

文章编号 1004-924X(2010)06-1420-09

# 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正

王文华<sup>1,2</sup>, 何 斌<sup>1</sup>, 韩双丽<sup>1</sup>, 李国宁<sup>1</sup>, 吕增明<sup>1</sup>, 任建岳<sup>1</sup>  
(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:**研究了时间延时积分(TDICCD)成像产生非均匀性的原因,基于两点校正算法探讨了星上图像非均匀性实时校正的可行性方案。鉴于工程一体化设计的要求,在常用的 CCD 时序处理器 FPGA 上实现了硬件实时校正。通过对相机均匀辐射定标,利用 FPGA 读取前 32 行 TDICCD 图像数据进行非均匀性等效灰度值(NUEDN)计算,根据工程经验,设定当 NUEDN>2 时对数字图像进行非均匀性实时校正。硬件实时校正结果表明,均匀辐照下 NUEDN 可降至 0.29。实验室动态目标滚筒成像试验表明,实时校正后 TDICCD 推扫成像均匀光滑,满足工程需要。

**关键词:**时间延时积分 CCD;成像非均匀性;FPGA;两点校正法;辐射定标

**中图分类号:**TP391;TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101806.1420

## Real-time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing

WANG Wen-hua<sup>1,2</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, HAN Shuang-li<sup>1</sup>, LI Guo-ning<sup>1</sup>, LÜ Zeng-ming<sup>1</sup>, REN Jian-yue<sup>1</sup>

(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*)

**Abstract:** The reasons for the nonuniformity in CCD imaging were researched, and the feasible schemes to correct the nonuniformity of an image from a satellite were discussed by using a flat field correction method. Then, based on FPGA-based processor, a real-time correction approach was presented to control all of the operations of TDICCD to implement the hardware correction of the nonuniformity. Furthermore, the Nonuniformity Equivalent Digital Number (NUEDN) was calculated by using FPGA to extract the first 32 rows of a raw image in the uniform exposure, and the real time correction for digital images was carried out when the NUEDN was set to be more than 2. The experimental results in the uniform exposure indicate that the NUEDN falls to 0.29. Dynamic push-scanning imaging test was also performed with a standard resolution chart attached on a roller, and the results have proved the validity of the approach in practical projects.

**Key words:** Time Delay Integrated CCD(TDICCD);imaging nonuniformity; FPGA; flat field correction; radiometric calibration

收稿日期:2009-06-18;修订日期:2009-08-26.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

## 1 引言

TDICCD 已广泛应用于各个工程领域,其高灵敏度特性等优点使其成为弱光探测方面的首选。但当对成像特性有很高要求时,则应该考虑成像系统的响应非均匀性。所谓响应非均匀性是指 CCD 相机在同一均匀光辐照下,CCD 不同像元的视频输出信号幅度不同<sup>[1]</sup>。在各种 CCD 成像系统中,CCD 像元响应的不均匀性会对应用系统产生了不同程度的影响,因此非常有必要对整个系统的非均匀性进行校正。目前,常用的非均匀校正算法分为两大类<sup>[2]</sup>,即基于定标的方法和基于场景的方法。基于定标的方法是根据辐照参考源来计算探测器的偏置和增益参数,主要有一点定标法、两点定标法、多点定标法、最小二乘多项式拟合法;基于场景的方法是利用场景信息来估计探测器参数,主要有恒定统计平均法、时域高通滤波法、人工神经网络法等。其中两点定标法、多点定标法及其改进算法应用最广泛,其算法简单,易于硬件实现。

近年来,在红外探测等领域也有针对硬件实时校正的研究,主要采用“DSP 处理器+ FPGA + 外部存储器”的模式<sup>[3]</sup>,这种做法在地面上相对容易实现,也易于维护,但对于卫星航天探测,需要更多考虑它的可行性与可靠性。卫星遥感的对地分辨率以米为单位,若干个像元的非均匀性干扰就会使遥感信息失真甚至丢失<sup>[4]</sup>。依靠地面站接收图像数据再进行软件校正的方法,不仅实时性差,而且由于空间成像数据量庞大,数据处理过程都比较困难。随着单片硬件处理能力的不断增强,硬件实现图像校正是一个发展趋势,可以利用 CCD 逐行或逐帧输出的特点,设计适当的流水线操作,既能保证实时性,还可以省去大量人力时间。

