

编者的话

电荷耦合器件(CCD)的发展已经历了十个年头。无疑，CCD已在半导体器件中独树一帜。随着它的飞速发展，其应用范围日趋扩大，目前正在军事，科学研究，民用等领域里大显身手。

我国也早已开展了这项研制工作，但如何将目前的研制工作同推广应用有机地结合起来，从而达到加快研制进程的目的，仍是当前迫切有待解决的问题。正是基于上述问题，我们编译了《电荷耦合器件应用译文集》。当然，文集中的选题远远不是包罗万象的，它只能是很小的一部分，有许多应用还处于探索之中。

由于我们的水平有限，译文集定有不少不足之处，还望读者批评指正。

编者

一九七九年二月二十六日

目 录

1. 电荷耦合摄象器在天文学中的潜在用途	(1)
2. 用于行星宇宙飞船的CCD摄象仪	(4)
3. CCD星跟踪式定位器	(13)
4. 确定瞬间高能天体源的X—射线影象照象仪	(21)
5. CCD在声纳中的应用	(26)
6. 双差分电荷耦合模拟延迟器件	(28)
7. 一种脉冲多普勒雷达处理机	(33)
8. 用于雷达动目标显示器的电荷耦合雪比契夫滤波器	(39)
9. 用作半导体工艺控制的电荷耦合器件测试结构	(41)
10. CCD在文件扫描上的应用	(50)
11. 一种实验的页面传真系统	(55)
12. 阴极射线管的设计进展预示着示波器的改进	(63)
13. 512×320单元电荷耦合摄象机的冷却慢扫描特性	(66)
14. 电荷耦合器件摄象技术的评述	(69)

电荷耦合摄象器在天文学中的潜在用途

Thomas B. McCord

摘要: 从科学的早期以来, 两维探测器在天文学中便是重要的了。最近, 对更高的测量光度精确性、灵敏度及光谱视界的要求激励了对更佳摄象器件的寻求。具有各种靶材料及增强措施的电子束读出器件, 包括次级电子导电摄象管和硅光导摄象管都已成功地被使用了。作为图象探测器的CCD较之电子束读出器件来说具有以下一些潜在的优点: 噪声低、结构简单及几何稳定性好等。

自开始研究天文学以来, 更广泛使用两维光电探测器了。那时几乎只借助人的眼睛及后来出现的摄象胶片。在以往的10—20年中, 试验了多种电子探测器, 但只有少数几种用在望远镜中来进行实际观察。这些器件用来代替人的眼睛以进行发现、跟踪及一般的视界观察等工作。更重要的是, 这些器件被用来对直接图象及扩展物体和点光源的光谱进行定量测量。

在一系列的光电—电荷—载流子转换器件中, CCD是最近发展起来的器件。是一种最有希望成为“完善”探测器的器件。有人请我简述一下什么探测器特性对地方天文学家是重要的, 以及CCD是如何满足天文学家的要求的。

CCD是一种在硅片上淀积电极结构的器件。硅片是光敏材料, 在其内部光子转换成电荷载流子。探测器的光电特性首先指的就是硅的这些特性。通过在电极上加电场, 电荷载流子被收集和存储在硅片上的势阱中。在一适当时候, 存储电荷能穿过芯片, 经过一电荷敏感放大器, 然后转换成视频信号。因为势阱是芯片阵列中的分立单元, 所以在作用上来说, 探测器便成为一个分立的邻接的光电传感器阵列。

通过对硅二极管阵列光导摄象管的研究, 总结了二维硅光电探测器工作方面的有关经验。最近, 这种器件已用到天文学上(参考文献1)。已经报导了在望远镜上所作的几项试验计划(参考文献2, 3)。现在这种器件正例行地为科学应用服务(参考文献4, 5)。

硅光导摄象管的许多问题与电子束读出及外部前置放大器有关。CCD是直接读出, 而其前置放大器是制造在硅片上的。在考虑到硅光导摄象管的高性能问题之际, CCD对天文学会有极大的潜在使用价值。事实上, 我的印象是, 天文学中的图象探测发展规划的中心工作正迅速地转向CCD方面。

虽然, 我将密切注意地面天文学的要求, 但我要指出的是: CCD探测器肯定会在宇宙飞船上的望远镜新计划中找出道路。使CCD在地球上有效的特性也将应用在宇宙工作中。正象我所肯定的那样, 这个问题将在此计划的其它地方加以讨论。另外, CCD的小尺寸和低功耗要求也将有助于它适用于宇宙。

天文学家所作的各种观察表明, 没有一种探测器会满足所有的要求。已观察到点光源图象(星)及扩展光源(行星, 星云, 银河系)。所有这些物体的光谱拍摄得象扩展光源。点光源的尺寸受到望远镜的光学系统的放大倍数和衍射以及大气骚动的限制。在短波长时, 光谱范围受到大气吸收的限制, 在长波长时受到地面热发射的限制。表1列出了能进行摄象的条件范围。

表2给出了目前所用的几种二维摄象器件的特点和性能。这些数值往往是近似的, 关于性能, 在某些情况下, 在天文学家之间是有争议的。这里我们给出了目前的技术状况。

对次级电子导电摄像管和静电感应管来说，量子效率和光谱范围受到光电阴极的限制，而对硅光导摄像管和CCD来讲受到硅及其表面涂层的限制。最大信号受电荷存储的限制。容量和最小信号等于前置放大器噪声。线性度范围，响应曲线 r 的斜率及光学精密性是整个探测器读出系统的特点。

CCD比其它探测器好，非所希望的问题若不出现的话，则它在天文学中将会成为一种重要的器件。我们认为，有待改进的最重要的特性是最小检测信号和阵列尺寸。光谱范围和量子效率也很重要。

表 1 用望远镜观察时的条件范围的规定

测量精度	0.1—10%
物体尺寸	≥ 10 微米
视界	1—300毫米
强度	$10-10^6$ 光子/像素
入入	0.3—3.0微米
▽入	$10^{-2} \text{ \AA} - 10^4 \text{ \AA}$
曝光	$10^{-2} - 2 \times 10^4$ 秒

