

天王星5颗主要卫星CCD定位观测试验*

谢华娇^{1,2} 彭青玉^{1,2†} 王 娜^{1,2} 马 帅^{1,2}

(1 暨南大学信息科学技术学院计算机科学系 广州 510632)

(2 暨南大学中法天体测量、动力学与空间科学联合实验室 广州 510632)

摘要 使用云南天文台1 m望远镜连续4个夜晚观测得到的248幅CCD图像对天王星5颗主要卫星(Ariel、Umbriel、Titania、Oberon和Miranda)进行了精确的位置测量. 在位置归算过程中, 采用了最新发布的Gaia DR1 (Data Release 1)作为参考星表, 并将卫星的观测值和理论计算值作比较. 卫星的理论位置参考JPL (Jet Propulsion Laboratory)历表(其中天王星理论位置参考了DE431行星历表). 结果显示: 5颗卫星在赤经和赤纬方向的 $O - C$ 平均值(观测值-理论值)均不超过 $0.027''$ (天卫一Ariel: $0.027''$ 和 $-0.007''$; 天卫二Umbriel: $0.024''$ 和 $-0.003''$; 天卫三Titania: $0.021''$ 和 $0.020''$; 天卫四Oberon: $0.024''$ 和 $-0.001''$; 天卫五Miranda: $0.021''$ 和 $0.001''$). 前4颗卫星两个方向的测量精度均好于 $0.015''$, Miranda的精度可达到 $0.030''$.

关键词 天体测量学, 技术: 图像处理, 行星与卫星: 个别: Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, Miranda

中图分类号: P129; **文献标识码:** A

1 引言

太阳系包括太阳, 4颗类地行星(水星、金星、地球和火星), 小行星带, 4颗气体的巨行星(木星、土星、天王星和海王星)以及柯伊伯带等, 其中火星、木星、土星、天王星和海王星也被称为(地)外行星. 外行星及其卫星的高精度轨道理论对于研究太阳系的形成、演化以及规划和支持未来的空间任务, 显得尤为重要. 天体测量对于行星卫星动力学模型的改善与研究起着关键的作用. 从20世纪开始采用的传统照相底片技术到后来日趋稳健的CCD技术, 对天王星5颗主要卫星(Ariel、Umbriel、Titania、Oberon和Miranda)的观测研究, 一直都在持续中. 例如, 国外主要有Veiga等^[1-4]、Stone^[5]、Camargo等^[6]以及Ershova等^[7]分别对5颗天王星的主要卫星采用不同技术、各种方法来研究. 具体地, Veiga等^[1-4]为了去除卫星周围由主星所带来晕的影响, 假定晕是关于过天王星中心的 x 轴或 y 轴对称, 采用对称像素点灰度值相减的处理

2017-07-27收到原稿, 2017-09-13收到修改稿

*国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金项目(U1431227、11703008)和中央高校基本科研业务费专项资助

[†] tpengqy@jnu.edu.cn

方式; Stone^[5]使用FASTT (Flagstaff Astrometric Scanning Transit Telescope)对天王星及其卫星进行了持续多年的观测, 1995—2000年期间的结果表明: 天王星赤经、赤纬方向的平均残差分别为 $0.016''$ 和 $-0.006''$, 标准差分别为 $0.14''$ 和 $0.20''$. 对于天卫三(Titania)来说, 相对应的平均值为 $-0.105''$ 和 $-0.079''$, 标准差为 $0.16''$ 和 $0.15''$. 而天卫四(Oberon)的平均值分别为 $-0.128''$ 和 $-0.072''$, 标准差两个方向均为 $0.13''$. 国内主要有Qiao等^[8]于1995—2007年对天王星主要卫星的CCD图像进行处理与位置测量. 他们借助了ASTROMETRICA软件测量了天王星及其卫星的位置以及完成后续的数据归算, 观测精度得到不断的改善与提升. 明显地, 天王星第5颗卫星(Miranda)的测量精度总是比其他卫星的精度低. 这是由于Miranda往往距离天王星较近及其星等与主星差异较大, 会受到天王星散射光的严重影响. 在前人工作的基础上^[9], 本文进一步对去晕后天卫五适用多项式阶数模拟背景梯度的情况进行了试验.

2 观测资料

本文采用的CCD图像是2016年11月20日至23日4晚在云南天文台(经度 $E102^{\circ}47'18''$, 纬度 $N25^{\circ}01'32''$, 海拔高度2000 m)用1 m望远镜观测获得, 观测过程中使用了I型滤光片. 望远镜及CCD探测器更详尽的信息见表1.

表 1 望远镜和CCD探测器
Table 1 Specifications of the telescope and CCD detector

Parameter	Value
Approximate focal length	1330 cm
F-Ratio	13
Diameter of primary mirror	100 cm
CCD field of view	$7.1' \times 7.1'$
Size of pixel	$13.5 \mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$
Size of CCD array	2048×2048 pixel
Approximate angular extent per pixel	$0.209''$

经过连续4晚的观测, 共得到248幅CCD图像(表2), 其中11月22日天卫五(Miranda)距离天王星太近, 部分图像中无法辨别.

3 天体测量归算

在对天王星主要卫星进行位置测量归算过程中, 参考星表的选择非常重要, 它会直接影响到卫星位置测量的精度. 我们选择了欧洲空间局最新释放的Gaia DR1 (Data Release 1)^[10–11]作为参考星表, 这个星表可用的恒星数量巨大且在恒星星表数据精度上有了很大的提高^[12]. 天王星卫星的理论位置采用美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的历表(<https://ssd.jpl.nasa.gov/>). 为了与其他历表相比较, 我们也采用了法国巴黎天文台天体力学与历表计算研究所(IMCCE)的历表(<http://www.imcce.fr/>), 天王星历表统一使用DE431.

表 2 观测资料分布
Table 2 Distributions of observations

Date	Total No.	Ariel No.	Umbriel No.	Titania No.	Oberon No.	Miranda No.	Filter
2016-11-20	21	21	21	21	21	21	I
2016-11-21	75	75	75	75	75	75	I
2016-11-22	77	77	77	77	77	10	I
2016-11-23	75	75	75	75	75	75	I
Total	248	248	248	248	248	181	I

观测资料的归算采用文献[13]中的归算过程. 主要步骤如下:

(1)对每幅CCD图像中的天王星卫星及其周围参考恒星使用二维高斯函数进行拟合得到量度坐标(Miranda除外), 具体的测量方法见文献[14]. 本文采用的恒星参考星表为Gaia DR1.

Miranda靠近天王星, 受到的主星光晕影响较大, 因此对Miranda首先进行去晕处理, 以去除天王星光晕所造成的背景梯度的影响; 再分别用带有1-3阶多项式为背景的高斯函数拟合其中心. 去晕过程参考了文献[15]的方法: 首先用圆方程拟合天王星周围未饱和和光晕部分, 得到粗略的天王星中心. 由于得到的中心像素点往往是个非整数, 其周围一个整数像素点关于其对称得到的像素点通常也是一个非整数像素点, 因此对非整数像素点(得到的对称点)的四邻像素点进行双线性插值得到对称像素点的灰度值.

图1展示了Miranda去晕前后对应的图像以及过Miranda中心的纵向线上的光度分布图, 其中, 左侧两子图是Miranda去晕前的图像和光度分布; 右侧两子图是去晕后Miranda的图像和光度分布. Miranda的位置在CCD中用箭头指示. 从图中可以看出, 天卫五(Miranda)距离主星很近, 受到了天王星光晕的严重影响, 导致其去晕前灰度分布剖面图近主星一侧出现明显不同于另一侧的背景梯度. 去晕处理之后, 天卫五周围的主星光晕明显减弱. 去晕后对应的光度分布也说明了这点, 其原本近主星一侧的高背景梯度已经平缓了许多.

(2)利用参考星的量度坐标和计算得到的站心视位置(考虑到大气折射的影响), 通过四常数模型便可求解出每一幅图像的底片常数.

