

文章编号: 1000-8349(2005)04-0304-14

CCD 漂移扫描的基本原理及在天文上的应用

毛银盾^{1,2}, 唐正宏¹, 郑义劲¹, 曹 凯¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 简要回顾了 CCD 在天文观测上的发展历程, 介绍了 CCD 漂移扫描观测模式的基本原理; 分析了该技术的优点和不足; 综述 CCD 漂移扫描技术的应用现状; 最后简述国内在 CCD 漂移扫描技术上的应用研究现状及对该技术的展望。

关键词: 天体测量学; 漂移扫描; 综述; CCD; 观测; 望远镜

中图分类号: P129

文献标识码: A

1 引 言

CCD (电荷耦合器件, charge coupled devices) 是 20 世纪 70 年代初发展起来的一种新型半导体器件, 它由美国贝尔实验室的 Boyle 和 Smith 于 1970 年首先提出, 以后便逐步建立了以一维势阱模型为基础的非稳态 CCD 基本理论。随后 CCD 的研究取得了惊人的发展, 特别是在像感器应用方面发展迅速, 已成为现代光电子学和现代测试技术中最活跃、最富有成果的新兴领域之一。

由于 CCD 具有量子效率高、几何失真小、噪声低及实时采集和处理能力强的特点, 从 20 世纪 80 年代初开始, 世界上的天文望远镜纷纷用 CCD 代替照相底片 (我国也在上世纪 80 年代后期开始给地面天文望远镜配备了 CCD 系统), 使天文观测效率显著提高, 可以说 CCD 技术是天文观测发展史上一个重要的里程碑^[1~3]。

但是, 随着天文观测要求的不断提高, 传统的 CCD 累积露光观测模式不可避免地出现了一些不足, 在自动化巡天观测方面尤为明显。而这其中的许多问题都可以利用 CCD 漂移扫描观测模式 (drift-scan mode) 得到改善或解决, 例如:

(1) 需要做巡天或大天区多目标同时观测时, 由于传统的观测模式只能在一次曝光结束时按帧输出, 需要花费相当多的时间完成数据传输与记录, 实现难度较高; 而 CCD 漂移扫描观测模式可以在观测过程中逐行输出, 并能连续扫描观测某条赤纬带, 从而得到一条赤经跨度很大的带状天区图像, 这是传统观测模式无法比拟的。

(2) 应用于地球同步轨道目标 (如卫星与空间碎片等) 相对于恒星背景的精确光学定位:

收稿日期: 2004-12-30; 修回日期: 2005-04-12

如果用传统的观测模式进行观测, 由于同步卫星与恒星背景运动不同步, 就会造成星像拖长的问题, 即跟踪恒星则同步卫星的星像拖长, 跟踪同步卫星则恒星的星像拖长, 因此始终无法同时精确地确定同步卫星与恒星的星像中心。如结合采用漂移扫描模式观测, 则可分别得到两者的良好星像, 相应的定位结果精度将会比传统模式有大幅提高。

(3) PHA (Potentially Hazardous Asteroid) 的观测研究方面的应用。所谓 PHA 就是在两个世纪里有可能与地球碰撞的那些小行星。由于我们不仅要跟踪到小行星, 还要把它的形态、轨迹拍摄下来仔细研究, 这需要长时间大天区的连续观测积累, 通常的观测模式由于数据传输与记录需要时间, 使观测难以连续地进行, 而具有漂移扫描功能的 CCD 系统则为更好地观测 PHA 提供了可能^[4]。

利用 CCD 漂移扫描技术可以使天文观测效率显著提高, 天文数据质量明显改善; 利用这一技术成果, 天文学家不但可以用同样口径的望远镜在相同的观测时间内观测到更多的恒星、星系及类星体, 而且使得天文观测的工作量和工作强度大大减小。从 20 世纪 90 年代开始, 具有 CCD 漂移扫描功能的探测设备陆续配备在国际上一些望远镜的终端, 随着该项技术的应用, 在许多天文学研究领域都取得了非常好的观测结果。

2 CCD 漂移扫描技术的基本原理

2.1 CCD 工作原理简介

CCD 是一种 MOS 器件, 即金属-氧化物-半导体器件。当光照射到 CCD 硅片上时, 在栅极附近的半导体内会产生电子-空穴对, 其多数载流子被栅极电压排斥, 少数载流子则被收集在势阱中, 形成信号电荷, 这就是 CCD 的电荷存储功能。

将按一定规则变化的电压加到 CCD 各电极上, 电极下的电荷就会从一个 MOS 势阱移到另一个势阱, 被转移的电荷值量与信号强度成比例。由于电荷将转移到相邻的最小势阱的空间位置, 所以当加在栅极上的电压连续变化时, 电荷向前转移, 最后可从移位寄存器中读出相应的信号^[1]。

2.2 CCD 漂移扫描的工作原理

CCD 漂移扫描技术, 也称为 TDI (Time-Delay Integration) 读出技术, 是利用 CCD 电荷逐步转移的原理, 通过时序电路控制电荷沿列方向并行转移的速度 (由垂直时钟 V-CLOCK 实现) 和沿行方向串行读取数据的速度 (由水平时钟 H-CLOCK 实现), 并且并行转移的速度和目标漂移线速度的大小相匹配。在电荷累积的同时实现电荷跟踪的目的, 这样就使得在 CCD 光敏面上所成的像跟随目标一起漂移, 从而可得到运动天体良好的圆星像。图 1 和图 2 分别为传统的 CCD 电荷累积和漂移扫描电荷累积的示意图。与传统的 CCD 电荷累积不同, 在漂移扫描的过程中, CCD 光敏面与被观测天体有相对运动, 随着曝光的进行, 同一天体的入射光子落在 CCD 光敏面的不同区域里, 而电荷跟踪实现了电荷在转移过程中的累积效应。

一块 CCD 芯片在其成像后, 需将成像的信号电荷从芯片的移位寄存器中读出。星像在 CCD 芯片上的移动过程如图 3 所示, 图中 V_s 代表天体运动速度在 CCD 光敏面上的投影, V 代表电荷沿列方向并行转移的速度, H 代表电荷沿行方向串行读取的速度, 后两者的移动是由时钟脉冲驱动的 (如图 4 所示)。

