

文章编号 1004-924X(2009)04-0854-05

利用单片可编程系统对红外焦平面阵列进行实时非均匀性校正

代少升,张新立

(重庆邮电大学通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘要:针对红外焦平面阵列(IRFPA)非均匀性多点校正过程中涉及的数据量大,难于实现实时校正的特点,提出了利用 Altera 公司的单片可编程系统(SOPC)对红外焦平面阵列进行多点实时校正的方法。利用 SOPC 的 NiosII 处理器定制指令功能,实现了软件算法的硬件化,有效提高了红外焦平面阵列实时非均匀性校正速度。实验结果表明:对相同的多点校正算法,利用 SOPC 硬件实现算法的校正速度比 TMS320C6201 DSP 硬件快 1.5 倍,且校正过程简单灵活,图像效果理想,能够很好地满足红外焦平面阵列实时非均匀性校正要求。

关键词:红外焦平面阵列;单片可编程系统;非均匀性;多点实时校正

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

Real-time nonuniformity correction of infrared focal plane arrays by system on programmable chip

DAI Shao-sheng, ZHANG Xin-li

(College of Communication and Information Engineering,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)

Abstract: A multi-point real-time nonuniformity correction method based on a System on Programmable Chip (SOPC) from Altera Company is proposed, for a large amounts of image data need to be processed in the nonuniformity correction of infrared focal plane arrays (IRFPA) and the data are difficult to correct in real-time. By creating custom instructions for the Nios II embedded processor, the software algorithms are implemented by a hardware to improve the nonuniformity correction speed of the IRFPA in real time. The experimental results show that the correction speed of utilizing the SOPC hardware has increased by 150% as compared with that of utilizing the TMS320C6201 DSP hardware for the same multi-point correction. The SOPC correction implementation is characterized by its simple and flexible method and clear images, it can satisfy the requirement of real-time nonuniformity correction of IRFPA.

Key words: Infrared Focal Plane Arrays(IRFPA); System on Programmable Chip(SOPC); nonuniformity; multi-point real-time correction

收稿日期: 2008-10-09; **修订日期:** 2008-11-06.

基金项目: 国家自然科学基金-中物院 NSAF 联合基金资助项目(No. 10776040); 国家自然科学基金资助项目(No. 60602057); 重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTC, No. 2006BB2373); 重庆市教委自然科学基金资助项目(No. KJ060509, No. KJ080517); 重庆邮电大学自然科学基金资助项目(No. A2006-04, No. A2006-86)

1 引言

红外焦平面阵列成像系统已成为红外热成像系统的发展趋势,但红外焦平面阵列由于受半导体材料不均匀(杂质浓度、晶体缺陷、内部结构的不均匀性等)、掩模误差、工艺条件等影响,存在响应不均匀性,从而导致红外热成像系统的温度分辨率等性能显著下降,以至难以满足红外系统的使用要求,因而工程中使用的红外焦平面阵列几乎毫无例外地都采用非均匀性校正技术^[1-2]。

焦平面阵列的非均匀性存在于整个焦平面上^[3-5]。愈是大面阵器件,非均匀性问题就愈突出。而大面阵红外焦平面阵列的非均匀性校正过程中所涉及的数据量大,实时校正过程中计算量大,这就要求图像处理系统必须具有高效的处理功能。单片可编程系统(System On Programmable Chip, SOPC)器件选用 Altera 公司 Cyclone II 系列中的 EP2C35F484C8 芯片,该芯片能够提供多达 150 个 18×18 比特乘法器,提供高级外部存储器接口支持,读写数据速率高达 668 Mb/s^[6-7],因此可以很好地应用在实时红外图像处理系统中。本文将以前校正精度较高,算法实现过程相对简单的多点校正为例,来阐述基于 SOPC 的红外焦平面阵列实时非均匀性校正过程。

2 多点校正方法的实现原理

红外焦平面阵列探测单元的实际响应过程为非线性响应,为了实现红外焦平面阵列实时非均匀性校正,通常采用两点或多点校正方法。两点校正方法对于非均匀性较大或离标定点较远的部分,校正后残留的非均匀性大,校正的效果差;同时该方法校正后的动态范围小,当辐照度变化较大时,会引入较大的校正误差。因此,两点校正方法适用于像元响应线性好或非均匀性小,工作范围较窄的器件。对于要求较高的场合,常常采用多点校正方法来降低探测单元非线性响应带来的校正误差,并且标定点愈多,校正精度愈高。图 1 给出多点校正的响应曲线。图中 r 为红外探测单元的响应输出, ϕ 为辐射通量。

