

CCD 探测器在地面天体测量中的应用

季 凯 帆 冒 蔚

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

摘 要

CCD 技术在天体测量领域的应用已得到很大发展。本文回顾了 10 年来 CCD 技术应用于大型望远镜和子午环上的基本情况和所取得的成果, 分析了在这些应用中所存在的三个主要问题, 并对这些问题提出了相应的解决途径。这些问题的解决, 将能促进地面基本天体测量的精度和效率跨上一个新台阶。

1 引 言

以实测为基础的天体测量学研究, 它的观测精度的每次提高和研究领域的扩展, 都与新观测原理的出现、新仪器和技术的采用以及新处理方法的实施密切相关。80 年代以来, 随着空间测量技术、VLBI 观测技术等的发展和出现, 使得测量精度达到毫角秒量级, 已经为天体测量学科的发展开拓了广阔前景, 同时也给传统的地面天体测量学带来巨大压力。但是, 地面天体测量学仍然有其固有的优势和难以取代的意义, 尤其在实用的参考架的建立及不同参考架之间的连接方面, 可以发挥重要作用。问题的关键在于, 如何利用现代科技发展的成果, 并根据新的要求, 进一步提高其实测的精度和效率, 与空间测量技术配合起来, 互相取长补短, 促使学科的发展跨上一个新台阶。

CCD 探测器以其灵敏、方便、快捷、精确而日益得到广大天文工作者的青睐, 现已成为装备在现代光学天文望远镜上最主要的探测工具之一。虽然这一技术仍然主要应用于天体物理领域, 但近 10 年来, 它已逐渐渗透进天体测量学科, 并已获得许多很好的测量结果。

广义地讲, CCD 技术也是一种照相技术, 它包含了照相观测方法的许多优点, 加上 CCD 本身一些特有的良好物理特性, 使得它在效率和精度方面均显示出较大的优势, 同时也暴露出一些问题。可以认为, 随着这一技术的发展和和使用方法的完善, 它将为地面天体测量学的发展做出很大贡献。

2 CCD 用于天体测量工作的优势和现状

CCD 器件已接近于一个理想的探测器, 对天体测量工作而言, 其优势表现在如下几个方面。

(1) 与底片相比, CCD 具有很大的动态范围, 达到 8—10 个星等的跨度, 使得有可能在同一幅图像中同时测得河外天体和亮定标星的位置, 这就为恒星位置系统与河外天体的直接联接创造了有利条件, 也为建立以河外天体为定标点的准惯性天球参考架提供了可能性。

(2) CCD 的量子效率高, 一般均可达到 50% 以上, 可以在较短曝光时间内得到较暗的星像。如 Monet 等人在暗恒星三角视差观测中, 用美国基特峰国立天文台 4m 望远镜 CCD 系统 1 次 2 分钟的测量的权重与用 1.5m 望远镜照相底片 4 次各 1 小时曝光的权重相当^[1]。对于太阳系小天体(如小行星、大行星卫星、彗星)的观测, 由于它们星等暗, 运动速度快, 在长时间照相跟踪过程中, 底片上的星像容易发生畸变, 但 CCD 的运用, 则可大大缩短曝光时间。美国海军天文台 Seidelman 等人曾用 CCD 对海卫二进行观测, 曝光 6 分钟的结果相当于底片曝光 1 小时以上^[2]。

(3) CCD 噪声很小。现代 CCD 读出噪声小于 $10e^-$, 甚至达到 $1e^-$, 暗流为 $0.5nA \cdot cm^{-2}$ ($20^\circ C$), 线性度好, 非线性小于 1%, 这样就大大提高了星像的信噪比, 而且其输出是数字化图像, 这为高精度地测量提供了有利的保证。相对而言, 照相底片的噪声来源很复杂, 而且它是非数字化的, 虽然采用 PDS 测量能达到数字化的效果, 但又会带进新的误差。

(4) CCD 基本上是实时观测的。也就是说几乎在观测同时就可以从计算机上知道所获得结果的好坏, 有利于作必要的重复观测, 并且可以快速存入计算机的存贮介质中, 无需底片后期冲洗和测量等复杂过程, 大大提高了观测的成功率。