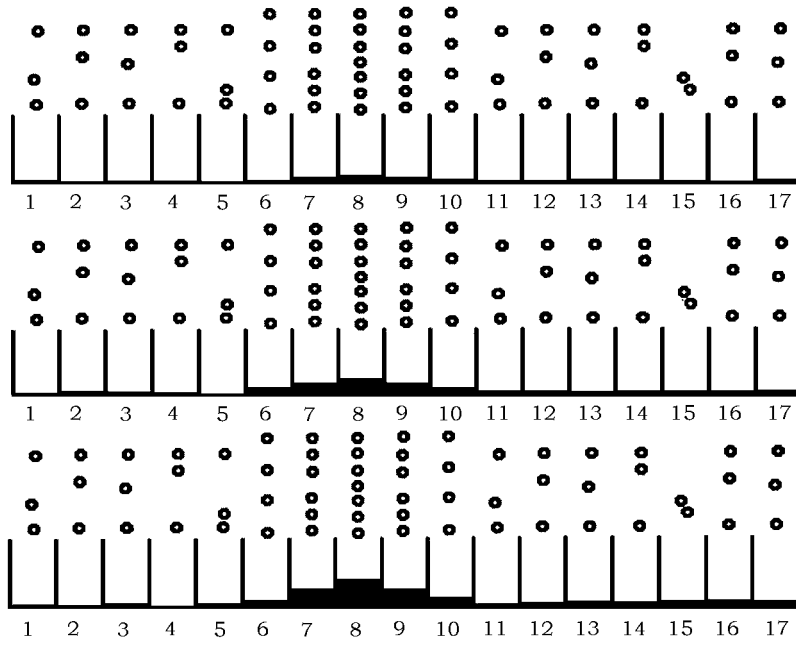


图1 传统的 CCD 观测模式的电荷累积过程示意
 ○代表入射光子，黑色部分代表光生电子。

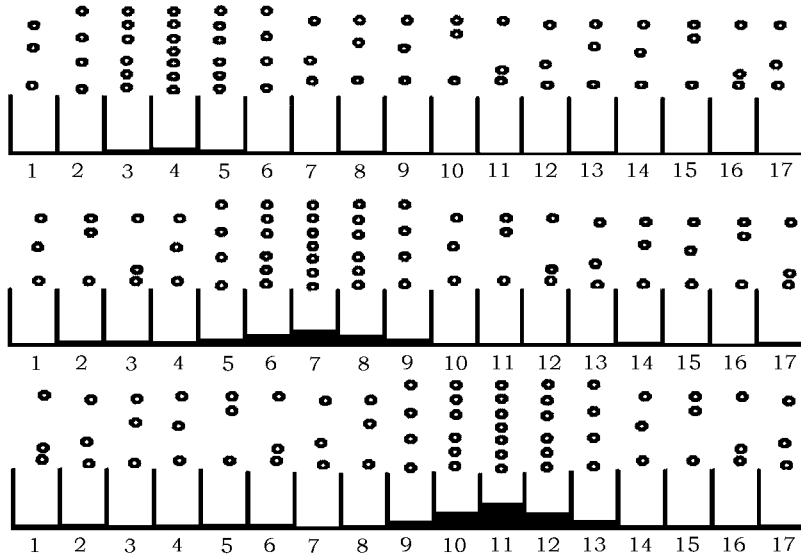


图2 CCD 漂移扫描观测模式的电荷累积过程示意
 ○代表入射光子，黑色部分代表光生电子。

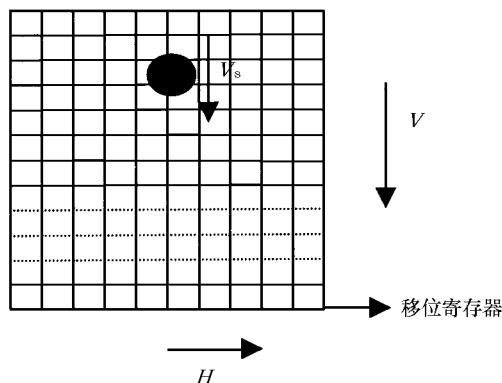


图 3 星像在 CCD 芯片上的移动

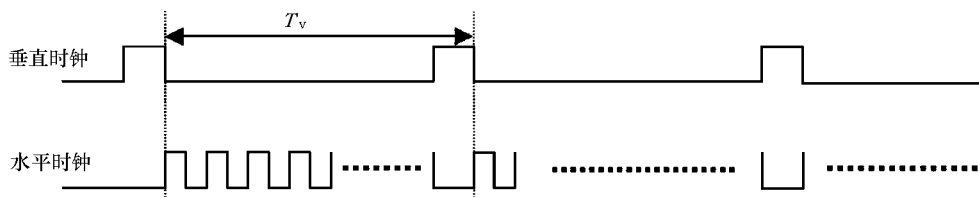


图 4 时序电路产生的时钟脉冲

为了使移动目标新产生的光生电荷始终叠加在其已产生的电荷上,从而达到电荷跟踪的目的,就需要电荷并行转移的方向与目标的移动方向一致,并行转移的速度 V 与星像在 CCD 光敏面上的移动速度 V_s 同步;因而对于不同运动速度的目标,要求计算机可对并行转移的速度进行编程,即改变电荷并行转移的周期 T_v (图 4)。 T_v 可以根据天体的赤纬 δ 、望远镜的焦距 f (单位 mm) 和 CCD 像元的高度 h (单位 mm) 计算出来^[5], 公式如下:

$$\begin{cases} s_{\text{scale}} = 206265/f \quad (\text{单位: } (")/\text{mm}), \\ v_0 = (360.0 \times 3600)/(23.0 \times 3600 + 56.0 \times 60 + 4.0) \quad (\text{单位: } (")/\text{s}), \\ v = v_0 \cdot \cos \delta \quad (\text{单位: } (")/\text{s}), \\ T_v = \frac{s_{\text{scale}}}{v} \cdot h \quad (\text{单位: s}). \end{cases}$$

