

文章编号: 1007-2780(2011)02-0255-05

在轨完成 CCD 非均匀性校正的方法

李丙玉^{1,2}, 王晓东¹, 李 哲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, E-mail: liby0125@126.com;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 为使空间遥感相机图像具有良好的均匀性, 利用 XQ2VP40 FPGA 在轨实时完成 TDI-CCD 非均匀性校正。首先对 CCD 非均匀性校正原理进行分析, 提出了半饱和灰度值和暗场灰度值的两点校正法; 然后, 介绍了空间遥感相机的系统结构, 利用 FPGA 实现了校正算法; 最后, 通过实验对均匀性校正的有效性进行了验证。实验结果证明: FPGA 在轨实时完成 CCD 非均匀性校正的方法是可行的, 对于非均匀性 5% 的 TDI-CCD, 校正后非均匀性控制在 1% 以内。

关 键 词: 在轨; 实时; TDI-CCD; 暗场; 非均匀性

中图分类号: V447.3; TN386.5

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20112602.0255

Method of CCD Non-Uniformity Correcting in Orbit

LI Bing-yu^{1,2}, WANG Xiao-dong¹, LI Zhe¹

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

Changchun 130033, China, E-mail: liby0125@126.com;

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

Abstract: In order to get space camera image with good uniformity, a method of real-time TDI-CCD non-uniformity correction in orbit using XQ2VP40 FPGA is studied. Firstly the principle of CCD non-uniformity correction is analyzed, a two-point correction algorithm of half saturation gray and dark field gray is proposed, then the architecture of space cameras is introduced and correction algorithm utilizing FPGA is realized, finally the effect is proved by experimental result. The experimental results show that the method of CCD non-uniformity correcting is feasible, for the TDI-CCD whose non-uniformity is 5%, the non-uniformity is less than 1% after correction.

Key words: in orbit; real-time; TDI-CCD; dark field; non-uniformity

1 引 言

TDI-CCD 是一种具有高灵敏度、多重级数延时积分功能的 CCD, 主要应用在低照度条件下, 近年来广泛应用于空间遥感相机成像领域^[1-3]。从信号传递过程来看, 由于光敏单元之间光电响应的不一致性以及 CCD 信号预放电路的影响会导致 CCD 成像的非均匀性, 严重影响成像质量,

因此必须加以校正^[4]。由于 CCD 输出信号的量化值与光照度符合线性关系, 因此可以通过线性修正对拍摄的图像进行归一化处理。传统的线性校正方法主要包括单点定标校正法、两点定标校正法、多点定标分段校正法和恒定统计平均值法等^[5-6]。

本文提出了半饱和灰度值和暗场灰度值的两点校正法, 并给出了利用 FPGA 内部资源实现校

正算法的方法,在不增加电子器件的情况下使空间相机直接下行的图像具有更好的均匀性,获得更优良的图像质量,对空间相机的工程应用具有现实意义。

2 CCD 非均匀性校正算法

2.1 CCD 非均匀性校正原理

根据 CCD 的光电响应特性可知,输出信号电压值和输入光照度之间呈现出良好的线性关系(接近饱和时线性关系变差),可用式(1)表示:

$$A_i = K_i \times L + B_i \tag{1}$$

式中 A_i 为 CCD 第 i 个像素点的输出信号电压值; L 为输入光照度; K_i 为 CCD 第 i 个像素点的光电响应系数; B_i 为 CCD 第 i 个像素点在暗场(没有光照输入)条件下的 CCD 信号电压值(由 CCD 芯片本身暗电流引起)。

CCD 信号输出的模拟信号经预放电路和 A/D 转换电路后转换为数字信号,可用式(2)表示:

$$D_i = A_i \times G_i \times C_i \tag{2}$$

式中 D_i 为 CCD 第 i 个像素点的量化值; G_i 为预放电路放大倍数; C_i 为 A/D 转换系数。

结合式(1)和式(2),得到:

$$\begin{aligned} D_i &= K_i \times G_i \times C_i \times L + \\ B_i \times G_i \times C_i &= \lambda_i \times L + \beta_i \end{aligned} \tag{3}$$

如式(3)所示,CCD 非均匀性体现为 λ_i 值和 β_i 值的不同。非均匀性校正就是通过定标实验得到 CCD 每个像素点的 λ_i 值和 β_i 值,对拍摄的图像按照对应的像素点进行归一化处理。

对于 TDI-CCD,图像上一个像素点对应于多个光敏单元(与积分级数对应),不同的积分级数成像时,每个像素点对应的光敏单元的个数不同,像素之间光电响应不一致性关系也不相同,因此均匀性校正时需要按照积分级数分别进行。

