

文章编号: 1672-8785(2011)05-0032-06

一种新的基于 SOPC 的红外非均匀性校正算法实现

胡旭峰 唐永鹤 卢焕章

(国防科学技术大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要: 针对 SOPC 条件下软硬件资源高度整合的特点, 在分析传统红外焦平面两点校正算法的基础上提出了一种基于一像素再校正的红外非均匀性校正算法, 并完成了算法实现。该算法根据实际场景完成对实验室获取校正系数的偏移及盲元修正, 使校正系数更符合实际场景, 提高了非均匀性校正精度。实测数据表明, 该算法及实现方法可以满足实际工程需求。

关键词: SOPC; PowerPC; 非均匀性校正; 盲元提取

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.05.007

A Novel SOPC-based Method for Infrared Non-uniformity Correction

HU Xu-feng, TANG Yong-he, LU Huan-zhang

(State Lab of Automatic Target Recognition, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Through the analysis of the traditional two-point method for infrared non-uniformity correction, a novel infrared non-uniformity correction algorithm based on SOPC is proposed and implemented. The algorithm can modify the drift and blind pixels in the correction coefficients obtained in laboratory according to the actual scenes. The resulting correction coefficients are more in agreement with the actual scenes and the infrared non-uniformity correction accuracy is improved. The measured data show that this algorithm and its implementation method can meet the practical demand in engineering.

Key words: SOPC; PowerPC; non-uniformity correction; blind pixels auto-searching

0 引言

凝视红外成像导引头具备灵敏度高, 作用距离远, 角分辨率高, 可全天时、准全天候、被动静默工作(难以被侦测)和无镜面回波干扰(多路径干扰)等优势。近年来, 基于较大规格红外焦平面(128×128 元、256×256 元或更大规格)的

凝视红外成像导引头已迅速走向成熟。目前, 国外已经研制了多款用于不同作战使命的凝视红外成像制导武器装备, 其中一些已经在实战中得到应用^[1]。然而由于敏感材料非均匀性以及工艺方面的原因, 红外探测器存在严重的非均匀性, 需要进行校正。

非均匀性校正方法主要包括基于黑体的两

收稿日期: 2011-03-24

基金项目: 国家高技术研究“863”重大项目(2009AA8100701); 武器装备预研基金项目(9140A01060110KG01)

作者简介: 胡旭峰(1981-), 男, 浙江慈溪人, 博士, 主要从事分布式协同目标检测与跟踪、信号处理及硬件加速实现等方面研究。E-mail: xufeng_hu@163.com

点校正算法与多点校正算法和基于场景的神经网络算法与时域高通滤波算法。基于场景的非均匀性校正算法需要利用多帧图像, 并且对场景有一定的要求。对于单帧图像的实时非均匀性校正, 宜采用两点校正法。目前的实际应用系统大多是利用 FPGA 通过调用存储的两点法系数对红外成像器的非均匀性进行实时校正的。该方案充分利用了 FPGA 的并行特性, 可以很好地满足非均匀性实时校正需求。文献 [2] ~ [4] 对这种方案作了详细设计和论述。但该方案也存在非均匀性校正系数需由外部设备提供, 针对不同温度范围及环境条件需要提供相应的校正系数继而导致存储单元需求变大以及系数更新困难等问题。

随着电子技术和电子设计自动化技术的快速发展, 集成微控制器、存储器、多种外围电路及实时操作系统、实时通信协议及应用软件的片上系统 (System on Chip, SOC) 已成为系统设计的发展方向。基于 FPGA 的可编程片上系统 (SOPC) 技术使 FPGA 在保持并行处理优势的同时, 通过嵌入处理器核获得了串行运算与控制能力。这样, 在不增加系统功耗和 PCB 版面的情况下, 通常需要通过采集多帧图像在 PC 平台上进行后期处理的红外焦平面非均匀性校正系数计算便可以在 SOPC 平台上在线实现了。

