

文章编号 1004-924X(2013)02-0454-08

多输出 CCD 接缝的校正

吴厚德, 许文海*

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:针对多输出 CCD 传感器成像存在接缝的问题,提出了一种基于延时积分(TDI)的校正方法。使用 TDI 的读出方式对均匀光源成像获得了具有亮度线性渐变的图像数据,建立了获得图像的行平均灰度和行曝光时间关系的模型,通过该模型对 CCD 每路输出特性进行拟合,校正了 CCD 多输出的不均匀性,解决了图像接缝问题,并在模拟前端(AFE)完成了校正过程。本方法仅使用一次成像过程,避免了辐照度调整精度对校正精度的影响。与传统的两点法和多点法(16点)相比,提出方法的输出非均匀性分别减少了 2.428%和 1.052%,校正效果明显提高。实验显示:本方法校正精度高,实验工作量低,可以广泛用于多输出 CCD 的接缝校正中。

关键词:电荷耦合器件;多输出;接缝校正;延时积分;非均匀性校正

中图分类号:TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0454

Correction of seams for multiple output CCD

WU Hou-de, XU Wen-hai*

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

* Corresponding author, E-mail: wh.xu@dlmu.edu.cn

Abstract: A new correction method based on the concept of Time Delay Integration (TDI) was proposed to eliminate the picture seams from a multiple output CCD. The TDI readout operation was used to capture the image under the illumination of a uniform light source, then a model to obtain the relationship between the line average gray level and the exposure time of the image was established. On the basis of the model, CCD output responses were fitted and the output non-uniformity was corrected. By the correction operations mentioned above, the seam correction was implemented in the analog domain of an Analog Front End (AFE). As only one image was needed for the correction method, the correction accuracy could not be affected by the illumination adjustment accuracy of uniform light source. Experiment results show that output non-uniformity by proposed method is 2.482% less than that of two-point method and 1.052% less than that of multi-point method (16 points), which means that the method has better correction effect, less experimental workload and can be widely used in the seam correction of multiple output CCDs.

Key words: Charge Coupled Device(CCD); multiple output; seam correction; Time Delay Integration; nonuniformity correction

收稿日期:2012-08-08;修订日期:2012-10-11.

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(No. 2009BAG18B03);中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 2102TD006)

1 引言

CCD 图像传感器作为成像系统的核心器件,以光电灵敏度高、动态范围大、读出噪声低、空间分辨率高等优点在水下探测、海洋测绘及其它领域获得了广泛应用^[1-3]。随着芯片制造技术的发展,CCD 器件的像素分辨率不断提高,为了保证 CCD 在高分辨率下的帧频,CCD 制造商普遍采用了多通道并行输出的读出方式^[4],每个输出通道使用独立的输出放大器和模拟前端电路(AFE: Analog Front-end Circuit),这使得多输出 CCD 传感器获得的图像存在接缝问题,导致 CCD 的像素不均匀性增加,图像质量降低。因此,对多输出 CCD 的接缝校正问题的研究具有实际意义。

目前,CCD 的像素响应非均匀性(PRNU: Pixel Response Non-uniformity)的校正多采用辐射定标方法,如两点定标法、多点定标法、最小二乘多项式拟合法等^[5-8]。这些方法也可以用来对多输出 CCD 的图像接缝进行校正,柯达公司提供的接缝校正方法正是使用最小二乘多项式拟合的辐射定标法^[9]。但是,为了获得成像系统输入辐射照度和输出数字量之间的对应关系,在定标阶段需要调整成像系统的入射辐射照度值,即改变均匀光源的输入电流或者焦平面与光源的距离,因此入射辐射照度值的调整精度会直接对校正效果产生影响。为了解决该问题,本文提出一种针对多输出 CCD 接缝校正的新方法,该方法使用时间延时和积分(TDI)的读出方式对均匀光源进行成像,将每行像素的曝光时间和行平均灰度作为一个测量点,对 KAF-50100 黑白版的 4 个输出特性进行拟合,并计算校正参数。将获得的校正参数应用于 AFE 的可变增益放大器中对各通道的增益和偏置进行补偿,从而解决多 CCD 输出不均匀性导致的图像接缝问题。本方法仅需一次成像便可获得大量校正使用的测量点,并且定标过程中不需要调整入射辐射照度值,故提高了校正精度。

