

文章编号: 1672-8785(2015)04-0001-05

星载红外成像系统 IRFPA 非均匀性 在轨定标与实时校正

殷世民¹ 喻 双¹ 梁永波¹ 朱健铭¹ 王炳键² 陈真诚^{1*}

(1. 桂林电子科技大学生命与环境科学学院, 广西 桂林 541004 ;

2. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘 要: 针对星载红外成像系统在轨定标等特殊环境条件的应用要求, 研制了一种基于现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, FPGA) 的红外焦平面阵列 (Infrared Focal Plane Array, IRFPA) 非均匀性在线定标与实时校正芯片系统。由于对输入信号进行了标准化设计, 该系统可用于各类红外成像系统的 IRFPA 非均匀性在线定标与实时校正处理。这种系统在时钟信号的驱动下以流水线方式运行, 在对非均匀红外图像进行实时校正的同时, 能够在线获取定标图像并能对存储器中的校正系数进行在线更新。该系统具有体积小、运算速度快、稳定可靠以及易于升级等优点, 为星载红外成像系统 IRFPA 非均匀性的在轨定标开辟了一条有效的技术途径。

关键词: 星载红外成像系统; 红外焦平面阵列; 非均匀性; 在轨定标; 实时校正

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.04.001

In-orbit Nonuniformity Calibration and Real-time Correction of IRFPA of Spaceborne Infrared Imaging System

YIN Shi-min¹, YU Shuang¹, LIANG Yong-bo¹, ZHU Jian-ming¹, WAN Bing-jian², CHEN Zhen-cheng^{1*}

(1. School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: According to the in-orbit calibration requirement of a spaceborne infrared imaging system, an online nonuniformity calibration and real-time correction chip system is developed for Infrared Focal Plane Arrays (IRFPA). The system is based on a Field-Programmable Gate Array (FPGA). Because the design of its input signal is standardized, it can be used for on-line nonuniformity calibration and real-time correction of IRFPAs for various infrared imaging systems. Driven by a clock signal, the system operates in a pipeline way. It can acquire calibration images and update the correction coefficient in memory on line while correcting the nonuniform images in real time. It has the advantages of small volume, fast operation, stability, reliability and easy updating. This work has opened up an effective way for the in-orbit nonuniformity calibration of IRFPAs used in spaceborne infrared imaging systems.

Key words: spaceborne infrared imaging system; IRFPA; nonuniformity; in-orbit calibration; real-time correction

收稿日期: 2015-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61265006; 61271119; 61107007)

作者简介: 殷世民 (1968-), 男, 河南信阳人, 博士, 研究员, 主要从事信号处理研究。

* 通讯作者 E-mail: chenzhcheng@163.com

0 引言

由于在军事和民用领域具有巨大的应用价值,星载红外成像系统一直都受到世界各国的高度重视并获得了广泛发展^[1,2]。不论是一般的星载红外成像系统,还是星载傅里叶变换红外成像光谱仪系统,它们所使用的探测器基本上都是 IRFPA 器件。由于受非均匀性的影响^[3,4],IRFPA 器件有时并不能有效满足某些特殊场合的应用要求。比如,在傅里叶变换红外成像光谱仪系统中^[5],由于光谱复原算法对噪声的敏感性,通常要求 IRFPA 的非均匀性不大于 5%。目前,国产 IRFPA 器件的非均匀性通常都在 10% 以上,而国外的高性能 IRFPA 器件的非均匀性通常在 5% 左右。因此在实际工程中,对 IRFPA 的非均匀性必须给予合理的校正处理。另外,由于星载红外成像系统所处的太空环境与地面之间在温度上存在巨大差异,IRFPA 的响应特性会发生温度漂移,这就会使得在利用从地面获得的定标数据对处于星载环境下的红外成像系统的 IRFPA 非均匀性进行校正时发生偏差。所以要求星载红外成像系统应具有针对 IRFPA 非均匀性的在线定标功能,以有效减小这种校正偏差。

目前,工程上用于对 IRFPA 的非均匀性进行校正的硬件电路主要采用数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 器件、DSP 器件 + FPGA 器件以及 FPGA 器件这三种主要模式^[6-8]。在前两种模式中,硬件电路设计完成之后修改起来比较困难;而 FPGA 硬件系统则具有在线编程功能,能够根据外部条件变化进行改进和升级。目前,在对 IRFPA 的非均匀性进行校正时,这三种模式基本上都是事先对红外成像系统进行定标,利用获得的定标数据求得校正系数,然后将定标系数固化到只读存储器中,并利用两点校正算法实现对红外图像的实时校正处理。但该方法并不具有在线定标功能,难以适应对星载红外成像系统的 IRFPA 非均匀性进行校正的技术要求。

为此,本文研制了一种用于对 IRFPA 的非均匀性进行在线定标与实时校正的 FPGA 芯片系统。该系统不仅具有以上功能,而且还可对系统的输入信号进行标准化设计,使得所设计的 IRFPA 非均匀性校正 FPGA 芯片能够应用到各种场合下的红外成像系统中。

1 系统数据处理算法

总的说来,IRFPA 非均匀性校正算法主要有基于场景和基于辐射定标的两大类算法^[9-11]。前者由于校正精度低、算法复杂等原因在工程上很少得到应用,而在工程上对 IRFPA 的非均匀性进行校正的辐射定标算法主要有两点校正算法和多点校正算法。因为目前 IRFPA 的线性度非常高 (不低于 98%), 所以利用两点校正算法完全能够满足工程上对 IRFPA 非均匀性校正的精度要求。

假设 IRFPA 为 $M \times N$ 元阵列, $I_1(i, j)$ 和 $I_2(i, j)$ 为两帧定标图像, $I(i, j)$ 为校正前的红外图像, $I_c(i, j)$ 为校正后的红外图像,则两点校正算法为

$$I_c(i, j) = K(i, j)I(i, j) + Q(i, j) \quad (1)$$

式中,

$$K(i, j) = \frac{\bar{I}_2 - \bar{I}_1}{I_2(i, j) - I_1(i, j)} \quad (2)$$

$$Q(i, j) = \frac{I_2(i, j)\bar{I}_1 - I_1(i, j)\bar{I}_2}{I_2(i, j) - I_1(i, j)} \quad (3)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_1(i, j) \quad (4)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_2(i, j) \quad (5)$$

2 系统的 FPGA 设计研究

2.1 系统的 FPGA 设计思想

为了使所设计的 IRFPA 非均匀性在线定标与实时校正芯片系统具有一定的普适性,我们对 FPGA 芯片的输入输出信号作了一个标准化设计,如图 1 所示。图中,输入信号为时钟信号

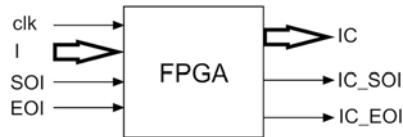


图 1 FPGA 芯片的输入输出信号

clk、帧红外图像信号 I、I 的起始位置信号 SOI 和结束位置信号 EOI；输出信号为帧红外图像信号 IC、IC 的起始位置信号 IC_SOI 和结束位置信号 IC_EOI。图 2 所示为输入信号的时序关系。其中示例的每帧红外图像信号有 16 个数据, SOI

信号的高电平脉冲对应一帧红外图像信号 I 的开始, 而随后的 EOI 高电平脉冲对应一帧红外图像信号的结束。输出信号的时序关系与输入信号类似。

在确定了 FPGA 的输入输出红外图像信号的时序关系之后, 我们设计了图 3 所示的 IRFPA 非均匀性在线定标与校正 FPGA 芯片系统。该系统主要由 IRFPA 非均匀性实时校正部分和 IRFPA 非均匀性在线定标部分组成。

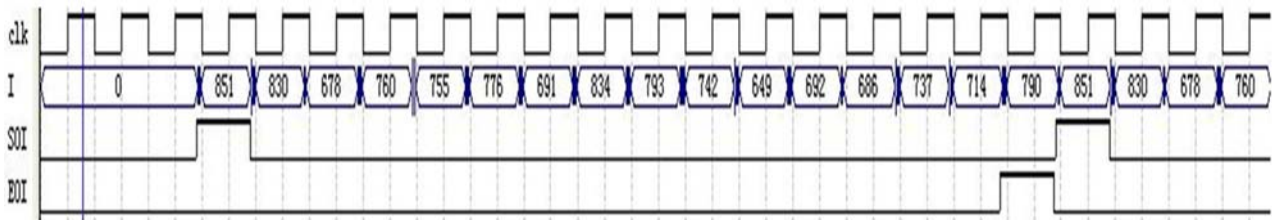


图 2 输入信号的时序关系

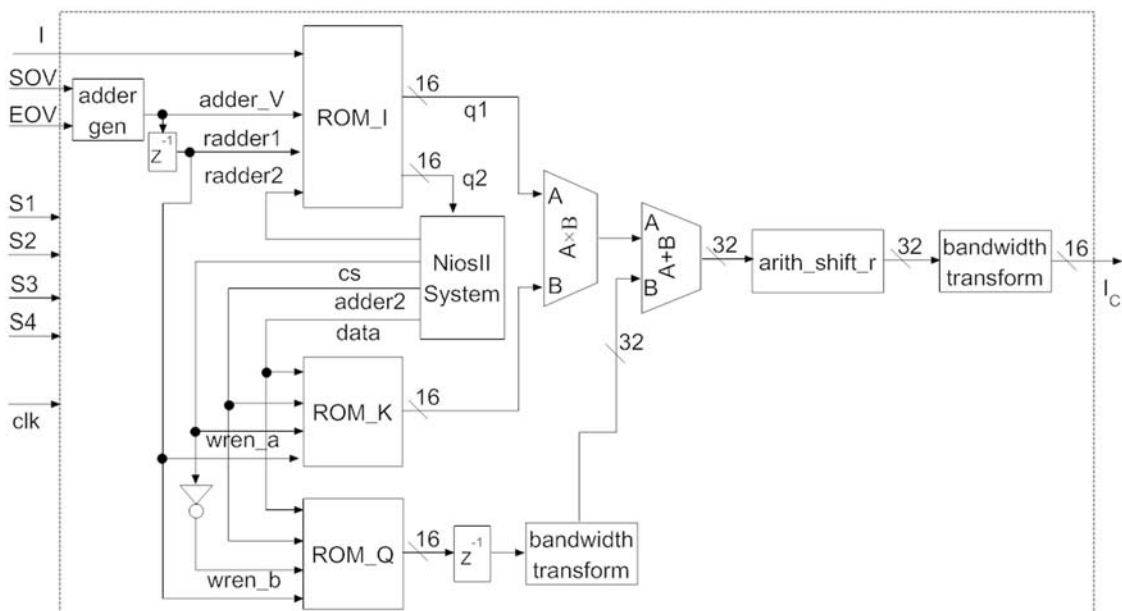


图 3 系统实现的原理框图

图 3 中, 首先, 系统的 adder_gen 部分根据时钟信号 clk、SOI 信号和 EOI 信号产生写地址信号 adder_V, 然后将输入红外图像信号 I 的一帧数据存入存储器 RAM_I 中, 同时将地址信号 adder_V 延迟一个周期作为 RAM_I、RAM_K 和 RAM_Q 的读地址信号 radder1, 然后将 RAM_I、RAM_K 和 RAM_Q 中的数据按顺序读出。在时钟的驱动

下, 从 RAM_I 中读出的数据 I 先与从 RAM_K 中读出的校正系数 K 相乘, 其乘积再与从 RAM_Q 中读出的校正系数 Q 延迟一个时钟周期的信号相加, 从而完成式 (1) 的计算并得到校正输出信号 I_c 。另外, 需要对由式 (2) 和式 (3) 得到的校正系数 K 和 Q 进行量化。量化方法是将 K 和 Q 同时扩大 1024 倍, 然后将其存入相应的存

器中,而在电路中则增加算术右移单元以除以 1024。

图 3 中的 NiosII_System 部分为 IRFPA 非均匀性在线定标单元,包括 CPU、RAM 控制单元、Flash 控制单元以及输入输出 IO 单元等。它是利用 QuartusII 开发软件中的 SOPC 功能实现的, RAM 和 Flash 存储器通过相应的控制器连接到系统中。图 4 所示为 NIOSII 模块图。在 Flash 中存放着系统运行程序和定标数据 K 和 Q 。系统

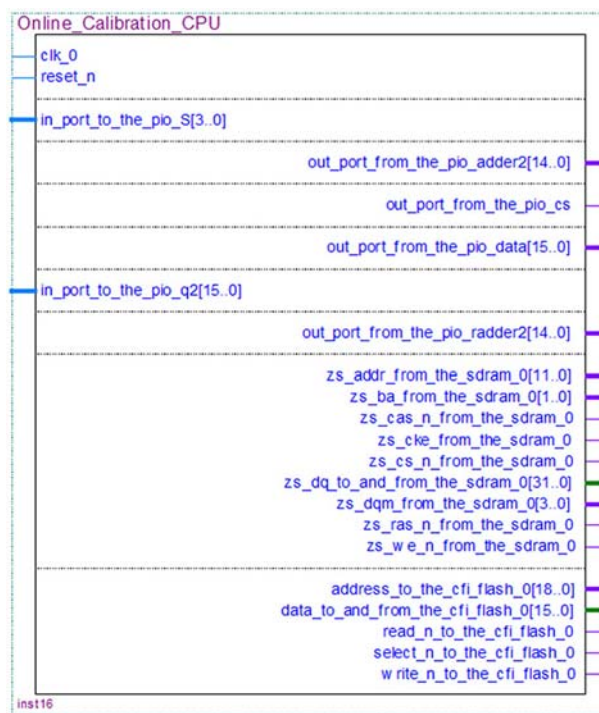


图 4 NIOSII 模块图

上电工作后,系统运行程序从 Flash 中读出 K 和 Q 的值并将其存储在 RAM_K 和 RAM_Q 之中。当需要进行在线定标时,首先置 S1 信号为高电平,系统程序检测到 S1 为高电平信号后便会从 RAM_I 中读出一帧数据,并输出一状态信号表示读取完毕;然后置 S1 为低电平而置 S2 为高电平,系统程序检测到 S2 为高电平信号后便会从 RAM_I 中读出第二帧数据,并输出一状态信号表示读取完毕;接着系统程序根据获取的两帧定标数据按式 (2) ~ 式 (5) 计算得到定标系数 K 和 Q 并予以量化,定标系数采用原位存储方法仍存储在原来存放定标数据的数组中,定标

系数 K 和 Q 计算完毕后输出一状态信号予以表示。此后置 S2 为低电平,这时若程序检测到 S3 为高电平,则将定标系数 K 和 Q 写入 RAM_K 和 RAM_Q 中;若检测到 S4 为高电平,则将定标系数 K 和 Q 写入 Flash 中以更新其数据。

关于定标系数的原位存储技术,从式 (2) 和式 (3) 中可以看出,定标系数 $K(i, j)$ 和 $Q(i, j)$ 的计算只与定标图像的当前值 $I_1(i, j)$ 和 $I_2(i, j)$ 有关。因此,在计算得到 $K(i, j)$ 和 $Q(i, j)$ 之后,可将其值仍然存储在数组中存储 $I_1(i, j)$ 和 $I_2(i, j)$ 的位置上。通过采用以上原位存储技术之后,原先存储的定标图像数据就变成了定标系数数据,这样可以有效节省系统软硬件资源的开销。

图 3 中,非均匀性校正单元在时钟的驱动下以流水线方式运行。在需要进行定标时, NiosII_System 会随时更新 RAM_K、RAM_Q 以及 Flash 存储器中的校正系数数据。非均匀性实时校正单元与在线定标单元均以相对独立的方式工作,互不影响。

3 IRFPA 非均匀性在轨定标

由于 FPGA 电路中设计了在线定标功能,可按以下方法对星载红外成像系统中的 IRFPA 的非均匀性进行在轨定标:

(1) 首先关闭红外成像系统的相机镜头,采集一帧定标图像并加以存储,然后再打开相机镜头对准均匀天空方向采集第二帧定标图像并加以存储;

(2) 利用两帧定标图像计算 IRFPA 的校正系数,并对存储器中的校正系数进行更新。

4 仿真结果

利用 QuartusII9.0 软件及 EDA 开发系统对所设计的 IRFPA 非均匀性在线定标与实时校正系统进行了仿真实验。实验中,系统输入的非均匀图像是由光谱仪输出的一帧 128×256 的干涉图像通过非均匀性校正模型变换得到的。图 5 所示为仿真波形。其中,clk 为时钟信号, I 为输入系统的非均匀图像信号, adder_V 为信号 I 所对应的存储器地址信号, SOI 和 EOI 信号的高电平脉

冲分别对应信号 I 的起始位置和结束位置; IC 为非均匀性校正后输出的图像信号, 而 IC_SOI 和 IC_EOI 信号的高电平脉冲分别对应 IC 信号的起始位置和结束位置。利用 QuartusII 软件将图 5 中的仿真波形保存为 *.tbl 文件, 并利用 Matlab

软件读出数据 (结果见图 6)。

图 6(a) 为原始图像 I₀, 图 6(b) 为非均匀性图像 I (相对于 I₀, 非均匀性为 10.19%), 图 6(c) 为系统经非均匀性校正后得到的图像 I₁ (相对于 I, 非均匀性为 0.93%)。

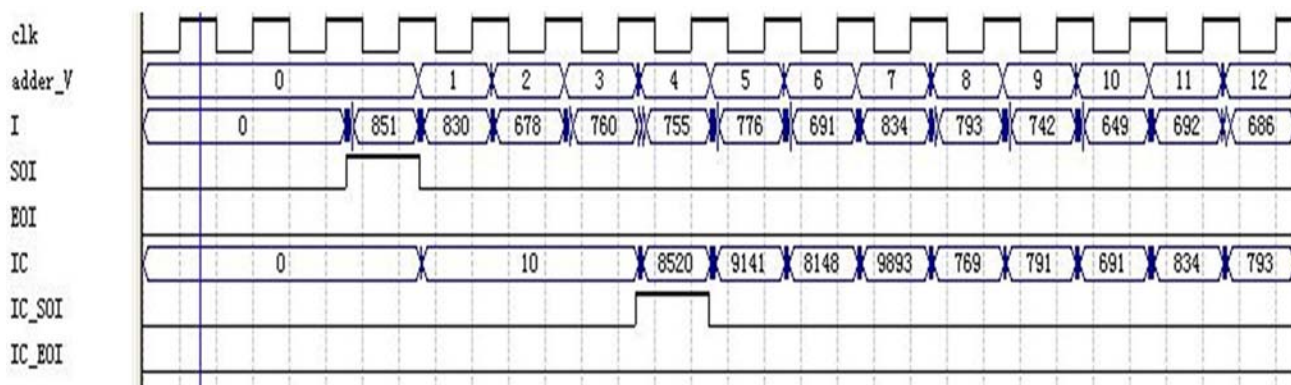


图 5 实时光谱复原 QuartusII 仿真结果

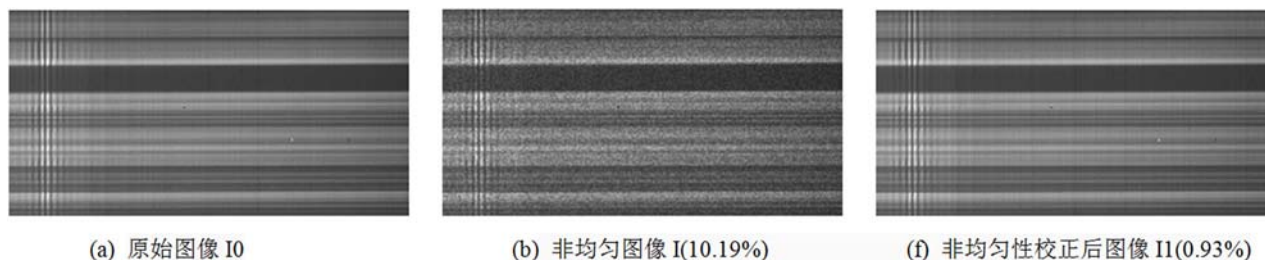


图 6 干涉图非均匀性校正结果

本文对 FPGA 系统的输入输出信号进行了标准化设计, 一者使得系统的运行速度可随外部时钟频率发生改变; 二者能够有效适应不同大小的 IRFPA 阵列; 三者不论是致冷型还是非致冷型红外成像系统, 只要其数据采集单元的输出信号格式与文中 FPGA 的输入信号一致, 则本文设计的 IRFPA 非均匀性校正 FPGA 芯片系统就可以有效应用于这些红外成像系统。

5 结论

(1) 本文设计的 IRFPA 非均匀性在线定标与实时校正 FPGA 芯片系统, 在对非均匀性红外图像进行实时校正处理的同时, 可以根据外部指令在线获取定标图像并对存储器中的非均匀性校正系数进行在线更新, 因此能够有效适应星载红外成像系统在轨定标等特殊环境条件的应用要求。

(2) 该系统对输入输出信号进行了标准化设计, 可用于各类红外成像系统的 IRFPA 非均匀性在线定标与实时校正处理单元。

(3) 该系统以 FPGA 芯片为载体, 在时钟信号的驱动下, 以流水线方式运行, 具有体积小、运算速度快、稳定可靠以及易于升级等优点。

参考文献

- [1] Su Lijuan, Yan Yuan, Bin Xiangli, et al. Spectrum Reconstruction Method for Airborne Temporally-Spatially Modulated Fourier Transform Imaging Spectrometers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(6): 3720-3728.
- [2] Yann Ferrec, Jean Taboury, Herve Sauer, et al. Experimental Results from an Airborne Static Fourier

(下转第 12 页)