表 2 从用实验系统来研究天文学的一些天文学家那里收集的几种二维探测器的性能

特 点	胶 片	次级电子导电摄像管	硅光导摄像管	静电感应管	CCD(现在的)	CCD(将来的)	理想的
量子效率(%)	< 1	1—15	1—70	1—15	~1—50	< 60	100
光谱范围(微米)	≤ 0.9	0.4—0.85	0.34—1.10	0.37—0.85	0.4—1.0	< 1.10	< 3
最大信号 (光电子/象素)	$\leq 5 \times 10^4$	2000	$\sim 10^6$	$\sim 10^3$	$10^5 \sim 10^6$	$\sim 10^6$	10^6
最小检测信号 (光电子/象素)	≥ 500	4	300	2	~300	~10	1
线性范围	$10^2 - 10^3$	~500	$\geq 10^3$	$\geq 10^3$	?	$> 10^5$	10^6
I	变 化	?	1.00(O)	0.97	?	1.00	1.00000
光学精度	百分之几	1.2×光电噪声	有限光电噪声	有限光电噪声	$< 1\%$	有限光电噪声(?)	有限光电噪声
阵列尺寸 (象素)	3×10^4	$10^3 \times 10^3$	500×500	500×500	100×100	500×500	$10^4 \times 10^4$
象素尺寸(微米)	10	25	25—50	25—50	25	25	10
数字读出	不	是	是	是	是	是	是
冷却	不	不	是	是	是	是	不
易碎性(1—3)	3	1	2	2	3	3	3
价 格	便宜	1000	250	1200	500	≤ 1000	便宜
预存增益	—	50—100	1	1000	1	1	1

译自《1975 Symposium on CCD Technology for Scientific Imaging Applications》p.35 黄提多译

用于行星宇宙飞船的CCD摄象仪

Terrence H. Reilly 等人

美国喷气推进实验室

摘要: 在认识到改进行星摄象有着巨大潜力的情况下, 国家航空和宇宙航行局(NASA)早就是并继续是研制CCD的支持者。本文目的是报导由NASA发起的, 旨在研制与CCD传感器一起使用的新的宇宙飞船照相系统而作出的有关努力。我们先简单地评述一下科研任务和影响远空间照相机设计的工程限制因素。接下来再评论正在喷气推进实验室(JPL)中进行的两项研制规划, 一项是研制一个行扫描摄象器, 另一项是研制一个面型阵列帧照相机。对这两项中的每一项, 将概述一下摄象器, 并着重描述其独特的特点。从讨论中我们可以很清楚地看到目前可得的CCD在某些方面还不能满足我们的需要。因此, 通过说明总结出CCD照相机的前景与传感器的继续成功地研制是如何息息相关的。

一、行星摄象器的设计考虑

行星宇宙飞船上的摄象机是科技界的愿望和工艺引起的限制因素之间的折衷物。本文第一部分评述了这些愿望和限制因素。应NASA的邀请, 行星科学家们为每次新的飞行使命规定了摄象目标。原目标可叙述如下: 测出了卫星的赤道直径 $I_0(\pm 1/2\%)$ 。宇宙飞船的轨道给出后, 照相机设计者就可将这种科研目标变为角分辨率, 几何保真度和图象格式的等效组合。

科学目标既可以是绝对的, 又可以说是相对的。绝对目标是来自自然现象。例如: 为了通过木星云层中的烷来研究吸收, 照相机必须在890毫微米时要反应。相对目标是与以前完成的任务或工艺水平的进展有着密切关系。习惯于800行电视图象的科学家们是不愿满足于较小格式的。

下面就照相机和传感器参数而表述的典型科学目标的简要总结:

1· 分辨率: 目标范围是100~10微弧度/每个像素。就合理的望远镜而言(焦距 ≤ 1.5 米)这就需要传感器上取样频率为20~40线对/毫米。整个照象机的调制转移在取样频率下至少应为20%。

2· 格式: 大多数科学家认为每维中具有1,000个像素的方形图象是良好的; 具有700个像素也是可以的。如果可获得某种特别吸引人的折衷方法或在迫不得已的情况下(如严格的重量限制), 将考虑更小的格式。通过几幅图象的拼凑, 就能建立较大的图象, 但拼凑图中的测量数据不能与单个帧的精度相比。而且, 背景处理费用与帧的数目成比的, 这样使许多小图象变为不受人欢迎。

3· 光谱响应: 图1示出了几种有用的光谱带, 其范围是从近紫外线到近红外线。典型的光谱滤波器具有20~100毫微米的通带。

4· 几何保真度: 在非计算图象中, 应能找出部分像素中的特征。这是实体测量、颜色配准、测绘及其他的照相测量术应用的需要。

5·光度学/偏振测定术：这虽然很难获得，但要求典型的绝对光度是10%，典型的相对光度是1%。该性能水准允许科学家研究行星表面的化学成分和探测与时间有关的亮度变化。

6·动态范围：行星景象常常具有低照光和对比度，因此图象调制不填满传感器的整个动态范围。该目标是要在图象上获得足够的可区别的灰色级，以便显示图象时，大大增大对比度。如果特定图象只占传感器动态范围的 $\frac{1}{8}$ ，对比度将扩大，并填满相片上的16个灰色级，照相机的动态范围必须至少是 $8 \times 16 = 128$ 。动态范围超过200是合适的。

7·图象处理：由于时间和成本的原因，科学家喜欢采用不需复杂的图象处理就可产生有价值图象的仪器。

照相机也必须要对付无人宇宙飞船上的寿命难题。下面列出了宇宙飞船能力和飞行使命特性所施加的主要限制因素。

1·最小尺寸/重量/功率：这些参数的合理分配是：

尺寸： $0.25 \times 0.25 \times 0.25 \sim 1.0$ 米

重量：2~25公斤

功率：10~20瓦

这些是一只照相机的参数；某些宇宙飞船装有二只照相机。

2·寿命和可靠性：典型的寿命要求是5~10年，3,000个工作小时。设计须经得起达250克的震动和20克的随机振动。之后还要某求简易性，反对采用移动部件。照相机作为科学仪器要求其保持校准度，这就意味着长期的稳定性。与地面仪器形成对照，使人苦恼的是不能解决漂移问题。故在早期就须将这个规则的例外因素考虑进去，并且实际上要提高照相机的复杂性。

