

函数拟合红外焦平面阵列非均匀性校正 FPGA 实现研究*

殷世民^{1,2}, 相里斌¹, 周锦松¹, 黄旻¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国人民解放军空军试验训练基地一区, 甘肃 酒泉 735018)

摘 要:结合红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)非均匀性校正的工程实际, 设计了基于函数拟合的校正算法, 采用大容量高速现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)器件, 实现了该非均匀性校正系统, 它能有效适应红外焦平面阵列器件响应特性的大动态范围和非线性, 具有体积小、运算速度快和校正准确度高等优点。

关键词:红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 函数拟合; 现场可编程门阵列

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)04-0768-4

0 引言

红外焦平面阵列(IRFPA)器件是当今技术性能最先进的红外探测器, 用它构成的红外成像系统具有结构简单、工作稳定可靠、灵敏度高、噪音等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)性能好等优点, 是当今国内外重点发展的新一代红外探测器。由于受材料和工艺水平所限等原因, 器件各探测单元响应的非均匀性较大, 它导致红外成像系统的温度分辨率、灵敏度等性能显著下降, 以至使其难以满足红外成像系统的实际使用要求, 因而在工程使用中焦平面器件基本上都要采用相应的非均匀性校正技术^[1-3]。

目前, 考虑到算法的复杂性和便于硬件实施, 工程上对红外焦平面阵列非均匀性校正基本上都是采用两点校正算法, 硬件多采用以 DSP 处理器为主的实现方案^[4], 设计复杂, 体积较大, 且不利于移植。由于二点校正算法的局限性, 在红外成像跟踪、红外成像制导以及红外成像光谱仪等实际工程应用中, 由于 IRFPA 器件响应特性的大动态范围和明显的非线性, 导致两点校正的准确度显著下降。本文研究了一种基于函数拟合的红外焦平面阵列非均匀性校正 FPGA 实现系统, 它具有体积小、运算速度快和校正准确度高等优点, 为 IRFPA 器件在红外成像制导导弹、机载或星载红外成像光谱仪等空间体积有限且要求有较高的计算准确度和运算速度等工程场合的应用开辟了一个新的技术途径。

1 系统算法的实现

IRFPA 辐射源定标就是红外成像系统根据 IRFPA 器件响应的动态范围, 利用黑体在 K 个不同温度下的均匀辐射作为系统输入, 系统采集并存储各不同温度下的输出作为校正数据实时或事后校正系统的工作输出。设 IRFPA 为 M 行 N 列的阵列, 红外成像系统在 K 个不同均匀辐照度 $\varphi_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 下的输出为 $S_{ij}(\varphi_k)_{j=1 \sim N}^{i=1 \sim M}$, 对其求平均得

$$\bar{S}_k = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij}(\varphi_k) \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (1)$$

如图 1, IRFPA 非均匀校正就是对各探测单元的响应特性曲线做归一化, 使各探测单元的响应特性曲线趋于同一条曲线。图 1 中实线为 IRFPA 中第 (i, j) 个探测器单元的响应特性曲线, 虚线为 IRFPA 中所有探测器单元的平均响应特性曲线。将 IRFPA 所有探测器单元的平均响应特性曲线作为归一化曲线即可校正 IRFPA 探测器的非均匀性, 即将 $S_{ij}(\varphi_k)$ 映射为 \bar{S}_k , $k = 1, 2, \dots, K$, 即要寻找在任意辐照度 φ 下, 第 (i, j) 个探测单元的输出值

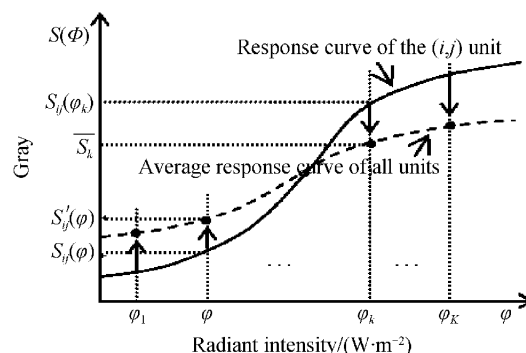


图 1 IRFPA 非均匀性校正原理
Fig. 1 Nonuniformity correction principle for IRFPA

*国家自然科学基金(60532070)和中科院光电研究院知识创新工程资助

Tel: 029-88887636 Email: yinshimin@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-08-31