本文主要探讨 SOPC 条件下的红外焦平面阵列非均匀性实时校正方案设计, 提出一种基于一点再修正的两点非均匀性校正算法, 并在 Xilinx V4FX100 超大规模 FPGA 平台上实现该算法。

1 基本原理和概念

1.1 非均匀性产生的原因及盲元定义

非均匀性定义为红外焦平面阵列在同一均匀辐射输入时探测元之间的输出不一致性, 又称为固定模式噪声。对于一个 M 行、 N 列的红外焦平面阵列, 其响应的非均匀性定义为

$$PRUN = \frac{1}{V_s} \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [V_s(i, j) - \bar{V}_s]^2} \quad (1)$$

式中, $V_s(i, j)$ 为第 i 行、第 j 列探测元对某温度黑体的响应电压; $\bar{V}_s$ 为所有探测元对相同温度黑体辐射的平均响应值:

$$\bar{V}_s = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_s(i, j) \quad (2)$$

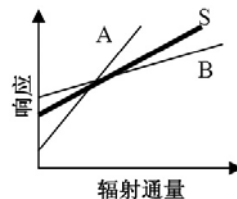
非均匀性的产生一方面是由于制造探测元的工艺水平还不够, 难以做到完全一致; 另一方面则是由于环境温度变化和光学系统等的影响, 主要体现为响应率的非均匀性 (包括光谱响应的非均匀性)、读出电路自身及其与探测器耦合的非均匀性、暗电流的非均匀性等。非均匀性校正就是采用一定的算法尽量减少探测元之间的响应差异, 使探测元具有大致相同的响应曲线, 并实现尽可能小的 PRUN 值。

红外焦平面阵列的各探测元对入射辐射都有一定的热响应, 但其响应之间并不存在一定关系。这些探测元的响应率是非线性的, 但在一定的环境温度范围内, 可以假定各探测元的响应是线性的 [5], 即

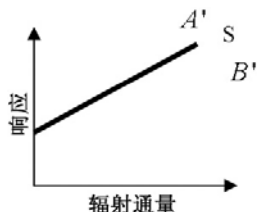
$$V_{ij}(\varphi) = A_{ij}\varphi + B_{ij} \quad (3)$$

式中, φ 为入射到第 (i, j) 个红外焦平面阵列探测元上的辐照度; $V_{ij}(\varphi)$ 为第 (i, j) 个焦平面单元的输出信号; A_{ij} 为直线 $V_{ij}(\varphi) - \varphi$ 的斜率; B_{ij} 为直线 $V_{ij}(\varphi) - \varphi$ 的截距。非均匀性校正主要是消除图像的加性噪声和乘性噪声。

在探测元响应率为线性的假定下, 红外焦平面阵列的非均匀性校正过程可以用图 1 来表示。在实际工程应用中, 一般可采用两点法来实现该过程。



(a) 校正前的探测元响应曲线



(b) 校正后的理想结果

图 1 线性响应模型的校正过程

红外焦平面阵列普遍存在响应非均匀性,而非均匀性严重到一定程度时就会形成盲元。当焦平面阵列本身的缺陷造成红外焦平面阵列部分探测元的响应率过高或过低时,这些像元通常称为盲元,包括死像元和过热像元。响应率过高的像元,称为过热像元;响应率过低的像元,称为死像元^[6]。国标 GB/T17444-1998《红外焦平面验收测试技术标准》中规定,过热像元为响应率超过平均响应率 10 倍的像元,死像元为响应率低于平均响应率 1/10 的像元,其中平均响应率为有效像元的平均响应率^[7]。

由式(2)即可得到去除盲元后的有效像元的平均响应率:

$$\bar{V}_s = \frac{1}{M \times N - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_s(i, j) \quad (4)$$

式中, d 和 h 分别为死像元数和过热像元数。盲元的数量及分布对器件性能影响很大。如果盲元过多,那么在红外成像系统输出的未经任何相应处理的图像中将会出现大量亮点和暗点,使成像质量大受影响。