但是, 我们看到目前的 CCD 器件也存在着一些问题, 其中最为突出的是 CCD 芯片的尺寸太小, 远远达不到照相底片一次成像面积可达到几个平方度, 甚至几十平方度的效果。目前用于天文工作的 CCD 芯片一般是 1024×1024 像元的, 成像面积不过几个平方厘米。虽然国外已有 4096×4096 像元的 CCD 芯片^[3], 但是由于这样的一幅图像拥有高达 32 兆的数据量, 对数据读出速率要求很高, 而且即使读出速率为 100kps, 一幅图的读出也需要 5min 以上, 影响连续观测。必须进行数据压缩, 而如何进行实时的无失真的数据压缩, 目前还是一个未能很好解决的问题。因此, 如何解决视场大小的问题还需要各方面的专家共同努力。

虽然从器件本身来讲, CCD 有缺点, 但是近 10 年来人们充分利用其优点, 把 CCD 探测器用于天体测量领域的测量和研究工作已取得很大进展。表 1 和表 2 分别列出 CCD 用在大型望远镜上的一些天体测量工作的部分结果和一些著名传统子午环配备 CCD 的工作和计划。

表 1 大望远镜 CCD 天体测量观测

天文台	作者	时间	任务	望远镜	CCD	极限星等	精度 (单位: ")	参考文献
KPNO	D.G.Monet	1983	视差	4m	Fairchild 211	15-18	0.01(位置) 0.002-0.004(视差)	[1]
USNO	D.G.Monet	1992	视差	1.55m	TI 800×800	15-19.5	0.0005-0.0027 中间值 0.001	[4]
CTIO	G.A.Anguita	1989	视差	1.5m	RCA	16-19.5 (红星等)	0.006(目前) 0.002(预计)	[5]
USNO 和 Auburn 大学	D.G.Monet 和 H.D.Albes	1989	位置 视差 自行		5 片 Thomson CSF 7882 和 1 片 Fairchild222	>13	0.005(单次) 0.001(40 次)	[6]
McDonald	G.F.Benedict	1991	自行	CTI 1.8m	2 片 RCA SID 53612 连接	12.7-18.7	0.04(>17) 0.04-0.1(17-18.7)	[7]
剑桥大学	A.N.Argue	1984	射电源	3.9m	RCA SID 53612	18.5-23.2	0.24(估计)	[8]
云南 天文台	冒 蔚 郭新建	1989	河外 星系	1m	RCA SID 53612	14	0.047(内精度) 0.044(外精度)	[9]
USNO	D.Pascu	1987	大行星 的卫星	1.55m	TI 800×800		0.10(外精度)	[10]
云南 天文台	许 水	1989	小行星	1m	RCA SID 53612	10.8	0.035(内精度)	[11]
BERNE 大学	Schildknecht		人造卫星	0.5m	512×512 CCD	12-14	0.4(目前) 0.06(希望)	[13]

在大型望远镜上采用 CCD 探测器的工作中, 最典型的例子是美国海军天文台 Monet 等人的三角视差工作。他们首先于 1983 年发表了第一批用 CCD 探测器获得的三角视差结果^[1], 即利用基特峰天文台 4m 望远镜上的 Fairchild 211 CCD(像元 190×244, 读出噪声 $20e^-$, 量子效率仅为 15%) 在 3 年的观测中获得了暗达 18mag 左右恒星的视差测定值, 其内精度达 $0''.002-0''.004$, 优于同期 Harrington 等人利用 10 年照相观测所发表的平均精度 $0''.0057$ 的结果^[18]。1992 年, 他们又发表了一批在 1.55m 天体测量望远镜上用 TI CCD(像元 800×800, 读出噪声 $8e^-$, 量子效率 50%) 观测得到 15-19.5mag 的恒星视差观测值^[4], 精度的中间值已达到 $0''.001$ 。这个结果不但优于照相测量, 而且在星等和测量精度方面都已超过 Hipparcos 卫星能够正常工作所预期达到的目标。

表 2 子午环配备 CCD 的工作和计划

天文台	仪器	任务	观测星等	参考文献
USNOFS	8 英寸子午环	位置测定	3.5-17.5	[14]
USNOFS	8 英寸子午环	度盘读数		[15]
Pulkovo	MK-200 子午环	位置测定	17	[16]
USNO(新西兰)	7 英寸子午环	位置测定		[17]
东京天文台	PMC-190	位置测定	15	[17]
Herstmonceux	RC 子午环	度盘读数		[17]
La Palma	SF 子午环	度盘读数		[17]

