

文章编号 1004-924X(2012)12-2791-05

应用双排 TDI CCD 提高空间推扫遥感相机动态范围

薛旭成*, 韩诚山, 薛栋林, 郭永飞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:考虑空间相机观测场景的动态范围很大,本文提出了采用双排时间延迟积分(TDI) CCD 来提高相机动态范围的方案。对两排 TDI CCD 分别设置不同的积分级数。得到的积分级数高的 CCD 图像虽然可能存在饱和区域,但暗区域极易分辨;积分级数低的 CCD 图像虽然不利于暗区域的分辨,但可以较好地观测亮区域的层次。最后,根据积分级数的差别对两排 CCD 的图像数据进行合成来获得大动态范围图像。结果显示,该方案有效地提高了相机的动态范围,当积分级数分别设置为 8 和 48 时,动态范围可以提高 15.56 dB。

关键词:双排时间延迟积分 CCD(TDI CCD);遥感相机;动态范围;图像合成

中图分类号:V447.3;TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2791

Increasing dynamic range of space push-broom remote sensing camera by two-row TDI CCD

XUE Xu-cheng*, HAN Cheng-shan, XUE Dong-lin, GUO Yong-fei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xue0818@163.com

Abstract: To adapt a space remote sensing camera to its large dynamic scene, a scheme with two-row Time Delay Integration(TDI) CCDs was proposed to increase the dynamic range of the camera. The two-row TDI CCDs were set separately different integration stages. The obtained image with a high integration stage CCD might contain a saturation region, however its dark region could be distinguished much better. The image with a low integration stage CCD could not be distinguished better, but the gray level of bright region could be recognized easily. Finally, the images were synthesized according to the difference of integration stages for the two-row CCDs to gain a large dynamic range image. This scheme increases the dynamic range of the camera effectively. When the integration stages of the two row CCDs are set as 8 and 48, respectively, the dynamic range can increase by 15.56 dB.

Key words: two-row Time Delay Integration(TDI) CCD; remote sensing camera; dynamic range; image synthesis

收稿日期:2012-08-29;修订日期:2012-09-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61036015)

1 引言

评价空间推扫遥感相机有很多指标,例如分辨率、信噪比、调制传递函数以及动态范围等。其中遥感相机的动态范围是一个很重要的指标^[1],因为它反映了相机可探测的最亮区域和可分辨的最暗层次。大动态范围遥感相机可以获得更多有关目标的信息。观测大动态范围场景时,如果相机动态范围不够大,其会在设置的某工作点能分辨亮区域的层次,却无法分辨暗区域的细节;而设置到另一个工作点后,又会出现可以分辨暗区域的层次细节,而亮的区域却已经饱和。不难看出,增加相机的动态范围是提供层次更丰富图像的有效途径。空间推扫遥感相机一般会遇到积分时间短和太阳高角变化大的问题。这是由于相机推扫速度较快,相机积分时间较短,但可以采用 TDI (Time Delay Integration) 技术通过增加积分级数的方法来增加积分时间。也就是说可以通过变化 TDI 积分级数来适应太阳高角的变化解决其观测场景亮度变化很大的问题。然而即使太阳高度角不变时,景物地面反射率变化范围也很大。另外高建筑物的阴影区域往往相对较暗,而高建筑物本身相对较亮,这种情况下被观测景物也具有非常大的动态范围,对相机的动态范围也提出了很高的要求。CCD 的动态范围由于受到像元尺寸等限制不能做到足够大,目前约为 60~70 dB,人眼的动态范围约为 90 dB,而自然场景动态范围往往超过 100 dB^[2],可见 CCD 不能完全适应大动态范围景物的要求。当然,通过增加 CCD 满阱电荷和降低读出噪声可以提高 CCD 的动态范围,但是由于 CCD 动态范围和其他指标间有约束关系,无法完全解决大动态范围场景问题^[3]。此外一些文献提出了图像传感器的动态范围扩展技术,包括多次曝光技术、自复位技术等^[4-5]。也有文献提出通过以 15 Hz 转动不同透过率的滤光片轮获得图像序列,然后将图像序列融合为一幅图像的方法^[6]。这些技术实质上都是同一场景多次曝光技术,而推扫相机很难对同一场景以不同曝光时间重复拍摄,从而限制了上述多次曝光技术的应用。