2 基于 SOPC 的非均匀性校正算法实现

2.1 SOPC 系统结构的建立

SOPC 系统利用可编程逻辑技术把整个系统放到一块硅片上,是一种特殊的嵌入式系统。首先它是个 SOC 系统,由单个芯片完成整个系统的主要逻辑功能;其次,它是个可编程系统,具有灵活的设计方式,可裁减、可扩充、可升级,并具备软硬件在系统中可编程功能。

SOPC 结合了 SOC 和 PLD、FPGA 各自的优点,一般具备以下几个基本特征:

- (1) 至少包含 1 个嵌入式处理器内核;
- (2) 具有小容量片内高速 RAM 资源;
- (3) 拥有丰富的 IP Core 资源可供选择;
- (4) 拥有足够的片上可编程逻辑资源;
- (5) 具有处理器调试接口和 FPGA 编程接口;
- (6) 可能包含部分可编程模拟电路;
- (7) 单芯片,低功耗,微封装。

Xilinx 公司的 Virtex-4 FPGA 是首款基于 ASMBL 架构的多平台 FPGA 系列。Virtex-4 FPGA 采用了多种新的结构模块,可得到最大的吞吐量、更高的集成度和更低的功耗,从而在性能上达到一个全新的水平。Virtex-4 FX100 提供了两个内置的增强型 PowerPC 405 内核。该内核具有 5 级流水线、16 kB 的指令、数据 cache 以及存储器管理单元 (MMU),在 450 MHz 的时钟频率下可提供 680 DMIPS 的性能。IBM CoreConnect 总线用于连接 CPU 和其他外围设备。Xilinx 公司提供了用于构建 SOPC 系统的 Xilinx Platform Studio 可视化工具和 Platform Studio SDK 软件调试环境,同时还和第三方公司共同提供了大量 IP 库,以促进基于 SOPC 的设计开发。我们使用 Xilinx Platform Studio 建立用于红外焦平面阵列非均匀性校正的 SOPC 系统结构(见图 2)。

从图 2 中可以看出,整个非均匀性校正系统由 PowerPC 处理器核和硬件处理模块两部分组成。PowerPC 处理器核负责完成硬件处理模块的参数配置、非均匀性校正系数的计算以及盲元提取算法的实现等软件工作。硬件处理模块由焦平面时序控制模块、非均匀性实时校正模块、图像存储模块和配置接口模块四部分组成,负责完成对红外焦平面阵列的时序控制和图像采集以及非均匀性的实时校正。PowerPC 处理器核和硬件处理模块之间通过 PLB 总线实现高效数据交互。同时,在 OPB 总线上还外挂了用于指示与控制硬件系统执行流程的 LED 指示灯和按键。

2.2 基于一点再修正的两点校正算法

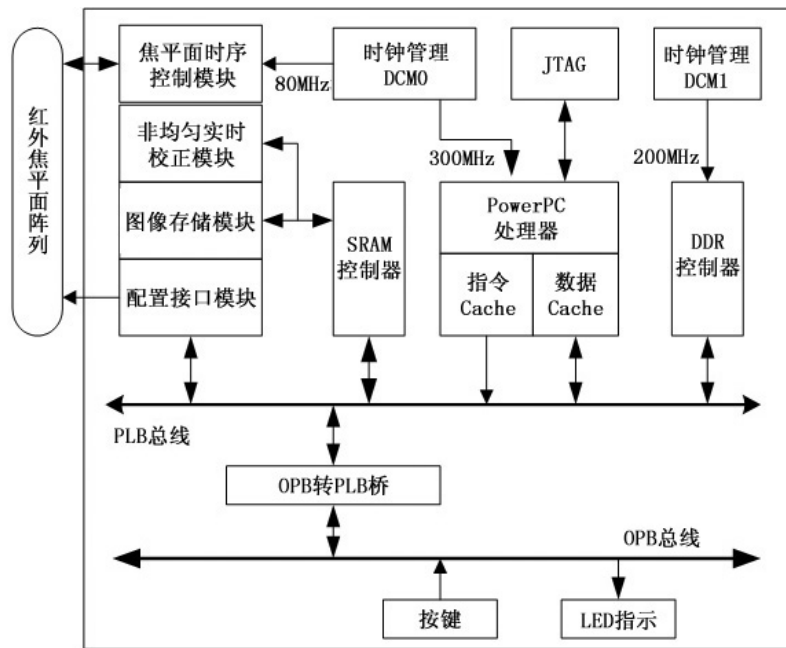


图 2 用于实现非均匀性校正算法的 SOPC 系统架构

一点温度定标算法先用温度为 T_1 的均匀辐射黑体辐照探测器, 得到此时每个探测元的响应输出 $V_{ij}^{T_1}$, 并求出其平均值:

$$\overline{V^{T_1}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ij}^{T_1}}{M \times N} \quad (5)$$

于是得到每个探测元的响应偏差为

$$D_{ij}^{T_1} = V_{ij}^{T_1} - \overline{V^{T_1}} \quad (6)$$

将 $D_{ij}^{T_1}$ 存储起来, 并对探测元的每个响应输出 V_{ij} 进行实时校正, 即

$$V'_{ij} = V_{ij} - D_{ij}^{T_1} \quad (7)$$

从算法上不难看出, 一点定标法实质上只是对焦平面的非均匀噪声中的加性噪声作了补偿, 而没有对乘性噪声进行校正。

两点非均匀性校正算法基于探测元在工作范围内呈现线性响应的假设, 根据场景的变化范围, 在光路中插入一个均匀辐射黑体, 将所有探测单元在高温 T_H 和低温 T_L 下的响应格式化为 V_{T_H} 和 V_{T_L} :

$$V_{T_H} = A_{ij} V_{ij}(\varphi_{T_H}) + B_{ij} \quad (8)$$

$$V_{T_L} = A_{ij} V_{ij}(\varphi_{T_L}) + B_{ij} \quad (9)$$

可以得到校正增益和校正偏移量分别为

$$A_{ij} = \frac{V_{T_H} - V_{T_L}}{V_{ij}(\varphi_{T_H}) - V_{ij}(\varphi_{T_L})} \quad (10)$$

$$B_{ij} = \frac{V_{T_H} V_{ij}(\varphi_{T_L}) - V_{T_L} V_{ij}(\varphi_{T_H})}{V_{ij}(\varphi_{T_L}) - V_{ij}(\varphi_{T_H})} \quad (11)$$

用上述公式计算校正增益和校正偏移量时, 首先需要得到不同温度下的等温辐照图像。为了减小由热涨幅和环境噪声等因素引起的定标不准确, 通常需要在同一温度下采集几十幅甚至上百幅图像, 然后将其求平均, 再用得到的平均图像进行校正系数计算。得到焦平面的增益和偏移系数后, 通过在 FPGA 中硬件实现公式 $V_{ij}(\varphi) = A_{ij}\varphi + B_{ij}$ 即可完成图像的非均匀性校正。

两点法系数需要由两个温度点上均匀辐照后的图像数据反算得出, 因此一般是在实验室中进行的。而实际获取两点法系数的实时校正工作环境同实验室环境存在差异, 校正系数无法正确反映实际情况。基于传统 FPGA 实现的非均匀性校正系统由于无法在线更新系数, 其非均匀性校正图像存在较大的模糊和退化。同

时,当红外焦平面进行长期工作后,焦平面阵列的非均匀性也存在一定程度的漂移。因此,随着工作时间的延长,基于传统 FPGA 实现的非均匀性校正系统的图像校正效果将会逐渐恶化。

在基于 SOPC 的非均匀性校正系统中,可以根据焦平面的工作情况利用处理器核的运算特性对非均匀性校正系数进行修正,以到达最佳的校正效果。但是利用式 (10) 和式 (11) 计算两点法系数时需要两个温度定标点,对标定设备要求较高,在实际工作环境中较难实现。考虑到外界环境变化主要影响两点法系数中的偏移系数,本文提出了一种基于一点再修正的两点校正算法。在校正系统实际工作前,先使用一点校正法修正原有的两点校正法中的偏移系数,然后再进行两点法实时校正。

