

科研用慢扫描 CCD 摄像机

卜玉林

1. 前言

用于科学研究的摄像机有很多种,如监视用的摄像机,高速摄影机以及慢扫描高灵敏度摄像机等。这些摄像机都可以利用“帧接收”图像板。因为有了更加完善的硬件,使计算机具有了处理影像的能力。慢扫描 CCD(电荷耦合器件)摄像机在科学研究的应用中更具优势。

2. 电荷耦合器件摄像机

现已有了性能优良的摄像机,它是以电荷耦合器件为主要部件制造的,已广泛地用于科研中的数据采集(资料收集)。

科学实验用的慢扫描 CCD 摄像机,由于它具有更好的性能参数而鹤立于影像设备之中。其表征性能的参数如下:

- 灵敏度、量子效应高
- 噪声低
- 暗电荷少
- 基线稳定
- 线性好
- 空间分辨率高
- 空间分辨率和精确度高
- 动态范围大
- 扫描光栅定界灵活

其中有些参数,如光谱范围虽与扫描速度无直接关系,但是为了适应市场的需要,只能把 CCD 摄像机设计成低成本,小光栅,限制它的光谱范围使之更接近人的眼睛特性。用这种摄像机拍出的照片看上去更加“栩栩如生”。

CCD 是用半透明多晶硅制成,复盖了整个影像区。实质上消除了对光谱中远蓝光和超紫外光带的响应。

下面对科研用慢扫描摄像机与高性能图像摄像机进行对比。在此假定图像摄像机使用的是标准的 8 比特分辨率的“帧接收器”。

3. 灵敏度和量子效应

灵敏度是慢扫描摄像机的一项重要指标。在科学实验中常遇到在微光下摄像,如天文学上的观测就是这样。若为了增加光通量选用大口径望远镜,其成本是很高的。对于观测生物化学、医学上的现象,加大光照强度是不可取的,因为强光照射会改变试样的生物化学结构。有时为了灵敏度的要求,不得不用增加曝光时间来增大光通量(每秒钟单位面积上的光照度),这样也能增加信号所占的比例。

不巧的是,并非所有射到 CCD 上的光子都能产生出电子空穴对,只有一小部分光子能产生量子效应(QE)。有一些 CCD 摄像机,这了使用方便安装了反射的或不响应的装置,如电子快门或防闪烁装置,其量子效应就更小,需要加大光通量才能有相当于科研用 CCD 的信号噪声比。

一般民用的 CCD 的量子效应在波长响应的峰值处低至 12% (见图 1)。而科研用背光式 CCD 的量子效应,其峰值可达 80%。仅仅由于量子效应而使灵敏度提高约为 30%。

光谱中的蓝光和紫外光对于研究生物化学、燃烧动力学是很重要的光谱区。在此光谱区,科研用与民用 CCD 的量子效应之差可达 100 多倍。

CCD 的读出噪声是影响灵敏度的一个重要因素,它与读出速率的平方根成正比,因此慢扫描时的读出噪声要小得多,这一点是很有实用价值的。例如 Princeton 的慢扫描摄像机,其读出噪声可以低至 4 个电子/每像素,因此在它的动态范围内的信号噪声比相当大。它的灵敏度只受入射光波动统计学结果的制约(只有光子撞击像素

时产生的噪声),可以说它的灵敏度不受读出噪声的影响。

当然,它的灵敏度也要靠加长曝光时间来提高。但是加长曝光时间会有不易察觉的“暗电荷”集聚,这也是影响灵敏度的一个主要因素。所谓“暗电荷”并非由入射光产生,而是由于CCD内部有泄漏电流(亦称暗电流)存在使电荷集聚起来的。

CCD的温度越低,泄漏电流越小,暗电荷集聚也越小。因此科研用的慢扫描摄像机都采用冷却CCD的办法,如用电热致冷器或用液态氮致冷。现在更有了“多脚分相”技术(multi-pin phasing),在长时间曝光时能把CCD的表面电位差降低,减小暗电流,使暗电荷集聚减小到百分之一以下。现代化的慢扫描摄像机都采用冷却方式或“多脚分相”技术,甚至两者都被采用。在这种情况下,限制灵敏度提高的因素实际上只有宇宙射线了。

表1所列是科研用慢扫描摄像机与民用图像摄像机两者在信号收集期间所要求的场景照明度的比较,从此可看出信号收集较长者的优点。图像摄像机必须使用帧接收器,因为它有帧平均功能,可是成本却大幅度地提高了。在比较表中假设了以下条件:

- 科研用慢扫描摄像机: 27μm×27μm 像素,量子效应为70%,4个电子的读出噪声,冷却。
- 图像摄像机: 11μm×13μm 像素,量子效应为25%,50个电子的读出噪声,不冷却。
- 其它参数:两者物境为F/1.4,均无损耗。要求信号噪声比均为40dB(100:1)。