本文从工程实际应用出发,探讨星上图像非均匀性硬件校正的可行性和可靠性,文中涉及的 CCD 器件为线阵 TDICCD,有效像元数为 4 096。

## 2 CCD 图像非均匀性的概念

CCD 图像非均匀性产生的原因十分复杂,具

体从信号传递过程来分析,如图 1 所示,导致非均匀性的因素首先是光学系统;其次是拼接多片 TDICCD 的焦平面,其入射窗口材料因透过率各异所导致的响应不均匀性;第三就是 TDICCD 成像光敏元响应度的不一致性;还有读出电路自身以及 CCD 信号处理电路与 CCD 探测器的耦合因素等。而造成 CCD 光敏元响应不均匀性的原因也是多种多样的<sup>[5]</sup>,硅材料本身的质量以及 CCD 的生产工艺造成的不均匀性都是无法改变的,如沟道掺杂浓度不均匀、表面态密度分布不均匀以及栅氧化物厚度不同造成的开启电压不同和光敏元有效面积不同,从而引入了固定模式噪声,表现为暗电流及光电响应的不均匀性。在这些非均匀因素中,有些仅与探测器自身性能相关,其中线性的因素比较容易测定和校正,而对于其中与器件工作条件、目标辐射等相关的非均匀因素,则很难进行控制。

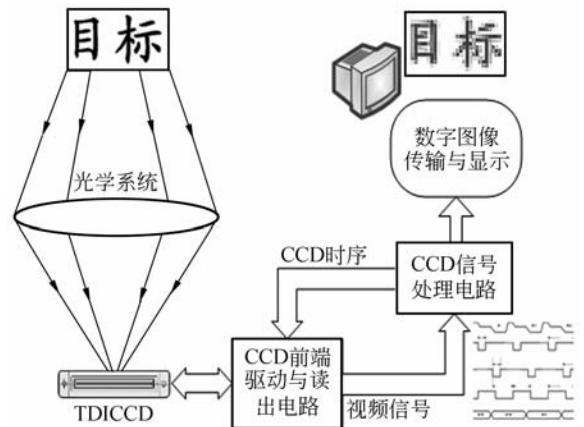


图 1 TDICCD 成像系统简明框图

Fig. 1 Block diagram of TDICCD imaging system

借鉴数学上标准偏差对数据离散程度的描述作用,我们来定义:在均匀辐照条件下,CCD 像元输出灰度值的标准偏差作为像元非均匀性的衡量,如(1)式:

$$\text{NUEDN} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2}, \quad (1)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  个光敏元的输出信号,  $\bar{V}$  为各个光敏元输出信号的平均值,  $N$  为光敏元的数目。采用标准方差度量,表征了整个器件输出值相对于均值的离散程度,能够刻画器件的响应非均匀性。实际测试时,通常把在饱和和视频信号幅度值一半

时所测得的非均匀性大小作为评价和比较器件性能的标准参数。

### 3 两点校正算法原理简介

如果没有非均匀性的影响,在均匀辐照定标条件<sup>[6]</sup>下,TDICCD的所有像元应该输出相同的数码值,逐行扫描后形成一幅像素灰度相同的均匀图像。然而,由于各种因素影响,扫描得到的图像会有不规则条纹。非均匀性校正就是要使相机在相同辐照下输出的整幅图像具有相同的灰度值。

目前,非均匀性校正主要集中在红外焦平面领域,针对算法的研究很多,算法模型不外乎探测器模型和通道模型<sup>[7]</sup>。这里我们主要探讨探测器在整个成像系统中的非均匀性,为便于硬件实现,采用基于辐射定标的两点校正算法<sup>[3,8]</sup>,其根本原理是利用成像辐照度范围内光敏元的线性响应特性<sup>[9]</sup>。就 TDICCD 的每一行光敏元来说,其灵敏度响应及暗电流都不可能完全相同,因此,每一个像元都有其不同的响应系数,由此可以建立如下模型:

$$Y_i(\varphi) = g_i X_i(\varphi) + o_i, \quad (2)$$

式中: $Y_i(\varphi)$ 为第  $i$  个像元期望输出的灰度值,每个像元的信号都向这个期望输出值转换; $g_i$ 为该像元的灵敏度系数(增益因子); $X_i(\varphi)$ 为待校正图像第  $i$  个像元的实际输出灰度值; $o_i$ 为这个像元的偏移量。对实际推扫成像后的图像矩阵而言, $X_i(\varphi)$ 可取第  $i$  列 500 行灰度值的平均值, $Y_i(\varphi)$ 取整幅图像  $500 \times 4096$  个灰度值的平均值。选取两个定标点  $\varphi_1, \varphi_2$ ,得出两个方程:

$$Y_i(\varphi_1) = g_i X_i(\varphi_1) + o_i, \quad (3)$$

$$Y_i(\varphi_2) = g_i X_i(\varphi_2) + o_i. \quad (4)$$

由此可推导出校正后的信号输出值为:

$$Y_i'(\varphi) = a_i X_i(\varphi) + b_i, \quad (5)$$

其中:系数  $a_i$  和  $b_i$  分别定义为增益校正因子和偏置校正因子:

$$a_i = \frac{Y_i(\varphi_1) - Y_i(\varphi_2)}{X_i(\varphi_1) - X_i(\varphi_2)}, \quad (6)$$

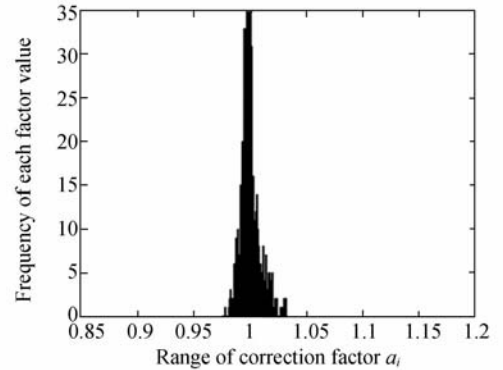
$$b_i = \frac{X_i(\varphi_1)Y_i(\varphi_2) - X_i(\varphi_2)Y_i(\varphi_1)}{X_i(\varphi_1) - X_i(\varphi_2)}. \quad (7)$$

这样每一个像元都有一组校正因子,将待校正的图像矩阵带入(5)式中,就可得到校正后的均

匀图像。应用两点定标校正算法对具有线性响应的图像传感器进行校正,可以取得很好的校正效果,理论上可以完全消除非均匀性,是一种简易而有效的校正算法。

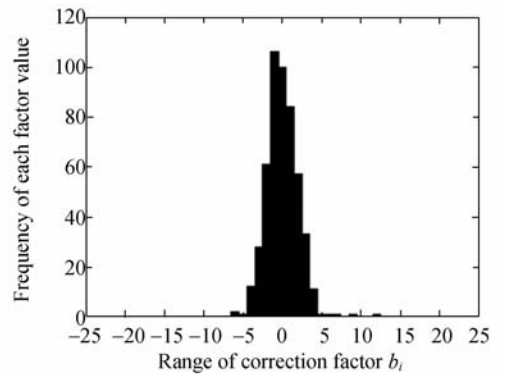
### 4 利用 MATLAB 进行仿真分析

首先通过实验室辐射定标,获取几幅不同辐照度下的 TDICCD 图像(raw 格式),选取其中两幅将其导入到 MATLAB 环境中,利用 MATLAB 软件强大的数据和图像处理功能,读取图像数据并按照(6)、(7)式计算校正因子,然后对任意其他图像按照(5)式进行校正。从校正因子直方图(图 2)可以看到系数的取值范围,为实现硬件定点乘法提供了参考。



(a) 系数  $a_i$  直方图

(a) Histogram of factor  $a_i$



(b) 系数  $b_i$  直方图

(b) Histogram of factor  $b_i$

图 2 校正因子直方图

Fig. 2 Histograms of correction factors

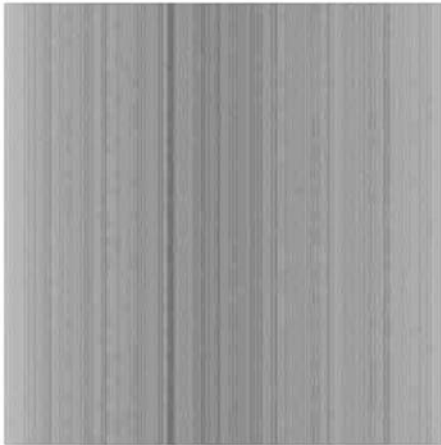
对校正算法的仿真步骤如下:

(a) 导入两个均匀辐照度下的 raw 格式图

像;

- (b) 读取 raw 图像原始数据并写入矩阵;
- (c) 计算每一列的平均值和整幅图像的平均值;
- (d) 依照(6)、(7)式计算校正因子;
- (e) 依照(5)式对某一幅均匀辐照度下的成像进行校正;
- (f) 对比显示校正后的图像。

校正前后的图像效果如图 3 所示,为便于比较差异,进行图像增强处理,亮度增强 50%,对比度增强 80%。



(a) 原始图像  
(a) Original image



(b) 仿真校正后图像  
(b) Corrected image

图 3 MATLAB 仿真校正效果(亮度增强 50%,对比度增强 80%)

Fig. 3 Effect of correction in MATLAB (brightness 50% up, contrast 80% up)

## 5 FPGA 硬件实现

### 5.1 定点数乘法定义与误差分析

如前所述,两点校正算法涉及乘法运算,鉴于校正因子已由 MATLAB 给出浮点数,后续乘法计算量已大大减少,因此在保证运算精度的前提下,采用定点乘法器即可。

对于 TDICCD,校正因子  $b$  相当于平衡了图像本底噪声,一般为正值;而校正因子  $a$  相当于对每一个像元进行了增益校正,根据定标结果计算得知,每个像元的增益校正因子范围是  $0 < a_i < 2$ ,偏置校正因子的范围是  $|b_i| < 100$ ,因此我们定义定点数据位如下:

由于系数  $b_i$  的精度对结果影响不大,对其十进制数直接取为 10 位二进制数  $b_i$ ,引入误差为 0.5,考虑到  $b_i$  是有符号数,取其相对值作为定点偏移校正系数  $b'_i$ ,表示为  $b'_i = b_i + b_{\min}$ ,这样  $b'_i$  就为无符号整数,其中  $b_{\min}$  为负常数,是偏置校正因子中的最小值,在寄存器中按补码存储。

硬件实现公式为:  $Y_i = a_i X_i + b_i + b_{\min}$ ,分别考查第一项  $a_i X_i$  与后两项  $b_i + b_{\min}$ ,这里认为两部分误差相互独立。已知  $b_i + b_{\min}$  的误差上限为 0.5,要使最终得出的结果  $Y_i$  误差上限为 1,由误差理论可得出  $a_i X_i$  的误差上限为  $\sqrt{1 - 0.5^2} \approx 0.87$ 。下面开始分析  $a_i X_i$  的误差范围:已知原始图像数据  $X_i$  为 10 位二进制数,校正因子  $a_i$  的误差最大可被放大  $2^{10}$  倍,则  $a_i$  的误差最大为  $1/2^{11}$  方可满足乘积项误差小于 0.87。因此定义校正因子  $a_i$  为 10 位二进制小数,再加上 1 位整数共 11 位,小数点如图 4 所示,引入误差为 0.5。校正因子首先由 MATLAB 计算出十进制结果,取 4 位小数,设为  $A'$ ,然后计算  $a_i = A' \times 2^{048}$ ,取整后转为二进制数。最终计算实际引入误差上限约为 0.7。

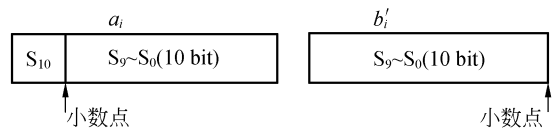


图 4 校正因子定点定义

Fig. 4 Definition of fixed-point of correction factors

### 5.2 FPGA 设计思路

CCD 正常工作需要很多的时序驱动信号,在 CCD 成像系统中,我们希望用一个处理器来完成包括时序驱动在内的尽可能多的功能,FPGA 芯片以其 IO 管脚丰富、引脚定义灵活等优点成为 CCD 成像处理器的首选。这里,我们把 CCD 非均匀性实时校正的功能也交由 FPGA 完成。FPGA 内嵌的 IP 核 RAM 可实现校正因子的存储,避免了 PCB 信号完整性问题引起的外部 RAM 读写不稳定性问题。

由(5)式可知,校正因子有两组,因此所需 FPGA 内部 RAM 的大小  $c=2wpn$ ,其中, $w$  为存储字节宽度, $p$  为 TDICCD 有效像元数, $n$  为该 FPGA 控制的 CCD 通道个数。例如,一片 FPGA 控制 2 个通道的 TDICCD(有效像元数为 4 096),量化位数为 10 bit,存储字节宽度按 12 bit 计算,则 FPGA 内嵌 RAM 容量至少需要 192 kbit。综合以上对内嵌 RAM 容量和乘法器数量的要求,最终选用 Xilinx 公司 Virtex-II 系列 XC2V1000 芯片,该芯片具有高效的时钟管理模块 DCM,为复杂的时序设计提供了可靠保障<sup>[10]</sup>。

