

天然卫星 CCD 精确定位的最新进展

彭 青 玉

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

摘 要

天然卫星 CCD 精确定位观测对于宇宙飞船探测外行星、行星物理的研究以及天文参考系的连接等方面都有重要的意义。文章介绍了长焦距望远镜 CCD 观测天然卫星所遇到的各种困难以及解决问题的方案。重点评介了 CCD 图像处理和归算方法。最后,介绍了影响天然卫星位置测量精度的各种因素及最新观测结果的精度。

关键词 天体测量 — 天然卫星

分类号: P129

1 前 言

天体测量意义上的天然卫星观测始于 1965 年。当时开展这项研究的目的是为宇宙飞船探测外行星作准备,其观测采用了照相天体测量方法。但观测精度较低,其结果也只是改进了卫星轨道的历表。当人们意识到当年卫星历表的精度与他们行星际探测的要求相距甚远后决定投入巨额的资金,以期大大地提高卫星观测的水平^[1]。从天文意义本身而言,天然卫星的观测可以间接地测得大行星(质心)的位置,从而可以避免直接观测大行星时产生的一系列困难,例如,大视面难以定心,不同时期观测时出现的“相位”差等。相对观测天然卫星还可以用于解算大行星的形状参数(半径,质量,扁率等)以及重力场展开式中的 Stokes 系数,从而检验和改进行星内部结构的模型^[2]。此外,天然卫星和恒星的相对观测还可以用于天文参考系的连接。最近,有将近 30 个天文台站准备参加 1997 年 11 月 12—14 日伽里略卫星掩星的国际联测,其主要目的就是希望实现 Hipparcos 参考系与动力学参考系的连接。

2 天然卫星长焦距望远镜的 CCD 观测

天然卫星的定位观测应包括现象测时(Phenomena Timings)和切平面上的天体测量。限于篇幅,本文只讨论切平面上的天体测量。

与照相底片相比,CCD 器件具有许多优越特性^[3]。首先,CCD 的量子效率高,这使

得用 CCD 可以在较短的露光时间内观测到较暗的星像。对于天然卫星的观测,因为它们不但亮度较暗,而且运动速度快。当使用照相底片时,不但需要长露光时间,而且要在这一期间保持望远镜跟踪的稳定性,否则,很容易使底片上的星像发生畸变。而 CCD 观测,不仅可以大大节约观测时间,而且降低了对望远镜跟踪稳定性的要求。照相底片动态范围小,而且仅局部是线性的。只有在正常曝光范围内,底片的特性曲线才是线性的。CCD 器件线性动态范围比照相底片高出两个数量级以上。这使得在同一幅图像中同时观测的亮暗天体的星等差更大,从而减少了照相观测中多级定标星使用的次数,这对于天然卫星的观测是有利的。此外, CCD 器件的噪声基本上可以用读出噪声来确定;而照相底片就要复杂得多,其乳胶是明胶与卤化银的混合物,常具有颗粒或晶体的形状,大小不等,产生乳胶的颗粒噪声。因此即使是均匀露光的底片,成像结果也是随机起伏的。最后, CCD 结构上也具有良好的线性以及资料的数字化等都是照相底片难以媲美的。目前,世界上许多大型长焦距(焦距大于 10m)望远镜都配备了 CCD。天然卫星的 CCD 观测也就具有相应的优势,并由此而发展了许多种观测和归算方法。近年来我国陕西天文台自然卫星研究组也由原来使用的照相底片过渡到 CCD 观测^[4]。

2.1 很大的星等差

天然卫星与主星间有很大的星等差。表 1 分别列出了土星、天王星及海王星与其主要卫星的星等^[5]。可见,主、卫星的亮度常常会相差 10 等左右。其他卫星系统也有类似的情况。这种亮度上的巨大差异常常会导致照相或 CCD 观测的卫星星像受主星星像像晕的强烈影响,从而给卫星的识别和卫星的定心计算带来一系列问题。

表 1 土星、天王星和海王星及其主要卫星的星等^[5]

名称	星等	名称	星等	名称	星等
Saturn	0.67	Uranus	5.52	Neptune	7.84
Mimas	12.9	Ariel	14.16	Triton	13.47
Enceladus	11.7	Umbriel	14.81	Nereid	18.7
Tethys	10.2	Titania	13.73		
Dione	10.4	Oberon	13.94		
Rhea	9.7	Miranda	16.3		
Titan	8.28				
Hyperion	14.19				
Iapetus	11.1				