3·数据带宽：由于通信的距离，故采用数字式数据系统。每一像素量子化为8~10位，这样25千赫变为250千位/秒(Kbps)。低无线电微波接力线路的电信信道的实时能力是在2~150Kbps范围内。对执行使命中的任何一点处用的实际速率取决于宇宙飞船设计，地球宇宙飞船范围及信道所需的信噪比。在这些情况下，理想的照相机应在几种非常低的数据率下能够工作。

传统的方法是使照相机与宇宙飞船上的外部缓冲器一起以一种速率进行工作。缓冲经常利用具有2百万位/秒(Mbps)和 5×10^8 位容量的数字式磁带记录仪进行。固体缓冲器较快(达10百万位)，但容量较小(小于 10^7 位)。由于缓冲器不能以我们所喜欢的速度工作，故常需用慢扫描照相机。这就意味着传感器本身必须具有能将摄得图象存储几十分钟的能力。一旦数据存于缓冲器，就能在任何所需的速率下被读到无线电信道上。

由于可靠性和增加的数据返回，当实时信道在高建率下工作时，目前宇宙飞船的设计允许有一数据缓冲器旁通道。过去，只要减少一些图象尺寸或降低质量，就能使以一种速率工作的照相机与实时信道匹配。为了利用实时选择的全部优点，未来的照相机应以各种图象格式和在几种更高的实时速率下工作。

4·环境：不管照相机是如何装在宇宙飞船上的，电子部分将处于室温或稍低于室温下。另外，望远镜能同时观察寒冷空间。热设计程度必须要控制好并将照相机的部件，特别是望远镜和传感器保持在上述限制情况下。该任务的困难是取决于传感器的温度灵敏度以及是否一定要冷却。

就目前和将来的飞行使命而言，由于行星，宇宙飞船功率发生器或这两者的关系。故存在着辐照危险。在1兆电子伏特(MeV)时，典型的辐照剂量是 10^6 拉特的电离辐照和 10^{11} 中子/厘米²。

5·低光：由于行星探索转向探索外行星，低照度问题就变得严重起来。通过把外行星上的太阳光照度与地球上的太阳光照度作一比较便能说明这点：地球=1.00，火星=0.44，木星=0.04，土星=0.01，天王星=0.0025。在近相遇时，由于宇宙飞船和行星的相应的运动，积分时间限制在

毫秒范围。在 6.000^0K 光时, 更远行星上的宽带曝光可能小于 $100\text{微焦耳}/\text{米}^2$ 。

CCD的优缺点可对照上述的目标和限制因素表, 测量照相机来看出。特别是红外和近红外时的光谱响应将大大扩大将来的摄象实验范围。不用广泛的全面校准, 便可保证有足够的几何保真度。动态范围和低照度光灵敏度在任何标准下是显而易见的。固体器件的潜在的寿命和可靠性非常好。与电子束传感器相比, 其尺寸/重量/功率方面的优点是明显的。

CCD已知的缺点对于仍处于研制阶段的器件来说, 不太使人惊恐的。对于行星工作来说, 目前可供使用的最大阵列还处于开始阶段。响应的非均匀性必须利用计算机处理来补偿, 以便产生研究质量的图象。但对辐射损坏的敏感性还没有彻底探索出来。因此, NASA和JpL最后发现CCD足够有希望证明第二部分和第三部分所述的照相机研制方案是合理的。

二. 行扫描摄象仪

行扫描摄象器方案的目的是为到外行星执行先锋级使命研制新颖照相机。目前的努力将导致1976年仪器模拟模型的完成, 并尽快在1979年能导致一个供发射的飞行模型。

先锋号宇宙飞船是单轴稳定的, 即以5转/分的额定转速围着其滚轴旋转。这种旋转允许采用扫描型照相机, 较之较熟悉的帧照相机基本上能提供一个重要的优点。为了这种应用, 已选择了一种行扫描照相机, 图2描述了它的工作方法。照相机的传感器是一种线性探测器阵列, 这种阵列通过宇宙飞船的旋转在行星表面上进行扫描, 产生一幅二维图象。线性传感器每次都在自身的宽度上前进, 并对积分光电荷进行取样和记录。

行扫描摄象仪由两部分构成: 置于宇宙飞船设备间中的电子部分和在外面的传感器/望远镜装置。步进马达和减速齿轮用来控制自始至终都与自旋轴有关的望远镜装置。第二自由度是由使得旋转宇宙飞船能以理想的旋转角来运载望远镜获得的。表1总结了行扫描摄象仪的主要特性。表1中的几项还需要附加说明。

被选择的传感器是目前正在得克萨斯仪器公司中研制的160位线性阵列的CCD。埋沟工作为辐照损害和较好的电荷转移效率提供了一个较高的阈值。传感器将被减薄, 并从背面进行光照, 使量子效率增加到最大限度。图象平面上使用三只传感器, 每只对应不同的谱带。光学滤波器将永久地被固定在传感器上面。

就简单的行扫描摄象仪而言, 传感器将由160个单元的单行组成。但是, CCD为图象摆动补偿(IMC)提供了机会, 而只是给摄象仪增加了很小的复杂性。在先锋号宇宙飞船上, 对图象运动的最大贡献者是宇宙飞船本身的转动。这种运动在速率和方向上是十分均匀的, 故不需复杂的逻辑。正如在望远镜的图象平面上看到的, 线性传感器上掠过的景象在方向上的几乎垂直于长尺寸。

