

线阵CCD暗电流和灵敏度实时校正

熊经武 朱建文 刘淑娥

摘要：线阵CCD摄像器件的暗电流和灵敏度的不均匀性是影响图像质量的两个主要问题。本文介绍对CCD(Charge Coupled Device)暗电流和灵敏度进行实时定标和自动校正的方法、预处理电路和航空遥感试验的校正效果。

一、前 言

在航空和航天遥感仪器中，过去都是采用机械扫描式的定向探测设备，美国已发射的着三颗陆地卫星上采用的多光谱扫描仪(MSS)就是这种设备。

用线阵CCD做遥感探测器的CCD扫描仪和机械扫描仪(棱镜或摆镜做扫描运动)比较，主要优点是：没有扫描运动的机械部件、简化了结构，消除了因振动产生的噪声；光驻留在光敏元(以下称象元)上的时间增加，系统灵敏度得到很大提高；象元位置精度高，几何失真小。因此，CCD扫描仪正代替机械扫描仪在资源探测、测图、军事侦察等方面获得应用。

线阵CCD扫描仪(以下简称相机)的成像原理是这样的，将相机置于飞机体上，飞行体向前运动成一维扫描(物方的机械扫描)，用电子学取样的方法完成与飞行方向垂直的另一维扫描(像方的电扫描)，从而构成图像。这就是线阵CCD推扫(Pushbroom)成像的原理。

由于CCD探测器采用推扫工作方式，不是从一个象元而是从几千个象元中提取图像信号，各象元间的暗电流和灵敏度的不均匀性会在图像上产生和飞行方向平行的黑白相同的条纹，从而影响图像质量。因而，要获得高质量图像就必需校正。

校正可以用大型计算机在地面站进行，但实时性差，信息容量大，数据处理复杂，价格昂贵。目前微处理机的运算速度尚满足不了校正处理的要求。

为此，我们研制出用中、大规模集成电路组成的CCD校正电路，可对CCD暗电流和灵敏度进行实时定标和自动校正。1982年下半年采用国产CCD作摄像器件，在长春和南京两地进行的航空遥感试验表明，图像经上述处理校正后像质明显提高。

二、校 正 方 法

由于材料本身的缺陷和工艺水平的限制，CCD各象元存在大小不等的暗电流。个别象元还会出现暗电流尖峰。

造成CCD各象元灵敏度不均匀的原因很多。有材料和工艺的原因，还有CCD转移效率的影响。某些线阵CCD各象元间的灵敏度最大可差三倍以上。

除此之外，相机还存在渐晕现象和像场不均匀，这虽是器件外部原因，但校正电路也应

给予补偿。

暗电流和灵敏度的大小还和工作条件紧密相关。CCD的工作点、驱动、采样、复位、积分时间等信号的宽度、波形、幅值以及相互间的位置变化都可能使各象元的暗电流和灵敏度发生改变。暗电流受环境温度的影响更大，温度每增加7~10°C，暗电流大约增加一倍左右。可见CCD各象元的暗电流和灵敏度不仅有较大的差异，而且是温度和时间的函数。因此，必须随时定标CCD各象元暗电流和灵敏度的实际数值，并由校正电路根据已经变化了的情况给予及时的处理，才能有效地消除环境温度及工作条件变化对像质带来的影响。

作为校正思想的基础，首先我们可以对CCD幅照特性做如图1所示的近似，认为CCD各象元都工作在线性区。图1实线A₁和B₁分别表示CCD两个象元幅照特性的原始数据，斜率代表该像元的灵敏度，在纵轴上的截距代表该象元的暗电流。