注:表中的星等均为主星平均冲时的视星等

2.2 CCD 的小视场

因为 CCD 的小尺寸,在观测天然卫星时视场中很难找到数量、质量均合适的定标星。例如,在中国科学院光学天文联合开放实验室的三架大型望远镜中,以云南天文台一米望远镜上的最新 CCD(1024×1024 像素)视场最大(6'.5×6'.5)。表 2 列出了一些主要星表系统对其可提供定标星的平均数。可见,若只考虑视场中定标星的平均星数, GSC1.1 星表较为合适,但其成员星的位置误差太大。考虑到定标的定位精度,则 HIPPARCOS、TYCHO 或 FK5 星表星较为合适,但 FK5、HIPPARCOS 星表星在视场中的平均定标星数太少,即使 TYCHO 星表也无法保证满足每次观测时视场中有两颗定标星的基本要求。

表 2 云南天文台一米望远镜可用的星表定标星状况

星表名	总星数	星表误差 /(") (1990.0)	视场中平均星数
FK5	1535	0.04	0.0005
FK5 Sup	1200	0.07	0.0004
FK5 Exten	2100	0.07	0.0006
SAO	258997	1.0—2.0	0.074
IRS	40000	0.24	0.012
AGK3	183173	0.41	0.104
PPM	326518	0.26	0.093
GSC1.1	19000000	0.60	5.406
HIPPARCOS	118000	0.002	0.034
TYCHO	1000000	0.03	0.284

2.3 CCD 的比例尺

同样因为 CCD 的小视场, 要精确测定 CCD 的比例尺也相当困难, 人们提出了多种方法。有人提出利用大距离双星 (如 61 Cyg)^[4,6]、星团 (如 M15, M92 和昴星团) 等进行测定, 但存在一个问题: 即测定比例尺所用的天区与观测卫星时的天区往往不同, 这就是所谓比例尺的不通用性。最近, Harper 等人^[7] 发现由 M15 和 M92 分别测定的比例尺和指向就是不一致的! 巴西的 Veiga 和 Martins^[8] 通过天王星的运动来确定望远镜的比例尺和指向, 这种方法克服了上一方法的缺点, 能精确地测定 CCD 的比例尺和指向, 但该方法对观测资料的连续性提出了一定的要求。如果只对卫星系统中的暗的近主星的卫星感兴趣, 也可以应用主星外面的亮卫星进行 CCD 的比例尺和指向的测定。Veillet 和 Ratier^[9] 首次应用这种方法进行了天王星卫星 Miranda 的照相观测, 此后, Pascu 等人^[10] 也应用同样的方法进行了同一卫星的 CCD 观测。

2.4 CCD 的指向

CCD 的指向可以用其某一轴 (x 轴或者 y 轴) 与视场中心和天极连接的大圆之间的夹角来表征。一般来说它在短时间内 (例如一个夜晚的一两个小时内) 应该是不变的, 但实际上, 由于望远镜的弯曲、跟踪误差等, 指向是不断变化的, Pascu 认为指向的测定是 CCD 定标 (原点、比例尺、指向) 中最为困难的一项^[1]。照相观测用的拖影方法在这里也遇到了困难。因为星像在视场中被拉长的轨迹很短, 这样测定的精度不高。也有采用星团 (如 2.3 节所述) 来测定指向的, 但要求星团与行星处于同一恒星区域, 这通常也难以满足。Jones^[11] 提出应用一种模型来研究望远镜指向的变化规律。但看来这种方法很难得到好的结果, 因为这种情况非常类似于子午环镜筒弯曲的模型设计。从事子午观测的研究者都知道, 镜筒弯曲是星表系统中的一项主要的误差来源, 不是通过简单的模型就可以精确求解的。

2.5 CCD 的其他误差

要用 CCD 高精度测定星像位置, 除了要考虑到上述定标因素外, CCD 本身的制造误差、安装误差也是不可忽略的。例如, CCD 的两坐标轴不垂直、比例尺不相等。另外, 即使在同一天区观测, 望远镜指向也会发生较小但不可忽略的变化, 原因可能是由于望远镜终端快门启关时的震动所致。最后, 观测中常会看到 CCD 图像上有“死点”、“死线”的现象, 我们要尽量避免有用星像成像在这些地方。

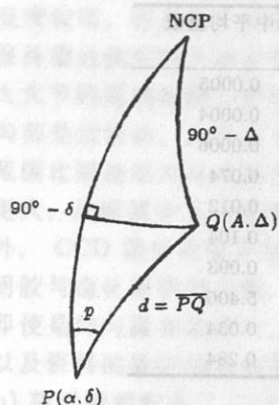


图1 角距离和位置角

3 极坐标的引入

天然卫星的位置常常采用位置角和距离来确定。这对相对测定来说是简便有效的^[12]。图1中， P 为主星， Q 为卫星，距离 d 就是两天体沿着通过它们的大圆的角距离，位置角 p 是通过主星和北天极NCP的大圆与 PQ 大圆之间的夹角，由北向东计量。设 Q 的赤道坐标为 (A, Δ) ， P 的赤道坐标为 (α, δ) 。考虑到卫星 Q 与行星 P 相距很近(即 d 、 $|\alpha - A|$ 、 $|\delta - \Delta|$ 都很小)不难得到：

$$d \cos p = \Delta - \delta$$

$$d \sin p = (A - \alpha) \cos \delta$$

$$\cos d = \sin \delta \sin \Delta + \cos \delta \cos \Delta \cos(\alpha - A)$$

4 图像及处理，资料的归算方法介绍

天然卫星通常离主星较近，主星与卫星之间很大星等差使卫星要受到主星的像晕的影响；另外，卫星像还会受到望远镜付镜支架“十字架”的散射像的影响。对离主星特别近的卫星，情况更为严重。为了减少晕的影响，最好的方法是应用利奥型日冕仪(Lyot-type-Cornagraph)进行观测^[1]。为消除或减少望远镜的“十字架”的影响，常用的方法是在付镜前加上一个罩子(mask)^[9]，它和被挖了若干个对称圆孔的薄板。也有人采用在照相底片前加上金属膜(metallic film)的方法，以补偿星等上的差别^[13]。这种方法要求精确计算金属膜的密度，观测也显得繁琐。Veiga等人^[22]用类似的方法进行了CCD的观测。与照相底片不同的是，CCD底片前有一个玻璃窗，金属膜只能镀在玻璃窗上，这时难以观测到近距离的卫星。还有人用具有“抗开花”(Anti-blooming)功能的CCD成功地观测到火星的两颗卫星^[14]。最近，云南天文台SRT(分离读出技术)研究组开发了一种具有独特功能的CCD观测技术，该技术可以对整幅CCD采用左右两半不同时间的露光，因而，可以用其观测相距很近亮度差别大的两天体。对天王星卫星的试验观测表明，该方法可以用于高精度测定卫星的位置^[15]。

尽管有许多种观测方法和手段用于天然卫星的观测，但是观测到的图像仍然还是会受到主星的像晕的影响。要测量到高精度的卫星位置，就需要进一步的图像处理或算法研究。Pascu等人^[10]采用二维对称的高斯函数并迭加一个二次多项式的算法获得了天王星卫星Miranda的位置。Jones等人^[16]应用高斯函数拟合卫星的CCD星像，而当高斯拟合失败时就采用计算机光标将星像等分的办法观测到了火星两颗卫星的位置。Beurle等人^[6]观测土星卫星时，采用的定心算法是对于一个小方框来进行的，这样可以减少土星和它的光环在卫星星像处产生的晕的影响。上述各种方法只是对定心算法进行了改进，真正图像处理意义上的研究是Veiga和Martins采用的方法^[17]。他们处理得到的天王星卫星^[18,19]和海王星卫星^[20,21]的资料已达到了目前国际上最好的精度。

Veiga和Martins采用的处理方法分为三步。第一步，确定行星中心的位置。他们假定主

星(天王星或海王星)没有饱和、没有卫星的部分的光子计数值满足高斯对称分布,利用这一分布拟合光子计数值可以得到行星中心的坐标。第二步,扣除倾斜背景。在这里,他们假定主星周围的晕具有某些对称性。于是,将卫星所在区域的每一点的计数值减去与之对称的点的计数值,认为晕的影响已被扣除,这一步尤为重要。第三步,确定卫星中心,扣除了晕的影响以后,对卫星所在区域作适当的平滑滤波,最后应用恒星定心的算法进行位置测定。