为了便于比较,表3给出恒星 VB8 和 VB10 的照相观测和 CCD 观测的视差测定值及其测定精度。从中可以看出, CCD 测量和处理方法经过这 10 年的过程,得到了逐步的完善,不仅测定值的精度提高了几倍,而且测定结果更可靠了。因为照相观测已有 100 多年的历史,是一种很成熟的方法,而表 3 中 1983 年的 CCD 测量结果相对于照相测量结果而言,仍有一个系统差,1992 年的结果这种系统差消失了。当然,仅用两颗星的测量结果作比较,很难断言,但可以对 CCD 用于天体测量的发展窥见一斑。

表 3 VB8 和 VB10 的视差结果

恒星	星等	观测方式	时间	绝对视差值	精度	观测者
VB8	17.80	照相	1983	$0''.154$	$0''.0057$	R.S.Harrington
		CCD	1983	$0''.162$	$0''.004$	D.G.Monet
		CCD	1992	$0''.1545$	$0''.0007$	D.G.Monet
VB10	18.64	照相	1983	$0''.174$	$0''.0049$	R.S.Harrington
		CCD	1983	$0''.179$	$0''.002$	D.G.Monet
		CCD	1992	$0''.1701$	$0''.0008$	D.G.Monet

从表 1 中看出,有些测量结果并不十分理想,其原因是多方面的,尤其是其中很多工作仅仅是试验型的。但可看到, CCD 用于大望远镜的天体测量工作,已涉及到恒星的视差和自行、河外天体位置、小行星、卫星等方面。随着 CCD 技术和 CCD 天体测量方法的发展,一定会有更多更好的结果出现。

CCD 用于子午环的工作大部分还在计划之中,其中最典型且已接近于完成的是美国海军天文台 Stone 和 Monet 等人的研究工作。它主要分两个部分:一是用于天体位置精确相对测定的 CCD 测微器的研制和实验^[14];二是用于度盘读数的 CCD 照相机的研制^[15]。

1992 年 9 月, Stone 在 IAU Symp. No. 156 会议上对他们的最新研究结果作了介绍: CCD 芯片为 CRAF/cassini 型, 1024×1024 像元,观测星等在 3.5—17.5mag 之间,每幅 CCD 图像上的星像多达 300 颗,1 小时可观测到 9000 颗星,平均单次测量精度为 $0''.1$ (亮于 16mag 的恒星的单次测量内精度为 $\pm 0''.05$, 17.5mag 的恒星的单次测量精度为 $\pm 0''.2$)。这架子午环的观测方式已完全不同于传统子午环, Stone 等人将其定名为 FASTT,意为 Flagstaff 工作站的天体测量扫描式子午望远镜,以区分用于绝对定位的每次单星测量的子午环。在观测时,望远镜固定于某一天顶距, CCD 采用漂移读出的方式来跟踪星像,而每颗星的曝光时间即为星像穿过 CCD 视场的时间。这样就可观测到一个连续的带状天区内所有亮于 17.5mag 的恒星相对位置及其相对光度。

同时他们又研制了 CCD 度盘读数系统,监测连续曝光过程中望远镜天顶距指向的变化。6 只 CCD-TV 图像照相机安装在度盘显微镜上,每只照相机的重量仅为 125g,其主要优点是设计简单;不受机械震动影响;不需要维护;设备本身没有可动的部分;在实时操作过程中,从每个 CCD 照相机得到的视频信号能在电视监视器上显示;全部采用商品化器件。这一系统监测度盘读数变化的精度达 $\pm 0''.007$ 。

由于 Stone 等人的试验在星等、观测效率和测量精度等方面取得成功,其他一些传统子午环配备 CCD 时,多数也仿效了他们的原理和方法。

3 CCD 用于天体测量学所存在的问题和展望

CCD 用于天体测量工作虽然已取得了一些令人鼓舞的成果,但仍然存在着一一些问题,有待于改进和完善。除了前文所述的 CCD 的视场太小和数据量太大,读出时间长,有待于大尺寸 CCD 或者多片 CCD 拼接技术以及数据压缩技术的发展外,我们认为,从观测原理和处理方法方面,有些问题需要解决,才能充分发挥 CCD 的优势。

3.1 数字星像的处理问题

CCD 图像是离散的数字化图像,由于大气影响、望远镜的衍射等因素,使得一个点状恒星像在 CCD 上成像不为 δ 函数,通过其分布轮廓可以估计其物理信息,如星像中心位置、星像光度等等。对天体测量而言,尤为关心的是星像中心位置,因而 CCD 天体测量工作的图像处理也是围绕位置测定进行的,但由于至今尚没有国际通用的标准天体测量图像处理软件包,以致大部分天体测量工作都是在使用为天体物理工作而编制的软件,这些软件虽然有一些星像定位功能,但并不是重点,无法满足基本天体测量高精度、高效率地处理大量暗弱天体包括不规则天体的要求。在天体测量界,随着 PDS 技术的引进,还有人进行了许多关于数字星像定心算法的研究,只是这些都是基于 PDS 测定方法的^[19]。目前尚没有用于天体测量学的专门处理 CCD 图像的文章发表。当然 CCD 与 PDS 底片处理有相似性,甚至和光子计数资料的处理也有许多类似之处,但它们本身各有其特殊性。因此,系统地研究这一问题有明显的实际意义,尤其在处理方法的细节问题上有许多可探讨的内容。根据我们初步的试验表明,应用同样的原理,仅在细节上不一致,也会给结果带来很明显的差异。

另外,对于 CCD 图像中信号的自动识别,也是一个急需解决的问题。因为对于大量 CCD 图像的资料(如子午环配备 CCD 后每夜晚有几百幅图像),使用人工方法去分析这些图像资料是不现实的,必须具有智能化的识别软件,而且应能识别暗河外天体、双星等等,并能精确测定它们的位置和其他物理特性。数字星像处理技术是 CCD 天体测量方法的重要基础之一,这需要天体测量学家、计算机专家和天体物理学家们的共同努力。

3.2 量度坐标与理想坐标之间关系的模型问题

传统的照相天体测量,在量度坐标与理想坐标之间一般是采用六常数模型来建立彼此的关系,对于大底片(例如 $5^\circ \times 5^\circ$)则采用十二常数模型。这与照相观测方法有关,因为每次观测是采用不同的底片,加上每张底片都分别在坐标量度仪上测量,也就无法保证一个常数系统的稳定性,以致每次都要解算底片常数,这就要求在每张底片上除了待测天体之外,还要有足够的定标星,当定标星数目不足时,模型的常数会受到限制。例如 $2^\circ \times 2^\circ$ 的底片,一般只能采用六常数模型,忽略二次项的影响,仅各项较差改正及光心偏差的二次项,在距视场中央 1° 处,就可达到 $0''.02$ 以上。若要保证量度坐标与理想坐标之间的转换达到 $\pm 0''.01$ 的精度,则对于 $2^\circ \times 2^\circ$ 的底片,也应采用十二常数模型,至少需要 6 颗定标星。这是难以满足的,而且计算量也很大。近 10 年来,大望远镜上的

CCD 测量,基本上沿用了照相观测的一套处理方法,在将来大视场的情况下,不能适应 $\pm 0''.01$ 或者毫角秒的精度要求。

对于 CCD 测量来讲,它在制造、安装过程中所带来的误差基本上是稳定的,不存在改变常数系统的问题。因此它的一些基本误差是可以通过专门性的反复测量,并且能在较长的时间内用于作修正。而对于其他的天文误差,如大气折射、光行差等的较差改正(包括高次项)也可通过计算得到。这样首先对量度坐标作这些修正,然后就可用较简单的模型(例如四常数模型)来与理想坐标建立联系。这一方面降低了对视场中定标星数量的要求,简化了处理过程;另一方面也可清楚看到各种误差对最终结果的影响,便于分析各种误差的变化。很显然,这种方法要求对各种误差有足够的认识和理解。

3.3 关于天体位置的绝对测定

Stone 等人在美国海军天文台 8 英寸子午环上的 CCD 工作是具有开创性的。利用 CCD 的大动态范围,可以同时观测河外天体和亮定标星。这不仅对恒星参考架与射电参考架之间的联系以及进行星数和星等的扩充有重要意义,而且可以测定恒星的绝对自行和视差,即相对于河外天体测定自行和视差。如果能通过其他手段测定或者获得河外天体的绝对位置,那么使用这种扫描方式可以大大加快利用恒星加密河外天体参考架的速度。但 Stone 自己也认为,这种测量方法也是相对测量,失去了子午环绝对定位的作用。所以,10 年来 CCD 应用于天体测量,在定位方面还仅局限于相对位置测量,尚没有绝对定位的先例。如果能进行天体位置的绝对测定,由于 CCD 在子午环上能观测到亮于 17.5mag 的大量河外天体,则可以在建立准惯性天球参考架方面充分发挥 CCD 的优势。那么是否可以实现这一目标呢?答案应该说是肯定的。但是对于传统子午环而言,由于观测原理的限制,特别是各种仪器误差测定方法的限制,使得它们的仪器误差修正值的随机误差远远大于 CCD 的测量误差,修正值的系统误差也无法消除,从而限制了 CCD 优势的发挥。因此,在传统子午环上配备 CCD 进行绝对测定,就目前而言不能在测定精度上有很大提高,但是若能对传统子午环进行改进,采用新的方法来测量仪器的各种误差,使这些误差的测量精度能与 CCD 测量精度相匹配,并且能够消除系统误差的来源,那么就应该用 CCD 在子午环上进行天体位置的绝对测定。这样做,就有可能直接在光学波段绝对测定河外天体的位置,进而建立一个以河外光学目标为基准的几何准惯性参考架。这也是新研制的子午环(例如低纬子午环)应该做到的,这将对基本天体测量学的发展做出很大贡献。