根据式 (6) 计算一点法偏移系数,只是对未经过非均匀性校正的原始图求取图像平均灰度,并不能真实反映场景的灰度信息。考虑到我们拥有在实验室中获取的两点法系数,将式 (5) 修正为式 (12),即计算经过初步非均匀性校正后的图像均值。

$$\overline{V^{T_1}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A_{ij} V_{ij}^{T_1} + B_{ij})}{M \times N} \quad (12)$$

当非均匀性严重到一定程度时,便会形成盲元。盲元在图像上表现为过亮点或黑点。盲元所在探测元的灰度值严重偏离了场景的实际值,因此在计算图像平均灰度时应去除盲元。焦平面阵列固定盲元的提取同样也可以在实验室中进行,即通过非均匀系数给盲元附加特殊的标记,比如我们的非均匀性校正系统中给盲元附加了 $A_{ij} = 0$ 、 $B_{ij} = 0$ 的标记。另外,随着焦平面环境的变化和使用时间的增加,新盲元即会出现,如不给盲元附加标记,将会影响图像的非均匀性校正效果。因此,我们的非均匀性校正系统可根据图像灰度和方差的盲元自动提取算法标定新出现的盲元。去除盲元后,将式 (12) 修正为

$$\overline{V^{T_1}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A_{ij} V_{ij}^{T_1} + B_{ij})}{M \times N - B} \quad (13)$$

式中, B 为红外焦平面阵列的盲元数。经修正后的偏移系数为

$$\tilde{B}_{ij} = B_{ij} + \overline{V^{T_1}} - V_{ij}^{T_1} \quad (14)$$

得到偏移系数 $\tilde{B}_{ij}$ 后,根据 $V_{ij}(\varphi) = A_{ij}\varphi + \tilde{B}_{ij}$ 即可完成实时校正。此公式的实时实现在文献 [2] ~ [4] 的基于传统 FPGA 实现的非均匀性校正算法中均有详细论述,本文不再赘述。

图 3 所示为基于一点再修正的两点校正算法的实现流程。

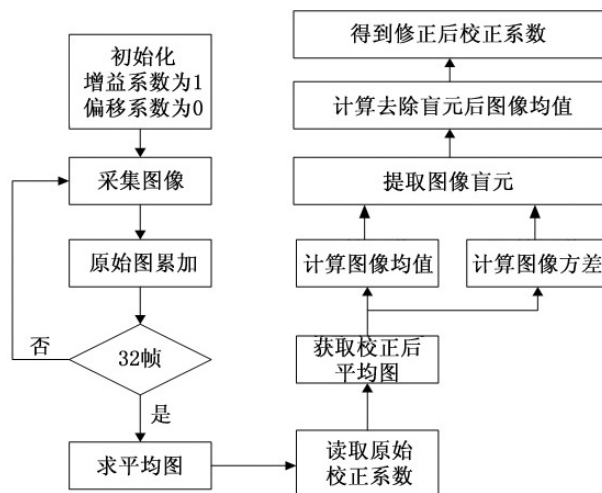


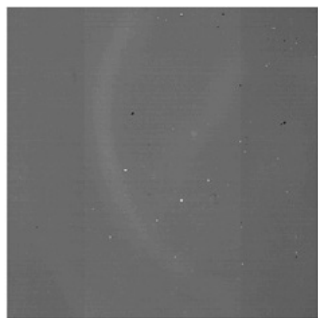
图 3 基于一点再修正的两点校正算法的实现流程

2.3 实验结果

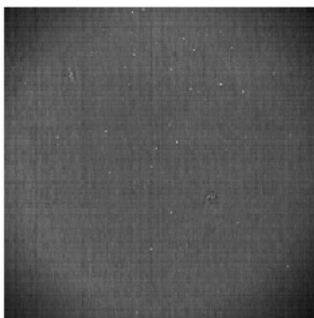
非均匀性实时校正模块一般为红外处理系统的子模块,而我们研制的某个红外信息处理系统需要支持两种不同波段的红外焦平面阵列。采用本文设计的基于 SOPC 的非均匀性校正方案,可以很方便地通过 PowerPC 处理器核访问硬件接口配置模块,因此适用于不同的红外焦平面阵列。图 4 对某国产 256×256 红外中波焦平面阵列获取的原始图像、经实验室两点系数校正后的图像以及基于本文提出的一点再修正算法的校正图像进行了对比。