2.2 暗场灰度值和半饱和灰度值校正算法

传统的两点定标校正法选取暗场灰度值点和 CCD 接近饱和灰度值点,实际上每片 CCD 的饱和输出电压存在偏差,实验室条件下很难定义接近饱和灰度值点^[7-9];同时由于 CCD 在接近饱和点时光电响应特性呈现一定的非线性,因此选取暗场灰度值点和半饱和灰度值点得到校正系数更加合理,实验过程如下:

(1)实验室暗场条件下进行成像实验。设置相机工作在典型的行频和增益参数下,改变 TDI-

CCD 积分级数,得到不同的积分级数下各列像素点灰度值的平均值,即为式(3)中的 β_i 值。

(2)实验室均匀光入射条件下进行成像实验。设置相机工作在典型的行频和增益参数下,改变 TDI-CCD 积分级数,在每个积分级数下通过调整均匀光亮度,使图像灰度值约为 CCD 饱和输出灰度值的一半,设此时第 i 列像素点灰度值的平均值为 ϕ_i ,则 $(\phi_i - \beta_i)$ 的值为式(3)中的 λ_i ,那么校正算法可用式(4)表示:

$$J_i = \frac{\bar{\lambda}_i}{\lambda_i} \times (D_i - \beta_i) =$$

$$\frac{\bar{\phi}_i - \beta_i}{\phi_i - \beta_i} \times (D_i - \beta_i) = \Phi_i \times (D_i - \beta_i) \tag{4}$$

J_i 为均匀性校正后第 i 个像素点的量化值; Φ_i 为光电响应校正系数; D_i 为第 i 个像素点实际的量化值。校正后暗场条件下图像灰度值为零,有利于图像目标识别。

3 CCD 均匀性校正算法实现

3.1 空间相机成像系统结构

空间遥感相机系统中成像电路结构如图 1 所示。

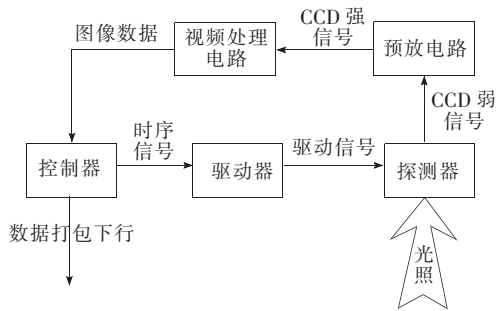


图 1 空间遥感相机成像电路结构
Fig. 1 Architecture of imaging circuit in Space Camera

控制器采用 Xilinx 的 XQ2VP40 FPGA 芯片,内部集成了 192 个 18 kbit 大小的 BlockRam,可以根据不同的需求配置成 RAM、ROM、或 FIFO,实现数据存储的功能;芯片内部还包含 192 个 18 bit×18 bit 的乘法器,可以完成最大 18 位的乘法计算。FPGA 用于产生 CCD 时序控制信号,并采集量化后的图像数据,将图像数据打包下行。

探测器采用的是 4 096×96 TDI 可见光 CCD,它的结构像一个长方形的面阵 CCD(实际

上是线阵结构),横向由 4 096 个像素组成,纵向由 96 个像素组成,横向 4 096 个像素通过 8 个通道同时输出图像数据,每个通道输出 512 个像素;纵向积分级数 8、16、32、48、72、96 可调。

视频处理电路采用型号 XRD98L59 的 CCD 视频信号集成处理器,内部集成了 CDS(相关双采样)、PGA(增益放大)和 ADC(10 位 A/D 量化)。

3.2 FPGA 实现 CCD 均匀性校正算法

根据第 2.2 节中给出的方法,通过定标实验得到 CCD 均匀性校正系数 β_i (减法校正系数)和 Φ_i (乘法校正系数)。FPGA 只能进行二进制的数学运算,因此需要将校正系数转化为二进制数。