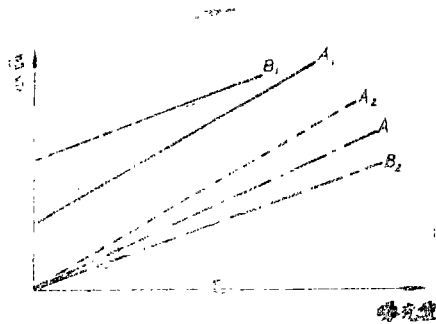


图1 校正原理

校正的第一步，经过坐标原点将实线平移至虚线（截距为“0”），暗电流从中被移去。第二步对每个象元的输出信号分别乘以不同的因子（校正因子），使各象元的灵敏度

（斜率）趋于一致。最后可用同一条过坐标原点的直线A来表示各象元的幅照特性。这就是本文采用的先移去暗电流然后对灵敏度进行归一化处理的校正方法。

对CCD各象元暗电流和灵敏度进行实时准确定标是这个方法的基础。而自动处理是实现高速校正的保证。

三、预处理电路

1. 电路结构

校正电路的原理如图2所示。

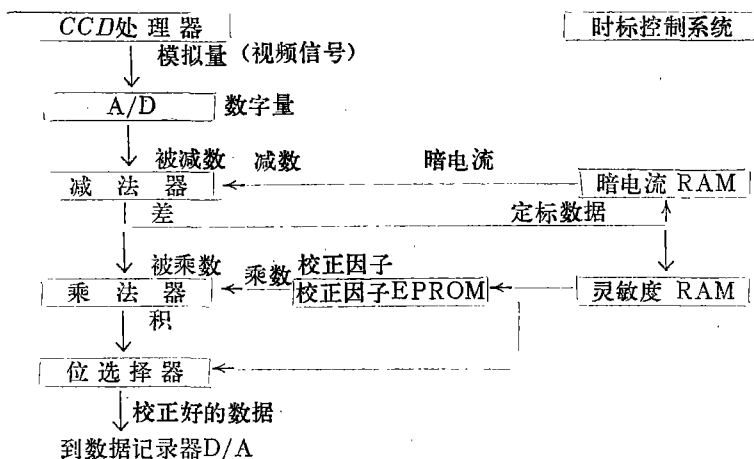


图2 校正电路方框图

2. 定标过程

为了保证校正效果,相机必须对CCD的暗电流和灵敏度进行实时定标。

电路处于暗电流定标状态时,相机快门关闭(或处于微光偏置下),CCD视频信号输出就是它的暗电流值。视频信号经A/D变换后,在减法器与零相减(直接输出),其差写入暗电流RAM。

暗电流定标后再改用均匀光照射CCD,输出信号经A/D变换后在减法器中与刚刚写入的暗电流相减,其差写入灵敏度RAM它反映了各象元灵敏度的大小。

在时标控制电路的控制下,CCD2048个象元的暗电流和灵敏度数据将一一对应地存入暗电流RAM和灵敏度RAM2048个地址中去。

3. 校正工作过程

当相机处于校正工作状态时,CCD在地面目标照射下,每个象元输出的视频信号经A/D变换器转换为数字量,同时从暗电流RAM和灵敏度RAM读出定标值。读出的暗电流数据作为减数送入减法器与视频数字信号相减(移去暗电流),差做为被乘数送入乘法器。读出的灵敏度数据一方面送入存贮校正因子的EPROM作为地址,在时钟控制电路的控制下,从中取出和灵敏度相对应的校正因子,做为乘数送入乘法器与去掉暗电流的CCD视频数字信号相乘(灵敏度归一化处理),另一方面做为位选择器的控制信号,从十五位乘积中选出八位数据输出。该数据已经去掉了该象元暗电流和灵敏度不均匀性的影响,反映了背景辐射的实际情况。CCD2048个象元中的每一个都要经过这样的校正过程。这个过程只允许在 $0.5\mu\text{s}$ (星载)或 $3\mu\text{s}$ (机载)之内完成,因此要求各部份电路具有较高的运算速度和严格的时序关系。

当CCD工作环境发生变化时,只要重复上述定标过程,就可得到一组新的暗电流和灵敏度数据,自动选出新的校正因子,使校正处理适应变化了情况。

四、校正因子

校正因子可按下列式计算:

$$P = \frac{2}{(G/M)} \times D \quad (1)$$

其中: P ——校正因子

D ——可变除数。用来减少校正因子的量化误差。

G ——灵敏度定标时,从每个象元数字信号中移去暗电流后的数据。

M ——灵敏度定标时,灵敏度最高的象元移去暗电流后可能出现的最大值。

D 的数值根据下述条件选择,

当 $8 \leq G \leq 15$ 时, $D = 8$

当 $16 \leq G \leq 31$ 时, $D = 16$

当 $32 \leq G \leq 63$ 时, $D = 32$

(G/M) 是象元相对增益。

存入EPROM中的校正因子预先都乘以可变除数 D (扩大 D 倍),所以最后输出时乘积要

除以 D 。这个除法运算由位选择器来完成。位选择器根据各象元灵敏度的定标值 G 选出乘积中的8倍作为输出数据。当 $8 \leq G \leq 15$ 时, 位选择器输出乘积中的 2^3 到 2^{10} 位(相当除以8); 当 $16 \leq G \leq 31$ 时, 输出 2^4 到 2^{11} 位(相当除以16); 当 $32 \leq G \leq 63$ 时, 输出 2^5 到 2^{12} 位(相当除以32)。从而实现了可变除法运算。

校正因子用Z-80单板机写入EPROM。

五、校正的附加处理

实际应用中遇到的情况是复杂的, 还应附加下面几种处理校正工作才能有效进行。

1. 负值处理

当背景辐射强度很低时, 由于噪声和干扰的影响, CCD视频信号可能小于暗电流值, 二者相减出现负值, 输出与实际情况相反的大数。在这种情况下电路自动置“0”。

2. 饱和处理

当背景辐射过强时, CCD视频信号出现饱和并溢出位网, 输出一个和实际情况相反的小数。在这种情况下, 电路输出最大数。

3. 平滑处理

由于CCD本身缺陷使个别象元灵敏度过低或无输出。电路对这种“盲点”做平滑处理。

4. 超标处理

在定标照度过强时, 个别灵敏度高的象元可能超过定标范围使校正不能正常进行。在这种情况下, 电路一方面给出定标过强指示, 同时对该象元自动选择最小的校正因子, 使校正工作仍然继续进行。