本文提出采用双排 TDI CCD 来增加相机动态范围的方法,该方法首先分别对两排 CCD 设置

不同的积分级数,然后对两排 CCD 的图像数据进行合成来得到大动态范围的图像。

2 动态范围分析

动态范围分析主要涉及场景动态范围和相机动态范围两个概念。当用相机对一个场景观测时,场景动态范围定义为场景中最大的入瞳辐亮度 L_{\max} 与需要分辨的最小入瞳辐亮度 L_{\min} 的比值,即

$$DR_{\text{scene}} = L_{\max} / L_{\min}. \quad (1)$$

空间遥感应用中,高建筑物阴影区域很暗,其入瞳辐亮度也很小。而在阴影区域中存在目标时,需要分辨的最小入瞳辐亮度 L_{\min} 也非常小,导致场景的动态范围非常大。如果相机没有足够的动态范围,那么阴影区域就很难分辨。图 1 所示为一幅高建筑物的遥感图像,阴影区域已经很暗,图中目标很难分辨。



图 1 高建筑物的遥感图像

Fig. 1 Remote sensing image of high building

相机动态范围等于可探测最大光能量和可分辨最小光能量的比值。它是相机的固有指标,并不随着观测场景的变化而变化。相机能探测的最小光能量由相机在无光照下的噪声电压 N_{dark} 决定,相机能探测的最大光能量由相机的信号饱和电压 $S_{\text{saturation}}$ 决定,相机动态范围

$$DR_{\text{camera}} = S_{\text{saturation}} / N_{\text{dark}}. \quad (2)$$

场景动态范围由亮度给出,而相机动态范围由相机输出信号电压给出,建立亮度和相机输出信号电压的关系即可分析场景动态范围和相机动态范围的关系。TDI CCD 相机的输出信号和入瞳辐亮度关系可以由图 2 所示的成像链路模型给出。

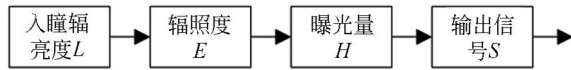


图 2 成像链路模型框图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging chain

相机入瞳处的辐亮度为 $L(\theta, \rho)$, 它是太阳高角 θ 和地面反射率 ρ 的函数, 可以通过大气分析等软件进行估算。相机焦平面处的辐照度

$$E = \frac{\pi}{4} \times L \times \tau_{\text{optics}} / F^2, \quad (3)$$

其中: τ_{optics} 为相机光学系统的透过率, F 为相机相对孔径的倒数。那么相机焦平面处的辐照量

$$H = E \times t_{\text{int}}, \quad (4)$$

其中: t_{int} 为相机的积分时间。相机响应的信号电压输出

$$S = R \times H, \quad (5)$$

其中: R 为 CCD 相应积分级数下的响应度,

$$R = M \times CCE \times \frac{\lambda \eta A_p}{hc}, \quad (6)$$

其中: M 为 TDI CCD 相应的积分级数, CCE 为 CCD 的电荷转换因子, λ 是波长, η 是量子效率, A_p 是 CCD 像元面积, h 是普朗克常数, c 是光速。

从公式(3)~(6)可知, 在入瞳辐亮度较小的情况下, 要使输出信号足够大, 可以采取的办法有提高光学系统透过率 τ_{optics} , 减小光学系统 F 数, 增加 CCD 的积分时间 t_{int} , 增加 CCD 的积分级数 M 等。当相机光学系统固定后, 为了探测入瞳辐亮度较小的目标, 可以增加 CCD 的积分时间或者增加 CCD 的积分级数。同理, 观测入瞳辐亮度较大的目标为了避免饱和, 可以减小 CCD 的积分时间或者减小 CCD 的积分级数。当场景动态范围很大时, 要求相机动态范围也要足够大, 也即要求 CCD 的积分时间或积分级数设置范围很大。

3 双排 TDI CCD 的大动态范围相机方案

采用 TDI CCD 需要进行推扫成像, 很难对同一场景在短时间内进行不同积分时间或积分级数的重复拍摄, 这些都限制了多次曝光技术的应用。此外, TDI CCD 的电荷转移需要和相机推扫速度匹配, 即要进行像移匹配^[7], 其积分时间由推扫速