图象运动补偿通过其他由几行(5~10行)组成的传感器来代替单行传感器获得。然后, 选择好电荷转移速率, 以便与在传感器上移动经过的光学图象的速度相匹配。因此, 当宇宙飞船的转动将光学图象上的一点从传感器的行1转移到行2时, 行1中产生的光学电荷也转移到行2。图象电荷在几行间隙中累积后, 便到达输出寄存器, 然后由取样电子设备读出。扫描摄象仪没有快门, 这样, 在电荷包转移经过CCD时, 行 $N+1$ 的电荷包立即跟随着行 N 的电荷包。由于光学图象经常在传感器上出现, 故除了并联寄存器中的有源行外, 所有其他部分必须用不透光屏蔽来遮盖。

图象运动补偿的效率是直接有源行的数目成正比的。就我们的应用而言, 大约将采用5条累积行以增加信号达5倍, 但不损失分辨率。有了这种用于执行使命的图象运动速度范围, 需要64种不同的电荷转移率, 以便使光学和电子图象速率之间的失配不超过3%。最后的失配取决于所采用

的IMC行的数目。在这种情况下,最坏情况的误差将是一个像素的总误差的 $5 \text{行} \times 3\% = 15\%$ 。显然,累积行的数目越大,对CCD时钟频率发生器上的要求就越大。

步进马达使用时,采用普通的齿轮减速和谐波驱动这二级。结果是一次步进大小是5个像素,其精度比一个像素好。可控观察角度是 $10 \sim 185^\circ$,但仪器只能看到标尺低端的无线电天线。

由于为了获得一幅图象而需要大量的指令,摄影仪将配有简单的自动序列装置。有了这种可任意进行控制的序列装置,照相机将随着帧之间的预选观察角度的增大而自动地拍摄一系列照片。

为了提供 $100\mu\text{T}/\text{像素}$ 的角分辨率,望远镜的焦距要经过选择。光学孔径由重量的制约被限制到约10厘米。

整个帧的格式是 $160\text{像素} \times 640\text{行}$ 。短尺寸是由线性传感器中的单元数目决定。从性能观点来看,希望有一个较长的传感器,是这种尺寸许多倍的线性CCD已经制取。然而,传感器的长度也决定着从照相机读出的数据速率。(行时间是由采用图象运动补偿决定的,不是由暗电荷的建立或某些其他可控因素决定的)传感器中只要有160个单元,每秒最大的数据率已是8兆位。比这更高的数据率将大大增加照相机和宇宙飞船数据系统中的功耗。

帧的长尺寸是由宇宙飞船的数据缓冲器的容量决定的。而摄影仪能连续地独自摄取景物,但当缓冲器被数据填满时,就需要停顿 $2 \sim 8$ 分钟。便将数据送到地面。先锋号上的固体缓冲器的现有设计容量是一百万位。

照相机能被指挥,以便记录帧的四分之一或一米。这种选择的主要效用是为了多光谱工作。三只传感器被安置在聚焦平面上,以便记录三种记录颜色的四分之一帧或记录二种颜色的半个帧。

噪声等效曝光在 2854°K 光照时设计为 $2\text{微焦耳}/\text{米}^2$,这比用阳光光照大约要好三倍。动态范围为几千。已选择了8位数字编码来提供与地面上的现有数据处理系统的兼容性。可变增益和补偿值将允许将256种灰色级分配给整个或部分照相机的动态范围。

三、面型阵列照相机

另外一个仪器研制方面所作出的努力是为了论证将用于1979年和以后的飞行一例如已被提到的水手号土星/天王星飞行使命的面型阵列CCD照相机的可行性。这种照相机能与传统的水手号宇宙飞船设计相容,特别是能与最近的模型相容。(水手号金星/水星,水手号木星/土星)。除上述的大量要求外,对照相机设计的具体限制因素一般是由执行水手号飞行使命提出的,特殊的是由外行星的执行使命提出的。

就目前的研制努力来说,已建立了250千位/秒的最大数据速率。这相当于约6.5秒的帧读出时间。这就要求依次冷却传感器,以将暗电流减到可接受的程度。随着暗电流的抑制,传感器本身必须能存储图象,以便防止长时间读出期间的衰减,并允许在曝光和读出之间有一个停顿。

与标准电视和行扫描摄影仪不同的是:面型阵列照相机的曝光(积分)时间不单单是连续读出之间的时间间隔。在这种应用中,曝光和读出时间须能分别从地面进行指挥。与最近的实践一致的是:照相机将具有可变读出速率,以致于在通讯信道率随着距离衰落时能连续地实时工作。

介质与窄带光学滤波器是以前的水手号摄影实验的重要的一部分。当采用窄谱滤波器时,用于将来飞行使命的CCD传感器也应保持良好的摄影质量。

抗辐照对外行星宇宙飞船,特别是对于包括木星飞行使命来说是重要的考虑因素。整个执行使命的活动过程中,在暴露在辐照剂量后,照相机和其他硬件必须继续能按预定的情况进行工作。因为土星上的辐照通量可能将暂时使传感器饱和,从而使得在这段时期内不能摄影,所以必须作出辐照限度。

为了论证利用CCD摄影仪能满足这些要求,照相机的可行模型正分三个阶段在研制。第一阶段采用仙童公司的传感器(CCD—101),构成500单元线性阵列照相机。这种照相机主要作为练习工具,以便能熟悉一般的CCD的工作特性和制约条件。

研制的第二个方面是建立一个模拟电路板面型阵列照相机,接着便建立可行的模型。可行模型照相机的设计将采用得克萨斯仪器公司为JpL而研制的 400×400 单元的传感器。这样将是一种特别在蓝色和近紫外线时具有最大量子效率的硅片减薄的,背部光照器件。该传感器也将是埋沟型的,预计这种类型的器件与表面沟道器件相比,可提供更高的转移效率,更低的噪声及改进了的辐照。然而,这样会导致暗电流的增大和较低的饱和电平的不良后果。

模拟电路板照相机开始时将采用最近才宣布的高性能的RCA公司的 320×512 单元的传感器。这是一种主要为标准电视机应用而研制的表面沟道,正面光照器件。就目前的性能而言,它不能为得克萨斯仪器公司的传感器设计提供所有的性能优点,但就目前的应用而言,则具有显著的优点。大部分的工作特性和电路要求与得克萨斯仪器公司的传感器的工作特性和电路要求类同。