实验证明,暗场灰度值 β_i 一般不大于 63,可用 6 bit 二进制数表示,则存储减法校正系数需要 $6 \text{ bit} \times 4\,096 (\text{像素数}) \times 6 (\text{积分级数}) = 147\,456 \text{ bit}$ 的存储器单元。因为 ROM 存储数据的个数必须为 2 的整数次幂,实际占用的存储器单元为 $6 \text{ bit} \times 4\,096 \times 8 (2^3) = 196\,608 \text{ bit}$,1 个 Block-RAM 内部包含 18 kbit 的存储单元,由式(5)可知,存储减法校正系数需要 11 个 Block RAM。

$$\frac{196\,608}{18\,000} = 10.39 < 11 \quad (5)$$

由于采用 10 位 A/D 量化电路,最大量化值为 1 023,为使乘法运算的结果误差小于 1 LSB (Least Significant Bit), Φ_i 的小数部分用 10 bit 二进制数表示,精度为 1/1 023;考虑到有可能存在非均匀性的极大值点,整数部分用 3 bit 二进制数表示,即 Φ_i 用 13 位的二进制数表示,参数范围为:0~7.999,则存储乘法校正系数需要 $13 \text{ bit} \times 4\,096 (\text{像元数}) \times 6 (\text{积分级数}) = 319\,488 \text{ bit}$ 的存储单元,实际占用的存储器单元为 $13 \text{ bit} \times 4\,096 \times 8 (2^3) = 425\,984 \text{ bit}$ 。由式(6)可知,存储乘法校正系数需要 24 个 Block RAM。

$$\frac{425\,984}{18\,000} = 23.67 < 24 \quad (6)$$

完成 $10 \text{ bit} \times 13 \text{ bit}$ 的乘法运算需要使用 1 个 $18 \text{ bit} \times 18 \text{ bit}$ 乘法器。

综上所述,要实现 CCD 均匀性校正算法,共需要 35 个 Block RAM 和 1 个 $18 \text{ bit} \times 18 \text{ bit}$ 乘法器。XQ2VP40 FPGA 内部包含 192 个 Block RAM 和 192 个 $18 \text{ bit} \times 18 \text{ bit}$ 乘法器,因此,仅利用 FPGA 内部资源就可以实现 CCD 均匀性校正

算法。

利用 FPGA 内部资源实现 CCD 非均匀性校正算法的处理流程如图 2 所示。

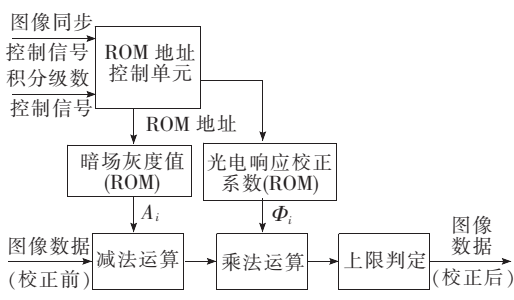


图 2 非均匀性校正处理流程

Fig. 2 Flow of CCD image non-uniformity correction

暗场灰度值校正系数和光电响应校正系数按积分级数和像元顺序初始化到 FPGA 内部 ROM 中。拍摄时,图像数据先后经过减法运算和乘法运算,实时完成 CCD 非均匀性校正。对乘法运算的结果进行上限判定,如果不大于 1 023,则输出运算结果;否则,输出 1 023。

4 非均匀性校正实验结果

4.1 CCD 非均匀性的评价依据

在均匀光入射条件下进行拍摄实验,得到图像数据,按照公式(7)进行分析计算,得到 CCD 均匀性指标。PRNU(K_{PRNU})值越小,代表图像越均匀,CCD 均匀性越好。

$$K_{\text{PRNU}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (DN_i - \overline{DN})^2}{N-1}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $\overline{DN}$ 为所有像元行平均灰度值按列统计算术平均值; DN_i 为第 i 列像元若干行图像灰度统计的算术平均值; i 为像元编号; N 为 CCD 像元个数。