### 5.3 校正因子存储与注入

每个 TDICCD 都有与之——对应的校正因子,校正系数矩阵 **A** 和 **B** 均为一维行矩阵,列数

等于像元数 4 096,存储在 FPGA 中的 BlockRAM 中。校正系数在地面定标验证无误后就能计算出来,在编写 FPGA 程序时将校正系数以 RAM 初始化文件的形式存入 RAM 中,当校正使能有效时,便可直接读出 RAM 中的校正因子。

地面定标后,应尽量保证 CCD 成像系统的工作与定标时相同,避免点扩散函数出现大的波动。但由于空间环境复杂,受空间辐射、单粒子效应等影响,星上 CCD 器件的像元响应特性以及电路元件性能都可能发生变化,为了在更长时间内保证卫星遥感图像的质量,几乎所有遥感相机都设置了星上定标,主要是通过星上 LED<sup>[11]</sup>或星上积分球<sup>[12]</sup>获取均匀光源。由于器件性能退化而重新定标得出的校正因子,我们称之为退化校正因子。当地面接收到星上定标图像后,计算退化校正因子,然后通过一系列指令给星上 FPGA 注入新校正因子,并存储在 BlockRAM 中,如图 5 所示。利用 FPGA 的 IP 核生成工具,配置 BlockRAM 为双口 RAM,地面校正因子作为 RAM 写端口的初始化数据,当 FPGA 加电启动后,在不需星上定标时,BlockRAM 中的初始化数据可从读端口读出进行实时校正;若需要星上定标,则重注的退化因子会覆盖原有的校正因子,总之,在实时校正时不影响校正因子的正确读出。

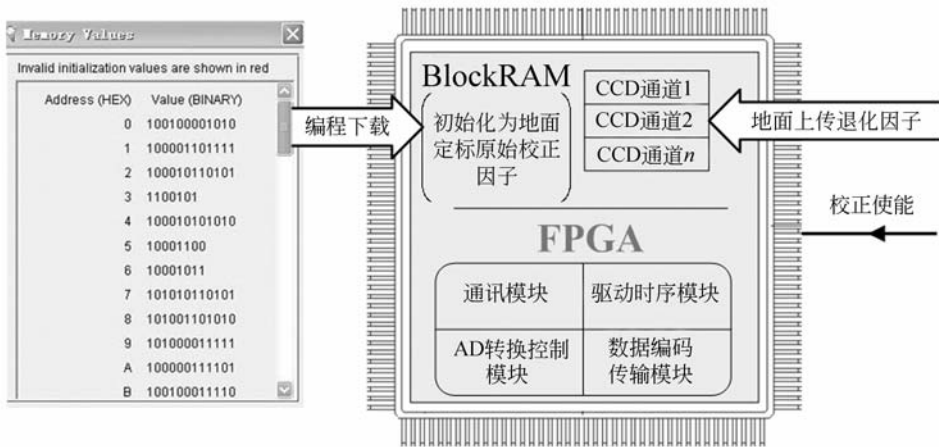


图 5 校正因子存储原理框图

Fig. 5 Block diagram of factor access

星上定标时下传的图像数据是原始数据,不能进行校正,因此有必要设置校正使能命令。另外,CCD 成像过程中可能出现饱和现象,此时的图像数据为 A/D 芯片在一定增益下的饱和值,按

照(1)式的定义,  $NUEDN=0$ ,也不能进行校正。根据工程经验,设定校正阈值当  $NUEDN < 2$  时,不进行校正,并将该判断条件与校正使能指令“或门”输出,作为硬件实时校正的条件。

综上所述,FPGA 实时校正图像功能要完成以下任务:

- (a) 计算前 32 行定标图像的 NUEDN;
- (b) 存储校正因子;
- (c) 更新退化校正因子;
- (d) 接收校正使能指令;
- (e) 实时校正图像。