度决定, 不能随意改变^[8]。因此, 只能通过两排 CCD 设置不同的积分级数依次对场景进行曝光, 然后再通过图像合成来增加相机的动态范围。实际上增加积分级数和增加积分时间是等效的。图 3 所示为双排 TDI CCD 相机框图。两排 TDI CCD 分别有自己的处理及控制电路, 输出的图像数据进入图像合成传输模块进行图像的合成。当然, 两排 CCD 获得的图像也可以不在卫星上进行合成, 可以把两幅图像传回地面采用更加复杂优秀的方法处理或合成。

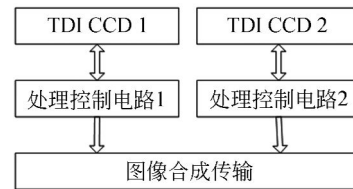


图 3 双排 TDI CCD 相机框图

Fig. 3 Schematic diagram of two row TDI CCD camera

此外, 该方案在电源功率受限时, 也可以只开启一排 CCD 恢复到 not 提高动态范围的模式。这样两排 CCD 互为冷备份, 相对一排 CCD 的相机, 可靠性得以提高, 工作模式相对灵活。

当采用双排 TDI CCD 获得两幅图像后, 可以把这两幅图像合成为一幅图像。设两排 TDI CCD 编号分别为 CCD1 和 CCD2, 其积分级数为 N 和 kN , 获得的图像分别为 $I_1(x, y)$ 和 $I_2(x, y)$, 图像的满量程码值为 FS 。设合成后的图像为 $O(x, y)$, CCD2 由于采用了较高的积分级数, 相当于曝光时间加长, 所以 $I_2(x, y)$ 可以反映暗区域的层次, 但亮的区域可能会饱和。而 CCD1 采用了较低的积分级数, 所以 $I_1(x, y)$ 可以反映亮区域的层次, 但不利于暗区域的分辨。把 $I_2(x, y)$ 中饱和的区域用 $I_1(x, y)$ 对应区域进行相应的代替就可完成图像的合成。实际上, 通过前面分析可知, 相机为线性响应系统, $I_2(x, y)$ 为 $I_1(x, y)$ 的 k 倍。当 $I_1(x, y) > FS/k$ 时, $I_2(x, y)$ 已经饱和, 这时合成图像 $O(x, y)$ 设置为 $kI_1(x, y)$ 。当 $I_1(x, y) \leq FS/k$ 时, $I_2(x, y)$ 不会饱和, 这时合成图像 $O(x, y)$ 设置为 $I_2(x, y)$ 即可。则有

$$O(x, y) = \begin{cases} I_2(x, y), & I_1(x, y) \leq FS/k \\ kI_1(x, y), & I_1(x, y) > FS/k \end{cases} \quad (7)$$

由于相机在无光照下的噪声电压 N_{dark} 不变,

而采用两排 CCD 后,可探测的最大亮度是一排 CCD 的 k 倍,所以相机动态范围是原先的 k 倍,动态范围提高了 $20 \log(k)$ dB。合成后的图像量化位数会增加 $\log_2(k)$ 位。例如积分级数分别为 8 和 48 时,动态范围是原先的 $48/8=6$ 倍,动态范围提高了 $20 \log(48/8)=15.56$ dB。

4 实验结果

本文对双排 TDI CCD 大动态范围相机的方案进行了模拟实验。采用叠放起来的书堆来模拟高建筑物。然后在书堆上和书堆的阴影区域都放置目标,如图 4 所示。由于增加积分级数和增加积分时间是等效的,所以通过控制相机积分时间来模拟不同的 TDI 积分级数。其中图 4(b)的积分时间是图 4(a)的 6 倍,即相当于积分级数为 6 倍关系。可见,图 4(a)中书堆阴影区域的目标较暗,难以分辨,但书堆上的目标层次分明。而图 4(b)中书堆阴影区域的目标层次分明,但书堆上的目标很多区域已经饱和。