文中首先对多输出 CCD 接缝问题产生的原因进行了分析,然后提出基于延迟积分读出方式的多输出 CCD 接缝校正方法,并推导了该方法获得的图像的行曝光时间与行平均灰度的关系模型,最后介绍了实验平台的组成并给出了实验结果和结论。

2 多输出 CCD 图像接缝产生的原因

CCD 上的像素被分区后,经由独立的放大机构输出,这就是多输出 CCD。多输出的目的在于提高像素的读出速度,有多少个输出,像素读出速度就会提高多少倍^[10]。但是由于半导体制作中蚀刻、掺杂以及其他方面的因素会使 CCD 输出放大器的特性不可能完全相同。另外,多输出 CCD 的每个输出通道都需要独立的处理链路,处理链路的特性也会存在差别。图 1 所示为一条 CCD 输出链路的示意图,处理链路中包括电压跟随电路和 AFE 芯片,AFE 中包含相关双采样电路和可变增益放大器(Variable Gain Amplifier, VGA)以及 A/D 转换器。每条链路中电压跟随电路的增益由于三极管的差异而不同,每个 AFE 芯片中的 VGA 的响应特性也不会完全一致。因此,多输出 CCD 各路输出之间的差异不可避免,不经补偿,在图像中将会出现灰度差产生的接缝,如图 2 所示。图 2 由四输出的 50 M 像素全帧型 CCD 传感器 KAF50100 生成,由于像素分为左右两部分输出,因此图像中间有接缝,每相邻两行像素由不同通道输出,所以微观上图像存在横条纹。

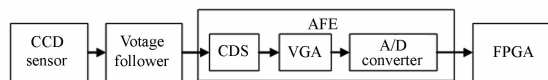


图 1 CCD 输出链路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CCD output chain



图 2 多输出 CCD 图像接缝示意图

Fig. 2 Block diagram of multi-output CCD picture seam

3 基于 TDI 读出方式的多输出 CCD 图像接缝校正方法

3.1 校正数据的获得

图 3 是 50 M 像素全帧型 CCD 图像传感器 KAF50100 的芯片结构示意图。该芯片有两行水平转移 CCD: HCCDA 和 HCCDB, 通过可控传输门 XG 相连接。每行 HCCD 分成了左右两部分, 每部分对应一组输出放大机构, 构成了 4 路输出。当 CCD 完成光积分过程后, 在纵向转移信号 V_1 和 V_2 的驱动下, CCD 上积累的光电荷整体向下移动两行到 HCCDA 和 HCCDB 中, 之后 HCCD 中的电荷在水平转移信号 H_{1A} 、 H_{1B} 、 H_2 和 H_{1L} 的作用下, 分左右两部分经浮置扩散二极管 (FD) 转换成电压后放大输出。KAF50100 在正常感光单元的四周还配置有遮光的暗电平参考像素, 该参考电平可以用作 AFE 的暗电平截断参考, 或者形成数字图像供上位机处理算法使用。当一行像素移动到暗像素行中, 光积分过程即停止。

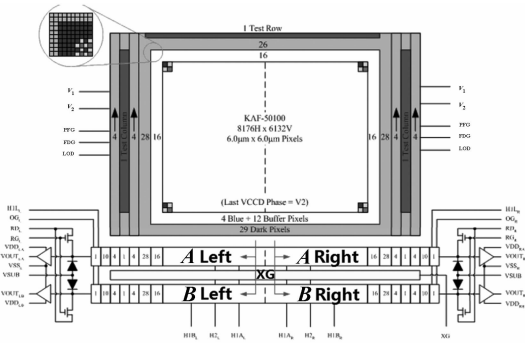


图 3 KAF50100 芯片结构框图
Fig. 3 Block diagram of KAF50100

KAF50100 上没有电子快门, 需要配备机械快门才能对 CCD 的积分过程进行控制。如果机械快门在 CCD 信号读出的过程中一直处于开启状态, 所有处在感光单元的电荷包将会继续积累电荷, 直到饱和或者电荷包移动到遮光的光学暗像素行中, 电荷数量才停止增加, 这就是 TDI 的读出方式^[11]。当对 CCD 器件表面进行均匀光照, 并使用 TDI 方式读出像素信号时, 由于每行像素的读出时间是相同的, 因此在不考虑 PRNU 的情况下, 行与行之间的亮度差应该是恒定的, 获

得的图像应该自下而上均匀变亮, 如图 4 所示。在 CCD 结构和控制时序已知的情况下, 可以计算得到每行像素的曝光时间, 根据曝光时间和行像素平均灰度的关系, 就可以对 CCD 输出通道的特性进行拟合。

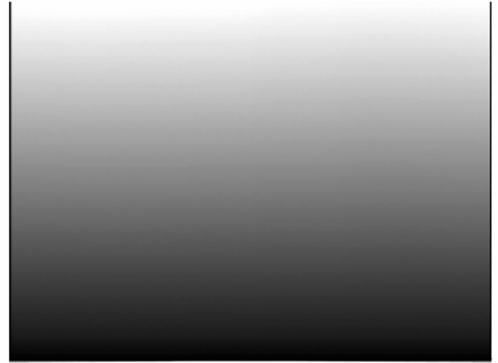


图 4 使用 TDI 方式对均匀光源成像照片
Fig. 4 Imaging of uniform light sources by using TDI mode

3.2 行平均灰度与行曝光时间的关系模型

由于多输出 CCD 可以理解为多个单输出 CCD 的像素在物理上的拼接组合, 因此 TDI 读出方式对均匀光源成像的模型可以仅讨论单输出 CCD 的情况。为了讨论问题方便, 假定一个具有单输出的面阵 CCD 传感器, 如图 5 所示, 该 CCD 具有一行水平转移到寄存器和一个输出放大器, 除水平转移寄存器外所有 CCD 像素均为感光像素。像素自上而下移入水平转移到寄存器中, 便完成光积分过程, 之后逐个输出。设水平转移周期为 T_H , 垂直转移周期为 T_V , 水平转移寄存器中像素个数为 M 。

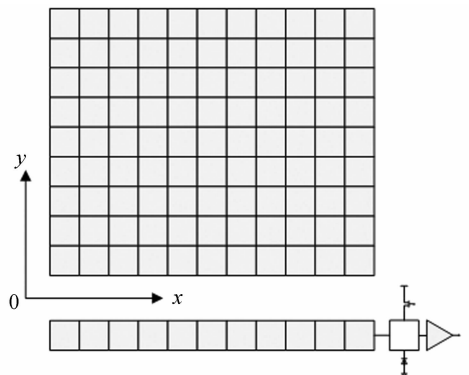


图 5 单输出 CCD 示意图
Fig. 5 Schematic diagram of single output CCD

根据 CCD 中单一像素的理论电荷量计算公式^[12],坐标为 (m, n) 的单个像素理论电荷量应为:

$$Q_{in(m,n)} = \frac{\eta_{(m,n)} \delta S_{(m,n)}}{h\nu} \int_t E_e dt, \quad (1)$$

式中: $Q_{in(m,n)}$ 为像素中的光生电荷量, $\eta_{(m,n)}$ 为光电转换效率, δ 电子电荷量, h 为普朗克常数, ν 为入射辐射频率, $S_{(m,n)}$ 为像素面积, t 为积分时间, E_e 为像素接收的辐照度。其中 $\eta_{(m,n)}$ 和 $S_{(m,n)}$ 由于晶体管制造工艺的问题,会根据像素的不同而变化,这就是 CCD 的像素不均匀性。像素位置确定后,光电转化效率和像素面积就固定了,考虑到 δ 、 h 是常量,CCD 表面辐照度 E_e 和入射辐射频率 ν 在积分过程中为定值,另增益系数 $g_{(m,n)} = \frac{\eta_{(m,n)} \delta S_{(m,n)}}{h\nu}$,则有:

$$Q_{in(m,n)} = g_{(m,n)} E_e t. \quad (2)$$

考虑到 CCD 成像过程中还受暗电流噪声、电荷包输出路径以及电荷转移效率等因素的影响,存在噪声项,因此在公式(2)的基础上考虑噪声因素,则有:

$$Q_{in(m,n)} = g_{(m,n)} E_e t + \sigma_{e(m,n)}, \quad (3)$$

式(3)中并没有考虑暗电流直流成分,仅考虑了暗电流噪声,因为在后续电路处理中,AFE 中的暗电平截断电路会以行为单位去除输出信号的暗电平直流分量,因此 $\sigma_{e(m,n)}$ 可认为是均值为零的随机噪声。由于像素在读出的过程中,CCD 仍然在接收照射,因此每个电荷包在向下移动经过像素 (m, n) 的时候,会有一个电荷增量,根据公式(3),该电荷增量应该为:

$$\Delta Q_{in(m,n)} = g_{(m,n)} E_e \cdot \Delta T + \sigma_{e(m,n)}, \quad (4)$$

其中 ΔT 是电荷包在像素 (m, n) 上停留的时间,该时间由 M 个水平转移周期和一个垂直转移周期构成。因此,在积分初始时刻,像素 (m, n) 上存在一个从零开始积累的电荷包,当它移动到水平转移寄存器上时,其上的电荷量应该是:

$$Q_{sum(m,n)} = \sum_{i=0}^n (g_{(m,i)} E_e \cdot \Delta T + \sigma_{e(m,i)}), \quad n \geq 1. \quad (5)$$

停止曝光过程的 $Q_{sum(m,n)}$ 经由输出链路转换为数字信号,其灰度值应为:

$$v_{(m,n)} = g_o \cdot Q_{sum(m,n)} + o + \sigma_r, \quad (6)$$

其中 g_o 是通道的输出增益系数, o 是输出链路的

直流偏置, σ_r 是输出链路中的随机噪声,包含 CCD 读出噪声、热噪声、以及量化噪声等。对这一行输出的所有像元灰度取平均,随机噪声 σ_r 由于取平均而剔除,则第 n 行 m 个像元的平均灰度有:

$$\bar{v}_n = \frac{g_o \cdot \sum_{j=0}^M Q_{sum(j,n)}}{M} + o. \quad (7)$$

将式(5)带入式(7)中, $Q_{sum(m,n)}$ 中 $\sigma_{e(m,i)}$ 也由于取平均而剔除,则有:

$$\bar{v}_n = \frac{g_o \cdot \sum_{j=0}^M (E_e \cdot \Delta T \cdot \sum_{i=0}^n g_{(j,i)})}{M} + o = \frac{g_o \cdot E_e \cdot \Delta T \cdot \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^n g_{(j,i)}}{M} + o. \quad (8)$$

由于多输出 CCD 横向移位寄存器像元数量 M 较大,根据不同型号的 CCD 芯片通常在 500

到 4 000 不等,因此可以认为 $\frac{\sum_{j=0}^M g_{(j,i)}}{M}$ 趋近于 CCD 像元的平均响应 g_{arv} ,式(8)可以简化为:

$$\bar{v}_n = g_o \cdot E_e \cdot g_{arv} \cdot n \cdot \Delta T + o, \quad (9)$$

其中 $g_o \cdot E_e \cdot g_{arv} \cdot \Delta T$ 是常数,设总增益系数 $g_T = g_o \cdot E_e \cdot g_{arv}$,则式(9)可以简化为:

$$\bar{v}_n = g_T \cdot n \cdot \Delta T + o, \quad (10)$$

其中, n 是输出行的行号,其与 ΔT 的乘积就是该行的曝光时间。由此可得,在使用 TDI 方式对均匀光源成像的情况下,图像的每行平均灰度与其行曝光时间可以作为一个测量点,用于拟合 CCD 的输出特性。

3.3 校正参数的计算

由于多输出 CCD 传感器表面由一整块硅片制造,仅有输出机构不同,所以各通道的平均响应 g_{arv} 和辐照度 E_e 相等,各通道的 $n \times \Delta T$ 由控制时序可以计算得到,因此根据各行的积分时间与平均灰度的关系,使用基于最小二乘法多点拟合^[13]的非均匀校正方法,便可校正多输出 CCD 各通道的响应不均匀性,从而消除多输出 CCD 的图像接缝问题。

首先,取 4 个输出通道在 N_q 个行曝光时间下的行平均灰度值,共 $4 \times N_q$ 个数据,表示为矩阵:

$$V = \begin{bmatrix} \bar{v}(1,1) & \bar{v}(1,2) & \cdots & \bar{v}(1,N_q) \\ \bar{v}(2,1) & \bar{v}(2,2) & \cdots & \bar{v}(2,N_q) \\ \bar{v}(3,1) & \bar{v}(3,2) & \cdots & \bar{v}(3,N_q) \\ \bar{v}(4,1) & \bar{v}(4,2) & \cdots & \bar{v}(4,N_q) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

对矩阵 V 的每一行进行最小二乘直线拟合,可以得到 4 个通道的输出特性曲线, i 通道的响应特性方程为:

$$v(i,q) = g_i \cdot q + o_i, \quad (12)$$

其中, $v(i,q)$ 是 i 通道在辐照度 q 下输出所有像元信号的平均灰度值, g_i 是通道响应增益系数, o_i 是通道输出偏置。设 4 个通道校正后的输出响应为:

$$v_c(i,q) = g_c \cdot q + o_c, \quad (13)$$

则可得增益校正系数和偏置校正系数为:

$$\begin{cases} a_i = g_c / g_i \\ b_i = o_c - a_i \cdot o_i \end{cases}. \quad (14)$$

校正后输出方程应该是输出增益 a_i 最大的那一路,而不是各个通道的平均输出响应,这是因为最先达到饱和的通道其 CCD 信号已经超出了 AFE 的输入上限,应用负增益后将可能使其在校正后永远不能饱和,这样会增加图像在饱和输出附近的噪声。另外,各通道的测量点使用 CCD 的行平均灰度,该参数已经多次平均,剔除了读取过程的随机噪声。因此不应使用通道平均输出响应作为校正目标,而应使用最大增益通道的响应。

4 实验及结果分析

4.1 实验平台介绍

本文所述校正方法使用的实验平台包含一台超高分辨率 CCD 成像系统和均匀光源,成像系统为本课题组自行研制的超高分辨率 CCD 成像系统^[14],该系统使用具有四路并行输出的柯达公司 50 M 像素黑白 CCD 传感器 KAF50100,均匀光源使用 Labsphere 中号均匀光源系统 USS2000C。超高分辨率成像系统框图如图 6 所示。

在对多输出 CCD 进行接缝校正的过程中,将镜头从系统中拆除,均匀光源通过幕帘式焦平面机械快门直接照射在 CCD 图像传感器 KAF50100 上。KAF50100 的每路输出对应一片 AFE 芯片,AFE 使用 ADI 生产的 AD9845B。CCD 输出通道的增益校正正在 AD9845B 的可变增

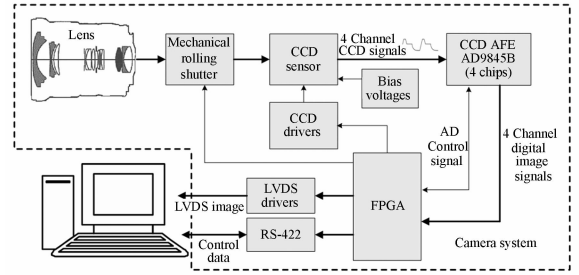


图 6 超高分辨率成像系统原理框图

Fig. 6 Block diagram of imaging system with ultra-high resolution

益放大器中进行,输出偏置校正正在光学暗电平截断回路中进行,该回路可以去除信号链路中的残留偏置。在 AFE 中校正后的像素信号经模数转换输出至 FPGA,在 FPGA 中进行缓存重排后经 LVDS 接口发送至上位机。

由于均匀光源的稳定性和面均匀性对本校正方法的精度会产生直接影响,因此实验中使用 Labsphere 公司的 USS-2000C 均匀光源系统。积分球直径为 500 mm,出口直径为 200 mm,光源电流稳定度为 99.9%。该均匀光源系统的辐照不稳定度非常低,对校正结果的影响可以忽略。KAF50100 有效感光区域对角线长 61.3 mm,根据蓝菲光学的应用手册,CCD 传感器放置于积分球出光口 3 m 以外就可以获得非常均匀的辐照度,边缘与中心辐照度比为 1.00。实验中传感器与积分球相距 5 m 左右,可以得到 99.9% 稳定度和 100% 面均匀度的入射光。

4.2 实验结果及分析

KAF50100 成像芯片水平转移时钟为 18 MHz,垂直转移时钟为 25 kHz,每次垂直转移操作使用 2 个转移时钟将两行像素信号转移至 HCCDA 和 HCCDB 中。因此,对于 KAF50100 而言,式(10)中的 ΔT 应该由 1 次行像素读出(4 152 个水平转移周期)和 2 次垂直转移周期组成,共 $230.67 + 40 \times 2 = 310.67 \mu s$ 。由于 KAF50100 每次纵向转移两行像素,因此 HCCDA 和 HCCDB 输出的相邻行像素之间的曝光时间相差一个纵向转移周期($40 \mu s$),所以 HCCDA 和 HCCDB 输出像素的曝光时间要分别计算,以此保证输出特性拟合的准确性。

使用本文所述方法,在清除 CCD 表面电荷之后立刻对 CCD 进行读操作,操作过程中保持均匀

光源对 CCD 表面的照射,获得校正用图片如图 7 所示,可见图片中间有明显的接缝存在。

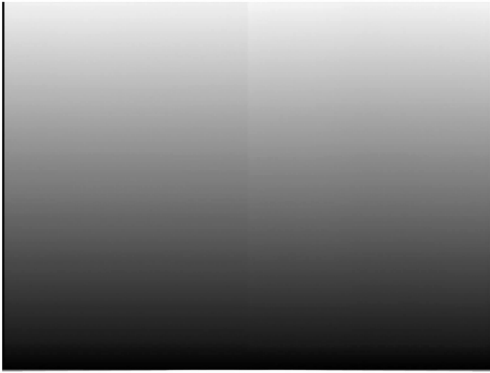


图 7 校正参数计算用图片

Fig. 7 Picture for calculating correction factors

图 7 中,上数第一行的平均灰度为 3 856(12 bit),该平均灰度未饱和且占 CCD 输出范围的 94%,因此依据此图片进行输出特性拟合,可以涵盖整个 CCD 线性输出范围。输出特性拟合依据为感光像素,而传感器最下方有 29 行光学暗像素不能用于校正参数的计算。因此,选取图 7 中下数第 30 行到 6 162 行,共 6 132 行数据作为输出特性拟合的依据,使用 matlab 拟合得到的 4 通道输出特性曲线如图 8 所示,图中,横轴为计算得到的每行输出像素的曝光时间,纵轴为各通道输出的行平均灰度。

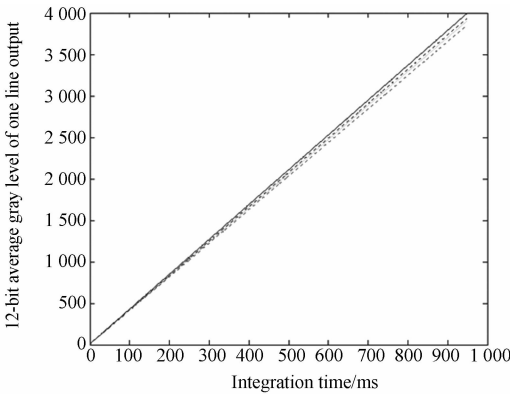


图 8 四通道输出拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of 4-channel output

拟合得到的 g_i 、 o_i 、 a_i 和 b_i 见表 1。由表 1 可见成像芯片 RB 通道的增益大于其他通道,因此其余 3 通道均以 RB 通道响应作为理想响应进行校正,可得校正系数 a_i 和 b_i 。

表 1 拟合结果及校正参数

Tab.1 Polynomial fitting results and correction factors

Channel	LA	LB	RA	RB
g_i	4.048 0	4.201 8	4.133 0	4.254 4
o_i	8.345 1	4.160 9	6.565 8	9.148 2
a_i	1.051 0	1.012 5	1.029 4	1.000 0
b_i	0.461 0	4.975 3	2.387 6	0

将校正参数应用于 AFE 中,获得校正图片如图 9 所示。



图 9 校正后图像

Fig. 9 Post-correction image

在进行多输出响应非均匀性校正后,CCD 整体的像元相应非均匀性会下降,下降的幅度可以用来评价校正方法的性能。设: $PRNU_c = PRNU_b - PRNU_a$,其中 $PRNU_b$ 是校正前 CCD 的像元相应非均匀性, $PRNU_a$ 是校正后像元响应的非均匀性, $PRNU_c$ 是算法消除的非均匀性。经实验测定,校正前 KAF-50100 的像元相应非均匀性 $PRNU_b$ 为 6.685%。分别使用两点法、多点法和本文提出的方法对 CCD 多输出不均匀性进行校正,将校正结果进行比较,结果见表 2。由表 2 可见,使用本文方法校正后,CCD 输出法图像的 PRNU 最低,并且相对于两点法,非均匀性减小

表 2 与两点法和多点法的性能比较

Tab. 2 Performance comparison between different methods

Calibration Method	Two points	Multiple points (16)	Proposed method
$PRNU_a$	3.854%	2.477%	1.425%
$PRNU_c$	2.832%	4.208%	5.260%
Pictures needed	2	16	1

了 2.428%，相对于多点法非均匀性减小了 1.052%，可见该方法在校正效果上明显好于两点法和多点法。另外，本方法仅需要成像一次，校正工作量大幅降低。

5 结 论

针对多输出 CCD 传感器成像存在接缝的问题，提出了一种新的校正方法，该方法使用 TDI 方式对均匀光源进行成像，仅使用一次曝光，就可以获得大量的测量点，每个测量点由 CCD 对应通道输出的一行像素的曝光时间和平均灰度组成，利用这些为数众多的测量点可以准确拟合出各输

出通道的响应曲线，从而对各通道的不均匀性进行校正，最终解决了多输出 CCD 传感器图像接缝的问题。本文叙述了校正算法的原理，并建立 TDI 读出方式对均匀光源成像下的行曝光时间与行平均灰度的模型，论述了该方法的可行性。在获得辐照度参考点之后，使用最小二乘法的思想对各通道的输出特性进行拟合，给出了校正使用的公式。本方法仅使用一次成像，因此不需要在标定过程中调整 CCD 表面的辐射照度，所以避免了辐射照度调整精度对校正效果的影响。与两点法和多点法(16 点)相比，本方法输出非均匀性分别减少了 2.428% 和 1.052%，校正效果明显提高且降低了实验环节的工作量。