设计完成后的 RTL 原理图如图 6 所示,其中溢出修正模块主要对运算后超出 1 023 或小于 0

的结果进行处理。为提高处理速度,对乘法运算采用流水线设计,为保证数据的建立保持时间,用交错的时钟沿构成流水操作进程,最终在校正使能有效情况下输出卫星图像。需要注意的是,TDICCD 图像输出以行使能信号 LEN 为有效标志<sup>[13]</sup>,校正时的行使能要比不校正时的行使能延时若干个像素周期,但不影响校正的实时性,时序延时仿真结果如图 7 所示,由图可知,校正数据仅比原始数据延后两个时钟周期。

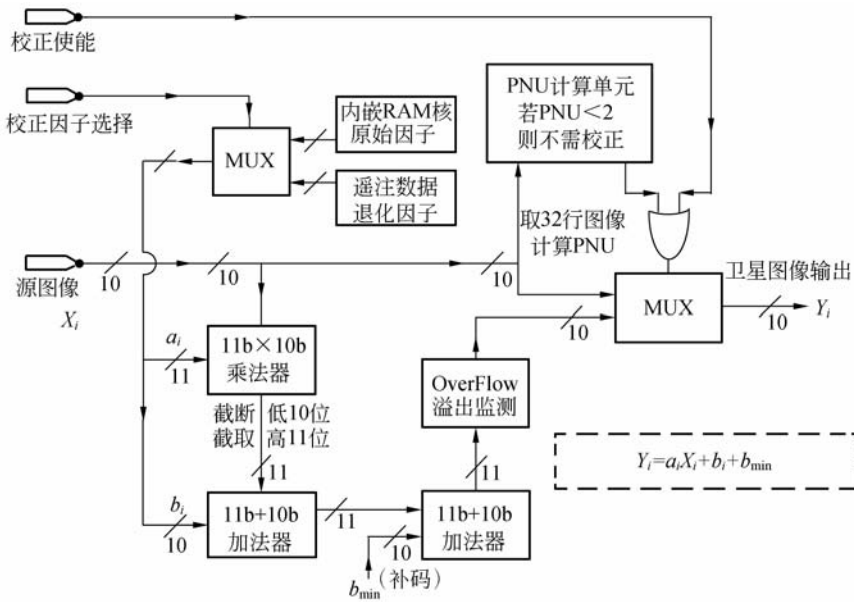


图 6 FPGA 设计 RTL 原理框图

Fig. 6 RTL schematic of FPGA design

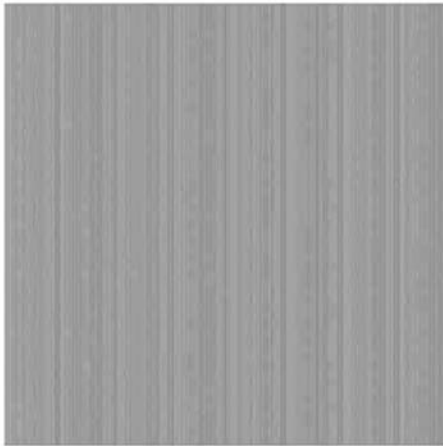
/uhc/fig_en	1										
/uhc/imagedata_01	608	316	318	320	322	324	326	328	330	332	334
/uhc/imagedata_pdt	1235634	0				660100	674892	670256	664200	673200	694876
/uhc/addrb_s1	256	0			1	2	3	4	5	6	
/uhc/addrb_s2	256	0			1	2	3	4	5	6	
/uhc/dout_a	2039	2043			2050	2083	2056	2025	2040	2093	2033
/uhc/dout_b	16	16			15	14			12	17	12
/uhc/clk	0										
/uhc/bmin	2032	2032									
/uhc/imagedata_cut	603	0				322	329	327	324	328	339
/uhc/dout_bs	16	16			15	14			12	17	
/uhc/hc_imagedata	598	0				321	327	325	322	324	340
/uhc/hc_len01	1										
/uhc/hc_image01	598	0				321	327	325	322	324	
/ulvds1/u2_pipenum/fig_en	1										