例如,焦距为 750 mm、像元尺寸为 0.009 mm、赤纬为 20° 时,并行转移一行的时间 T_v 为 0.175122 s。

图 5 为用来实现 CCD 漂移扫描的硬件流程示意图。通过数据总线对模块 (1) 中的计数器进行计数初值设置,使它产生周期可变的列驱动脉冲及相应的相关双采样放大器 (Correlated Double Sampling) 的开关控制信号。从模块 (1) 产生的 CCD 移位脉冲还需要经过模块 (2) 中的驱动电路将其变成具有一定驱动功率的信号^[6,7]。

经过相关双采样放大器处理后,从 CCD 输出的信号变成有效信号电压,而此时的有效信号

电压为模拟量，必须经过 A/D 转换器将其转换为数字量，再送到计算机作进一步的信号处理。

A/D 转换器是一具有一定转换精度、高采样速率的模拟 / 数字转换器，每次采样后经数据总线将数据传给计算机。

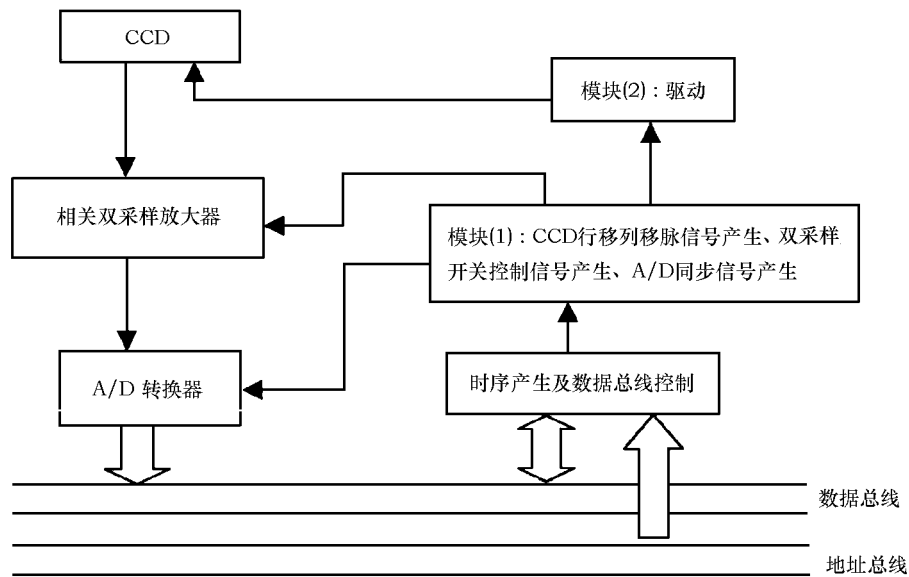


图 5 CCD 漂移扫描的硬件实现流程框图

3 CCD 漂移扫描的优点和不足

在原理和实际效果上，相对于传统的累积露光模式，应用 CCD 漂移扫描模式有很多优点，其中主要有以下几个方面：

(1) 更有效的巡天观测。传统的 CCD 观测模式用于巡天有 3 个缺陷：一是需要重复地进行 CCD 清零和开关望远镜的机械快门，即使对于一些更高速的 CCD 芯片，例如对于 WHT (William Herschel Telescope) 望远镜的标准数据采集系统，光清零和控制机械快门就需要 9 s^[28]，而大部分 CCD 则需要更多时间；二是需要频繁地在曝光观测和数据采集之间切换，这也需要花费时间，例如上海天文台的 1.56 m 望远镜配备的 2K×2K 的 CCD 存储一幅图需要 30 s，北京天文台 2.16 m 望远镜存储一幅图大约需要近 2 min，这对于巡天观测来说时间的损耗是相当可观的。三是由于需要望远镜跟踪观测目标，这给远程操作、自动化或半自动化提供了难度。CCD 漂移扫描技术每次观测只需一次清零，不用开关快门；更重要的是能逐行采集数据并显示出来，因此能连续观测某条赤纬带，这不但提高了巡天观测的工作效率，减轻了观测人员的工作强度，显著增加了观测数据；而且使得操作能得到实时的反馈信息：观测人员可以根据可视化的反馈信息快速检查所获得的数据，甚至对望远镜作出必要的调节。尤其当 CCD 拼接技术成熟后，更多的望远镜采用大尺寸 CCD 作为探测终端设备，上面的这些特点显得尤为重要。另外从原理上讲，CCD 漂移扫描技术在观测过程中望远镜无需

跟踪目标,不但避免了由于机械原因造成的跟踪误差,更重要的是便于实现半自动化、自动化甚至是远程操作,这将极大地节省人力资源。

(2) 由于 CCD 漂移扫描能对低纬和中纬带上的恒星(一般认为赤纬小于 50°) 观测得到良好的圆星像;这对同步卫星相对恒星背景的光学定位来说是很大优势。分别对同步卫星和恒星背景交替采用跟踪模式和漂移扫描模式观测,使得同步卫星和恒星均呈良好的圆星像,这样星像中心的量度坐标的误差将大大减小,定位精度也将大幅提高。

(3) 利用漂移扫描不仅可以探测近地天体,为近地天体撞击地球作出预防,而且还可以进行高轨空间碎片的探测和超新星等新领域的观测研究^[26]。

(4) 子午环在配备 CCD 漂移扫描系统后,可使两者的优势互补。子午环用来对天体位置做绝对测量,曾经在天文观测中发挥过巨大作用。随着发展的需求,子午环的定位精度差、星等要求高和由于不能跟踪目标所引起的观测效率低下的弱点越发明显,而且在低纬地区设置的子午环观测误差更大。这样世界上的 100 多台子午环已逐渐不受重视;但是子午环也有它的优点,由于它的出现是为了满足绝对测量的要求,其仪器的稳定性要比一般的望远镜好,而且它是观测通过子午圈的天体。而 CCD 漂移扫描技术无需望远镜跟踪,但是它需要赤经方向在 CCD 面上的投影与 CCD 的列方向严格平行。如果将 CCD 漂移扫描技术应用于子午环,在准确调节 CCD 光敏面后只需在南北方向上移动就可以扫描不同的赤纬带。这对设置在低纬度地区的子午环也适合。