表1 两种摄像机性能比较

曝光时间	慢扫描摄像机	图像摄像机
1/30 秒	0.045 (勒克斯)	38 (勒克斯)
1	0.0015	38 有/无帧平均
1	0.0015	3.4 有帧平均
1 (分钟)	2.5×10 ⁵	0.086 有帧平均
10	2.5×10 ⁶	0.086 有帧平均

4. 线性度, 动态范围, 精确度和信噪比

这些指标是定量测量与定性观测的区别点。若想测出落入一个像素上的光达到10%的精确度,即便使用无噪声检测器测量来自自然界的随机性光子也需要有平均为100个的光子落在一个像素上。这是因为光子的散射噪声等于光子数的平方根(散射噪声=10)。

实用的检测器的总噪声等于散射噪声的平方与读出噪声的平方之和的平方根。那么要想找到能产生信号噪声比(精确度)为P的光子数,要用下式求出光电子数Nd:

$$Nd = P^2 [1 + \sqrt{1 + 4R^2/P^2}] / 2 \dots \dots \dots (1)$$

式中R是读出噪声,以电子个数为计量单位。对于科研用的具有4个电子读出噪声的摄像机来说,光信号相当于114个光电子。标准的图像摄像机每个像素产生的读出噪声约为50个电子,如此就需要有553个光电子才能测出同样的结果。

从(1)式看出,当信噪比(精确度)P增大时,读出噪声R的重要性便下降了(与光子散射噪声相比可以忽略不计),光电子总数Nd就随P²增加。对于大多数精密的测量来说,CCD的每个像素必须接收大量的光子才行,所以要采用长时间曝光以便聚集更多的光子。在此要强调指出,科研用CCD与普通民用CCD在设计上有很大区别。CCD能够储存在每个像素中的电荷量(光电子数)在很大程度上取决于像素的几何尺寸,因此科研用CCD有较大尺寸的像素,通常为24~27微米。像素尺寸大制造成本就高,所以非科研用的CCD只要达到应用要求,其像素尽可能做得小些。

采用多次读取和帧叠加的办法也能使小容量的CCD做出高精度的测量。因为这样做也能集聚大量的光电子,从而解决由于光电子的散射而造成的噪声问题。但是由于多次读取CCD而增大了读出噪声,它是按帧叠加次数的平方根规律而变动的,因此它的信噪比增益不如科研用CCD那么大,因为科研用CCD只被读取一次。

帧叠加次数与图像用CCD的型号有密切关系,是用一个帧速计算插板来控制叠加次数的,

其成本比电位储存式 CCD 的要高许多。

动态范围是科研用摄像机的既重要而又难以解决的一项指标。Prinston 把它定义为 CCD 的最大信号与其读出噪声之比，但是这会产生两个意义不明确的问题：其一是“线性度如何？”；其二是“信号是来自一个像素还是来自几个联合像素之和？”。如果 CCD 在产生非线性之前就能满足 A/D 变换器的要求，前一个问题就不存在了。由于噪声经 A/D 变换后只有约一个单位，动态范围也就变为 A/D 的动态范围了。Pinston 的摄像机具有 16 比特，它的动态范围大约为：65000:1。在联合几个像素才能满足 A/D 时（用 18 比特的 A/D），要用“联合动态范围”来表达。

CCD 的读取速率若超过 500 千个像素/每秒时，一般不再选用 16 比特或 18 比特 A/D，在目前的工艺水平，用这种变换器是很昂贵的。与读取速率有关的噪声电平太高，不得不降低动态范围。

应当指出，用上面的方法确定动态范围是科研用 CCD 摄像机的标准（并未涉及所有的标准）。最重要的是景象内部的动态范围：即最大视觉信号与最小视觉信号之比，这是同一帧内的重要参数。这不仅仅依赖于摄像中的电子管，更多地依赖于 CCD 的光学性质，其中包括光从表面上的散射和光波在表面上的导向以及与 CCD 所用的光学系统有关。一般说来，电子学的动态范围超过光通过光学系统照在 CCD 上的景象内部的动态范围。因为在光路上有各种损耗，如光学系统的不完善以及光学系统的表面反射等。在某些情况下，科研用 CCD 的尺寸比较大，可以减少一些光路损耗。

动态范围大有助于科学试验，在试验之前人们并不知道试验中有多大的光量，如果试验失败
表 2 科研用 CCD 与民用图像阵列的比较

	信/噪 = 500, 帧#	光子/ μm^2 - 秒	信/噪 = 10^4 , 帧#	光子/ μm^2 - 秒
CCD, 7.5 电子/计数	1	860	200	860
图像, 230 电子/计数	4	50000	1667	50000
图像, 50 电子/计数	23	10750	9337	10750

需要重做势必花费太大。若动态范围大，获取有用资料的机率就大得多，特别是初次试验更是如此。

科研用 CCD 配以合适的信号调理电路可使线性度优于 1%，非常大的信号例外。事实上测量出线性度为 1% 是很困难的，这就是说：“CCD 的线性度要比测量设备的线性度好得多”。以高速运作的 CCD 有时反而降低了它所能达到的线性度，这是因为受信号调理电路或 CCD 输出级电路本身的限制所致。为了发挥 CCD 固有的高线性度，应当使它处在慢扫描的运作中。

5. 反差分辨率

在许多应用中，如显微镜，其图像反差很小。为了使图像观察清晰需要使用图像增强技术。当然，最终图像的清晰与否仍然受原始资料的限制，最好的办法是对未经加工的资料施以图像增强技术。

现在来看一个反差只有 0.1% 的图像。反差是由亮度与平均亮度之比的变化确定的。测量这样小的反差，若要达到 10% 的准确度需要信号噪声比为 10000:1。表 2 所列是考虑到信号的平均值。该表中对信噪比为 500 的值（测定反差为 0.2%）进行对比。此表还包括为了达到要求的信噪比需要的光通量（单位是光子/ μm^2 秒）。其中也考虑到两种图像摄像机，其一是 50 个电子/“计数”，用的是最大灵敏度，另一种是 230 个电子/“计数”，摄像机设置在最大的信号调理上。同时假定典型的图像 CCD 全容量为 60000 个电子。显而易见，图像摄像机需要有更多的光，对于灵敏采样和乏光应用来说这是真正的不足之处。

6. 空间分辨率

一般图像摄像机的空间分辨率相当于现行的电视标准。美国、日本采用 NTSC，而欧洲各国采用 CCIR。典型的感光器在水平方向有 385~770 个像素，在垂直方向有 300~600 个像素（隔行扫描，一场 300 个像素，两场是 600 个像素）。现在已有了高清晰度电视，不久也会有多像素扫描出现，这是必然的事，因为科研用成像器只是高清晰度电视研究中的一个支脉。

空间分辨率虽然可以测量，但是这也与除 CCD 之外的光学系统有关系，慢扫描冷却式摄像机在这方面有它的独特优势。首先，数量大的像素能直接产生高分辨率，其次更有微妙的效应即“假信号清除”功能。“假信号”的出现是数据采集系统中的一种现象。当信号频率处在采样频率一半以上时（即奈奎斯特频率），就会出现一个低频信号（幅度相等）。这是由于 CCD 是在空间域采样的，会受到空频域中假信号的影响。

最终来说，CCD 是为图像逼真而设计的（隔行输出型），在 CCD 的像素之间存在着不敏感区。具有矩形响应的 CCD，其一维空频响应

为：

$$H(f_s) \propto \frac{\sin(\pi f_s X_a)}{\pi f_s X_a} \dots \dots \dots (2)$$

式中 X_a 是像素的有效宽度； f_s 是空间频率。对于一个像素的节距为 X_p 来说，奈奎斯特频率是 $1/(2X_p)$ 。显然，当 $X_a < X_p$ 时，此响应函数大大超过 $X_a = X_p$ 时的奈奎斯特频率。科研用慢扫描冷却式摄像机利用了所有的光敏感有效区，在奈奎斯特频率以上就有很低的响应，因此它的假信号很小，几乎达到“清除”的程度。

7. 结束语

科研用慢扫描 CCD 摄像机比起图像摄像机具有许多不可替代的优点。如能用于低光度采样，用于精确测量与位置有函数关系的影像，它有很高的空间分辨率。或者用于低反差摄像等。

由于慢扫描摄像机要求体积小，所以采用了许多贵重的元器件，如高分辨率的 A/D 转换器；低噪声的信号调理器以及恒温控制用的电子线路等，它的成本比较高。但是在科研应用中，它能把被测的微信号提高到能定量测量的水平。因此成本虽高也是值得的。

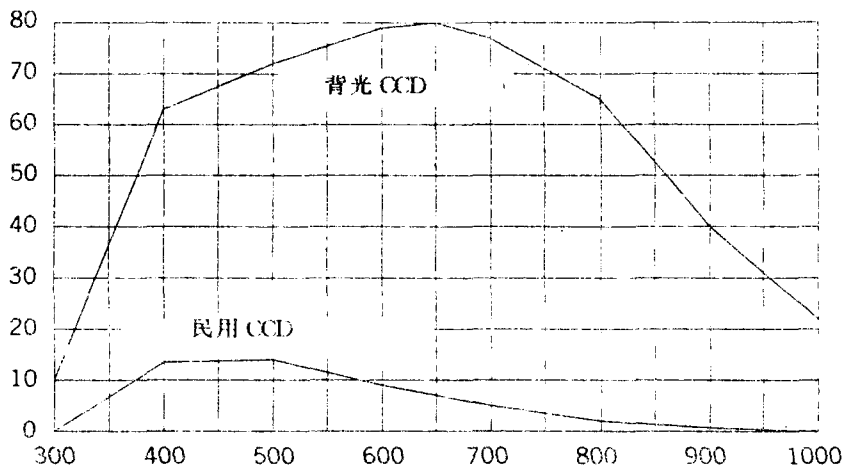


图1 背光 CCD 与民用（隔行）CCD 阵列响应的比较。