多点校正法可以通过分段线性校正来实现。在每个标定区间内,方法如同两点校正方法,将各

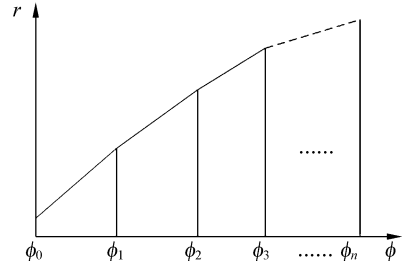


图 1 多点校正的响应曲线

Fig. 1 Response curve of multi-point correction

个探测单元的非线性响应当作线性响应来处理,通过平移和旋转使其一致,从而把多个探测单元的非线性响应校正为一致。

多点校正的通用公式推导过程如下:在光路中插入均匀辐射的黑体,根据红外焦平面阵列探测单元的线性响应模型可得到每个像元在 n 个不同温度 $T_1, T_2 \dots T_n$ 的黑体辐射下的响应输出数学表达式:

$$\begin{aligned} X_{ij}(\phi_1) &= r_{ij}\phi_1 + O_{ij}, \\ X_{ij}(\phi_2) &= r_{ij}\phi_2 + O_{ij} \\ &\vdots \\ X_{ij}(\phi_n) &= r_{ij}\phi_n + O_{ij} \end{aligned}$$

取极值后得:

$$\begin{aligned} X_{ij}(\phi_1) &= \max_{i=1, j=1}^{M, N} [X_{i, j}(\phi_1)] \\ X_{ij}(\phi_2) &= \max_{i=1, j=1}^{M, N} [X_{i, j}(\phi_2)] \\ &\vdots \\ X_{ij}(\phi_n) &= \max_{i=1, j=1}^{M, N} [X_{i, j}(\phi_n)] \end{aligned}$$

根据两点校正公式的推导过程可得多点校正的 $n-1$ 段线性区间内的校正公式为:

$$\begin{aligned} X_n(\phi) &= \frac{X_n(\phi_{l+1}) - X_n(\phi_l)}{X_{ij}(\phi_{l+1}) - X_{ij}(\phi_l)} X_{ij}(\phi) + \\ &\frac{X_{ij}(\phi_{l+1})X_n(\phi_l) - X_{ij}(\phi_l)X_n(\phi_{l+1})}{X_{ij}(\phi_{l+1}) - X_{ij}(\phi_l)}, \quad (1) \end{aligned}$$

式中 $\phi \in [\phi_l, \phi_{l+1}]$, $l \in [1, n-1]$

令

$$\begin{aligned} K_{ij}(\phi_l) &= \frac{X_n(\phi_{l+1}) - X_n(\phi_l)}{X_{ij}(\phi_{l+1}) - X_{ij}(\phi_l)} \\ B_{ij}(\phi_l) &= \frac{X_{ij}(\phi_{l+1})X_n(\phi_l) - X_{ij}(\phi_l)X_n(\phi_{l+1})}{X_{ij}(\phi_{l+1}) - X_{ij}(\phi_l)}, \quad (2) \end{aligned}$$

则

$$Y_{ij}(\phi) = K_{ij}(\phi_l) X_{ij}(\phi) + B_{ij}(\phi_l). \quad (3)$$

式(3)为多点校正的通用公式,其中 $K_{ij}(\phi_l)$ 、 $B_{ij}(\phi_l)$ 分别为多点校正中第 l 个区间内的校正增益和校正偏移量, $X_{ij}(\phi)$ 为校正输入值(像元响应值), $Y_{ij}(\phi)$ 为校正输出值。

3 校正方法的硬件实现

32 位 NIOS II 系列软核处理器是 Altera 公司开发的第二代 SOPC 嵌入式处理器,它具有软硬件可灵活定制,多路并行处理能力。通过其 SOPC Builder 集成软件开发环境,可以与处理器、存储器、I/O 接口等系统需要的模块集成到一起,完成整个校正系统的逻辑运算功能,具有设计灵活、可裁减、可扩充、可升级等优点,并且软硬件系统可编程,是一种灵活高效的 SOC 校正系统解决方案。

3.1 校正系统的构成

红外焦平面阵列多点校正系统的主要由红外焦平面阵列、多制式 SDTV 视频解码器 ADV7181B、SOPC 芯片 EP2C35F484C、外围扩展存储器及输入输出设备等构成,系统组成框图如图 2 所示。