用上述处理方法,只能获得主星、卫星或者只有卫星的量度坐标 (x, y) , 要将他们转化为常用的天文赤道坐标 (α, δ) 或位置角和距离,就需采用前述的 CCD 的定标、归算方法。目前,国际上大多采用相对某一颗卫星测量的方法。例如,天王星卫星系统中,常常相对于 Oberon(天卫四),土星卫星系统中相对于 Titan(土卫六)。虽然精确测定 CCD 的比例尺和指向往往是很困难的,但有两种情况的 CCD 定标是无可挑剔的:第一,由行星的外围卫星(通常具有较为精确的理论位置)作定标来测定近距离卫星;第二,利用主星几天的运动作为参考系(定标)测定各卫星之间的相对位置。第一种情况并非最新研究成果,在此不作讨论。第二种情况的方法是 Veiga 和 Martins^[6] 于 1994 年采用的,可以用于多颗卫星相对测定的情况。

由主星的运动来定标的方法需要满足三个要求:(1)观测资料要求有两夜晚或更多夜晚,但时间上不能相距太远。在第一幅 CCD 和最后一幅 CCD 图像上,行星必需运行一至二倍卫星与行星或参考卫星与待测卫星之间的弧长。(2)对于所有连续的 CCD 片,要求每张有至少五颗共同的暗恒星。(3)为满足上述条件,容许有无卫星和行星的 CCD 片。而该方法对每一张 CCD 片的处理均由下面两个步骤组成:第一步,构造一个由全部 CCD 片组成的马赛克图,这个图是由一个任意选取的参考系(例如第一幅 CCD 图像中各个星像的量度坐标)组成的。具体地说,他们采用了六常数模型,并以暗星作为过渡。第二步:在这个任选的坐标系中由行星的运动解算出 CCD 的指向和比例尺。有了比例尺和指向,便可以求得卫星在不同观测时刻相对于行星或参考卫星的位置(位置角和距离)了。上述方法的基础是假设几天之内,行星的相对运动具有高的精度,或者说具有很好的稳定性。由于它避免了其他方法的缺点,因而观测资料的精度较高。但是,要求的观测条件不一定总能满足。例如,只有一个夜晚的资料,或虽有几个夜晚的观测资料,但行星在其间运动的弧长不一定能满足条件,因此,该方法亦有其局限性。

5 观测精度

CCD 观测天然卫星的精度是与多种因素有关的,这些因素包括星像的信噪比,星像间的距离和积分时间等等。信噪比影响卫星的定心精度;定心精度又与采用的算法有关。另一方面,积分时间和星像间的距离是与大气宁静度紧密相关的。Lindgren^[23] 在 1980 年就揭示了它们的关系,即两星像间距离的平均误差 $m.e.$ (") 与两星像的距离 θ (rad) 以及积分时间 T (s) 满足关系:

$$m.e. = 1.3\theta^{0.25}T^{-0.5}$$

可见,适当增加积分时间有利于提高星像间距离的精度。此外,不同卫星系统内由于星像距离的不同,位置精度也不同。

下面是 CCD 观测天然卫星最新结果的精度。

表 3 CCD 观测天然卫星最新结果的精度情况

研究 者	单次观测的精度 / (")	说 明
Jones & Sinclair (1989) ^[16]	±0.15	火卫观测
Colas & Arlot (1991) ^[14]	±0.15	火卫 Anti-blooming CCD 观测
Beurle et al. (1993) ^[6]	±0.10	土星主要卫星观测
Harper et al. (1997) ^[7]	±0.08	土星主要卫星观测
Pascu et al. (1987) ^[10]	±0.10	天王星卫星 Miranda 观测
Veiga & Martins (1994) ^[18]	±0.05	天王星卫星 Ariel, Umbriel 和 Titan 相对于 Oberon 观测
	±0.07	天王星卫星 Miranda 相对于 Oberon 观测
Veiga & Martins (1996) ^[21]	±0.11	海王星卫星 Triton 相对于主星观测

可见,天王星卫星的观测具有最好的精度,这与天卫系统中卫星之间较近的距离有关,也与较长的露光时间分不开。至于火星卫星的观测精度稍低,则很大程度上是由于主星与卫星间很大的星等差,限制了观测的精度。其他系统中的情况则介于上述两种情形之间。