把这两幅图像按照上节的方法合成后可得到动态范围扩大 15.56 dB 的图像。合成后的图像动态范围较大,可以用大动态范围显示器显示。但是目前绝大多数常规显示和打印设备都只能支持相对较低动态范围的显示和打印输出。因此,为了把大动态范围图像显示在低动态范围设备上,要进行图像的色阶重建 (tone reproduction)^[9]。本实验进行了图像的色阶重建。色阶重建也是一个重要的研究领域,已有文献报道了很多方法^[10-11]。本文重点是提高相机的动态范围,不对色阶重建进行详细论述。这里采用 Schlick 方法^[12]进行处理。处理后的图像如图 4(d)所示,可见不论是亮区域还是暗区域目标层次都较丰富。需要指出的是大动态范围图像并不能通过直方图均衡化等图像处理获得。图 4(c)所示为对图 4(a)进行直方图均衡化的结果,阴影区域仍然难以分辨。

参考文献:

- [1] 何红艳,王小勇,付兴科. 遥感卫星 CCD 相机的动态范围设计考虑[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(1): 39-42
HE H Y, WANG X Y, FU X K. Study on the de-



(a) M=8 模拟图像 (b) M=48 模拟图像
(a) Simulated image with M=8 (b) Simulated image with M=48



(c) 直方图均衡化后图像 (d) 合成图像
(c) Image after equalizing histogram (d) Synthesized image

图 4 不同积分级数图像及合成图像

ig. 4 Images of different stages and synthesized image

5 结论

空间遥感相机由于地面反射率变化范围大以及高建筑物存在阴影区域等特点使得观测场景的动态范围很大。为了提高遥感相机的动态范围,本文提出了采用双排 TDI CCD 设置到不同的积分级数获得两幅图像,然后进行图像合成的方法。积分级数高的 CCD 用于观测暗的区域;而积分级数低的 CCD 用于观测亮的区域。根据积分级数的差别对两排 CCD 的图像数据进行合成。该方案有效提高了相机的动态范围,当两排 CCD 积分级数分别设置为 8 和 48 时,动态范围可以提高 15.56 dB。

signing of the dynamic range of remote satellite's CCD camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(1): 39-42. (in Chinese)

- [2] ABBAS E G, HELMY E. Cmos image sensors[J]. *IEEE Circuits & Devices Magazine*, 2005, (5/6): 6-20.

- [3] JAMES R J. *Scientific Charge-Coupled Devices* [M]. USA: SPIE Publications, 2001.
- [4] MASA AKI S, MITSU HITO M, SHOJI K, *et al.*. A wide-dynamic-range CMOS image sensor based on multiple short exposure-time readout with multiple-resolution column-parallel ADC[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(1): 151-158.
- [5] MCLLRATH L. A low-power low-noise ultrawide-dynamic-range CMOS imager with pixel-parallel A/D conversion [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2001, 36:846-853.
- [6] 陶坤宇,李福巍,周彦平,等. 红外焦平面成像系统动态范围自适应技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2008,37(2): 265-269.
TAO K Y, LI F W, ZHOU Y P, *et al.*. IRFPA imaging system dynamic range adaptive adjust technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008,37(2):265-269. (in Chinese)
- [7] 闫得杰,徐抒岩,韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2008,16(11):2199-2203.
YAN D J, XU S Y, HAN C S. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2199-2203. (in Chinese)
- [8] 马天波,郭永飞,李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. *光学精密工程*, 2010,18(9): 2028-2035.
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [9] BATTIATO S, CASTORINA A, MANCUSO M M. High dynamic range imaging for digital still camera: an overview[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2003, 12(3): 459-469.
- [10] JOOHYUN L, GWANGGIL J, JECHANG J. Piecewise tone reproduction for high dynamic range imaging [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(2): 911-918.
- [11] GABRIELE G, STEFANO M, GIOVANNI R. High dynamic range image display with halo and clipping prevention[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(5): 1351-1362.
- [12] SCHLIK C. Quantization techniques for visualization of high dynamic range pictures[C]. *5th Eurographics Workshop on Rendering*, 1994:7-18.

作者简介:



薛旭成(1980—),男,河北阳原人,副研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电成像及处理技术方面的研究。E-mail: xue0818@163.com



韩诚山(1972—),男,辽宁盖州人,研究员,硕士生导师,1993年于吉林工业大学获得学士学位,1998年、2004年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位,主要从事空间有效载荷电控系统设计方面的研究。E-mail: xuan_han@yahoo.com.cn



薛栋林(1979—),男,江苏靖江人,副研究员,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学检测和空间光学系统设计等方面的研究。E-mail: xuedl@ciomp.ac.cn



郭永飞(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1990年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电技术应用,CCD成像电子学,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn