

文章编号 1004-924X(2011)12-3034-09

多TDICCD拼接相机成像非均匀性 实时校正的硬件实现

朱宏殷^{1,2}, 郭永飞^{1*}, 司国良¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)平台实现的成像非均匀性实时校正算法来解决遥感多时间延迟积分(TDICCD)拼接相机存在的问题。首先介绍了拼接相机成像非均匀性(PRNU)的定义及其产生的原因,然后针对拼接相机的特点,提出了一种通道内用两点定标法、通道间用增益平均法、片间用自适应场景补偿法的复合非均匀性校正算法。从可靠性和实时性考虑,选择在相机信号处理FPGA硬件平台上实现校正算法,针对FPGA的运算能力改进算法并分析误差,同时给出星上定标和校正因子修正的方案。实验结果表明,该算法可将单片TDICCD的成像非均匀性从4.82%降低到0.27%,最终拼接图像的非均匀性降低到0.41%,且实时性好、效率高、可满足实际工程需求。

关键词:多时间延迟积分(TDICCD)拼接;成像非均匀性;实时校正;现场可编程门阵列

中图分类号:V447.3;TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111912.3034

Real-time correction of imaging nonuniformity for multi-TDICCD mosaic camera on hardware

ZHU Hong-yin^{1,2}, GUO Yong-fei^{1*}, SI Guo-liang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn

Abstract: A real-time imaging nonuniformity correction algorithm on a Field Programming Gate Array (FPGA) platform was proposed to modify the imaging nonuniformity of a multi Time Delay Intration (TDICCD) mosaic camera. Firstly, the definition of Photo Response Nonuniformity (PRNU) and its generation in the multi-TDICCD mosaic camera were introduced. Then, the synthetical correction algorithm was presented, in which the two-point correction method was used in a single channel, gain averaging correction method among multi-channels and the scene-adaptive correction method among multi-TDICCDs. By considering the reliability and the influence of finite word-length of the FPGA, the synthetical correction algorithm was optimized and implemented on the signal processing FPGA

收稿日期:2011-03-21;修订日期:2011-06-21.

基金项目:中科院国防创新基金资助项目

platform. Furthermore, a scheme for modifying correction factors and spaceborne calibration were given. The experimental results indicate that the imaging nonuniformity can be decreased from 4.82% to 0.27% for a single TDICCD, and to 0.41% for a 3-TDICCD mosaic camera with the proposed correction algorithm. It also proves that this correction algorithm has high real time performance, good practicality and efficiency, and satisfies the requirements of target projects.

Key words: multi-Time Delay Interation(TDI)CCD mosaic; imaging nonuniformity; real-time correction; Field Programming Gate Array(FPGA)

1 引 言

时间延迟积分(Time Delay Interation, TDI) CCD 具有成像灵敏度和信噪比高的优点,近年来已被广泛应用于航天航空遥感领域^[1-2]。但是,在大视场、高分辨率光电测量设备中,需要对多 TDICCD 器件进行拼接才能够满足测量精度和测量视场的要求^[3]。随着空间遥感技术的提高,遥感成像对图像质量的要求也越来越高。由于成像非均匀性是影响高分辨率拼接相机高精度成像的关键技术。因此,为了获得最佳的最终图像,需要对多 TDICCD 拼接相机的成像非均匀性进行校正^[1]。

目前常用的成像非均匀性校正方法有基于定标的校正方法^[1-6]和基于场景的校正方法^[7-8]两种。基于定标的校正方法是在成像前用均匀辐照光对图像数据进行定标以得到校正参数,这种方法依赖于均匀辐照实验,无法根据环境进行自适应调整,主要有一点法,两点法和多点法。基于场景的校正方法是利用实时获取的图像数据对校正参数进行实时估计和更新,这种方法一般不够精确且很难实时校正^[7],主要有神经网络法、恒定统计平均法和时域高通滤波法。但是,以上方法都没有全面地考虑多 TDICCD 拼接相机由多片 TDICCD 拼接且单片 TDICCD 多抽头输出的特点。

本文从工程实际出发,结合所研究的多 TDICCD 拼接相机的特点,综合考虑非均匀性校正的精确性和实时性,将定标校正法和场景校正法相结合,提出通道内用两点定标法、通道间用增益平均法和片间用自适应场景补偿法的复合成像非均匀性校正算法,最后探讨该方法在硬件中的实时校正及其可靠性。

2 非均匀性校正算法

2.1 非均匀性分析

CCD 成像非均匀性反映了相同光照条件下, CCD 各像元之间响应的不一致性。用 PRNU (Photo Response Nonuniformity)表示成像非均匀性,一般将 PRNU 定义为:CCD 各像元在 50% 饱和曝光量条件下各自输出信号与平均值之差的均方差值与平均值之比,它由下式表示:

$$PRNU = \frac{\sigma_x}{\bar{X}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中 $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}}$, X_i 是第 i 个像元输出信号, \bar{X} 是平均值, N 为总像元个数。

本文所研究的 TDICCD 有 4 096 个有效像元,平均分 8 个通道输出,分别用 8 个视频处理器对各通道输出的 CCD 信号进行转换。如图 1 成像流程框图所示,导致成像非均匀性的因素很多,如光学系统的非均匀性,入射窗口材料透过率各异,成像光敏元响应度的不一致性等^[9]。最终在显示设备上成像时非均匀性表现在 3 个方面:单片 TDICCD 通道内的非均匀性、通道间的非均匀性和多片 TDICCD 片间非均匀性(下文分别简称为通道内、通道间和片间非均匀性)。其中,通道内非均匀性主要是由成像光敏元响应不一致造成的,文献[10]中对此进行了具体阐述。下面具体分析通道间和片间非均匀性产生的主要原因。

由于时序发生器和驱动器产生的时序信号不完全一致,每片 CCD 各通道输出的视频信号所经过的预放器、视频处理器等元器件参数也不完全一致,以及传输路径印刷电路板(Print Circuit Board, PCB)的布局布线等都存在差异,使得各个通道信号的增益和偏置不一致,最终导致通道间

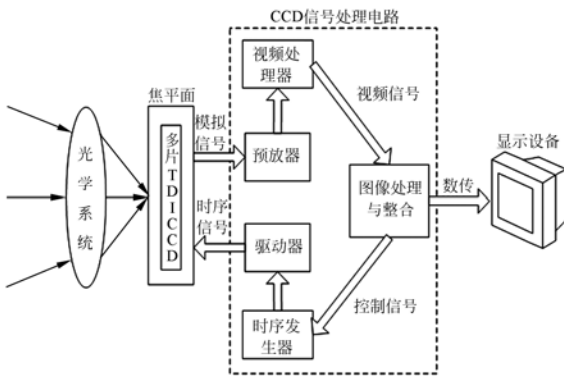


图 1 多 TDICCD 拼接相机成像系统框图

Fig. 1 Block diagram of multi-TDICCD mosaic camera system

非均匀性。

多 TDICCD 拼接相机通常采用侧摆成像的工作方式,侧摆成像会导致各拼接 CCD 接收的光照度不同。根据 TDICCD 的输出信号等效灰度值 DN 正比于积分时间 T_{int} 、光敏元面积 A 、输入光照度 H 和积分级数 M ,即^[11]:

$$DN \propto T_{int} AHM. \quad (2)$$

假设小角度侧摆时各 TDICCD 积分时间 T_{int} 和积分级数 M 不变,那么输入光照度 H 的不同会引起输出图像灰度值的差异。此外,不同 TDICCD 受生产工艺和材料影响,其光电响应灵敏度也不完全相同。因此,相邻 TDICCD 对同一地面反射率的目标成像具有一定的灰度差,拼接图像有明显的拼接线。以上所述是造成拼接相机片间非均匀性的主要原因。

因此,多 TDICCD 拼接相机成像非均匀性更加明显,需要校正的图像数据量非常大,实时校正更加困难。综合考虑校正效果、可实现性和实时性,本文将多 TDICCD 拼接相机成像非均匀性校正分为通道内校正、通道间校正和片间校正 3 部分实现。

2.2 通道内校正

在忽略响应区域两端的情况下,可以认为 TDICCD 响应是线性的^[2]。两点定标校正法对具有线性响应的 CCD 进行校正可以取得很好的校正效果,且易于硬件实现和实时校正,选择对 TDICCD 通道内非均匀性采用基于辐射定标的两点法进行校正。

两点法校正公式为:

$$Y_i'(\varphi) = g_i Y_i(\varphi) + o_i, \quad (3)$$

式中, $Y_i'(\varphi)$ 为通道内校正后像元 i 期望输出的灰度值, $Y_i(\varphi)$ 为通道内校正前像元 i 实际输出的灰度值, g_i 为增益因子, o_i 为偏置因子。在均匀光照情况下,认为所有像元期望输出的灰度值一致,即 $\bar{Y}_i(\varphi) = Y_i'(\varphi)$ 。

在图像采集过程中不可避免地存在随机噪声,它将干扰非均匀性校正结果,随机噪声属于正态分布,它的数学期望值为 0^[1]。因此连续采集 1 000 行图像,求得通道内所有像元灰度平均值作为 $\bar{Y}_i(\varphi)$ 。

校正前进行辐射标定,在 m 种不同的光照条件 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_m$ 下,根据公式(3)得到 m 个方程,用最小二乘法求得每个像元的校正参数 g_i 和 o_i 。 m 个方程的矩阵形式为^[1]:

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}(\varphi_1) \\ \bar{Y}(\varphi_2) \\ \vdots \\ \bar{Y}(\varphi_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_i(\varphi_1) & 1 \\ Y_i(\varphi_2) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ Y_i(\varphi_m) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_i \\ o_i \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2.3 通道间校正

通道间的校正可以使用增益平均法,获得每个通道校正后的增益与各通道平均增益,据此对各个通道的增益进行校正以达到各通道增益一致。进行通道间校正时,要先完成各通道内的非均匀性校正。

对于任一片 TDICCD,第 j 个通道的增益补偿参数 s_j 的获取公式如下:

$$s_j = \frac{\bar{Y}_j'(\varphi) - Y_j'(\varphi)}{Y_j'(\varphi)}, \quad (5)$$

式中, $Y_j'(\varphi)$ 为照度 φ 下的通道内校正后第 j 个通道内所有像元灰度的平均值, $\bar{Y}_j'(\varphi)$ 为照度 φ 下的通道内校正后所有通道内所有像元灰度的平均值。为了消除随机噪声,同样采集 1 000 行图像取平均值。

通道间校正公式为:

$$Y_{ij}''(\varphi) = Y_{ij}'(\varphi)(1 + s_j), \quad (6)$$

式中, $Y_{ij}''(\varphi)$ 为 j 通道 i 像元片内通道间校正输出, $Y_{ij}'(\varphi)$ 为 j 通道 i 像元通道内校正输出。

2.4 片间校正

如果通过地面辐射定标对片间非均匀性进行校正,则工作量非常大,而且校正效果和精度也没有保证。因此提出一种自适应场景的校正方法对多 TDICCD 拼接相机片间非均匀性进行校正。

大视场高分辨率多 TDICCD 拼接相机一般

采用机械交错拼接方式,可以消除光学拼接和直接拼接的一些缺陷^[12]。机械交错拼接方法如图 2 所示,拼接时奇数片 CCD 和偶数片 CCD 的光敏元在飞行方向上错开一定距离,相邻两片 CCD 首尾像元搭接。通过在每片 CCD 的每行图像中插入行号和将奇数片 CCD 的图像信号滞后一个精确的时间间隔输出,最终就可得到清晰准确的大视场图像^[13]。可以利用搭接像元实现片间自适应场景非均匀性校正。

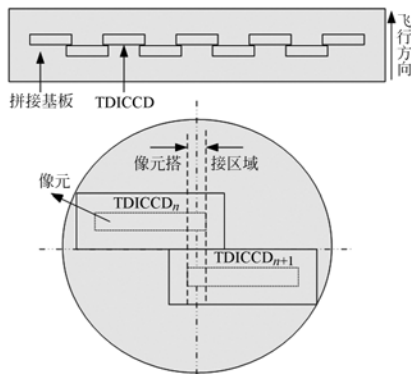


图 2 机械交错拼接示意图

Fig. 2 Principle of mechanical interleaving assembly

不妨以两片 TDICCD 拼接为例,设首尾搭接像元为 2 个,即 CCD_1 的搭接像元为 $P_{1,i}(i=4\ 095, 4\ 096)$, CCD_2 的搭接像元为 $P_{2,i}(i=1, 2)$, 其中 i 表示第 i 个像元。从实时性和计算量的角度考虑,以 10 行为周期进行判断。为减少随机噪声的干扰,分别去除 $P_{1,i}(i=4\ 095, 4\ 096)$ 和 $P_{2,i}(i=1, 2)$ 10 行中像元灰度值最大的两个值和灰度值最小的两个值,然后取每列剩余 6 个灰度值的平均值,得到 $\bar{P}_{1,i}(i=4\ 095, 4\ 096)$ 和 $\bar{P}_{2,i}(i=1, 2)$,再求搭接像元的平均值之差:

$$\bar{Q} = \frac{1}{2} [(\bar{P}_{1,4\ 095} + \bar{P}_{1,4\ 096}) - (\bar{P}_{2,1} + \bar{P}_{2,2})], \quad (7)$$

\bar{Q} 即为两个相邻拼接片的片间校正参数。

若拼接相机由 N 片 TDICCD 组成,设 \bar{Q}_i 为第 $i+1$ 片对第 i 片的片间校正参数,以第一片 TDICCD 为基准,对其他片 TDICCD 的灰度值进行校正,则第一片不用校正,第二片校正参数为 $\bar{Y}_2 = \bar{Q}_1$,第三片校正参数为 $\bar{Y}_3 = \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2$,第 N 片校正参数为:

$$\bar{Y}_N = \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 + \dots + \bar{Q}_{N-1}. \quad (8)$$

求片间校正参数时,要完成片内非均匀性校正。

3 在 FPGA 平台上的算法实现

由于总像元个数多,行频高,数据量大,多 TDICCD 拼接相机图像实时校正系统对其实现平台提出了很高的要求。通常,在遥感相机成像系统中,各通道经过 A/D 转换后的数字图像信号最终都输入到信号处理 FPGA 中进行图像数据整合处理,然后再通过数传通道输出。如果在数据采集计算机上用软件实现校正,虽然可以达到很高的准确度,但是实时处理需要开辟大量的缓存空间,采用多线程的方法进行校正处理和图像处理的协调,增加了后续处理载荷^[6]。如果在数据采集计算机和信号处理 FPGA 中间增加 DSP 来进行非均匀性校正的话,虽然计算方便且实时性好,但是增加了图像数据处理环节,同时加重了系统硬件负担,降低了系统可靠性。由于本文片内非均匀性校正是在定标的基础上进行,如果采用 FPGA 来实现非均匀性校正算法不用增加额外的硬件负担,结构灵活,而且并行的运行方式和流水线设计使得实时性也能满足要求。

3.1 定点运算及误差分析

要在 FPGA 上实现校正算法就首先要考虑 FPGA 运算能力对算法带来的限制,首先 FPGA 无法完成带小数的计算,其次进行整数运算时舍入误差会降低校正精度,最后乘法和除法运算对 FPGA 内部资源消耗巨大。鉴于 FPGA 在运算上有以上缺点,就需要对上文所提出的校正算法进行优化以适应 FPGA 硬件平台。

先根据公式(4)对实验室定标获得的 10 位量化图像数据在 PC 机上进行处理,得到通道内校正参数 g_i 和 o_i 。图 3 为某片 TDICCD 的通道内校正参数直方图,从中可以看到增益因子 g_i 和偏置因子 o_i 的取值范围,为算法适应硬件而进行的优化提供参考。由图 3 可以直观看到 g_i 和 o_i 的取值范围,在充分考虑 g_i 和 o_i 取值范围的余量后,最终确定校正参数的取值范围为 $0 < g_i < 2^1$, $|o_i| < 2^7$ 。

通道内校正时,考虑到把整数和小数分开进行处理可以减少计算量,设 $g_i = G + \Delta g_i$ (G 为 0 或 1, $0 < \Delta g_i < 1$);又考虑到 o_i 为有符号数,将其转化为无符号运算也可以减少计算量,设 $o_i = O_i + \Delta o_i$ (O_i 为负常数 -2^7 , $0 < \Delta o_i < 2^8$),则可以得

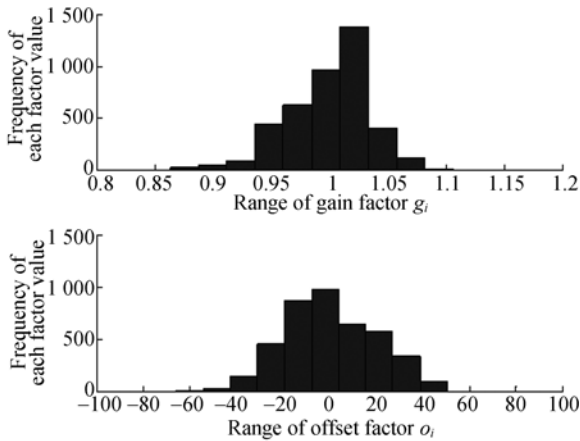


图3 一片TDICCD的通道内校正参数直方图

Fig. 3 Histogram of correction factors for one part of TDICCD

到:

$$Y_i'(\varphi) = (G + \Delta g_i) Y_i(\varphi) + o_i = \Delta g_i Y_i(\varphi) + G Y_i(\varphi) + O_i + \Delta o_i, \quad (9)$$

式中, G 、 O_i 和 $Y_i(\varphi)$ 是整数, Δg_i 和 Δo_i 必须也是整数, 这样才能在 FPGA 中进行运算, 从而得到整数值 $Y_i'(\varphi)$ 。本文采取的方法是: 将 Δg_i 和 Δo_i 分别扩大 2^M 倍和 2^N 倍变换为整数值进行运算, 得到的结果再缩小相应的比例。这样处理可以提高计算精度, 降低计算误差。据此, 公式(9)可以变换为:

$$\begin{aligned} Y_i'(\varphi) &= \Delta g_i (2^M \cdot 2^{-M}) Y_i(\varphi) + \Delta o_i (2^N \cdot 2^{-N}) + G Y_i(\varphi) + O_i = \\ &(\Delta g_i 2^M) Y_i(\varphi) 2^{-M} + (\Delta o_i 2^N) 2^{-N} + G Y_i(\varphi) + O_i = \\ &\Delta g_i^M Y_i(\varphi) 2^{-M} + \Delta o_i^N 2^{-N} + G_i(\varphi) + O_i, \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\Delta g_i^M = \Delta g_i 2^M$, $\Delta o_i^N = \Delta o_i 2^N$ 。显然 g_i 和 o_i 的误差分别存在于 Δg_i 和 Δo_i , 所以分析(10)式的计算误差不需要考虑 $G_i(\varphi)$ 和 O_i 项。下面分析 $\Delta g_i Y_i(\varphi)$ 和 Δo_i 的计算误差: $Y_i(\varphi)$ 为 10 位二进制数, Δg_i 的误差最大可被放大 2^{10} 倍, 则 Δg_i 的误差最大为 $1/2^{11}$ 方可满足乘积项误差小于 0.5 的要求^[9], 因此 $M=11$, Δg_i 取十进制数小数点后 4 位, 然后乘以 2^{11} , 再取整转换成 11 位二进制数, 即 $0 < \Delta g_i^M < 2^{11}$, 引入误差上限为 0.5。为适当减小 Δo_i 的计算误差, 取 $N=2$, Δo_i 取十进制数小数点后 2 位, 然后乘以 2^3 , 即 $0 < \Delta o_i^N < 2^{11}$, 引入误差上限为 0.05。因此通道内校正引入的计算误差上限为 $\sqrt{0.5^2 + 0.05^2} \approx 0.5$ 。

在 FPGA 中右移 N 位(用“ $\gg N$ ”表示)表示除以 2^N , 即乘以 2^{-N} , 因此, 在 FPGA 上实现算法时, 公式(10)可以表示为:

$$Y_i'(\varphi) = (\Delta g_i^M Y_i(\varphi)) \gg M + (\Delta o_i^N \gg N) + G_i(\varphi) + O_i, \quad (11)$$

通道间校正时, 根据经验可知 $|s_j| < 1$, 对公式(6)也进行如上变换:

$$Y_{ij}''(\varphi) = ((s_j^K Y_{ij}'(\varphi)) \gg K) + Y_{ij}'(\varphi), \quad (12)$$

式中, $s_j^K = s_j 2^K$, $K=11$, s_j 取十进制数小数点后 4 位, 乘以 2^{11} , 取整转换成 11 位二进制数, 引入计算误差上限为 0.5。

同理, 片间校正时, 校正公式(7)可以表示为:

$$\bar{Q} = ((\bar{P}_{1.4\ 095} + \bar{P}_{1.4\ 096}) - (\bar{P}_{2.1} + \bar{P}_{2.2})) \gg 1, \quad (13)$$

引入计算误差上限为 0.5。

3.2 星上定标与校正因子修正

遥感相机实际工作环境与地面差别很大, 而且在轨工作时间长, 相机的性能和参数会随着时间推移发生变化, 所以现代遥感相机一般都设置星上辐射定标装置, 常采用 LED 作为星上定标光源^[14]。当发现地面定标(或星上定标)得到的校正因子不再适用时, 重新进行星上定标, 将定标图像下传至地面, 重新计算片内校正因子(包括通道内校正因子和通道间校正因子), 然后通过指令将新的校正因子注入 FPGA, 存储在星上校正因子存储区。将地面辐射定标得到的校正因子称为地面校正因子, 将星上辐射定标得到的校正因子称为星上校正因子。校正因子存储在 BRAM 中, 用 ISE 的 IP 核生成工具将 BRAM 配置成双端口 RAM, 读写端口分离, 写端口由写使能信号控制。如图 4 所示, 地面校正因子作为 RAM 的初始化数据在 FPGA 上电初始化时即自动载入 RAM 中, 在不需要注入星上校正因子时关闭写使能; 若需要注入星上校正因子则打开写使能, 写入星上校正因子(或覆盖旧的星上校正因子)。通过校正因子选择信号选择输出地面校正因子还是星上校正因子。总之, 可对校正因子进行星上修正, 确保非均匀性校正的精度不随空间环境和相机性能的变化而出现波动。

3.3 FPGA 硬件实现

除了实现非均匀性校正算法, 信号处理 FPGA 在空间相机成像系统中还要完成图像数据整

合输出、视频处理器时序驱动、与相机控制器进行通讯和时钟及复位控制等功能,因此 FPGA 的选择主要考虑以下几点:大容量的内部数据存储能力、丰富的逻辑资源和足够的 IO 管脚。由式(11)和式(12)可知,需要 RAM 存储的校正因子有 4 组: Δg_i^M 、 Δo_i^N 、 $(G_i(\varphi) + O_i)$ 和 s_j^K 项,每组 4 096 个,按 12 bits 宽度存储, n 为拼接相机的 CCD 拼接片数,则需要内嵌 $192 \text{ kbits} \times n$ 的 BRAM。设多 TDICCD 拼接相机由 3 片 CCD 组

成,则至少需要 576 Kbits 的 BRAM。基于以上考虑,最终实现算法的 FPGA 选用 Xilinx 公司 Virtex2 系列中的 XC2V3000 芯片,它有 700 多个 IO 管脚,内嵌 1 728 Kbits 的 BRAM,96 个独立嵌入式 18×18 乘法器以及 12 个 DCM。此外,在 FPGA 程序设计时采用交错时钟沿的流水线设计方法来提高系统处理速度,保证实时性,如图 5 所示。在实际程序仿真中,校正后的图像数据可仅比原始图像数据延迟 5 个像素时钟。

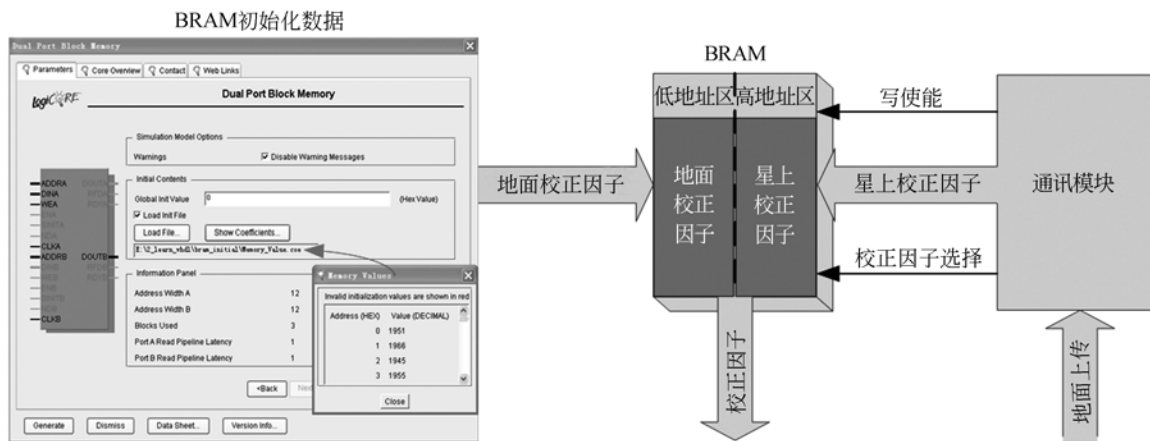


图 4 校正因子注入原理框图

Fig. 4 Block diagram of correction factor access

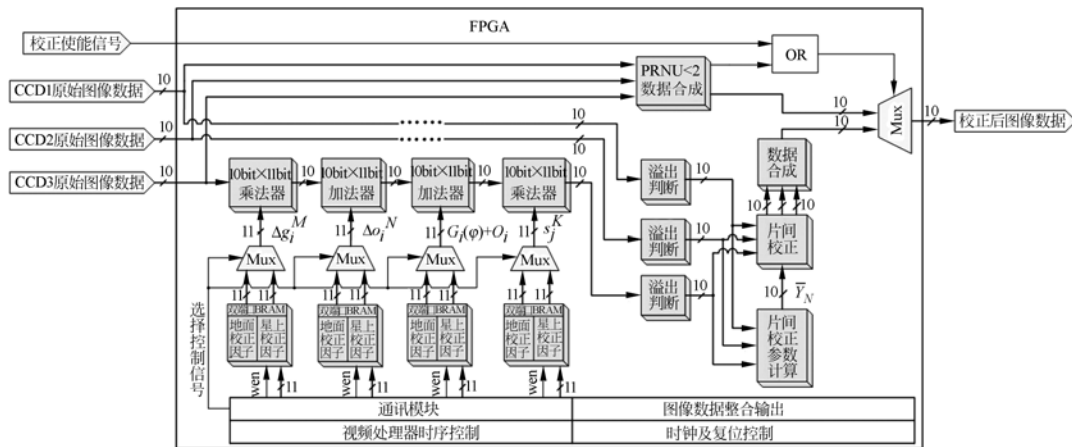


图 5 非均匀性校正算法硬件实现框图

Fig. 5 Block diagram of nonuniformity correction algorithm implemented on FPGA

4 实验结果与分析

本文选用由 3 片 TDICCD 组成的拼接相机,分别记为 TDICCD1、TDICCD2 和 TDICCD3,在

实验室内进行了非均匀性校正实验来验证多 TDICCD 拼接相机非均匀性校正算法的性能。

首先用积分球进行均匀光辐照实验,将 3 片 TDICCD 的增益调节到不同值来模拟其接收到不同的光照强度,图 6 为均匀辐照条件下校正前后

图像对比,可以看出原始拼接图像的非均匀性很明显,校正后的图像光滑流畅,没有灰度差。图 7 为均匀辐照条件下校正前后各像元灰度值曲线。表 1 所示为拼接相机中各 TDICCD 校正前和校正后的 PRNU 值的对比。通过表 1 中数据对比可知,校正后各片 TDICCD 及拼接相机的非均匀性都得到了显著降低,单片 TDICCD 非均匀性最低达到 0.27%,最终拼接相机图像的非均匀性低至 0.41%。

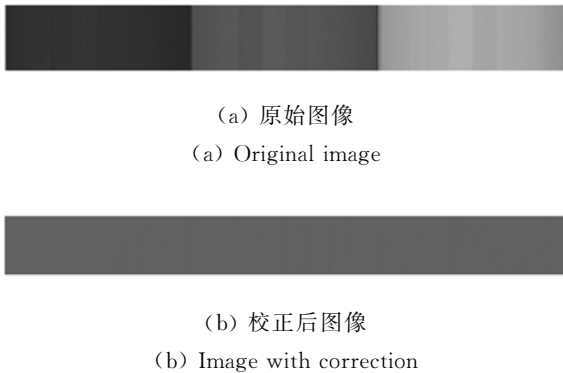
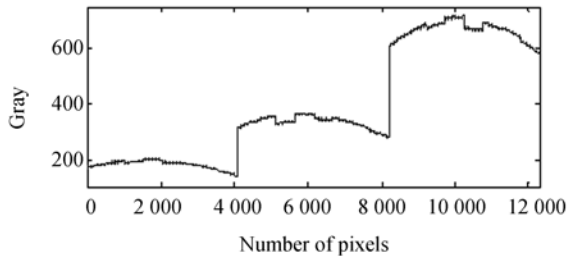
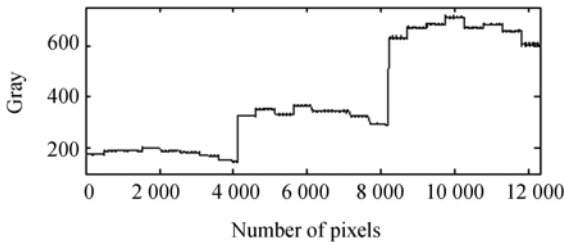


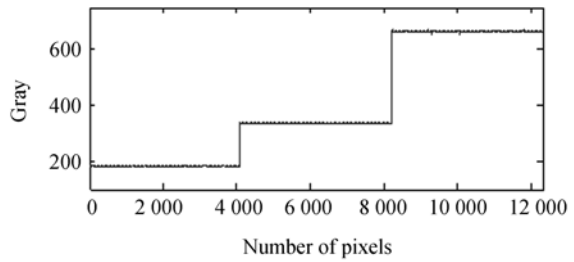
图 6 均匀辐照条件下校正前后图像对比
Fig. 6 Images with/without correction on FPGA in uniform illumination



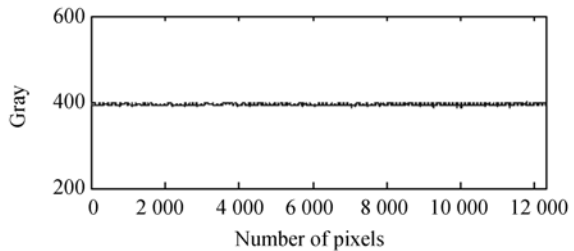
(a) 校正前各像元灰度值曲线
(a) Gray curve without correction



(b) 通道内校正后各像元灰度值曲线
(b) Gray curve with correction of singly port



(c) 通道间校正后各像元灰度值曲线
(c) Gray curve with correction of singly TDICCD



(d) 片间校正后各像元灰度值曲线
(d) Gray curve with correction of multi TDICCD

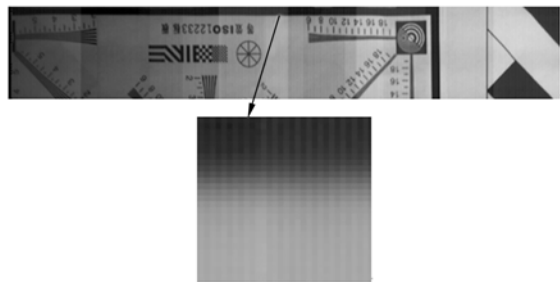
图 7 均匀辐照条件下校正前后各像元灰度值曲线
Fig. 7 Gray curves before and after corrections in uniform illumination

表 1 拼接相机校正前后的 PRNU

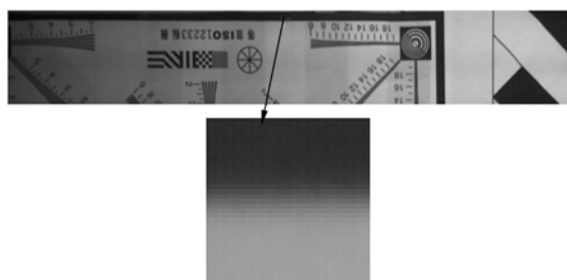
Tab. 1 PRNU before and after corrections for mosaic camera

PRNU	校正前	校正后		
		通道内校正	通道间校正	片间校正
TDICCD1	8.07%	7.87%	0.76%	—
TDICCD2	6.13%	5.94%	0.48%	—
TDICCD3	4.82%	4.65%	0.27%	—
mosaic camera	51.56%	—	—	0.41%

然后,用拼接相机对电机控制转速的滚筒成像来模拟推扫成像,部分推扫图像及其细节图校正前后的对比如图 8 所示。



(a) 原始推扫图像
(a) Original image without correction



(b) 校正后推扫图像
(b) Image with correction

图 8 推扫图像及其细节图校正前后对比

Fig. 8 Real-time correction on FPGA by push-scanning

参考文献:

- [1] 刘亚侠,阮锦,郝志航. 线阵 TDI CCD 遥感相机非均匀性校正的研究[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 749-751.
LIU Y X, RUAN J, HAO ZH H. Research on the nonuniformity correction of linear TDI CCD remote camera [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(6):749-751. (in Chinese)
- [2] 岳俊华,李岩,武学颖,等. 多 TDI-CCD 拼接相机成像非均匀性的校正[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12):3084-3088.
YUE J H, LI Y, WU X Y, *et al.*. Correction of imaging non-uniformity for multi-TDICCD mosaic camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 3084-3088. (in Chinese)
- [3] 王军,杨会玲,刘亚侠,等. 多 CCD 拼接相机中图像传感器不均匀性校正[J]. 半导体光电, 2005, 26(3):261-263.
WANG J, YANG H L, LIU Y X, *et al.*. Correction to the nonuniformity of multiple CCDs butting camera [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, 26(3):261-263. (in Chinese)
- [4] LI T, HE M Y, LEI M, *et al.*. TDICCD non-uniformity correction algorithm [C]. ICIEA, 2009: 1483-1487.
- [5] 程万胜,赵杰,蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):314-318.
CHENG W SH, ZHAO J, CAI H F. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):314-318. (in Chinese)
- [6] 徐树兴,王宝光,郑义忠. 线阵 CCD 平场校正及 FPGA 实现的研究[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(6): 34-37.
XU SH X, WANG B G, ZHENG Y ZH. Study on linear CCD flat field correction and its implementation on FPGA [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007, 27(6):34-37. (in Chinese)
- [7] 刘畅,李绘卓,范勇,等. 多路 CCD 成像不均匀性校正算法[J]. 光电工程, 2009, 3(3):120-124.
LIU CH, LI H ZH, FAN Y, *et al.*. A method for calibrating non-uniformity of multiple CCD images based on scene[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 3(3):120-124. (in Chinese)
- [8] 赖睿,杨银堂. 场景自适应的红外焦平面阵列非均匀性校正新方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(2):228-232.
LAI R, YANG Y T. Novel scene adaptive method for non-uniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. *Journal of Xidian University*, 2009, 36(2):228-232. (in Chinese)
- [9] 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.

5 结 论

本文针对多 TDICCD 拼接相机的特点,分析了多 TDICCD 拼接相机非均匀性产生的原因,提出通道内用两点定标法、通道间用增益平均法、片间用自适应场景补偿法的复合成像非均匀性校正算法,且鉴于工程实时性和可靠性的需求,选择在信号处理 FPGA 平台上实现硬件实时校正。实验室非均匀性实验结果表明,本方法可显著降低 3 片 TDICCD 拼接相机的成像非均匀性,最终拼接图像的非均匀性达到 0.41%,且实时性好,能够满足实际工程需求。此外,在资源允许的情况下,可对 FPGA 程序中重要的控制信号、通讯模块、RAM 等进行三模冗余设计,大大提高星上非均匀性校正的可靠性。

- 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)
- [10] 陈迎娟, 张之江, 张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(2): 216-220.
- CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel nonuniformity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2):216-220. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 张星祥, 任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接 [J]. *光学学报*, 2006, 26(5):740-745.
- ZHANG X X, REN J Y. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5):740-745. (in Chinese)
- [13] 岳俊华, 李岩, 张沛露, 等. 星载拼接相机图像实时校正系统的研究[J]. *光机电信息*, 2008(12):30-35.
- YUE J H, LI Y, ZHANG P L, *et al.*. Study on real-time correction system of spaceborne mosaic camera [J]. *Ome Information*, 2008(12):30-35. (in Chinese)
- [14] 任建伟, 麦镇强, 万志, 等. 星上 LED 定标光源的可行性研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3):398-405.
- REN J W, MAI ZH Q, WAN ZH, *et al.*. Feasibility of LED light source in spaceborne calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):398-405. (in Chinese)

作者简介:



朱宏殷(1984—),女,黑龙江大庆人,博士研究生,2007年于吉林大学获得学士学位,主要从事光电成像技术,FP-GA应用技术等方面的研究。E-mail: zhuhongyin_190310@163.com



郭永飞(1961—),男,山东人,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在计算机中的应用,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail:guoyf@ciomp.ac.cn



司国良(1979—),男,吉林长春人,副研究员,2001年于吉林大学获得学士学位,主要从事光电成像技术方面的研究。E-mail:signol@sina.com