可行模型照相机将是一种由检测光学装置,电学机械快门,具有冷却机理的CCD传感器和信号处理电子装置的简单部件。外部的光学滤波器将用来证明特定的光谱带的照相机特性。表2总结了面型阵列照相机的特性,其中包括对于水手号木星/天王星应用的某些参值。图3是照相机的功能方块图。以下几段将简单描述各种不同的功能块。

传感器外壳内装有光学装置、快门、传感器、冷却板和冷却散热器。在较长的帧时间里的可接受的暗信号方面,预计将需要 -40°C 的传感器温度,外围结构必须处于 $-30^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 。同时,将与光学聚焦平面有关的传感器位置保持在 ~ 50 微米左右。

冷却散热器将与其他工作台所需的冷却硬件一起,为在模拟空间条件下的传感器提供冷却。另外,工作台操作中传感器外壳也应用干氮清洗,以防止水气的凝聚。

信号处理器可执行直流恢复工作,并通过模拟/数字转换器,在未处理的传感器输出信号转换为一系列数字数据流之前,对其进行滤波。传感器采用标准的“电荷选通”前置放大器,信号处理器的主要功能之一是大大减小与这种类型的器件有关的复位噪声。希望信号处理器的性能与取样频率无关(传感器的时钟频率),这样,便能简化可变速率工作的执行过程。模拟/数字转换器是一民用10位装置。预计CCD照相机所具有的动态范围比能被编入10位中的要大。这样,信号处理器的增益便可加以调节。

电路平衡为传感器和快门提供了定时控制和偏置,并用照相机状态数据来多路传输数字视频信号,以产生组合的串行数据。

表3列出了照相机所设计的性能规格。照相机的性能将大大地依赖于传感器的特性,因此也是可推测的。方案的一个目标是为典型宇宙飞船的应用中的传感器性能的估价提供测试手段。

可行模型照相机将服从于设计的试验方案,以验证CCD照相机对于水手号飞行使命的适宜性,其中包括性能和环境考虑。这种试验将包括列于表3的温度,热真空(空间模拟器),振动和辐射等性能参数的表征。重点将是识别问题和解决问题。所关心的专门领域是传感器的冷却与安装,传感器中的温度梯度,聚焦平面的移动和辐射的适应性(损伤和干扰效应)。

四、结论

我们已对用于行星宇宙飞船的照相机设计所面临的一般的限制因素,满足这些限制因素的CCD的潜在优点和两种专门的照相机仪器作了描述。这些照相机研制努力的成功将在很大程度上取决于

传感器的进展。

目前传感器的空间响应的非均匀性程度还很高。这就需要在这方面进行重大改进,以满足上述仪器的性能要求。

另一个有关问题是瞬时稳定性,极希望CCD传感器具有硅器件的固有稳定性,但以前的器件还没有获得这种稳定性。

也许最困难的问题是为获得高量子效率和蓝光/紫外光响应的传感器减薄技术的研制。由于热梯度和其他效应,安装和冷却问题,潜在问题是传感器的畸变。

最后,抗辐射对于大多数计划的行星飞行使命是个重要问题。研制的器件必须大大减少辐射效应,且须很好地解这些效应,以采取适当的屏蔽和其他的预防措施。

就将来的照相机研制而言,较大的格式将是主攻目标。如果这点用较大的单片阵列来完成,就需要改进暗电流和转移效率。另外,更大的阵列将使减薄问题更复杂。采用较大格式的另外一种方法包括采用多个传感器镶嵌技术,其方法是将传感器一个挨着一个地放在图象平面上,或采用光学图象分离法。没有一种方法是十分令人满意的,第一种方法是先在图象上留下了间隙,另一种方法致使光学系统更复杂化及带来了传感器的安装问题。

总之,看来CCD照相机在将来的行星探索方面将担当着重要角色,且潜在的性能优点证明了继续加强研制力量是有理由的。

表 1 行扫描摄象仪的特性

传感器	三只埋沟,背面照光,三相,双层铝栅 160×5 CCD
图象摆动补偿 (IMC)	补偿宇宙飞船旋转
多光谱	三个谱带
望远镜	聚焦长度229mm, $f/2.3$
步进器	经过165度的增量为五行
程序器	观察角度的自动步进
尺寸	$0.25 \times 0.25 \times 0.50$ 米
重量	7 公斤
功率	10瓦
角分辨率	$100\mu\text{T}/\text{像素}$
帧格式	160×640 像素,允许四分之一帧和米个帧
视场	1×4 度全帧
编码	8 位/像素
噪声的等效曝光	$2 \text{ 微焦耳}/\text{米}^2$ (2854°K 光照时)
数据率	64 (从 $0.5 \sim 0.8$ 百万位/秒)

表 2 面型阵列照相机的特性

传感器	得克萨斯仪器公司的埋沟、背部光照型
图象格式	400×400单元
象素间隔	23微米
图象尺寸	9.2×9.2毫米
信号处理	基带、经过滤波和存储重复信号
信号编码	10位/象素
光谱滤波器	在照相机外面
曝光时间	2~2048毫秒、2×阶梯
连续的数据率	7.81~250千位/秒、2×阶梯
帧读出时间	210~6.56秒、2×阶梯
工作方法	1. 曝光与读出 2. 曝光与保持 3. 不用曝光读出 4. 禁止
光学	聚焦长度1500毫米, $f/8.5$
角分辨率	15.3 μ T/象素
快门	双叶片的电学机械装置
传感器冷却	额定值为-40°C, 外部散热器
尺寸	3.000厘米 ²
重量	4 公斤(加上光学装置的重量)
功率	12瓦

表 3 面型阵列照相机的性能规格

饱和电荷	$\sim 5 \times 10^5$ 电子
饱和曝光	$< 10^4 \mu J/m^2$ (2854° K时)
噪声等效曝光	$< 2 \mu J/m^2$ (2854° K时)
动态范围	$> 2 \times 10^3$
暗电荷	$< 5\%$ (指在13秒、-40°C时的饱和)
方波响应	$> 30\%$ (在221p/mm时)
量子效率	$> 20\%$ (400nm 时) $> 50\%$ (600nm时) $> 50\%$ (800nm时) $> 5\%$ (1.000nm时)