图 7 行使能延时仿真图

Fig. 7 Simulation of enable signal delay

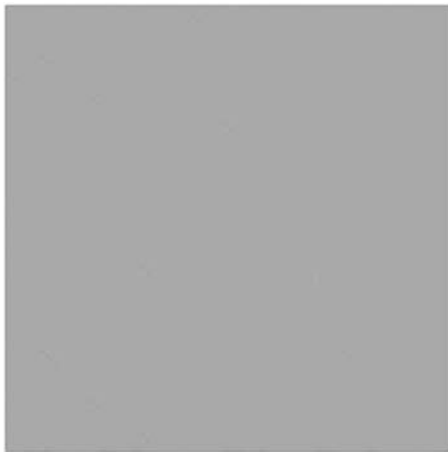
## 6 校正试验与分析

试验分为均匀辐照条件下校正和推扫成像校正两部分。首先用积分球均匀光照射 CCD, 结合(1)式定义, 检测校正前后的 NUEDN(对比如图 8 所示), 经 MATLAB 读图计算得出, 校正前的图像( $NUEDN=5.91$ )可以明显看到非均匀性条纹, 校正后的图像( $NUEDN=0.29$ )非常均匀光滑。



(a) 原始图像

(a) Original image



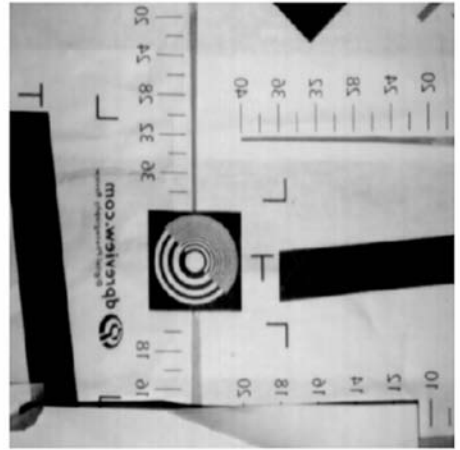
(b) 校正后均匀图像

(b) Corrected image

图 8 均匀辐照校正对比(亮度增强 50%, 对比度增强 80%)

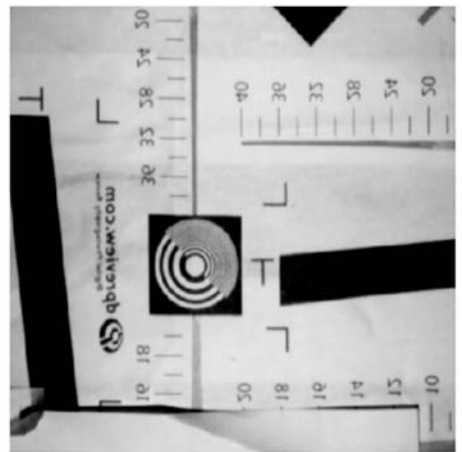
Fig. 8 Real-time correction with FPGA in uniform exposure (brightness 50% up, contrast 80% up)

均匀光辐照校正试验表明, 校正因子计算和实时校正模块工作正常无误, 可以进行实物成像试验。结合 TDICCD 成像原理, 要进行推扫成像试验, 需要设置合适的动态目标。我们选用标准分辨率图<sup>[14]</sup>贴在由电机控制转速的滚筒上, 调节转速与 TDICCD 行频相匹配, 经成像系统输出数字图像后由 FPGA 进行实时校正, 校正前后对比如图 9 所示。



(a) 校正前推扫成像图

(a) Original image



(b) 校正后推扫成像图

(b) Corrected image

图 9 推扫成像硬件实时校正图像效果对比

Fig. 9 Real-time correction with FPGA by push-scanning

## 7 结论

本文研究了 TDICCD 成像产生非均匀性的原因, 选用典型的两点校正算法, 探讨了星上图像

实时校正的可行性方案,鉴于工程一体化设计的要求,最终在常用的 CCD 时序处理器——FPGA 上实现了硬件实时校正。实验室滚筒推扫成像的试验结果表明,FPGA 硬件实时校正能够将

NUEDN 控制在 2 以下,能够满足工程需要。在条件允许的情况下,星上定标校正因子的计算也可由 FPGA 完成,省去地面遥注参数的麻烦,从而提高退化因子的数据可靠性。

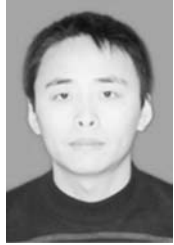
## 参考文献:

- [1] 刘亚侠. TDICCD 遥感相机标定技术的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- LIU Y X. *Research on the calibration technique of the TDICCD remote sensing camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [2] 王强,倪国强,郭馨,等. 非均匀校正技术算法分析与实时系统设计[J]. 光电工程, 2007, 34(9): 97-102.
- WANG Q, NI G Q, GUO P, *et al.*. Algorithmic analysis and real-time system design of nonuniformity correction techniques [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(9): 97-102. (in Chinese)
- [3] 李旭,杨虎. 基于两点的红外图像非均匀性校正算法应用[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 608-610.
- LI X, YANG H. Application of a nonuniformity correction algorithm for IRFPAs based on two points [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 608-610. (in Chinese)
- [4] 王加朋,王淑荣,李福田,等. 空基紫外成像仪关键器件 ICCD 非均匀性校正技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1353-1360.
- WANG J P, WANG SH R, LI F T, *et al.*. Non-uniformity correction of key device ICCD in ultraviolet imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1353-1360. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 刘亚侠. TDICCD 相机实验室辐射定标的研究[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 71-74.
- LIU Y X. Research on the laboratory radiometric calibration of the TDI CCD camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(5): 71-74. (in Chinese)
- [7] 刘永进,朱红,赵亦工. 基于红外焦平面阵列读出结构的非均匀校正算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 128-133.
- LIU Y J, ZHU H, ZHAO Y G. Nonuniformity correction algorithm based on infrared focal plane array readout architecture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 128-133. (in Chinese)
- [8] 李玉珏. 基于两点法的实用 FPA 非均匀性校正系统[J]. 激光与红外, 2007, 37(8): 753-755.
- LI Y J. An utility FPA nonuniformity correct system based on two-point method [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(8): 753-755. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] XILINX. Virtex-II platform FPGAs' complete datasheet [R]. 2005.
- [11] 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)
- [12] MENDENHALL J A, LENCIONI D E, HEAM D R, *et al.*. EO-1 Advanced Land Imager In-Flight Calibration [J]. *SPIE*, 1998, 3439: 416-422.
- [13] 王文华,何斌,任建岳. 线阵 CCD 成像系统自校图形设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 2011-2016.
- WANG W H, HE B, REN J Y. Design of self-

check figures in linear CCD imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(8):2011-2016. (in Chinese)

[14] Digital Still-Camera Resolution Chart (ISO-12233) QA-72-P-RM [S/OL]. <http://www.aig-imaging.com/Resolution-ISO-Optical-Test-Chart>.

#### 作者简介:



**王文华**(1982—),男,山东泰安人,博士研究生,2005年于东北师范大学获得工学学士学位,主要研究方向为光电成像与图像处理。E-mail: wangwh900@yahoo.com.cn



**何 斌**(1961—),男,吉林长春人,研究员,1990年于北京理工大学获得工学硕士学位,2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为空间遥感图像处理技术。E-mail: hbeimail@163.com



**韩双丽**(1968—),女,吉林长春人,副研究员,1990年于大连理工大学获得工学学士学位,主要从事空间光学遥感器热控制技术的研究。E-mail: shuanglihan@yahoo.com.cn



**李国宁**(1979—),男,辽宁盘锦人,工学博士,助理研究员,2002年、2005年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事图像采集、图像处理等方面的研究。E-mail: lgning@netease.com



**吕增明**(1978—),男,吉林长春人,助理研究员,2001年于吉林大学获得工学学士学位,主要从事空间相机的研制工作。E-mail: lzm232@163.com



**任建岳**(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,863专家组成员,主要从事空间相机光机电一体化研究。E-mail: renjy@ciomp.ac.cn

#### ●下期预告

## 注射成型微流控芯片微沟槽成型质量的无损检测

祝铁丽,周 亮,刘永云

(大连理工大学 模具研究所,辽宁 大连 116023)

注射成型的微流控芯片具有微沟槽深度成型质量好、微沟槽宽度成型质量较差而且各处成型质量不均衡的特点,因此需要对各处的微沟槽宽度进行全面检测。本文利用 Matlab 软件的图像处理工具箱开发了微流控芯片微沟槽显微平面图片的图像处理系统,引入人工干涉来进行高效的图像去噪处理,根据提取的微结构轮廓点进行了微沟槽轮廓的曲线拟合,并测量了微沟槽的开口宽度和底部宽度。将由微流控芯片微沟槽显微平面图片所得到的测量结果与对微流控芯片进行切片检测所得到的测量结果进行比较,二者得到的微沟槽开口宽度的测量数据相差约 4%,微沟槽底部宽度的测量数据相差约 3%,说明微沟槽显微平面图片的测量结果能够满足注射成型工艺研究中微流控芯片微结构成型质量检测的要求,实现了利用显微平面图片对注射成型微流控芯片的微沟槽成型质量进行快速、全面的无损检测。