(5) 一方面,由于从移位寄存器中读取的信号是经过整列像素后的平均效果,使得列信号受该列像素间量子效率差异引起的影响很小;另一方面,列与列之间平场的非均匀性依然存在;所以在做平场改正时,只需做简单的一维改正即可^[27]。

与传统的观测方式相比较, CCD 漂移扫描从观测原理上来讲也存在一些缺陷,主要有:

(1) 漂移扫描无法像传统观测方式那样任意增加曝光时间;它的有效曝光时间,即天体走过视场的时间,受观测目标的运动速度和视场宽度的限制,从而不能做更深的观测。

(2) 由于电荷并行转移的速度是以视场中心的天体运动速度为参考的,而望远镜的视场又有一定的赤纬跨度,所以对非视场中心的天体,其星像肯定会有不同程度的拖尾和倾斜,而且越远离视场中心,星像拖尾和倾斜现象越严重,这也是漂移扫描观测时单个 CCD 视场不能太大的原因。

(3) 漂移扫描实现的电荷跟踪,实际上是用离散的电荷载转移去拟合观测目标的连续运动,这就会导致采样不足,而采样不足的结果是在赤经方向出现星像失真(smearing)。

(4) 严格地讲,除了赤道上空的天体,其他所有天体运动轨迹的投影与直线都有一定的偏差,导致星像并不是严格沿着 CCD 的列方向漂移,从而会使星像在赤纬方向变得模糊;而且这种现象随着天体赤纬的增加而突显,星像质量随着天体赤纬的增加而下降,这也是漂移扫描不能观测靠近天极目标的原因^[27]。

(5) 应用 CCD 漂移扫描技术,如不进行人工干预,一个晚上就不能重复观测同一个目标。

(6) 应用 CCD 漂移扫描技术时望远镜不跟踪目标,天体与 CCD 光敏面沿 CCD 的列方向有相对运动,导致了同一天体发出的光照射在沿 CCD 列方向上的不同区域,即越晚产生的电子越靠近水平移位寄存器,所以由同一个天体产生的光生电荷沿 CCD 的列方向转移的行数不同,转移的次数不同,这使得该天体的星像受 CCD 本身的电荷转移效率(CTE)的影响比较

显著。而传统的跟踪模式,由于天体与 CCD 光敏面没有明显的相对运动,同一天体不同时间发出的光始终照射在相同的区域,所以该天体的星像受 CCD 本身的电荷转移效率影响很小。随着新技术新工艺的采用, CCD 的电荷转移效率逐渐趋向 1。例如, SITe442A CCD 的垂直 CTE 达 0.999999995, 水平 CTE 达 0.99999981^[1], 该影响可以大为削弱。

(7) 在长时间连续观测时,受大气湍流的影响而引起星像抖动的现象比较显著。

上述 (6)、(7) 两点也是引起数据系统差的主要原因^[8]。

4 CCD 漂移扫描在天文观测上的应用与发展

由于 CCD 漂移扫描技术不但能对一定条件下的运动目标达到很好的观测效果;能观测一些较暗的天体;而且漂移扫描模式可以对某一条赤纬带进行长时间连续观测(在计算机存储容量允许范围内),增加了一个晚上所能观测的天区面积和星的数目,所以在巡天观测和星表加密中(例如 CMC13 星表、M2000 星表、SDSS 的 EDR 星表)是一种应用非常广泛的特殊 CCD 读出方式。另外在双星、掩星与变星观测、近地天体搜索、人造卫星监测及目标识别等领域也有非常广阔的应用前景。

从上个世纪 90 年代中后期开始,国外已有一些光学望远镜安装了可以用漂移扫描方式采集数据的终端设备,例如英国卡尔士勃格望远镜(Carlsberg Meridian Telescope)、法国波尔多子午环(Bordeaux CCD Meridian Circle)、美国海军天文台旗杆镇子午环(The Flagstaff Astrometric Scanning Transit Telescope)、乌克兰尼古拉耶夫天文台的多通道望远镜(The Multi-Channel Telescope)和水平子午环(The Axial Meridian Circle)等;也有数个望远镜采用了大面积 CCD 阵列作为其终端设备,其中有委内瑞拉施密特望远镜(The Venezuelan Schmidt telescope)、SDSS 的 2.5 m 望远镜和加利福尼亚技术学院 Palomar 天文台的 1.2 m Oschin 施密特望远镜等;另外在快速测光领域,漂移扫描也发挥着越来越重要的作用。本节将详述这些望远镜及其终端接收设备的性能参数和目前的主要工作。

4.1 用于光学定位的单 CCD 像传感器的望远镜

4.1.1 英国卡尔士勃格望远镜(CMT)^[8,9]

CMT 是一架建造于 1952 年的子午望远镜,1983 年 9 月搬至西班牙 Canary 岛 La Palma,并于 1984 年 5 月 1 日开始正式观测。1998 年采用等效于 SDSS 的 r 波段的滤光片和 CCD 漂移扫描观测方式代替原有的测微器等。

目前,该望远镜的观测任务主要是提供亮星参考架和暗星参考架之间的连接,加密星表。目前为止覆盖天区为赤纬 $-3^{\circ}\sim 50^{\circ}$,并逐渐扩充至 $-15^{\circ}\sim 50^{\circ}$;利用该望远镜,每晚用漂移扫描模式可以观测 50 平方度天区,约 10~20 万颗星(约 3 Gb 数据,采用数据自动参数化可压缩至 6~7 Mb)。

4.1.2 法国波尔多子午环(BCMC)^[10]

1994 年 3 月,波尔多子午环就安装了具有漂移扫描功能的照相机,其 CCD 芯片像素数目为 512×512 ,视场宽度为 $14'$ 。该 CCD 设备于 1995 年 5 月安装在靠近巴西 Sao Paulo 的 Valinhos 子午环上,并作为法国 Bordeaux 天文台和巴西 Sao Paulo 天文研究中心合作计划的一部分。第二代具有漂移扫描功能的照相机于 1996 年 6 月装备在 Bordeaux 子午环上。从 1998

年后的 10 年间, 同 Valinhos 子午环一起, Bordeaux 子午环主要用于 Hipparcos-Tycho 框架的扩展; 同时, Bordeaux 子午环还用来完成 Meridian 2000 项目。

4.1.3 美国海军天文台旗杆镇子午环 (FASTT) [11~14]

该望远镜是一架传统子午环, 已经实现了包括目标选择、观测、数据处理和结果验证在内的全自动化操作, 主要采用漂移扫描模式观测。从 2003 年起每年只需要一个人来负责程序维护和数据清理。利用该望远镜, 一年可以得到不同观测目标大约共 41000 帧 CCD 图像; 到 2003 年底, FASTT 已经观测并得到 190000 颗太阳系天体的位置。

目前 FASTT 的观测任务有: 用于支持多个航天器飞行任务的天体测量; 掩星发生的预报; 计算所选目标的动力学质量; 改进包含上万颗小行星、太阳系行星 (从木星到冥王星) 和木星的 17 颗卫星在内的星历表; 建立赤道附近的标准天区; 修正 Hipparcos 参考架和国际地球参考架之间的连接; 确定射电源的精确位置; 研究 FK5 星表的系统差等。此外, 该望远镜还用来观测变星和双星。

4.1.4 乌克兰尼古拉耶夫天文台的多通道望远镜 (MCT) [15] 和水平子午环 (AMC) [16]

MCT 和 AMC 属于乌克兰尼古拉耶夫天文台, 它们的终端接收设备 (不包括 CCD 芯片) 是该天文台自行研制并于 1999 年装配, 同年正式用于天文观测。MCT 既可以用漂移扫描模式也可以用传统的跟踪模式, MCT 的主要观测任务有 3 个: (1) 改进部分小行星的轨道参数和质量; (2) 改进近地天体 (高度在 400~34000 km) 的坐标和光度参数; (3) 亮于 15 mag 的河外射电源的观测。AMC 是一架轴向垂直于子午面的水平子午环, 包括主望远镜和一个与主望远镜同轴的准直望远镜, 两者之间是两个平面反射镜, 夹角为 45° , 从而保证了来自子午面上的星光经反射后水平进入主望远镜的镜筒。准直望远镜的口径 180 mm, 焦距 12360 mm, 采用 CCD-13M 芯片, 像素数目 288×256 , 像素尺寸 $24 \times 32 \mu\text{m}^2$ 。该望远镜目前只用于漂移扫描模式观测, 每次扫描 $26' \times 5^\circ$ 的天区。目前 AMC 主要用于恒星和小行星定位。

表 1 是具有漂移扫描模式的几架望远镜的主要参数。

表 1 具有漂移扫描模式的几架望远镜的主要参数

		英国 Carlsberg 子午望远镜	美国 FASTT 中天 望远镜	法国 Bordeaux 子午环	乌克兰 MCT 望远镜	乌克兰水平 子午环
望远镜	安装地点	La Palma	Flagstaff	Bordeaux	Nikolaev	Nikolaev
	焦距 /cm	266	208	236.8	200	248
	口径 /cm	17.8	20	20.2	16	18
	视场 /(')	23.9	50.7	28	30	26
照相机	CCD 芯片	KAF-4202	FA2048	TH7896M	ISD017AP	ISD017AP
	像素数目	2060×2048	2048×2048	1024×1024	1040×1060	1040×1060
	像元尺寸 / μm^2	9×9	15×15	19×19	16×16	16×16
	满阱电荷 / e^-	100000		464000	180000	180000
	暗流 / $e^- \cdot \text{rms}$	15 (-25°C)		87 (25°C)	8 (-35°C)	8 (-35°C)
	工作温度 /($^\circ\text{C}$)	-30	-49	-40	-35	-35
	动态范围 /dB	76		75	80	80
系统	漂移扫描始用年份	1998 年	1988 年, 1999 年升级	1996 年	1999 年	1999 年
	工作方式	自动、远程操作	全自动	全自动	半自动	半自动
	定位精度 /(')	0.05~0.1	0.047~0.3	0.06~0.17	0.15~0.5	0.15~0.5
	极限星等 /mag	17.0	18.3	16	15	16

4.2 漂移扫描应用于掩星和变星的检测

掩星是角直径较小的天体在位于地球上观测者的视线方向上被月面或行星遮蔽的现象,包括月掩星、月掩射电源、月掩行星、行星掩星、行星掩射电源等天文现象。变星是指亮度有起伏变化的恒星。引起恒星亮度变化有几何的原因(如交食、屏蔽)和物理的原因(如脉动、爆发)以及两种原因兼有(如交食加上两星间的质量交流)3种情况。不管掩星还是变星,共同的特点就是它们的光度信息随时间在变化,而光度随时间的变化可以通过 CCD 漂移扫描技术在快速测光上的应用检测得到。这种快速测光的原理为:将望远镜指向目标位置并在观测过程中保持跟踪;打开快门,经过很短的曝光时间 t_1 后,目标产生的光生电荷所成图像为一斑点状图像 (speckle image), 该斑点图像的区域即为目标所在的子阵 (subarray); 在尽可能短的时间 t_2 内将子阵中的信号电荷快速转移到下一个区域,从而完成一个周期为 t ($t = t_1 + t_2$) 的观测,在电荷转移过程中保持快门一直打开。重复上述周期,直到第一帧斑点图像被转移到 CCD 阵列的最末端,然后关闭快门,观测结束,这样在整帧 CCD 里存储有数 10 个或 20 个左右的斑点图序列。最后从移位寄存器中将整帧图像读出。这种斑点成像的过程如图 6 所示^[24]。应用该方法做快速测光有两个优点:(1)可以实时检测掩星或变星光度变化的整个过程;(2)如果采用合适的曝光时间,不但可以提高斑点图像的信噪比,而且能够最大限度地减少大气的影响。由于该方法在数据读取上与漂移扫描技术类似,所以也被认为是一种广义的 CCD 漂移扫描。

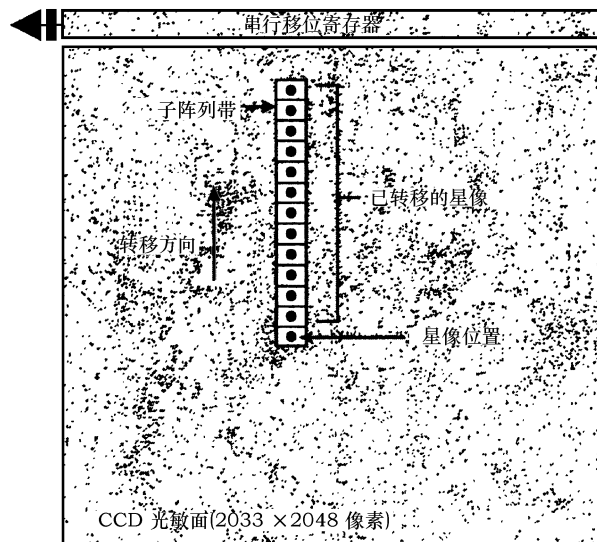


图 6 利用漂移扫描做快速测光的原理示意图^[24]

4.3 以大面积 CCD 阵列作为终端设备的望远镜

由于增大终端探测设备的光敏面有 3 个好处:(1)视场扩大,提高了观测效率,缩短了观测时间;(2)增加了有效曝光的时间,能够提供更深的观测;(3)扩大了框架的尺寸,提高了补偿精度^[8];所以现在一些望远镜的终端探测器都趋向于使用更大尺寸的 CCD,但事实上并不能一味地靠增加单个 CCD 芯片的尺寸来增加探测设备光敏面,一方面在工艺上 CCD

很难做到很大,另一方面由于在较大视场内恒星的漂移速度存在较大差异,使得远离视场中央的恒星星像存在比较严重的拖尾和倾斜现象。为了在扩大视场的前提下保证星像的质量,国际上已经有数个望远镜采用大面积 CCD 阵列作为其终端设备,例如委内瑞拉施密特望远镜(The Venezuelan Schmidt telescope)^[17~19]、SDSS 的 2.5 m 巡天望远镜^[20,21]和加利福尼亚技术学院 Palomar 天文台的 1.2 m Oschin 施密特望远镜^[22]等。

安装在委内瑞拉施密特望远镜(VST)终端的照相机是由耶鲁大学和印第安纳大学联合研制的,于1997年装配在VST上,1998年11月正式观测。该照相机是把16个CCD组成一个方阵,如图7所示,每4个CCD分别由不同的时序电路控制,每列CCD前分别装置v、u、b和u滤光片,保证每次观测可以同时得到3个波段的星像。由于在观测过程中望远镜是固定不动的,整个系统非常稳定,所以能得到更精确的光度测量。星像中的任一点的值都是经过整列像素后的平均效果,这降低了由像素间量子效率差异引起的误差,从而大大提高测

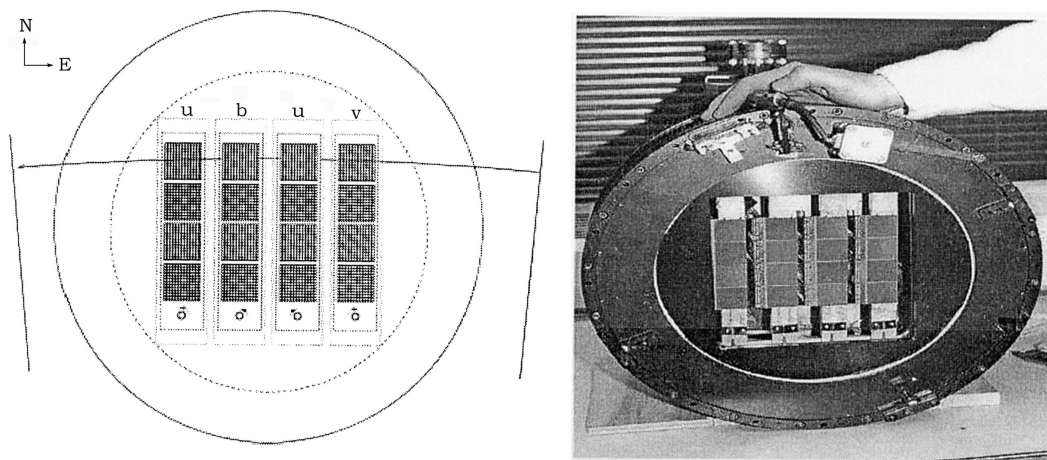


图7 委内瑞拉施密特望远镜的终端 CCD 设备^[19]

表2 委内瑞拉施密特望远镜的参数^[19]

		参 数	
望远镜	安装地点	Llano del Hato	
	焦距 /cm	303	
	口径 /cm	100	
照相机	单个 CCD	像素数目	2048×2048
		像元尺寸 / μm	15
		比例尺 /($''$)·pixel ⁻¹	1.0
		视场 /($'$)	30.0
CCD 阵列	像素数目	8192×8192	
	阵列尺寸 /cm ²	12.6×18.2	
	视场 /平方度	2.3×3.5	
系统		7 台奔腾处理器 实时处理 极限星等 $m_B \approx 21 \text{ mag}$	

光的精度。在一个晴朗的夜晚,该望远镜可以扫描一条 $2.3^\circ \times 120^\circ$ 的带,天区面积大约是 250 平方度。目前 QUEST (QUasar Equatorial Survey Team) 主要利用该望远镜对赤道附近 $\pm 6^\circ$ 大约 4000 平方度的天区做巡天观测。有关该望远镜的参数如表 2 所示。

Palomar-QUEST 大面元照相机的光敏面是用 112 个 CCD 拼接而成的 (CCD 阵列为 7×16), 也是由耶鲁大学和印第安纳大学物理学院研制而成, 该照相机现安装在位于加利福尼亚技术学院 Palomar 天文台的 1.2 m Oschin 施密特望远镜上, 操作过程全自动化。每一个 CCD 都采用量子效率较高的背光照射, 像素数目为 2400×600 , 像素尺寸为 $13 \mu\text{m}$; 拼接后像素数目为 16800×9600 , 整个视场 9.5 平方度, 每个像素 $0.878''$ 。在一个有效观测时间为 8.5 h 的夜晚, 可生成 4 个波段的 540 平方度 (赤经方向 120° , 赤纬方向 4.5°) 的图像, 其中在 R 波段的极限星等为 21 mag。

SDSS 的 2.5 m 巡天望远镜安放在美国新墨西哥州 Apache Point 天文台, 用来对北银极 10000 平方度和近南银极的 3 个天区进行巡天观测, 目的是测量星系和类星体的红移。在同一望远镜上设计了两种观测方式, 既可以对 640 个天体作光谱观测, 也可以同时在 5 个波段对星像作天体测量和测光。望远镜口径 2.5 m, 视场为 2.5° , 场畸变小于 $0.1''$, 在焦平面上安置星像照相机和两个双棱镜摄谱仪; 星像照相机有 30 个 49.2 mm^2 大小、像素数目 2048×2048 的测光 CCD, 焦面像比例尺为 $3.616 \text{ mm}/(')$, 像元大小和比例尺为 $24 \mu\text{m}$ 和 $0.396''/\text{pixel}$; 还有 22 个天体测量 CCD, 整个观测用漂移扫描模式运行。除了上述主望远镜外还有 3 个辅助仪器: 0.5 m 的测光望远镜、大气宁静度监测仪和 $10 \mu\text{m}$ 云层扫描仪。该仪器已在 2000 年 4 月开始正式观测, 5 年内观测了 $1/4$ 天空约 10000 平方度, 检测 5×10^7 个星系、 10^6 类星体和 8×10^7 恒星。

图 8 为该望远镜星像照相仪的示意图。图中 CCD 两侧向下的箭头表示扫描观测时星的运动方向。中央部分为 30 个测光 CCD, 其前装置 r、i、u、z、g 波段的滤光片, 每块像素

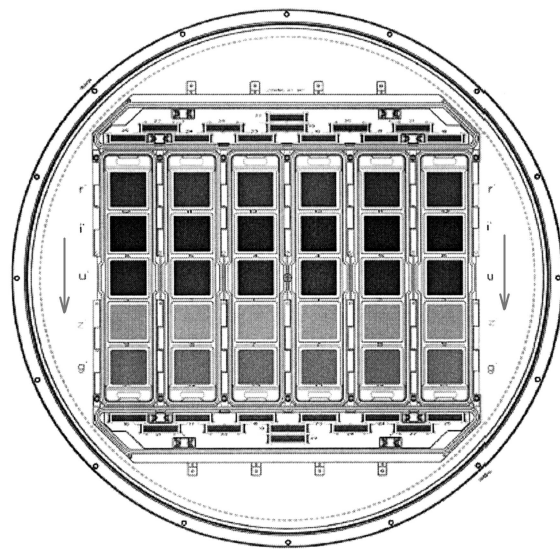


图 8 SDSS 的 2.5 m 望远镜的星像照相仪示意图 [25]

动数目 2048×2048 ; 上下两端较小的长方形为 22 块天体测量 CCD, 排列成二排, 第一排 5 个, 第二排 6 个, 每块像素数目 2048×400 , 这 22 个天体测量 CCD 用来把观测连接到天体测量参考框架上; 最上和最下面的 2 个 CCD 是专门用以动态测定焦距的变化。不难发现, 该照相仪的设计非常巧妙, 由于测光 CCD 和天测 CCD 的尺寸不同, 天体经过两类 CCD 的时间长短不同, 也就造成了它们有效曝光时间的差别, 从而达到长短露光的效果。

5 CCD 漂移扫描在我国的应用和研究现状

目前 CCD 漂移扫描观测模式在我国的应用和研究虽还处于开始阶段, 但是已取得一定的成果, 例如, 由光学与红外 CCD 探测器实验室研制完成的空间太阳望远镜 / 主光学望远镜 (SST/MOT) 的 200 万像素 CCD 帧转移相机样机于 2002 年 6 月 13 日通过专家验收。研制组根据任务书的特殊要求, 提出了有独到见解的实现方法, 具有相当的创新点, 如在 MPP (Multi-Pinned Phase) 模式 (该模式可以极大减小热噪声) 下达到超过 25 万电子的满阱电荷, 成功试验了漂移扫描 CTDI 模式等。漂移读出在巡天观测中是一种应用非常广泛的特殊 CCD 读出方式。该设计大胆创新, 首次采用插入时钟的模式, 省略了国际上通常使用的高精度分频器, 大大减少了硬件的体积和数量, 提高了控制跟踪精度^[26]。

2004 年 10 月, 中国科学院紫金山天文台 1 m/1.2 m 口径施密特近地天体望远镜已在盱眙观测基地顺利安装, 从美国引进的 CCD 探测系统 (带漂移扫描功能) 正在进行总体测试和检测。该望远镜改正透镜的口径 1 m, 球面反射主镜口径 1.2 m、焦距 1.8 m, 有效无晕视场 3.14° , 改正镜的中心波长 656.3 nm, 具有大视场、强光力的特点, 在施密特型的望远镜中, 名列世界第 5 位。其终端装备具有漂移扫描功能的大尺寸、高灵敏度 $4K \times 4K$ CCD 探测系统, 望远镜的 CCD 探测视场为 $2^\circ \times 2^\circ$, 目前居国内之首位。该望远镜系统投入工作后, 不仅可进行近地天体的探测, 在国际近地天体联测网中为预防近地天体撞击地球做出有显示度的工作, 而且还可以进行高轨空间碎片的探测和超新星、暗物质等新领域的观测研究^[27]。

上海天文台也于 2004 年下半年开始和乌克兰尼古拉耶夫天文台联合研制 CCD 漂移扫描设备。尼古拉耶夫天文台在研制漂移扫描 CCD 的硬件与软件方面有很强的实力, 与上海天文台又已有多年合作的基础, 上海天文台派了 3 位技术人员于 2004 年 10~12 月到乌克兰参与了该项目的硬件研制工作, 并且已经初步掌握了相关技术。该项目预计在 2005 年完成。漂移扫描 CCD 照相机正式投入使用后, 将可以通过国际合作根据需要进行长时间连续观测, 上海天文台与尼古拉耶夫天文台距离约 10000 km, 地理经度差为 90° (即 6 h 时差), 双方联合观测可显著提高卫星的观测弧段范围, 根据计算, 在夏天, 联合观测可覆盖同步卫星轨道的 50%, 在冬天则可覆盖近 100%, 这在一个观测地点是根本无法达到的。覆盖卫星轨道比例越多, 定轨精度越高。除应用于同步卫星的精密光学定位外, 双方将扩展合作研究领域, 利用漂移扫描 CCD 照相机进行空间碎片、近地天体以及小行星等目标的监测。

6 CCD 漂移扫描技术的应用前景

由于 CCD 漂移扫描技术应用的关键问题就是保证目标的运动轨迹在像传感器上的投影与 CCD 的列方向严格平行,所以对低轨或其他轨道并不稳定的天体难以进行观测,这也是 CCD 漂移扫描技术发展中的一个瓶颈。为了解决这个问题,有的科研人员已经提出一个方案,就是利用高精度的轨道预报旋转 CCD,使得 CCD 的列方向同目标运动轨迹在像传感器上的投影平行,并在同步驱动信号的驱动下实现对低轨目标的电荷跟踪。如果该方案的试验能够获得成功,无疑将极大扩展 CCD 漂移扫描技术的应用前景。

致谢 关于 CCD 漂移扫描硬件部分,作者得到国家天文台叶彬浔和赵昭旺两位老师的悉心指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 王庆有,孙学珠. CCD 应用技术,天津:天津大学出版社,1993:2~5
- [2] Gerald C H. CCD Arrays Cameras and Displays, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998: 10~20
- [3] Pool P J, Holtom R, Morris D G. *Ap&SS*, 1989, 228: 29
- [4] http://tech.163.com/scienceimport/0801/010723_44380_33695.html, 2001
- [5] <http://www.driftscan.com/#uebersicht>, 2003
- [6] <http://dianzi.net/show.asp?id=1794>, 2002
- [7] Kavachuk A. private communication, 2004-11-10
- [8] Evans D W, Irwin M J, Helmer L. *A&A*, 2002, 347: 348
- [9] Belizon F, Muinos J L, Vallejo M *et al.* *AdelA Pub. Ser.*, 2003, 1: 61
- [10] Viateau B, Requieme Y, Le Champion J F *et al.* *A&A*, 1999, 134: 173
- [11] http://www.nofs.navy.mil/about_NOFS/telescopes/fastt.html, 1999
- [12] Stone R C, Monet D G, Alice K B *et al.* *AJ*, 2003, 126: 2060
- [13] Stone R C. *AJ*, 1998, 506: 93
- [14] Garcia L A, Salas B E, Gomez F *et al.* *Inf. Bull. Variable Stars*, 2003, 5455: 1
- [15] <http://www.mao.nikolaev.ua/eng/main.html>, 2005
- [16] Pinigin G I, Kovalchuk A N, Protsyuk Y I *et al.* *Astron. Ges. Abstr. Ser.*, 2001, 18: 23
- [17] Sabbey C N, Coppi P, Oemler A. *PASP*, 1998, 110: 1067
- [18] Baltay C, Snyder J A, Andrews P *et al.* *PASP*, 2002, 114: 780
- [19] http://www.cida.ve/des_quest.html, 2000
- [20] Nicinski T. *ASP Conf. Ser.*, 1996, 101: 424
- [21] <http://www.sdss.org/background/telescope.html>, 2004
- [22] Graham M J, Williams R, Djorgovski S G *et al.* *ASP Conf. Ser.*, 2004, 314: 14
- [23] Fors O, Horch E P, Nunez J. *A&A*, 2004, 420: 397
- [24] Horch E P, Ninkov Z, Slawson R W. *AJ*, 1997, 114: 5
- [25] <http://www.sdss.org/dr3/instruments/imager/index.html#arrangement>, 2004
- [26] <http://www.bao.ac.cn/kjz/top10/2002/p17.htm>, 2002
- [27] <http://www.pmo.ac.cn/tushu/zttxdetail.asp?newsid=456>, 2004
- [28] Gibson B K, Hickson P. *MNRAS*, 1992, 258: 543

The Basic Principle and the Application in Astronomy of CCD Drift-Scan

MAO Yin-dun^{1,2}, TANG Zheng-hong¹, ZHENG Yi-jin¹, CAO Kai¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In this paper, the processes and the basic principle of CCD drift-scan are introduced. The advantages and the shortcomings of CCD drift-scan mode are discussed. The main parameters and the main tasks of several telescopes observing with drift-scan mode are shown. Finally, the application and the study about CCD drift-scan in China are introduced.

Key words: astrometry; drift scan; review; CCD; observation; telescope

* * * * *

《天文学进展》 2006 年征订启事

《天文学进展》2006 年征订事宜委托天津市全国非邮发报刊联订服务部全权办理。刊物为季刊, 每年的 3、6、9、12 月下旬出版, 每期定价 25 元, 全年 100 元 (含邮寄费和包装费)。凡需订阅者请将订刊款通过邮局或银行直接按以下地址汇出即可:

邮政编码: 300385

地 址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

户头全称: 天津市河西区联合征订服务部

帐 号: 605248-1046196

开户银行: 工商行天津市尖山分理处

电 话: (022) 23973378; (022) 23962479

传 真: (022) 23973378

网 址: www.lhzd.com

E - mail: lhzd@public.tpt.tj.cn

汇款时请注明“订阅 2006 年《天文学进展》(编号 5155)”字样和订阅份数、订户名称、收件人姓名、地址、邮政编码。联合征订部收到订刊款后即会奉上发票。本编辑部在刊物出版时即及时奉寄。凡在 2006 年中订阅者均能及时收到本刊。凡非通过上述渠道订阅本刊者, 如有延误或寄失, 本编辑部概不负责, 敬请谅解。

欢迎订阅, 谢谢支持!

《天文学进展》编辑部

2005 年 12 月