参考文献:

- [1] 阮锐. CCD 技术在海洋测绘领域中的应用[J]. 海洋测绘, 2011, 31(3): 80-82.
RUAN R. Application of CCD technology in the field of hydrographic surveying and charting [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 31(3): 80-82. (in Chinese)
- [2] 马庆军, 宋克非, 曲艺, 等. 紫外临边成像光谱仪 CCD 电路系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1538-1545.
MA Q J, SONG K F, QU Y, *et al.*. Design of CCD circuit systems for ultraviolet limb imaging spectrometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1538-1545. (in Chinese)
- [3] 孙泽林, 王昭, 李明. 火炮稳定精度图像测试系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 157-164.
SUN Z L, WANG ZH, LI M. Image test system for gun stabilization accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 157-164. (in Chinese)
- [4] 张达, 徐抒岩. 高速多通道 CCD 信号并行处理系统[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2008, 26(3): 281-286.
ZHANG D, XU SH Y. High-speed multi-channel CCD signal parallel processing system [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2008, 26(3): 281-286. (in Chinese)
- [5] MARTA D L, JAUME P, MONTSERRAT A, *et al.*. Optimized algorithm for the spatial nonuniformity correction of an imaging system based on a charge-coupled device color camera [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(2): 167-174.
- [6] 王文华, 何斌, 韩双丽, 等. 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1420-1428.
WANG W H, HE B, HAN SH L, *et al.*. Real-time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1420-1428. (in Chinese)
- [7] TIMOTHY C W, CHRISTOPHER R S. Simultaneous correction of flat field and nonlinearity response of intensified charge-coupled devices [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78: 123702.
- [8] LI T, HE M Y, LEI M, *et al.*. TDICCD non-uniformity correction algorithm [C]. *ICIEA*, 2009: 1483-1487.
- [9] TUESENSE IMAGING INC. Multiple Output Sensors Seams Correction [OL]. <http://www.truesenseimaging.com>, 2009, 4.
- [10] 余达, 郭永飞, 周怀得, 等. 面阵 CCD KAI-0340DM 高速相机的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2791-2799.
YU D, GUO Y F, ZHOU H D, *et al.*. Design of high speed camera system with area-CCD KAI-0340DM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2791-2799. (in Chinese)
- [11] 王海宁, 魏仲慧, 何昕. TDICCD 相机的实验与研究[J]. 光学精密工程, 1997, 5(2): 93-97.
WANG H N, WEI ZH H, HE X. Experiment and research of TDI CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(2): 93-97. (in Chinese)
- [12] 王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

Wang Q Y. *Applied Technology of Image Sensor* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)

- [13] 邓自立. 最优估计理论及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2005.

DENG Z L. *Optimal Estimation Theory with Applications* [M]. Harbin: Harbin Institute of Tech-

nology Press, 2005. (in Chinese)

- [14] 许文海, 吴厚德. 超高分辨率 CCD 成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1603-1610.

XU W H, WU H D. Design of ultra-high resolution CCD imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1603-1610. (in Chinese)

作者简介:



吴厚德(1982-),男,辽宁大连人,博士研究生,2005年、2008年于大连海事大学分别获得学士、硕士学位,主要从事可见光成像系统的研究。E-mail: shrek@dlmu.edu.cn

导师简介:



许文海(1956-),男,吉林扶余人,博士,教授,博士生导师,1991年、1993年分别于哈尔滨工业大学仪器科学与技术专业和日本东京工业大学生产机械获得工学博士学位(双博士),现主要从事水下探测、光电检测与光电信息等方面的研究。E-mail: whxu@dlmu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)