6 结论和展望

纵观天然卫星的 CCD 天体测量观测,要取得有意义的观测结果,其关键主要是两个方面:(1) CCD 图像处理 and 定心算法,(2) CCD 小视场的定标。其中,定标更为重要。

行星卫星精确定位的观测是卫星所有观测中最基本的观测方式,它将随 CCD 技术的不断发展、行星际探测器的发射、行星物理的研究以及相关学科的发展不断开拓其应用领域,并取得新的更多的成果。

致谢 本文在完成过程中得到了云南天文台冒蔚老师,南京大学天文系张承志老师以及陕西天文台沈凯先老师的关心和指导,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Pascu D. In: Ferraz-Mello S, Morando B, Arlot J E eds. Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System, IAU Symp No.172, Paris, France, 1995, Dordrecht: Kluwer, 1996: 373
- 2 张承志, 私人通信, 南京大学天文系, 1995-6-13
- 3 季凯帆, 冒蔚, 天文学进展, 1994, 12: 2
- 4 乔荣川, 沈凯先, 陕西天文台台刊, 1996, 19: 1
- 5 The Astronomical Almanac, For the Year 1997, Washington, 1996, F2
- 6 Beurle K, Harper D, Jones D H P et al. Astron. Astrophys., 1993, 269: 564
- 7 Harper D, Murray C D, Beurle K et al. Astron. Astrophys. Suppl. 1997, 121: 65
- 8 Veiga C H, Martins R V. Astron. Astrophys. Suppl., 1994, 107: 551
- 9 Veillet C, Ratier G. Astron. Astrophys., 1980, 89: 342
- 10 Pascu D, Seidelmann P K, Schmidt R E et al. A. J., 1987, 93: 963
- 11 Jones D H P. In: Ferraz-Mello S, Morando B, Arlot J E eds. Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System, IAU Symp No.172, Paris, France, 1995, Dordrecht: Kluwer, 1996: 431
- 12 塔夫 L G. 计算球面天文学, 凌兆芬, 毛昌莹译, 北京: 科学出版社, 1992.17
- 13 Pascu D Dissertation. Maryland: University of Virginia, 1972. 10

14 Colas F, Arlot J E. *Astron. Astrophys.*, 1991, 252: 402
 15 彭青玉, 冒蔚, 叶彬浔. *空间科学学报*, 1998, 18: 91
 16 Jones D H P, Sinclair A T, Williams I P. *M.N.R.A.S.*, 1989, 237: 15
 17 Veiga C H, Martins R V. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1995, 111: 387
 18 Veiga C H, Martins R V. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1994, 107: 559
 19 Veiga C H, Martins R V. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1995, 113: 557
 20 Veiga C H, Martins R V, Guyader C L et al., *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1996, 115: 319
 21 Veiga C H, Martins R V. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1996, 120: 107
 22 Veiga C H. In: Ferraz-Mello S, Morando B, Arlot J E eds. *Dynamics, Ephemerides and Astrometry of the Solar System*, IAU symp No.172, Paris, France, 1995, Dordrecht: kluwer, 1996: 419
 23 Lindegren L. *Astron. Astrophys.* 1980, 89: 41

New Progress in the CCD Astrometric Observation of Natural Satellites

Peng Qingyu

(Yunnan Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

Abstract

CCD astrometric observation of natural satellites is important for the spacecraft probation of the outer planets, the planetary physics, and the link between different astronomical reference systems. In this paper, we introduce the difficulties on CCD observation of natural satellites by the long focus telescope and different solving methods and mainly review and describe the CCD image processing and reducing methods. At last, some factors affecting the accuracy of the positional determination of natural satellites and the accuracy of the newest results are also introduced.

Key words astrometry—natural satellites

表 1

观测方法	精度 (角秒)	年份
照相	10	1915
照相 + 照相测微	100	1930
照相 + 照相测微 + 照相光度	1000	1980
照相 + 照相测微 + 照相光度 + 照相偏振	10000	1988
照相 + 照相测微 + 照相光度 + 照相偏振 + CCD + 多目视光扫描	100000	1993
照相 + 照相测微 + 照相光度 + 照相偏振 + CCD + 多目视光扫描 + 天球 2DSS	1000000	2000
照相 + 照相测微 + 照相光度 + 照相偏振 + CCD + 多目视光扫描 + 天球 2DSS + LAMOST	10000000	2005