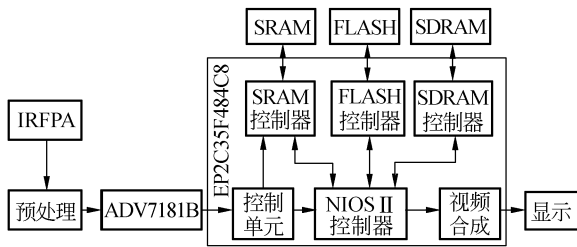


图 2 多点校正系统框图

Fig. 2 Diagram of multi-point correction

在红外焦平面阵列多点校正系统中,使用的红外焦平面阵列面阵大小为 128×128 ,帧频为 50 frame/s。如果多点校正选用 4 点,则校正过程中需要 4 组标定数据和 3 段标定区间的 3 组校正增益和校正偏移量,数据量大小为 $16 \text{ k} \times 8 \text{ bit} \times 4 + 16 \text{ k} \times 8 \text{ bit} \times 6$,故使用一片外部 256 $\text{k} \times 16 \text{ bit}$ 的 SRAM 来存储这些数据。16 MByte 的非易失性存储器 FLASH 用来存储校正程序。32 MByte 的 SDRAM 作为 NIOS II 的内存用来运行程序和进行红外图像的非均匀性实时校正处理的数据缓

存单元。控制单元用来控制在标定过程中把标定数据存储在 SRAM 中以及在校正过程中把数据直接传输到内存中进行校正处理。校正完毕的图像数据通过视频合成模块处理后,送到显示设备进行显示。

3.2 多点校正的实现过程

多点校正的具体实现过程可以分为两个阶段完成:

标定过程:

第一步记录数据。用稳定的均匀光源辐射非均匀的红外焦平面阵列,生成相同辐射源下每一个探测单元响应输出的不均匀性数据,辐射强度由弱到强,逐一记录,直到探测单元达到饱和为止。

第二步保存 4 组标定数据。系统按 4 个灰度等级进行标定,并把 4 组标定数据存储在 SRAM 中。

第三步确定归一化值。对保存的 4 组标定数据进行分析,确定灰度值最大的像元为标准像元,确定所有探测单元在不同温度下的响应归一化值。对于四点校正来说,有 3 段线性区间,对于每一线性区间都将有一组不同的归一化值 $X_n(\phi_{l+1})$ 和 $X_n(\phi_l)$ 。每段线性区间如图 1 所示。

第四步计算每段线性区间的校正增益 $K_{ij}(\phi_l)$ 和校正偏移量 $B_{ij}(\phi_l)$,得到 6 组数据并保存在 SRAM 中。将第三步得到的 3 组归一化值,代入公式(2)计算出 3 组校正增益 $K_{ij}(\phi_l)$ 和校正偏移量 $B_{ij}(\phi_l)$ 。

校正过程:

在校正过程中,NIOS II 将要校正探测单元的数据和 4 组标定数据进行比较,确定落入的线性区间,然后按式(3)合成输出校正数据,即可实现多点实时校正。具体实现分如下几步:

第一步,3 段线性区间内校正增益 K_{ij} 和校正偏移量 B_{ij} 的加载。将标定过程中保存的 3 组校正增益和校正偏移量加载到系统内存中,每组数据均按像元号数的递增依次存放,以便 NIOS II 处理器进行处理。

第二步,启动非均匀性校正算法。当 NIOS II 处理器收到 ADV7181B 采集的视频数据后,将启动多点校正子程序。

第三步,校正数据的生成。多点校正程序启动后,NIOS II 处理器将按照采集数据的先后次序,依据多点校正算法依次对每个探测单元的输

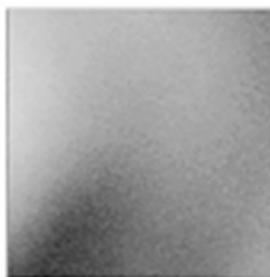
入值进行实时校正计算,并将校正后的图像数据送入到视频合成模块进行下一步处理,这样就实现了多点实时校正。

第四步,图像的显示。将视频合成模块处理后的数据送入显示设备进行显示,以验证实时校正算法的有效性。

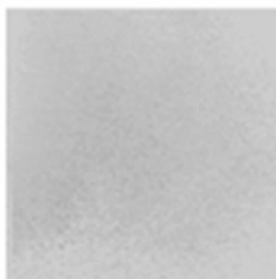
4 实验结果

针对帧频为 50 frame/s 的 128×128 的热释电红外焦平面阵列,利用 SOPC 硬件和 TMS320C6201 DSP 硬件进行多点实时校正实验,实验结果如图 3 所示。图 3 为实验过程中保存的同一幅校正前后的图像。图 3 (a)为校正前的原始图像,图 3 (b)为 TMS320C6201 DSP 硬件校正后的图像,图 3 (c)为 SOPC 硬件校正后的图像。

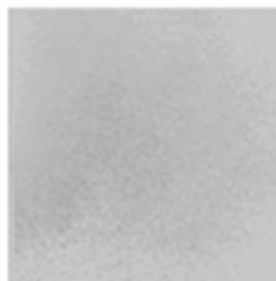
对相同的多点校正方法(四点校正)和校正计算量,利用 SOPC 硬件和 TMS320C6201 DSP 硬件进行实时校正速度比较,计算得出 1 min 内 SOPC 硬件实时校正图像 2702 帧,每秒为 45.03 frame 左右,1 min 内 TMS320C6201 DSP 硬件实时校正图像 1791 帧,每秒为 29.85 frame 左右。