CCD 器件用于天体测量学的潜力很大,它更进一步的应用已是不可避免的趋势。关键在于我们如何更为充分而合理地运用这一硬件设备和研制相应的软件,并发展 CCD 天体测量方法。随着科技进步,高品质的 CCD 芯片的推出也必定会对天体测量工作带来更大的进展。虽然在其深入的研究和实施中,仍然会碰到许多问题,但我们相信,这一新技术的生命力及其将给地面光学天体测量带来的新发展,将会吸引更多天体测量工作者去努力探索。

参 考 文 献

- [1] Monet D C, Dahn C C. A. J., 1983, 88: 1489
- [2] Seidelman P K. In: Lieske J H, Abalakin V K eds. Inertial coordinate system on the sky, Proc. of IAU symp. No. 141, Leningrad, U.S.S.R., 1989, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 37
- [3] Janesick J, Elliot T, Dingizian A *et al.* In: Jacoby C H ed. CCDs in astronomy: Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 8, Tuscon, 1989, California: Book Crafters Inc, 1990:18
- [4] Monet D G, Dahn C C, Vrba F J *et al.* A. J. 1992, 103: 638
- [5] Anguita G A, Ruiz M T. In: Lieske J H, Abalakin V K eds. Inertial coordinate system on the sky, Proc. of IAU symp. No. 141, Leningrad, U.S.S.R., 1989, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 455
- [6] Monet D G, Ables H D. In: Lieske J H, Abalakin V K eds. Inertial coordinate system on the Sky, Proc. of IAU symp. No.141, Leningrad, U.S.S.R., 1989, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 517
- [7] Benedict G F, McGraw J T, Hess T R *et al.* A. J., 1991, 101: 279
- [8] Argue A N, M.N.R.A.S., 1984, 211: 713
- [9] Mao Wei *et al.* Astron. Astrophys., 1989, 215: 190
- [10] Gehrels T *et al.* A. J., 1986, 91: 1242
- [11] Pascu D *et al.* A. J., 1987, 93: 963
- [12] 许 水, 胡晓淳, 张 晶, 云南天文台台刊, 1989, (2): 77
- [13] Schildknecht T *et al.* In: Hughes J A, Smith C A, Kaplan G H eds. Reference System, Proc. of IAU colloq. No.127, Virginia Beach, 1990, Washington, D. C.:USNO, 1991: 341
- [14] Stone R C. In: Mueller I I, Kolaczek B eds. Developments in astrometry and their impact on astrophysics and geodynamics, Proc. of IAU symp. No. 156, Shanghai, 1992, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993: 65
- [15] Stone R C, Monet D G, Brid A R. A. J., 1991, 101: 2311
- [16] Yerskov V N, Streletsky Y S, Lebedv N V. In: Lieske J H, Abalakin V K eds. Inertial coordinate system on the sky, Proc. of IAU symp. No.141, Leningrad, U.S.S.R., 1989, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 91
- [17] Miyamoto M. In: Report on astronomy: Transactions of the International Astronomical Union(Reports 1991)Vol.XXIA, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991: 29
- [18] Harrington R S, Kallarakal V V, Dahn C C. A. J., 1983, 88: 1038
- [19] Stone R C. A. J., 1989, 97: 1227

(责任编辑 刘金铭)

CCDs in Ground-based Astrometry

Ji Kaifan Mao Wei

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

Abstract

CCDs have been widely used in the field of astrometry. The development of CCD applications to the large telescopes and meridian circles is reviewed in the past ten years. We discuss three main problems that still exist in this kind of applications, and propose some methods to solve them. The solution of these problems will make more progress in accuracy and efficiency of ground-based astrometry.