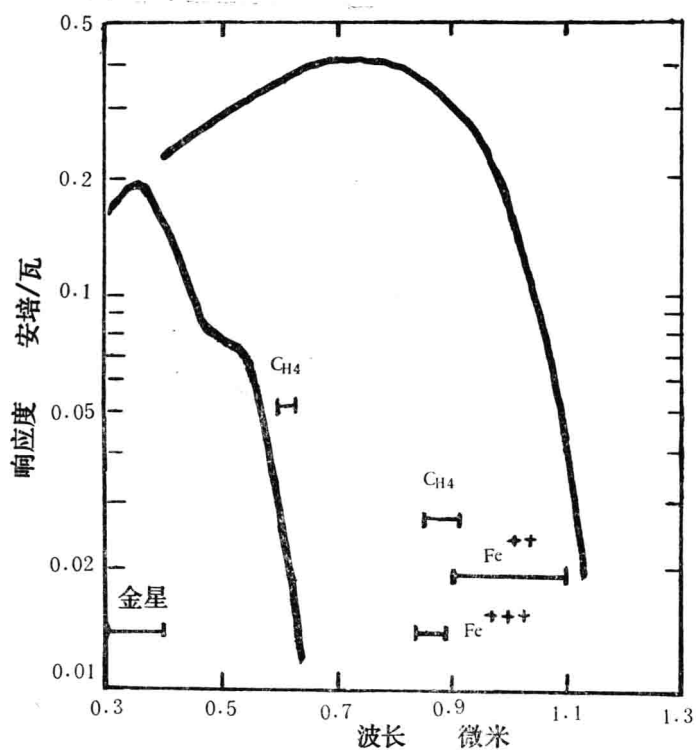


图1 行星科学家感兴趣的典型谱带(附上
硒硫光导摄像管与CCD的响应曲线)

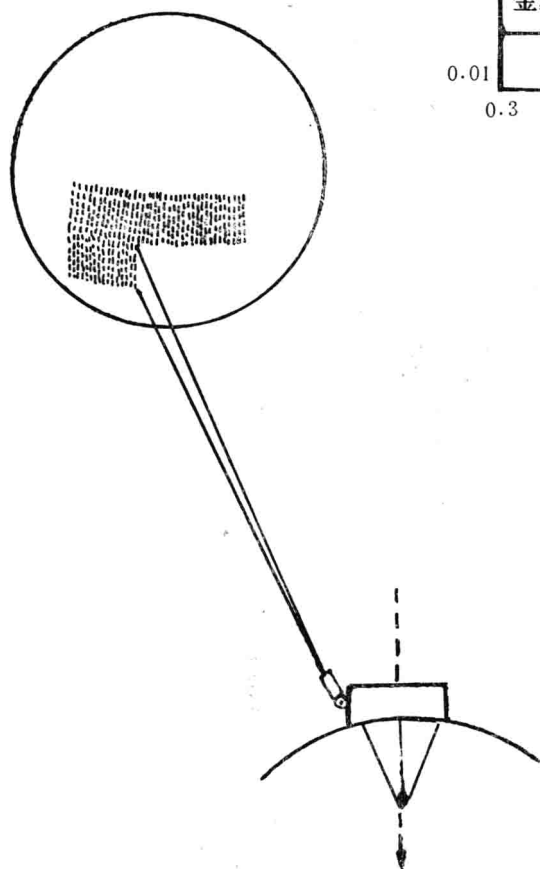


图2 采用行扫描照相机的图象形成法
(扫描是从上到下)