4.2 实验结果

图 3 和图 4 分别为 CCD 非均匀性校正前单片 CCD 的 8 个通道拼接后的图像和放大的单个通道的图像(积分级数 48 级)。



图 3 校正前单片 CCD 图像

Fig. 3 Image of single CCD before non-uniformity correction

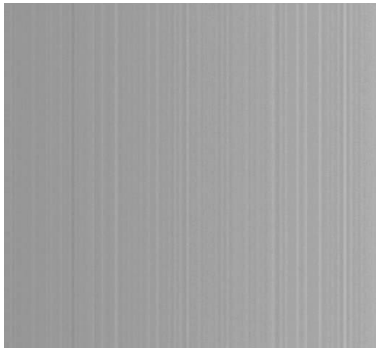


图 4 校正前单个通道图像

Fig. 4 Image of single channel before non-uniformity correction

CCD 通道间和像元间存在明显的灰度值偏差。灰度值平均值为 571,最大值为 609,最小值为 534,最大偏差为 6.7%,均匀性指标为 2.85%。

图 5 和图 6 分别为均匀性校正后单片 CCD 的 8 个通道拼接后的图像和放大的单个通道的图像。

校正后单片 CCD 的 8 个通道之间灰度非常均匀,灰度值平均值为 571,最小值为 569,最大值为 573,最大偏差为 0.4%,均匀性指标为 0.11%。

利用 FPGA 内部资源对多片 TDI-CCD 拼接结构的空间遥感相机整机进行校正,对校正前后的图像进行分析,统计结果见表 1。



图 5 校正后单片 CCD 8 通道图像

Fig. 5 Image of single CCD with 8-channel after non-uniformity correction

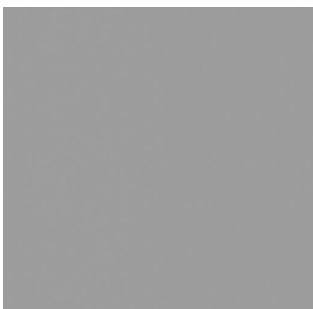


图 6 校正后单个通道图像

Fig. 6 Image of single channel after non-uniformity correction

表 1 非均匀性校正结果

Table1 Results of non-uniformity correction		
积分级数	校正前/%	校正后%
8 级	4.78	0.43
16 级	4.53	0.35
32 级	4.64	0.37
48 级	4.56	0.35
72 级	4.73	0.62
96 级	4.52	0.48

5 结 论

以在轨实时完成空间遥感相机 CCD 非均匀性校正为研究目的,对 CCD 非均匀性校正原理进行分析,提出了半饱和灰度值和暗场灰度值的两点校正算法。根据空间遥感相机成像电路结构,给出了利用 FPGA 实现校正算法的方法,最后通过实验对非均匀性校正的有效性进行了验证;对于非均匀性约为 5% 的 TDI-CCD,校正后非均匀性可控制在 1% 以内。

参 考 文 献:

[1] 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): 3085-3087.

[2] 李洋,刘亚侠. TDI CCD 相机系统响应非均匀性校正 [J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):1226-1227.

[3] 王军,何昕,郝志航. 多 CCD 拼接相机中图像传感器不均匀性校正 [J]. 半导体光学,2005,26(3):261-263.

[4] 郑耿峰,张柯,金龙旭,等. 空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的设计 [J]. 光学精密工程,2010,18(3): 623-628.

[5] 雷宁,刘苗,李涛. TDI CCD 像元响应不一致校正算法性 [J]. 光学技术,2010,36(1):134-139.

[6] 李静,王军政,马立玲. 一种高精度 CCD 测试系统的非均匀性校正方法 [J]. 北京理工大学学报,2010,30(4): 451-455.

[7] 姚涛,殷世民,相里斌,等. 干涉成像光谱仪 CCD 象元响应非均匀性校正技术 [J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(6):

1712-1716.

[8] 周辉,陶宏江,任建岳,等. 基于行间转移 CCD 场输出模式下成像系统设计. [J]. 液晶与显示,2009,24(1): 121-125.

[9] 马岩,胡君,吴伟平. 基于 CCD 成像单元仿真测试系统的实时性实现 [J]. 液晶与显示,2008,23(2):200-204.



欢迎订阅 欢迎投稿

《光学 精密工程》

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问,陈星旦院士任编委会主任,国家科技部副部长曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位,集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新能力。本刊自 2007 年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

- 中国科学技术协会择优支持期刊
- 中国百种杰出学术期刊
- 第一届北方优秀期刊
- 吉林省双十佳期刊

国际检索源:

- 《美国工程索引》(EI Compendex)
- 《美国化学文摘》(CA)
- 《英国 INSPEC》(SA)
- 《俄罗斯文摘杂志》(PЖ)
- 《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

- | | |
|-------------|----------------|
| 中国科技论文统计源期刊 | 中文核心期刊要目总览(北大) |
| 中国学术期刊(光盘版) | 中国学术期刊综合评价数据库 |
| 万方数据系统数字化期刊 | 中国光学与应用光学文摘 |
| 台湾华艺中文电子期刊网 | 中国科学期刊全文数据库 |
| 中国科学引文数据库 | 中国光学文献数据库 |
| 中国物理文献数据库 | 中国学术期刊文摘 |
| 中国期刊网 | 中国物理文摘 |

地 址:长春市东南湖大路 3888 号

《光学 精密工程》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176855

传 真:(0431)84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp. ac. cn

gxjmgc@sina. com

http://www. ope. net. cn

国内邮发代号: 12-166

国外发行代号: 4803BM

定 价: 50.00 元/期

帐 户: 中国科学院长春光学
精密机械与物理研究所

银 行: 中行吉林省分行营业部

帐 号: 220801471908091001