 图像的归算模型和精度分析

通常, 低轨空间碎片的初轨精度不高, 为了使目标落于视场, 要求旋转 CCD 漂移扫描

望远镜的视场设计较大。大视场的成像很可能具有较突出的非线性特征。非线性产生主要有两方面原因：一是天文因素，即由较差大气折射和较差光行差引起的星座形变，这些因素可根据台站的地方参数和观测时刻精确计算出来；二是仪器设备本身的因素，即望远镜成像的系统性畸变、CCD 靶面的倾斜和 CCD 量度坐标系本身的系统误差等，这些因素交织在一起，影响成为 CCD 图像的最终成像模式。我们需要通过实测资料的检验，确定 CCD 图像的最佳归算模型。具体做法为：借助于高精度的天体测量星表，按照常规天体测量标准程序，将参考星由星表位置计算至观测方向；根据“心射投影”规则，计算得到参考星的理想坐标 (ξ, η) ；考察在不同底片模型下，参考星残差的中误差结果和残差的分布，选取参数最少、中误差最小且残差分布随机的模型为最佳归算模型。这相当于采用实际的恒星框架标定 CCD 量度坐标系的坐标尺度和非线性模式。

我们以 Hipparcos 星表作为参考星表，保证每幅 CCD 图像上有足够的参考星(平均 140 颗)。Hipparcos 星表的位置精度好于 1 mas，自行精度好于 1 mas/a。表 2 列出常见的 1—4 阶 (6—30 参数) 模型。表 3 列出在各阶模型下，每幅 CCD 图像上参考星残差的中误差结果。可见，采用 3 阶 (20 参数) 模型归算得到的中误差与更高阶模型的结果一致。图 3 和图 4 分别示出采用 2 阶 (12 参数) 和 3 阶 (20 参数) 模型归算时，这批观测资料全部参考星残差在 CCD 图像上的分布。当采用 2 阶 (12 参数) 模型时，参考星的残差存在系统性的旋转畸变，当采用 3 阶 (20 参数) 模型时，残差分布的随机性较好，表明对于该望远镜的观测，3 阶 (20 参数) 模型最佳，它可以较准确描述 CCD 图像的成像模式，此时 Hipparcos 星单次测量的位置精度达 1.626''。

表 2 4 种底片参数模型

底片参数模型	模型 阶数	参数 数目
$\xi = ax + by + c$ $\eta = a'x + b'y + c'$	1	6
$\xi = ax + by + c + dx^2 + exy + fy^2$ $\eta = a'x + b'y + c' + d'x^2 + e'xy + f'y^2$	2	12
$\xi = ax + by + c + dx^2 + exy + fy^2 + gx^3 + hx^2y + ixy^2 + jy^3$ $\eta = a'x + b'y + c' + d'x^2 + e'xy + f'y^2 + g'x^3 + h'x^2y + i'xy^2 + j'y^3$	3	20
$\xi = ax + by + c + dx^2 + exy + fy^2 + gx^3 + hx^2y + ixy^2 + jy^3 + kx^4 + lx^3y + mx^2y^2 + nxy^3 + oy^4$ $\eta = a'x + b'y + c' + d'x^2 + e'xy + f'y^2 + g'x^3 + h'x^2y + i'xy^2 + j'y^3 + k'x^4 + l'x^3y + m'x^2y^2 + n'xy^3 + o'y^4$	4	30

6 结束语

使用刚建成的上海天文台安吉天荒平观测站 30 cm 旋转 CCD 漂移扫描望远镜观测了 6 个天区，露光时间为 1 s，每个天区观测 2 次。该望远镜的焦距为 250 mm，CCD 阵列大小为 1528 pixel \times 1528 pixel，视场约为 8.4° \times 8.4°。采用“二维修正矩”方法计算得到 CCD 图像中的星象位置。基于这批观测资料，对该设备的天体测量精度进行分析，结果表明：噪声对星象位置测量的影响小于 0.1 pixel (约 2'')，最小可达 0.03 pixel (约 0.6'')。此外，以高精度的

表 3 各阶模型归算时参考星残差的均方差

天区 序号	观测 次数	均方差 l''			
		1 阶模型	2 阶模型	3 阶模型	4 阶模型
1	1	9.690	6.169	1.254	1.077
	2	9.884	6.098	1.422	1.241
2	1	9.658	5.124	1.424	1.473
	2	9.119	5.916	1.589	1.600
3	1	9.206	5.205	1.853	1.811
	2	9.172	5.386	1.819	1.873
4	1	9.449	5.525	1.725	1.751
	2	9.443	5.693	1.737	1.549
5	1	9.952	5.472	1.813	1.800
	2	9.981	4.680	1.991	2.189
6	1	8.685	6.671	1.459	1.654
	2	8.450	5.699	1.421	1.495
平均值及其均方差		9.391 ± 0.141	5.637 ± 0.154	1.626 ± 0.066	1.626 ± 0.085

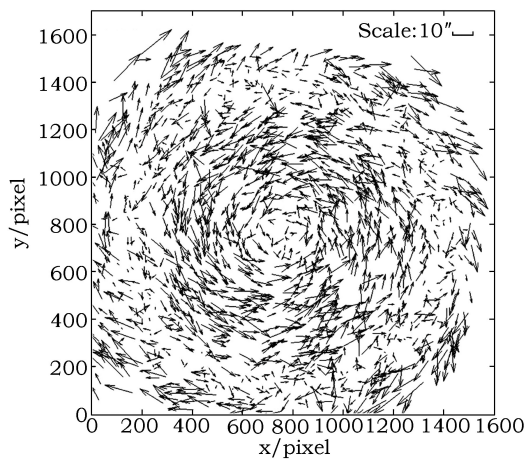


图 3 采用 2 阶模型归算时，参考星残差在视场上的分布，“Scale”为箭头长度的示例

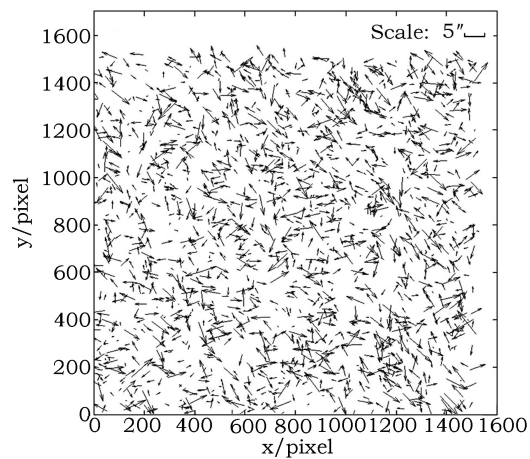


图 4 采用 3 阶模型归算时，参考星残差在视场上的分布，“Scale”为箭头长度的示例

Hipparcos 星表作为参考，比较 4 种模型的归算结果得出：该望远镜 CCD 观测的非线性特征明显，即在底片参数模型中，星象量度坐标 (x, y) 对理想坐标 (ξ, η) 的影响达 3 次方项，考虑 3 阶 (20 参数) 底片模型后，Hipparcos 星单次测量的位置精度达 $1.626''$ 。本项工作为后续利用该设备做低轨空间碎片的定位观测提供了有价值的参考依据。

参考文献：

[1] Stone R C, Pier J R, Monet D G. AJ, 1999, 118: 2448
 [2] Evans D W, Irwin M J, Helmer L. A&A, 2002, 395: 347
 [3] 毛银盾, 唐正宏, 陶隽. 天文学报, 2007, 48(4): 475
 [4] Perryman M A C, Lindegren L, Kovalevsky J *et al.* A&A, 1997, 323: 49

[5] 冒蔚, 季凯帆, 李彬华. CCD天体测量学. 昆明: 云南科技出版社2003: 62

Astrometric Performance of the 30 cm CCD-rotating drift-scan Telescope of Shanghai Astronomical Observatory

YU Yong, MAO Yin-dun, LI Yan, TANG Zheng-hong

(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

Abstract: The CCD images of 6 regions are taken twice using the newly-built 30 cm CCD-rotating drift-scan telescope at the Tian Huangping station of the Anji county of Shanghai Astronomical Observatory (the CCD FOV is $8.4^\circ \times 8.4^\circ$ with $1528 \text{ pixel} \times 1528 \text{ pixel}$ and the exposure time is 1 s). Astrometric performance of the telescope is analyzed by this group of CCD observations. The results show that the impact of noise on the positions of star image obtained by “2-D Moment” method is better than 0.1 pixel ($\sim 2''$), and preferably up to 0.03 pixel ($\sim 0.6''$). On the other hand, the Hipparcos catalog is taken as reference and the reduction is performed with different plate models, the results show that the CCD images suffer from complicated distortions, and a 3-order plate model is recommended. Accordingly, the positional measurement accuracy of Hipparcos stars can be derived as well as $1.626''$.

Key words: astrometry; CCD; precision analysis