$S_{ij}(\varphi)$ 与其校正值 $S'_{ij}(\varphi)$ 之间的函数映射关系 f

$$S'_{ij}(\varphi) = f(S_{ij}(\varphi)) \quad (2)$$

满足

$$\bar{S}_k = f(S_{ij}(\varphi_k)) \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (3)$$

求解满足式(2)与(3)的函数映射关系 f 属于数值分析中函数插值或函数拟合的问题。

数据 $(S_{ij}(\varphi_k), \bar{S}_k) (k = 1, 2, \dots, K)$ 的最小二乘拟合问题为在某一空间 $\text{span}\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n\}$ 上寻找一个函数

$$q(x) = p_{ij}^0 \varphi_0(x) + \dots + p_{ij}^n \varphi_n(x) \quad (4)$$

使平方和

$$\varphi(p_{ij}^0, p_{ij}^1, \dots, p_{ij}^n) = \sum_{k=1}^K |q(S_{ij}(\varphi_k)) - \bar{S}_k|^2 \quad (5)$$

达到最小,其中 $n+1 \leq K$. 根据最小二乘拟合原理^[5],其解为

$$\begin{bmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & (\varphi_0, \varphi_1) & \dots & (\varphi_0, \varphi_n) \\ (\varphi_1, \varphi_0) & (\varphi_1, \varphi_1) & \dots & (\varphi_1, \varphi_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\varphi_n, \varphi_0) & (\varphi_n, \varphi_1) & \dots & (\varphi_n, \varphi_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ij}^0 \\ p_{ij}^1 \\ \dots \\ p_{ij}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f, \varphi_0) \\ (f, \varphi_1) \\ \dots \\ (f, \varphi_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中

$$(\varphi_j, \varphi_l) = \sum_{k=1}^K \varphi_j(S_{ij}(\varphi_k)) \varphi_l(S_{ij}(\varphi_k)) \quad (7)$$

$$(f, \varphi_l) = \sum_{k=1}^K \bar{S}_k \varphi_l(S_{ij}(\varphi_k)) \quad (8)$$

对 IRFPA 非均匀性校正这一实际工程问题,考虑到校正准确度和运算速度的要求,定标点 K 一般取 2 至 4 点为宜. 式(6)中系数求解矩阵比较小(最大为 4×4 矩阵),它通常是非病态矩阵,因此,采用最小二乘拟合的方法解决 IRFPA 非均匀性校正的问题是适宜的。

一般地,取基 $\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n\} = \{1, x, \dots, x^n\}$, 则上述算法为多项式最小二乘拟合 IRFPA 非均匀性校正. 特别地,当选定两个辐照度 φ_1, φ_2 作为校正定标点,基取为 $\{\varphi_0, \varphi_1\} = \{1, x\}$, 则上述多项式最小二乘拟合校正就简化为工程上常用的 IRFPA 非均匀性两点校正算法

$$S'_{ij}(\varphi) = K_{ij} S_{ij}(\varphi) + Q_{ij} \quad (9)$$

$$(i = 1 \sim M, j = 1 \sim N)$$

式中

$$K_{ij} = \frac{\bar{S}_2 - \bar{S}_1}{S_{ij}(\varphi_2) - S_{ij}(\varphi_1)} \quad (10)$$

$$Q_{ij} = \frac{S_{ij}(\varphi_2) \bar{S}_1 - S_{ij}(\varphi_1) \bar{S}_2}{S_{ij}(\varphi_2) - S_{ij}(\varphi_1)} \quad (11)$$

两点校正算法在线计算量很小,只有一次加法和一次乘法运算,在 IRFPA 动态范围较小且各探测器单元响应特性曲线为线性或比较接近线性时是一种行之有效的方法. 在实际工程中,随着 IRFPA 动态范围的增大其响应曲线呈现出明显的非线性,两点校正准确度会显著下降. 为提高校正准确度,一般采取多点校正方式,实验表明,对多项式最小二乘拟合红外焦平面阵列非均匀性校正,采用三点二次多项式校正效果比较好,且其在线计算量很小,只有两次加法和两次乘法运算,比较便于硬件实现。

2 系统 FPGA 的实现

红外焦平面阵列三点二次多项式拟合校正算法的校正公式为

$$Y = P_2 X^2 + P_1 X + P_0 = (P_2 X + P_1) X + P_0 \quad (12)$$

式中, $X = \{x_{ij}\}$ 为输入非均匀性图像, $Y = \{y_{ij}\}$ 为校正后图像, $P_n = \{p_{ij}^n\}, n = 2, 1, 0$ 为根据式(1)~(8)得到的校正系数矩阵. 利用 Altera 公司大容量高速现场可编程门阵列器件^[6]来实现该函数拟合 IRFPA 非均匀性校正 FPGA 系统,其原理如图 2.

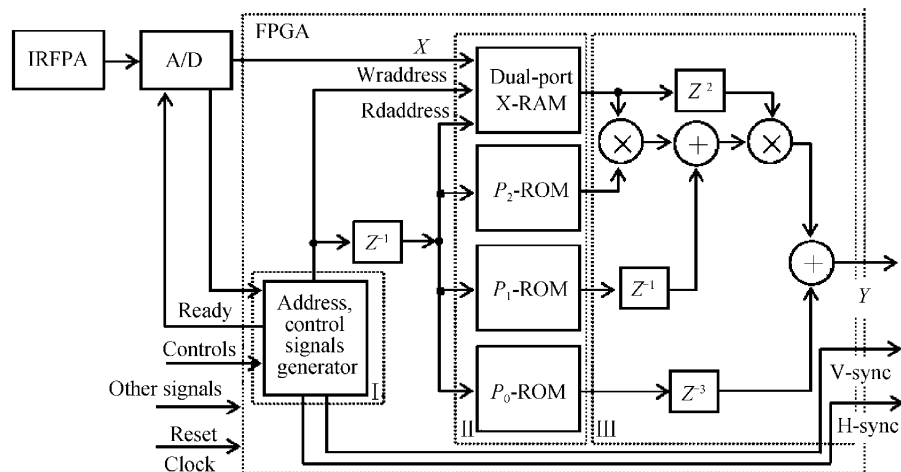


图 2 系统 FPGA 实现原理
Fig. 2 Realization principle of the FPGA system

系统主要由三个部分组成,第 I 部分为系统的控制核心,它根据外部输入的复位信号、时钟信号以及其他诸如行、场同步信号等产生 A/D 变换所需的控制信号 Controls 以控制 A/D 对 IRFPA 输出的模拟视频信号的采集过程,并结合 A/D 反馈给它的转换结束数据准备好信号 Ready 产生双口 RAM 的写地址计数信号 wraddress,将 A/D 转换好的数字信号存入 X-RAM 中,并根据数据流的延时情况产生输出数字信号 Y 的场同步信号 V-sync 和行同步信号 H-sync. 同时,将写地址计数信号 wraddress 延迟 1 个时间单位,馈入第 II 部分的存储系统作为采样数据存储单元 X-RAM 及校正系数存储器 P2-ROM、P1-ROM、P0-ROM 的读地址计数信号,rdaddress 将相应的数据同步读出并馈入第 III 部分的计算单元. 这种运行模式使信号采集和 IRFPA 非均匀性校正能同步进行,可有效保证系统以数据流的方式连续而高效的运行. 第 III 部分的计算单元完成非均匀性的校正输出,计算单元由两个乘法器和两个加法器及六个数据延时单元组成,乘法器和加法器均采用 pipeline 技术使其计算结果延迟一个时间单位输出,这样可保证按时序正确完成多项式 $y_{ij} = p_{ij}^2 x_{ij}^2 + p_{ij}^1 x_{ij} + p_{ij}^0$ 的计算输出. 整个系统集成在一个 FPGA 芯片内,采用流水线数据处理技术,结构简单,体积小,运算速度快.

当采用通常的两点校正算法时,只需将图 2 中

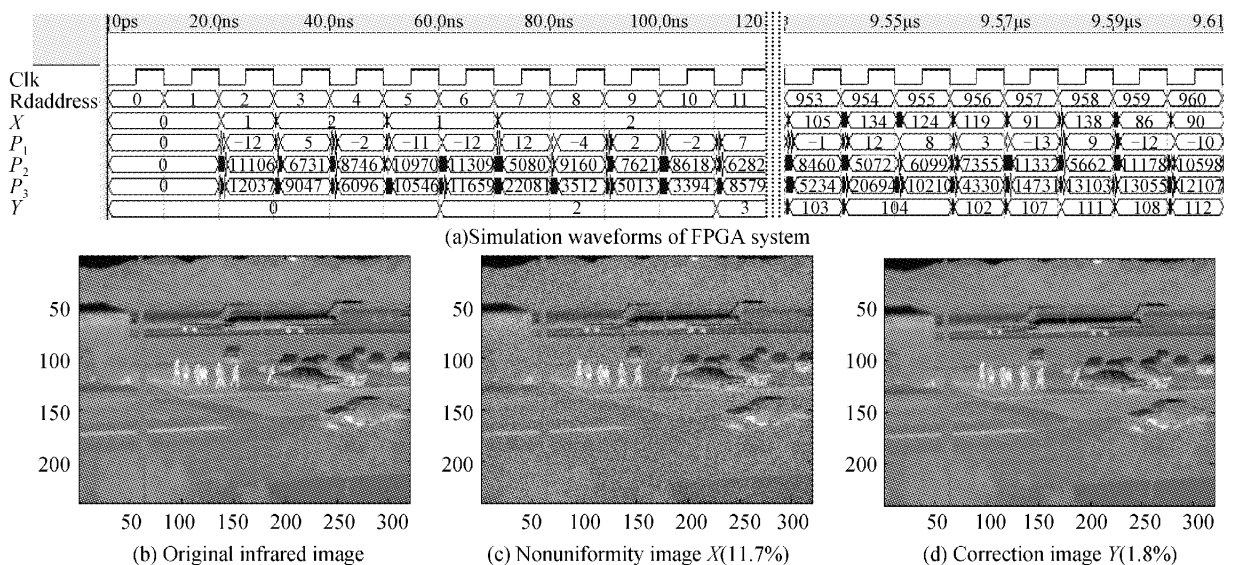


图 3 FPGA 系统实现仿真结果

Fig. 3 Simulation results of FPGA system

两点校正和四点三次多项式拟合校正算法的仿真结果与三点二次多项式拟合校正比较见表 1. 从表 1 可以看出,由于 IRFPA 响应特性非线性的影响,两点校正的准确度不高,而四点三次多项式校正准确度较三点二次多项式稍高,但其计算量和硬件

第 II 部分简化为存储校正系数 K_{ij} 和 Q_{ij} 的两个 ROM 存储器,第 III 部分简化为计算线性函数 $y=ax+b$ 的运算单元即可. 同样,对四点三次多项式校正也只需将系统第 II、III 部分稍加修改即可,因而,整个系统便于移植和推广.

3 仿真结果

利用 FPGA 设计软件 QuartusII5. 1, 选用 Stratix II 系列高速器件,根据实际获得的红外图像,对三点二次多项式拟合校正算法进行仿真实验,结果如图 3. 图 3(a)为部分仿真波形,图 3(b)为原红外图像,图 3(c)为非均匀性图像,其非均匀性为 11.7%,图 3(d)为校正后图像,其非均匀性为 1.8%. 实验首先根据图 3(b)原红外图像利用 IRFPA 非均匀性校正的 S-曲线模型 $y = a / (1 + \exp(b - cx)) + d$ 得到图 3(c)的非均匀性红外图像 X,利用上面所述算法产生校正系数矩阵 P_1 、 P_2 、 P_3 并对之适当量化,然后根据图 2 原理利用 QuartusII5. 1 仿真实验得到校正数据 Y 的输出波形并将之保存为 .tbl 文件后用 Matlab 读出显示如图 3(d). 系统以数据流的方式连续运行,运行时钟频率可达 102 MHz,相应于 1024×1024 的红外图像其帧采样频率可达 97 Hz,而对于 512×256 的红外图像其帧采样频率可达 778 Hz.

表 1 各算法校正准确度及在线计算量比较

	非均匀性	在线计算量
输入非均匀图像	11.7%	
两点校正	7.6%	1 次乘法 1 次加法
三点二次多项式	1.8%	2 次乘法 2 次加法
四点三次多项式	1.7%	3 次乘法 3 次加法

开销相对较大。

4 结论

1)本文研究的函数拟合红外焦平面阵列非均匀性校正算法能有效适用于 IRFPA 响应特性的大动态范围和非线性,具有较高的校正准确度。

2)本文研究的三点二次多项式拟合红外焦平面阵列非均匀性校正 FPGA 实现系统,采用流水线数据处理技术,以数据流的方式连续运行,结构简单,体积小,运算速度快,校正准确度高,便于扩展和移植。

3)由于大存储容量的 FPGA 芯片价格高,将数据采集存储器 and 校正系数存储器等以外挂的方式置于 FPGA 芯片外面,采用小存储容量的高速 FPGA 芯片可显著提高系统的性价比。

参考文献

- [1] GROSS W, HIERL T, SCHULZ M. Correctability and long-term stability of infrared focal plane arrays[J]. *Opt Eng*, 1999, **38**(5): 862-865.
- [2] XUE Li-jun, LI Zi-tian, LI Chang-le, *et al.* Study on the hyper-spectral CCD imager non-uniformity correction algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 693-696.
- [3] LI Qing, LIU Shang-qian, LAI Rui, *et al.* A scene-based nonuniformity correction algorithm of IRFP [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 720-723.
- [4] ZHOU Hui-xin, WANG Bing-jian, LIU Shang-qian, *et al.* Digital implementation of nonuniformity correction for IRFPA [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, **26**(1): 130-132.
- [5] CHENG Zheng-xing, LI Shui-gen. Digital approximation and ordinary differential equation numerical solution[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000: 187-246.
- [6] REN Ai-feng, CHU Xiu-qin. Embedded system design based on FPGA[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 41-126.

Realization of Nonuniformity Correction for IRFPA Based on FPGA Using Function Fitting

YIN Shi-min^{1,2}, XIANG-LI Bin¹, ZHOU Jin-song¹, HUANG Min¹

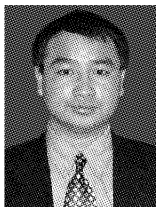
(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 First Field of Trial and Training Air Base of the Chinese People's Liberation Army, Jiu Quan, Gansu 735018, China)

Received date: 2006-08-31

Abstract: Upon considering the engineering practice of the nonuniformity correction of infrared focal plane array (IRFPA), a correction algorithm based on function fitting is designed. The nonuniformity correction system of IRFPA is realized by using large-capacity high-speed field programmable gate array (FPGA) device. The system can effectively adapt to the broad dynamic range and non-linearity of response characteristic of IRFPA with some advantages such as small size, fast speed and high correction precision.

Key words: Infrared focal plane array; Nonuniformity correction; Function fitting; Field programmable gate array



YIN Shi-min was born in 1968. He obtained the B. S. degree in applied mathematics from Zhejiang University. He worked as an engineer in the Trial and Training Air Base of CPLA from 1990 to 1997. He obtained his M. S. degree in signal and information processing in 1999 and Ph. D. degree in photoelectricity engineering in 2005 from Xidian University. Now he is working as a postdoctor at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. He is interested in the research of signal processing and visible/infrared imaging spectrometer etc.