(a)原始图像
(a)Original image



(b)TMS320C6201 DSP 校正后的图像
(b)Corrected image by TMS320C6201 DSP



(c)SOPC 校正后的图像
(c)Corrected image by SOPC

图 3 多点实时校正前后的图像

Fig. 3 Multi-point real-time uncorrected and corrected images

采用非均匀性的第三种定义公式^[8],计算红外焦平面阵列校正前后的残余非均匀性。计算公式如下:

$$NU = \frac{1}{V_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{ij} - V_{\text{avg}})^2}$$

$$\text{其中: } V_{\text{avg}} = \frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ij}$$

上式 NU 为焦平面阵列的非均匀性, V_{ij} 为焦平面上第 i 行第 j 列所对应像元的输出信号, V_{avg} 为焦平面上所有有效像元的视频信号平均值, M 和 N 分别为焦平面阵列的行数和列数, d 为焦平面阵列中的死像元数, h 为焦平面阵列中的过热像元数。对一幅等灰度图像数据,利用多点校正公式进行校正前后图像的残余非均匀性的计算。校正前图像的残余非均匀性为 23.2%, TMS320C6201 DSP 硬件校正后图像的残余非均匀性为 1.01%, SOPC 硬件校正后图像的残余非均匀性为 1.0%。

5 结论

采用 SOPC 技术进行红外焦平面阵列实时非均匀性校正能够将硬件和软件紧密结合在一起,充分发挥 SOPC 硬件高速处理能力和 Nios II 处理器计算灵活的特点,在保证系统校正的实时性和高速运算能力的前提下,使系统处理器、定制单元、逻辑控制电路、外围 I/O 接口及红外图像数据的传输、非均匀性校正处理算法都集成在一块芯片上完成,从而使校正系统具有设计体积小、

功耗低、稳定性能高的特点。同时该系统在设计过程中,具有软硬件协同设计和验证能力,大大缩短了红外焦平面阵列非均匀性校正的实现过程。通过与利用 TMS320C6201 DSP 硬件校正相比,

SOPC 硬件的实时校正速度提高了 1.5 倍左右。基于 SOPC 红外焦平面阵列实时非均匀性校正的实现研制小型化、高性能、高清晰度红外成像系统具有重要意义。

参考文献:

- [1] 代少升,张天骐. 基于非线性响应的红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法[J]. 光学精密工程, 2008,16(4):714-719.
DAI SH SH, ZHANG T Q. Adaptive nonuniformity correction algorithm for IRFPA with nonlinear response[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 714-719. (in Chinese)
- [2] 张科,赵桂芳,等. 神经网络非均匀性校正算法中初始权值选取方法[J]. 激光与红外,2007,37(3):248-251.
ZHANG K, ZHAO G F, *et al.* Selection method of initial value of neural network for nonuniformity correction[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(3): 248-251. (in Chinese)
- [3] 朱明,鲁剑锋,胡硕. 采用 DSP 的电视测量跟踪器的研制[J]. 光学精密工程,2005,13(增):232-235.
ZHU M, LU J F, HU SH. Development of TV measuring and tracking system by using DSP[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(Supp):232-235. (in Chinese)
- [4] 李庆,刘上乾,等. 一种基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. 光子学报,2006,35(5):720-723.

- Li Q, LIU SH Q, *et al.*. A Scene-based Nonuniformity Correction Algorithm of IRFPA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006,35(5):720-723. (in Chinese)
- [5] 陈浩,谭久彬. 一种用于光电目标跟踪的非线性滤波算法[J]. 光学精密工程,2006,14(5):917-921.
CHEN H, TAN J B. Nonlinear filtering algorithm for improving opto-electric target tracking[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 35(5):720-723. (in Chinese)
- [6] 李兰英. NiosII 嵌入式软核 SOPC 设计原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
LI L Y. *Design Principle and Application of SOPC Based on NiosII Embedded Processor*[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006. (in Chinese)
- [7] Altera Corp. *Cyclone II Device Handbook*[M]. Altera, 2005.
- [8] 国家技术监督局. 红外焦平面阵列特性参量测试技术规范. GB/T17444-1998[M]. 北京:中国标准出版社,1998.
Country Engineering Supervision Bureau. *The technique norms for measurement and test of characteristic of China*. GB/T17444-1998 [M]. Beijing: Standards Press of China,1998. (in Chinese)

作者简介:



代少升(1974—),男,河南潢川人,副教授,工学博士,主要从事红外图像处理及系统,红外目标检测与估计等方面的研究。E-mail:daiss@cqupt.edu.cn



张新立(1983—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事图像处理及 SOPC 技术方面的研究, E-mail: zhangxinli0918@163.com