六、误差分析

影响校正效果的因素很多, 但以下几项是主要的。

1. 温度漂移

CCD的暗电流对温度的变化反映很灵敏。对质量较好的器件来说, 在 0°C 时, $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的热漂移对暗电流最大的象元可产生 $3.5\mu\text{J}/\text{m}^2$ 的等效输入噪声, 相当于太阳垂直照射下典型背景辐射能的约1%左右。只有当温度下降到 -30°C 时, $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的热漂移才能使该项误差降到0.3%以下。采用校正后, 由于对暗电流进行实时定标, 温度控制精度大大放宽了。当在 0°C 附近时, 温度漂移 $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$, 每30秒钟定标一次, 就可把暗电流的影响减小到CCD等效噪声的水平(0.3%)^{[1],[2]}。可见, 要减少暗电流的影响, 对CCD致冷, 严密控制温度和进行实时定标是重要的。

2. 系统噪声

校正电路采用单线定标(定标时对每个象元暗电流和灵敏度仅取样一次), 把扫描CCD一行得到的暗电流和灵敏度数据存入对应的随机存贮器(RAM)中做为校正的依据。由于随机噪声掺杂在信号中一起被写入RAM, 将引起误差。

在定标中, 由于噪声的影响, 误差最大值将出现在灵敏度最低背景辐射强度最大的时候。显然, 象元间灵敏度差异越大, 误差也越大。

3. 电气干扰

系统电气间的干扰, 也会同噪声一样掺杂在信号中被写入暗电流和灵敏度RAM, 误差分析方法同上。

4. 量化误差

CCD 输出的视频信号在模数变换时要产生量化误差。由于暗电流接近满量程的一半, 象元间灵敏度相差三倍, 如果采用8位A/D变换器, 输出信号的动态范围为42到127个数。量化误差由2.4%到0.8%。

此外, 在灵敏度定标中照射在CCD像面上的光分布是否符合要求, 电气部分参数是否稳定等都对校正精度有影响。

上述误差, 有的是随机的, 在图像中并不会形成条纹。而有些误差, 如在定标过程中噪声和干扰伴随信号一起写入RAM中, 使误差被“固化”。温度漂移使摄像时的实际暗电流值和定标值不符, 造成固定误差。这些被“固化”了的误差, 在图像中形成的条纹, 对像质影响较大。

以上误差有的是随机的, 有的变化复杂, 而且误差最大值也不一定同时发生在同一个象元上, 所以可用均方差近似估价校正后的精度。

在CCD象元灵敏度差三倍、暗电流占最大信号30%的室温度条件下, 通过校正处理后可使CCD各象元灵敏度基本相近, 误差在 $\pm 20\%$ 左右。最大误差可能出现在暗电流大、灵敏度低的象元处。在各象元灵敏度差异较小, 暗电流也较小的条件下, 校正精度会有很大提高。

七、试验效果

可以从两个方面通过试验来检验校正效果。首先在不进行推扫(无物方扫描)的情况下, 检查暗电流和灵敏度单行校正效果, 这是成像的基础。然后再加上推扫运动形成图像, 看实际的摄像效果。实验表明, 经过校正后的输出, 暗电流及其尖峰已得到较好的消除。

在均匀光照下, 校正后的输出信号基本上是一条和横轴平行的直线, 暗电流尖峰已消除, 各象元的灵敏度相近。

在1982年10月参加长春地区航空遥感试验(飞机相对海拔高度1800m, 速度150km/h)及1982年11月南京—马鞍山地区资源考察航空遥感试验(飞机相对海拔高度3000m, 速度250km/h)中, 从校正和未经校正的图像对比可以看出, 通过校正后原由暗电流形成的白条纹已基本消除, 图像比较清晰。

八、结束语

由中、大规模集成电路组成的CCD暗电流和灵敏度校正电路, 具有速度快、存贮容量大、设有附加处理、能在工作条件下对暗电流和灵敏度进行实时定标和自动校正, 在两次航空遥感试验中应用都取得了明显效果。

试验中由于无快门自动装置, 对暗电流和灵敏度每定标一次相机要连续工作10~30分钟(而不是要求的30秒钟)。在每次刚定标不久, 图像质量较好, 但随着时间的增加, 图像质量逐渐下降, 甚至也会出现固定条纹, 使像质变坏。因此, 增设定标快门自动装置, 致冷和温

控, 是进一步提高像质应采取的措施。

参加该项工作的尚有胡其良、冯宝胜、刘锐、余容红等同志, 工作中得到了陈楚康同志的指导和唐九华同志的关怀和支持, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] Tracy, Noll, User-Oriented Data Processing Considerations in Linear Array Applications, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, January 1979, 45, No.1, 57-61.
- [2] Leslie L. Thompson et al., On-Board Radiometric Preprocessing for Multispectral Linear Arrays (MLA), SPIE, 1979, 179, Smart Sensors, 83-90.

Real-Time Correction for Linear Array CCD Dark Current and Response

Xiong Jingwu Zhu Jianwen Liu Shue

Abstract

It is two important problems impairing the image quality that linear array CCD (Charge Coupled Device) image sensor exhibits dark current and response variations from detector to detector. This paper describes methods of real-time calibration and automatic correction for CCD dark current and response, preprocess circuits and correct effect in aircraft tests.