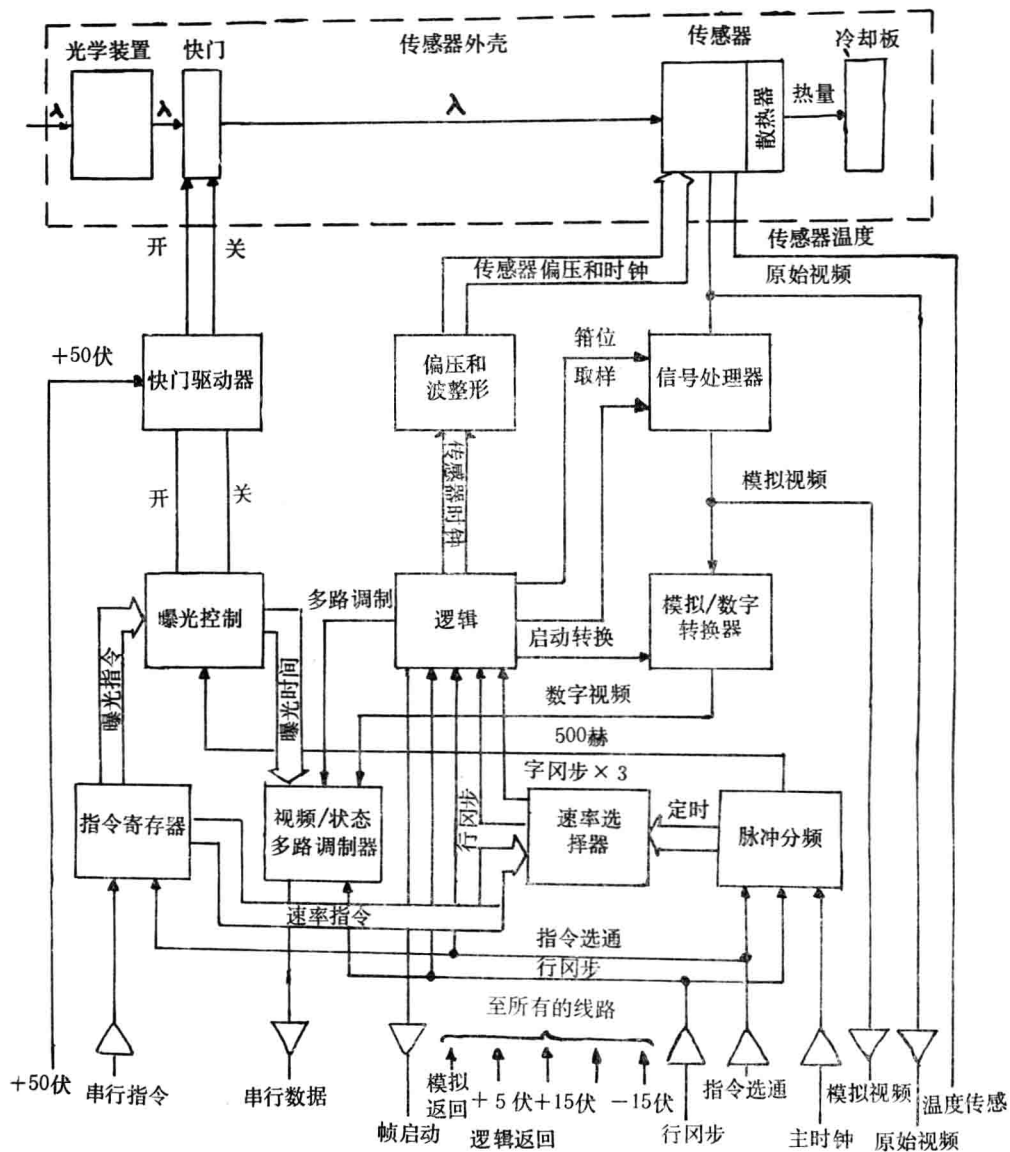


图3 可行模型模拟面型阵列照相机的功能方框图

译自《75 Symposim on Charge Coupled Device Technology For Scientific Applications》P. 46, P. 46—P. 64 周兆杰译 黄提多校

CCD星跟踪式定位器

W. C. Goss 美国喷气推进实验室

摘要: 本文对目前正在喷气推进实验室(JPL)中欲将CCD应用于星跟踪式定位器和星测绘器的工作提出了一个总的看法,并将硅CCD星跟踪式定位器的优缺点与析象管星跟踪式定位器的优缺点作了比较。结论是虽然析象管为跟踪单星提供了稍大的灵敏度,但CCD为大多数的单星跟踪任务提供了足够的灵敏度,且在聚星跟踪或测绘应用方面占有明显的优势。此外,CCD在尺寸、重量、稳定性和发展潜力方面都有着较多的优点。

本文讨论了几种CCD结构的信号和噪声系数,描述了所需信号处理的基本结构,并说明了超过单元数目的分辨率可利用插值法得到。

目前正在JPL中研制的CCD星跟踪式定位器和星测绘器将采用微处理机来进行信号处理。本文讨论了采用微处理机进行信号处理的主要优点,其中包括在隔行扫描方式中应用数据的能力。

一、引言

JPL目前担负着二项由国家航空和宇航局的航天和空间技术处资助的任务,以便为宇宙飞船和有效载荷的稳定化而研制CCD星参考跟踪式定位器,其中一项是直接提供一个单轴的星跟踪式定位器,该定位器将用来解决继1977年水手号木—土星而执行飞行任务的水手号宇宙飞船的滚轴稳定性问题。另一项是研制一个具有同时可跟踪十颗星能力的星图象传感器,为每颗星提供双轴座标和值数,并为电视器上的星场显示提供一个视频信号。其用途是通过棱式(Shuttle)红外靶设备来监视探测红外靶体,当然,目前的短程穿梭运输工具的有效载荷是勿容置疑的。

二、析象管和CCD

析象管十多年来作为令人满意的星数值和位置传感元件而广泛地用于星跟踪式定位器。析象管是一种十分简单的光电倍增管,在光电阴极和在电子倍增器部分的入口处的取样孔径之间具有电子摄像和电子偏转部分。析象管可提供光学信号调制及不需采用可动部件的万向视场。

析象管几乎能够完全限制信号散粒效应噪声。倍增器部分中大而几乎无噪声的增益减少了以后的漏电流效应,并使放大噪声贡献减到很小程度。就典型的析象管的电子孔径的区域而言,现代的光电阴极每秒只有几个电子或更少电子的热发射。脉冲高度鉴别的光子计数技术可不包括倍增器结构内部热发射出的大部分电子,并能够忽略不计倍增器增益分布函数、在无大的天空背景或大气辐照电势的情况下,析象管能够在每个取样阶段可靠地检测一些光电子(参考文献1)。

但是,析象管还存在着一些不利的特性,而这些不利特性已激励设计人员考虑另外的析象管。这些特性主要保持在多重靶和全帧搜索情况下严重影响灵敏度的非存储特性、穿过需要精心校准以

获得准确补偿点的电场的可变的非对称放大倍数、光电阴极灵敏度的疲劳和损害、重量和功率比较大、使用的电压高、易脆性、对磁场灵敏和成本高等。

由于硅光敏二极管或光电探测器的成本低、尺寸小、结构坚固、稳定、对磁场不敏感以及能与微型电路兼容的电压电平下工作的能力,所以通过比较,引起了人们对某些应用的极大兴趣。尽管硅探测器的视场有限、灵敏度较差、除了在一个很有限的区域外,还不能在电学上提供准确的星位信息,但是采用硅探测器的固态星跟踪式定位器已经制造并大量地生产。

硅CCD传感器现在为设计者提供了一个优越的选择,这种选择呈现了硅探测器的全部优点,几乎是无缺点地提供了既不能用析象管也不能用硅传感器能获得的有价值的能力。具有电荷存储能力的单个CCD单元的微小区域和宽带高量子效率的硅响应结合在一起产生适当的灵敏度,当不超过一天体量值或小于理想析象管的阈值时冷却到适当的低温时,所有其他的系数都保持不变。这个数目通过比较硅和—S—20光电阴极的响应(对于较热型F星来说,其典型比率为 $8/1$)(参考文献²⁾以及二只探测器在统一信噪比时的信号电平获得。析象管每间隔的典型数为3个电子,而目前的CCD每个单元的典型数约为150个电子。就析象管调制而言,所包括的占空系数为 $1/2$,所得的天体阈值幅射比为3,与1.2的天体量值一致。

如果较冷的星为靶,或用析象管来跟踪多重靶或搜索时扫描整个场的话,这种利于析象管的细长边缘将明显地消失。而CCD的电荷存储和整个扫描场读出特征却与析象管不同,它可以使星值阈值与靶无关。

分立探测器结构的进一步的优点是传感器对散射光或天空背景的非饱和电平较不敏感。唯一能干扰星靶信号的光照就是被一些星在其上面成象的同一单元截止的光照。这样,信号处理中背景电平的扣除就能去除干扰光照的平均值。而固定的图形变化和散粒效应噪声将保留。

CCD用于星跟踪式定位器时存在着采用析象管所未遇到的几个固有的问题。室温下平均暗电荷的产生率很高,以至于在几秒内就可填满CCD势阱,单个的高暗电荷单元能具有是平均值好几倍的产生率。为了减少暗电荷,降低到适当的低温,例如 -40°C ,就有必要减少暗电流,以便提供一个有用的动态范围。

从JPL的其他空间仪器,例如火星大气层水份探测器上所取得的经验表明,利用对空间进行无源辐射,外壳可可靠地冷却到更低温度。

由于分立探测器的阵列结构,引起了几种信号处理的复杂性。总之,星图形在同一时间内不会落到一个单元上。甚至一点图形会往往在四个单元的共同角上四等分。事实上,如果CCD是隔行转移器件,一个极小的象形可以在单元之间“破裂”。因为其他一些原因,用图象点扩散函数方法测量二个或多单元的宽度及通过累积足够大所能包括所有来自星图形的一小组邻近单元的信号则往往是有效的。

一个有关的问题是目前在CCD中可获得的像素数目较之多数星跟踪式定位器应用中所需的较大像素要小。目前市场上可得到的最大的摄象CCD阵列是RCA公司的Big Sid,即一种具有 256×312 单元的表面沟道器件。而 400×400 单元的埋沟阵列目前正由得克萨斯仪器公司和仙童公司研究。为了提供点补偿能力,星跟踪式定位器常常要求需要1000或1000个以上的穿过扫描场的分辨单元。目前的CCD制备技术能制造具有适当几何精度的单元结构,如本文中将要进一步要讨论的,简单的插值法技术可用将来已扩展的图形中心定位于一像素(Pixel)内。由于必须用几种方法处理来自象九个分离图象像素这么多的信号,以推出星值和内插图象的中心位置,这些信号处理技术需要有连续的存储容量和逻辑能力,且信号将不是全部连续地被置于数据带中。事实上,采用间隔扫描CCD数据带将在一扫描场中产生部分数据,而在其他扫描场中产生其余部分的数据。

信号处理在操作上较之析象管星跟踪式定位器要复杂得多,因为它是通过单相调制来获得扫描宽度内的星位,并根据放大电流或放大电压来获得对星值的直接测量。于是,比较起来说,预计这

种信号处理电路较复杂。虽然这种计算任务在硬件方面较复杂，然而在软件方面较简单，采用微处理机可以简化工作，在改变跟踪器特性以满足各种功能要求方面提供了极大的灵活性。

析象管和CCD之间的折衷考虑乃是目前和将来需要认真考虑的一个问题。析象管是一种具有相当稳定和可预测特性的成熟器件，商用器件要化上几千美元才可获得，故市场还是相当小的。这种估计再过十年，还是正确的。而另一方面，CCD器件的发展速度非常之快，并且有很大的发展潜力，虽然今天的商业市场上这种器件还很少，但这种器件在将来必定会被认为是将来涌出的能力更大的器条的先驱。不难想象，它一定会发展成一个很大的商业市场，且价格竞争将会激烈起来。十年中，如果我们采用集成电路工业经验的话，现在的可供使用的CCD摄象器将无疑会陈旧和不能使用，而更成熟可靠的在价格方面或许只有几十个美元的器件将会取代它们。

三、CCD信号特性

如果我们假定：在邻近单元中产生的星象信号电荷通过信号处理电路重新构成一个代表整个图象总值的话，那么，对于星的探测器响应可由下式表征：

$$Q_s = \frac{aA\Delta T}{q} \int R(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

式中： Q_s = 电极中的星信号

a = 比例，探测器单元/单个单元面积

A = 物镜面积

ΔT = 电荷积分时间

q = 电子电荷

$R(\lambda)$ = 探测器响应，安培/瓦

$S(\lambda)$ = 星辐照光谱密度

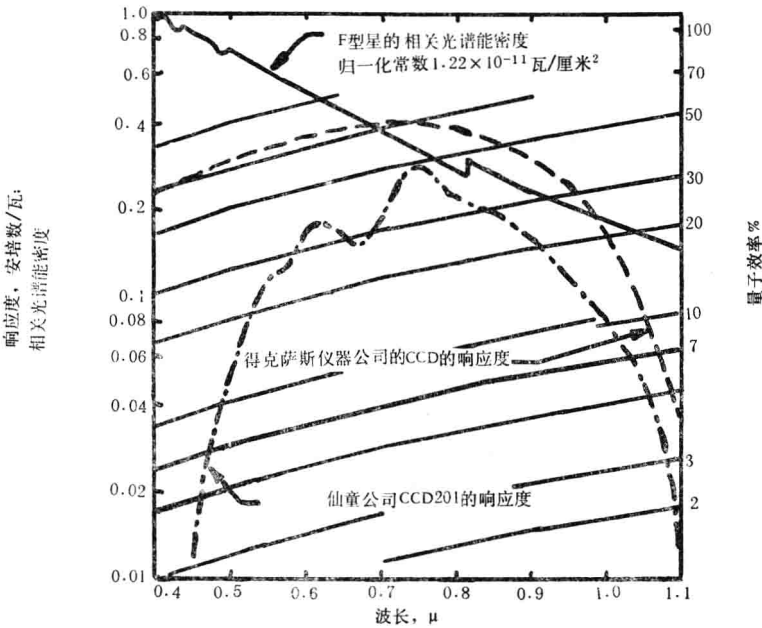


图1 典型的星源与CCD响应特性