3 总结

非均匀性校正一直是红外图像处理中的关键技术。本文构建了一种基于 SOPC 的红外焦平



(a) 校正前的原始图像



(b) 采用未修正系数的校正图像



(c) 采用本文修正算法的校正图像

图 4 图像非均匀性校正结果的比较

面阵列非均匀性校正系统架构, 根据 SOPC 软硬件协同工作的特点设计了基于一点再修正的两点校正算法, 给出了算法流程并在 Xilinx Virtex-4 FX100 硬件平台上实现了算法。实验结果表明, 本文设计的系统方案工作稳定、适应性强, 可以很好地完成红外图像的非均匀性校正任务。

参考文献

- [1] 范晋祥, 王社阳, 张渊. 对红外成像制导导弹自动目标识别应用现状的思考 [C]. 2007 年光电探测与制导技术的发展与应用研讨会论文集, 2007.
- [2] 周建勇, 唐遵烈, 蒋志伟, 等. 基于 FPGA 红外图像实时非均匀性校正及滤波技术 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(z4): 393-396.

- [3] 石岩, 张天序, 王岳环, 等. 红外焦平面非均匀性两点校正法分析及 FPGA 实现 [J]. 激光与红外, 2005, 35(2): 100-103.
- [4] 王炳健, 刘上乾, 李庆, 等. 基于 FPGA 的红外焦平面阵列实时非均匀性校正 [J]. 半导体光电, 2006, 27(1): 79-82.
- [5] 常本康, 蔡毅. 红外成像阵列与系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 代少升, 张天琪. 一种新的红外焦平面阵列盲元处理算法 [J]. 压电与声光, 2008, 30(3): 376-378.
- [7] GB/17444-1998, 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

新闻动态 News

美国喷气推进实验室研制截止波长可定制的势垒红外探测器

据 www.techbriefs.com 网站报道, 美国喷气推进实验室已研制出一种工作温度比现有的 InSb 基中波红外探测器高的中波红外势垒光电探测器。这种标准的高工作温度势垒红外探测器是用一种与 GaSb 衬底晶格匹配的 InAsSb 红外吸收材料制作的, 其截止波长约为 $4\ \mu\text{m}$ 。为了增加灵活性和效用, 该探测器采用了可定制截止波长的红外吸收材料。

这种探测器可以通过在一块晶格匹配的 GaAs 衬底上添加一层四元合金 GaInAsSb 吸收材料和一层 GaAlSbAs 势垒层制作而成。GaInAsSb 吸收材料的截止波长可以通过调节合金组分而确定。但吸收层和势垒层两种材料必须具有以

下特性: (1) 它们的价带边缘必须大致相同, 以使空穴流动不受阻碍, 而其导带边缘必须具有大的差别, 以形成电子势垒; (2) 为了保证高的材料质量和低的缺陷密度, 吸收层和势垒层必须分别与衬底晶格匹配和接近匹配。

为了制作截止波长短于 $4\ \mu\text{m}$ 的这种探测器, 须采用 GaInAsSb 四元合金作为吸收材料和采用匹配的 GaAlSbAs 四元合金作为势垒材料。通过改变合金组分, 四元合金吸收体的带隙可以得到连续调节, 相应地, 其截止波长可以从 $4\ \mu\text{m}$ 一直下调到短波红外。通过精心选择势垒层的合金组分, 人们便可以制成这种探测器结构。

这种探测器技术适用于制作在低地球轨道上须通过被动冷却而工作的超大规模中波红外/短波红外焦平面阵列。由于冷却要求降低了, 这种高工作温度红外技术对于卫星尺寸、重量及功率的降低和寿命的延长都是有益的。

□ 高国龙