(3)在天体观测过程中, 望远镜的光学成像系统常存在几何扭曲, 导致星像位置测量中存在几何扭曲的误差. 因此在求解底片常数之前, 需要对星像的量度坐标进行几何扭曲的改正, 具体方法可参考文献[13]和文献[16-17].

(4)得到底片常数后, 计算目标星的观测位置, 并与历表比较得到残差 $O - C$ (观测值-理论值). 本文采用的历表是JPL历表, 为了便于比较, 同时也采用了IMCCE的Emelyanov和Nikonchuk于2013年发表的卫星历表(下文简称E13)^[18]以及Lainey于2015年发表的卫星历表(下文简称L15)进行了试验, 其中天王星的理论位置采用DE431.

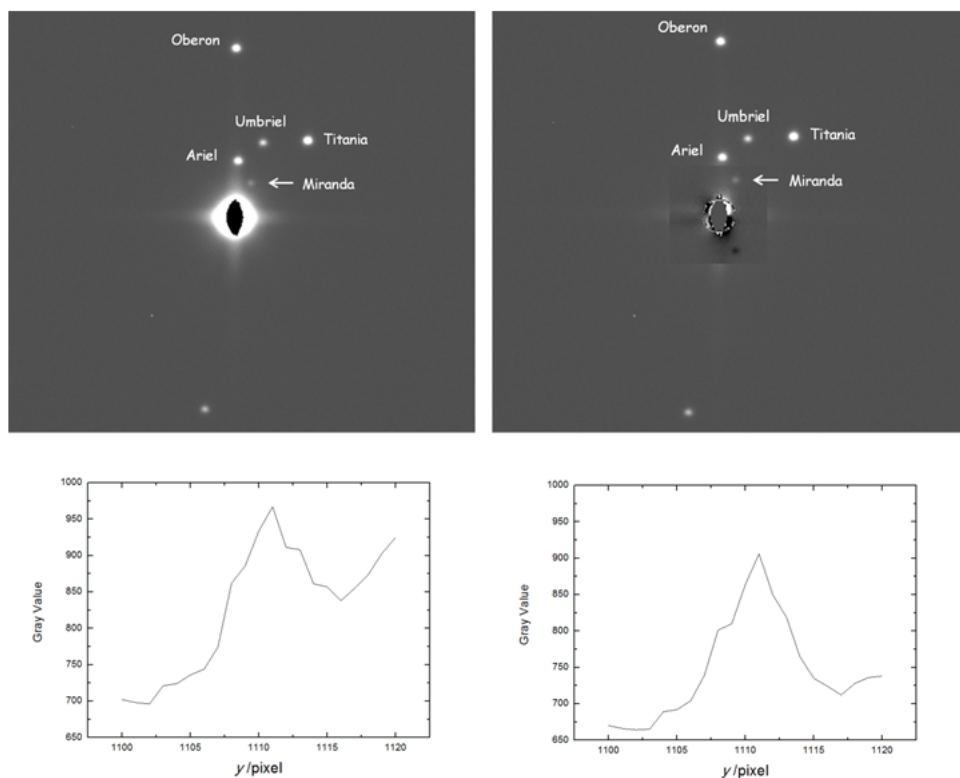


图 1 Miranda 去晕前(左)、后(右)图像和光度分布

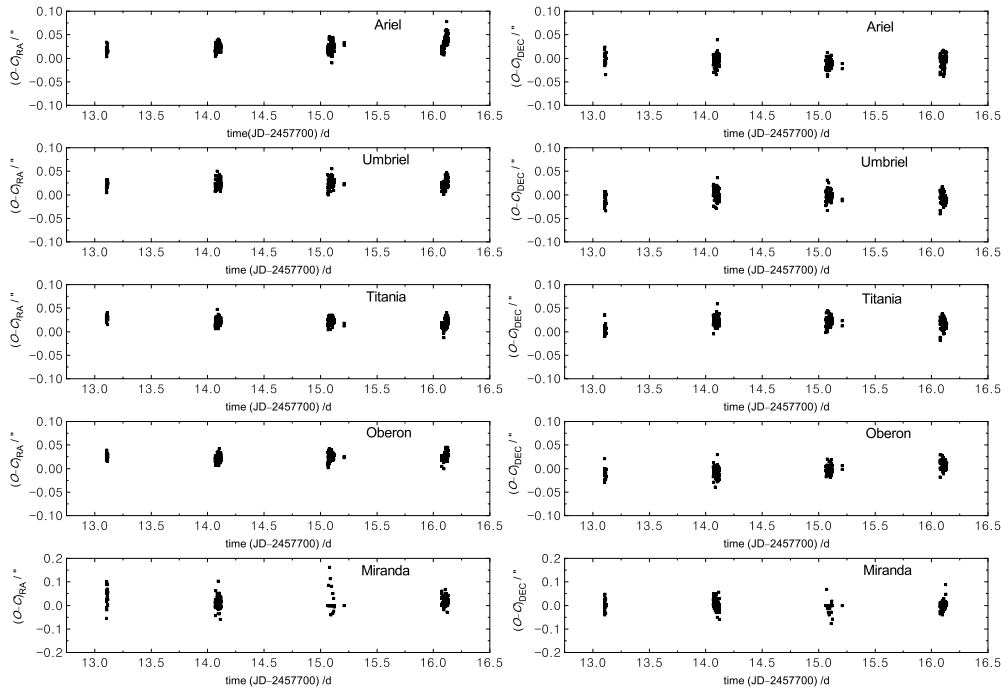
Fig. 1 Images and intensity distributions of Miranda before (left) and after (right) halo removal

4 结果与分析

图2给出了采用Gaia DR1和JPL得到的天王星5颗主要卫星赤经和赤纬方向 $O-C$ 残差随时间的分布情况. 此处给出Miranda的结果是去晕后用带有3阶多项式背景的高斯函数拟合中心得到的.

表3给出了5颗卫星对应 $O-C$ 残差的统计结果, 表中赤经和赤纬方向的 $O-C$ 平均值分别为 $\langle O-C \rangle_{RA}$ 和 $\langle O-C \rangle_{DEC}$, 赤经和赤纬方向的 $O-C$ 标准差分别为 SD_{RA} 和 SD_{DEC} . 我们可以看到, 无论哪颗卫星, 赤经方向上在这4个晚上所得到残差 $O-C$ 的平均值都几乎处于持平状态, 具有较好的一致性; 而赤纬方向上虽然稍显逊色, 但整体误差范围约在 $0.02''$ 内. 赤经方向 $O-C$ 的平均值可能主要来自天王星理论误差, 当然我们还需进一步证实. 同时可以观察到前4颗卫星单个晚上残差 $O-C$ 的标准差均在 $0.01''$ 左右. 对于天卫五Miranda来说, 存在前文提及过的某段观测期间过于邻近主星以及受到主星光晕影响等情况, 导致其赤经赤纬方向的一些残差值偏大. Miranda赤经赤纬方向残差的标准差约是其余4颗卫星的2-3倍.

前4颗卫星赤经赤纬方向测量结果的 $O-C$ 平均值好于 $0.03''$, 标准差好于 $0.02''$. 天卫五两个方向的测量精度均能达到 $0.03''$, $O-C$ 平均值好于 $0.025''$.

图2 Ariel、Umbriel、Titania、Oberon和Miranda $O - C$ 残差随时间的分布Fig. 2 Distributions of $O - C$ residuals of Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, and Miranda表3 5颗卫星 $O - C$ 残差统计Table 3 Statistics of $O - C$ residuals for five satellites

Object	$\langle O - C \rangle_{RA}/''$	$SD_{RA}/''$	$\langle O - C \rangle_{DEC}/''$	$SD_{DEC}/''$
Ariel	0.027	0.013	-0.007	0.012
Umbriel	0.024	0.009	-0.003	0.012
Titania	0.021	0.008	0.020	0.011
Oberon	0.024	0.008	-0.001	0.012
Miranda	0.021	0.030	0.001	0.022

学者们对如何去除天卫五受到主星光晕影响的研究较多, 但是对去晕处理后应该用带有几阶多项式背景的高斯函数进行定心测量的情况却没有明确的说明. 在文献[9]的基础上, 我们分别用带有1、2、3阶多项式的高斯函数模拟去晕后Miranda的星像分布. 图3显示了去晕后对Miranda采用不同阶数多项式进行定心测量、归算后得到的赤经赤纬方向上的残差结果分布. 上面1行是不同阶数赤经方向的 $O - C$ 残差分布图, 下面1行是赤纬方向的 $O - C$ 残差分布图(卫星历表选择JPL历表). 表4给出了不同阶数下 $O - C$ 的统计值. 对Miranda去晕后选择1阶、2阶或者3阶拟合得到的结果是: 不同方法之间 $O - C$ 平均值的最大偏差在 $0.005''$ 内, 弥散的最大偏差在 $0.002''$ 内. 3阶拟合得到的Miranda结果与前4颗卫星的结果具有较好的一致性, 反映出观测到的 $O - C$ 的平均值在赤经方向主要源于行星理论的误差(也参考表3). 因此对Miranda去晕处理后, 采用带

有三阶多项式为背景梯度的高斯函数进行定心测量便可获得不错的精度.

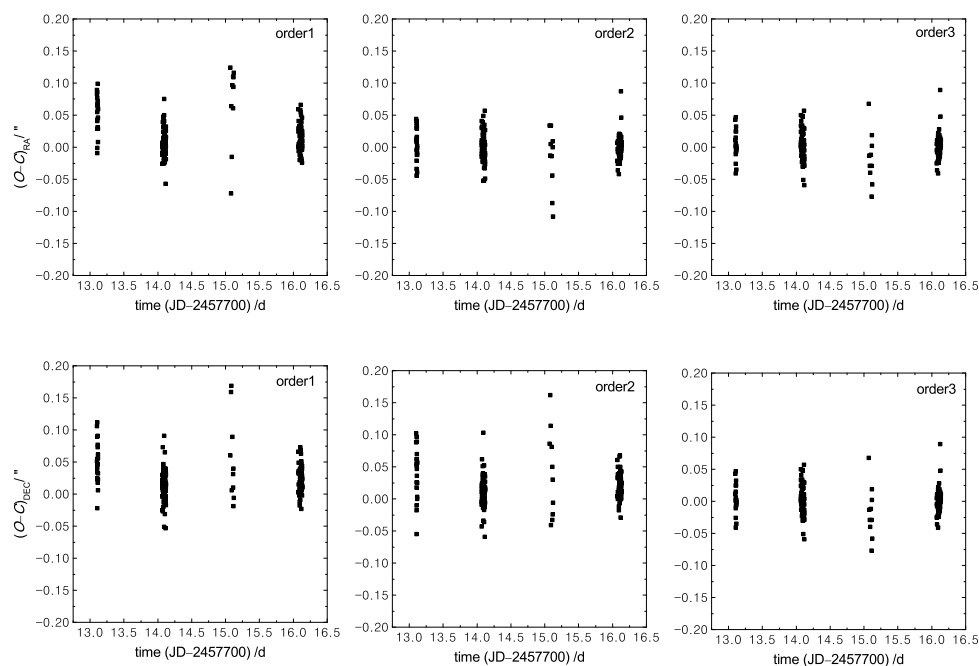


图 3 不同阶数下 $O - C$ 残差随时间分布

Fig. 3 Distribution of $O - C$ residuals with respect to observational epochs for different orders

表 4 不同阶数下 $O - C$ 的统计结果

Table 4 Statistics of $O - C$ residuals for different orders

Orders	$\langle O - C \rangle_{\text{RA}} / ''$	$\text{SD}_{\text{RA}} / ''$	$\langle O - C \rangle_{\text{DEC}} / ''$	$\text{SD}_{\text{DEC}} / ''$
order1	0.018	0.031	0.004	0.024
order2	0.023	0.030	-0.000	0.023
order3	0.021	0.030	0.001	0.022

最后, 为了比较不同卫星历表对位置测量精度的影响, 除了JPL历表以外, 我们还采用了IMCCE的E13和L15历表. 表5给出了5颗卫星分别在3个历表下对应的 $O - C$ 残差统计结果. 从表中可以看出: 总体上, 我们的观测资料与JPL理论预测值符合得最好. E13和L15相比, 不同卫星、不同方向上呈现出不一样的精度结果. 对于Umbriel和Oberon, 两个历表的精度差不多; E13理论的精度结果对于Ariel来说好于L15, 而对于Titania而言却刚好相反; 对于Miranda来说, E13和L15历表则出现赤经、赤纬不同方向精度偏向不一致的差异.

表 5 不同历表下 $O - C$ 残差的统计结果
Table 5 Statistics of $O - C$ residuals for different ephemerides

Object	Ephemeris	$\langle O - C \rangle_{\text{RA}} / ''$	$\text{SD}_{\text{RA}} / ''$	$\langle O - C \rangle_{\text{DEC}} / ''$	$\text{SD}_{\text{DEC}} / ''$
Ariel	JPL	0.027	0.013	-0.007	0.012
	L15	0.030	0.020	-0.011	0.020
	E13	0.021	0.017	-0.009	0.012
Umbriel	JPL	0.024	0.009	-0.003	0.012
	L15	0.023	0.011	-0.002	0.013
	E13	0.020	0.013	0.018	0.012
Titania	JPL	0.021	0.008	0.020	0.011
	L15	0.019	0.008	0.004	0.010
	E13	0.031	0.012	0.024	0.012
Oberon	JPL	0.024	0.008	-0.001	0.012
	L15	0.028	0.008	0.001	0.011
	E13	0.027	0.008	0.007	0.012
Miranda	JPL	0.021	0.030	0.001	0.022
	L15	0.014	0.032	0.012	0.031
	E13	0.020	0.044	-0.002	0.024

表6列出了我们的观测结果与国际上同类型观测数据的比较, 其中 $O - C$ 平均值与标准差的值单位为 $''$. 可以看出: 总体而言, 本文的观测具有较小的 $O - C$ 平均值和更小的弥散. 虽然仅凭借4 d短期的观测资料很难与其他学者长期大量的测量结果进行全方位的比较, 但是这对本项目组今后开展天王星5颗主要卫星的高精度天体位置测量具有参考意义.

5 结论

本文对天王星5颗主要卫星共计248幅CCD图像进行了处理和位置测量归算, 重点对天卫五的去晕处理结果以及采用Gaia DR1星表和不同卫星星表的结果进行了分析. 在3个卫星历表JPL、E13和L15中, 总体而言, JPL与测量位置符合得最好.

表 6 与同类型观测资料的比较
Table 6 Comparisons with other observations

Object	Reference	Image No.	$\langle O - C \rangle_{\text{RA}} / ''$	$\text{SD}_{\text{RA}} / ''$	$\langle O - C \rangle_{\text{DEC}} / ''$	$\text{SD}_{\text{DEC}} / ''$
Ariel	[4]	1754	-0.096	0.140	-0.006	0.153
	[8]	269	-0.030	0.090	0.000	0.130
	[7]	80	0.043	0.110	-0.074	0.110
	This work	248	0.027	0.013	-0.007	0.012
Umbriel	[4]	1746	-0.090	0.146	-0.011	0.145
	[8]	389	-0.020	0.090	0.040	0.120
	[7]	255	0.025	0.090	-0.069	0.110
	This work	248	0.024	0.009	-0.003	0.012
Titania	[4]	1726	-0.088	0.151	-0.008	0.153
	[8]	673	-0.010	0.080	0.000	0.090
	[7]	523	-0.009	0.030	-0.014	0.030
	This work	248	0.021	0.008	0.020	0.011
Oberon	[4]	1714	-0.088	0.164	-0.030	0.150
	[8]	835	-0.020	0.080	0.020	0.090
	[7]	578	-0.001	0.030	-0.019	0.040
	This work	248	0.024	0.008	-0.001	0.012
Miranda	[4]	1452	-0.080	0.156	0.006	0.161
	[8]	15	-0.080	0.100	0.310	0.090
	[7]	—	—	—	—	—
	This work	181	0.021	0.030	0.001	0.022

采用JPL历表得到的结果如下: 5颗卫星赤经赤纬方向 $O - C$ 的平均值均不超过 $0.027''$ (Ariel: $0.027''$ 和 $-0.007''$; Umbriel: $0.024''$ 和 $-0.003''$; Titania: $0.021''$ 和 $0.020''$; Oberon: $0.024''$ 和 $-0.001''$; Miranda: $0.021''$ 和 $0.001''$). 对于前4颗卫星来说, 位置测量的精度好于 $0.015''$; 对于Miranda来说, 精度可以达到 $0.030''$. 本文实验为日后天王星主要卫星的高精度位置测量提供了有益的参考.

致谢 感谢中国科学院云南天文台1米望远镜运行组全体成员的帮助和支持.

参考文献

- [1] Veiga C H, Vieira Martins R. A&AS, 1994, 107: 559
- [2] Veiga C H, Vieira Martins R. A&AS, 1995, 113: 557
- [3] Veiga C H, Vieira Martins R. A&AS, 1999, 138: 247
- [4] Veiga C H, Vieira Martins R, Andrei A H. AJ, 2003, 125: 2714
- [5] Stone R C. AJ, 2001, 122: 2723
- [6] Camargo J I B, Magalhães F P, Vieira-Martins R, et al. A&A, 2015, 582: A8
- [7] Ershova A P, Roshchina E A, Izmailov I S. P&SS, 2016, 134: 96
- [8] Qiao R C, Cheng X, Dourneau G, et al. MNRAS, 2013, 428: 2755
- [9] 马帅. 天王星暗弱卫星高精度位置测量. 广州: 暨南大学, 2017
- [10] Prusti T, de Bruijne J H J, Brown A G A, et al. A&A, 2016, 595: A1
- [11] Brown A G A, Vallenari A, Prusti T, et al. A&A, 2016, 595: A2
- [12] Lindegren L, Lammers U, Bastian U, et al. A&A, 2016, 595: A4
- [13] Peng Q Y, Vienne A, Zhang Q F, et al. AJ, 2012, 144: 170
- [14] 李展, 彭青玉, 韩国强. 天文学报, 2009, 50: 340
- [15] Peng Q Y. MNRAS, 2005, 359: 1597
- [16] Wang N, Peng Q Y, Peng H W, et al. MNRAS, 2017, 468: 1415
- [17] Peng H W, Peng Q Y, Wang N. MNRAS, 2017, 467: 2266
- [18] Emelyanov N V, Nikonchuk D V. MNRAS, 2013, 436: 3668

Experimental CCD Positional Observations of the Five Major Uranian Satellites

XIE Hua-jiao^{1,2} PENG Qing-yu^{1,2} WANG Na^{1,2} MA Shuai^{1,2}

(1 Department of Computer Science, College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632)

(2 Sino-French Joint Laboratory for Astrometry, Dynamics and Space Science, Jinan University, Guangzhou 510632)

ABSTRACT Two hundred and forty-eight CCD frames, observed by using 1 m telescope at Yunnan Observatories for four consecutive nights, have been reduced to derive the precise positions of the five Uranian major satellites (Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, and Miranda). The positions of satellites are measured with respect to the stars in Gaia DR1 (Data Release 1), a newly published star catalogue. Then we make a comparison between the observed and theoretical positions of the satellites. The theoretical positions of the satellites are retrieved from JPL (Jet Propulsion Laboratory) ephemeris (while the position of Uranus is obtained from DE431). Our results show that the mean values of $(O - C)$ (observed values minus calculational values) do not exceed $0.027''$ in both right ascension and declination for the five satellites (Ariel: $0.027''$ and $-0.007''$; Umbriel: $0.024''$ and $-0.003''$; Titania: $0.021''$ and $0.020''$; Oberon: $0.024''$ and $-0.001''$; Miranda: $0.021''$ and $0.001''$). The dispersion in each direction is better than $0.015''$ for the first four Uranian satellites, and $0.030''$ for Miranda.

Key words astrometry, techniques: image processing, planets and satellites: individual: Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, Miranda