

·测试、试验与仿真·

基于FPGA的线阵探测器非均匀校正的实现

高文清¹,徐世伟¹,刘严严¹,丁艳艳²

(1.光电信息控制和安全技术重点实验室,河北 三河 065201;2.华北科技学院人文社会科学学院,河北 三河 065201)

摘要:充分利用了FPGA的硬件资源,提出一种采用电路逻辑设计的FPGA来实现两点校正;利用FPGA中的浮点加法器、浮点除法器、浮点乘法器,以及内部RAM、ROM存储器,可以实时计算校正系数,然后对线阵红外探测器进行非均匀性校正,保证了校正精度。同时,充分利用FPGA并行处理能力强的特点,使系数、图像数据的读取在一个时钟周期内完成。

关键词:线阵探测器;非均匀校正;两点校正;现场可编程门阵列(FPGA)

中图分类号:TN215 文献标识码:A 文章编号:1673-1255(2012)03-0077-05

Non-uniformity Correction of Linear Array Detector Based on FPGA

GAO Wen-qing¹, XU Shi-wei¹, LIU Yan-yan¹, DING Yan-yan²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China;

2. School of Humanities and Social Sciences, North China Institute of Science and Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract: Based on the FPGA hardware resources, a FPGA in the logic circuit design is presented to achieve the two-point correction. The floating-point adder, floating-point divider, floating-point multiplier and the internal RAM, ROM memory in FPGA can be used to calculate the correction factors in real time, and then the non-uniformity correction is completed on the linear array infrared detector, thus the correction accuracy is ensured. At the same time, the coefficient and the reading of image data can be completed in a clock cycle by using the parallel processing ability of the FPGA.

Key words: linear array detector; non-uniformity correction; two-point correction; FPGA

红外探测器各个单元的响应度的不一致,导致了红外图像的不均匀,严重影响其成像质量,因此必须对其进行非均匀性校正。尽管非均匀性校正有很多种方法,但目前应用较多的还是普遍采用的基于标定的两点(或多点)校正法。两点校正算法的流程简单固定,主要以乘法和加法运算为主,十分适合用FPGA实现。

文中就这种算法原理及算法实现加以探讨,提出一种采用电路逻辑设计的FPGA来实现两点校正。该方法利用FPGA中的浮点加法器、浮点除法器、浮点乘法器,以及内部RAM、ROM存储器,可以实时计算校正系数,然后对焦平面器件线阵红外探测器进行非均匀性校正,保证了校正精度。同时,充

分利用FPGA并行处理能力强的特点,使系数、图像数据的读取在一个时钟周期内完成,然后通过采用流水线技术进行非均匀性校正,大大降低了系统的工作频率,从而减少了噪声干扰。

1 两点校正算法原理

红外探测器非均匀性校正根据获得非均匀性校正参数方法的不同原理,可将校正方法分为参考辐射源法、离焦法、统计平均法和神经网络法等多种方法^[1]。其中有的方法已在实际中应用,有的正处在理论探索和实验室研究阶段。按校正方法分为两大类,基于黑体(calibration based)的校正和基于场景

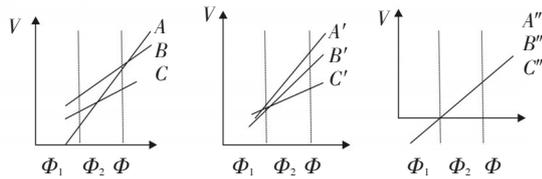
收稿日期:2012-04-19

基金项目:国家部委基金(9140C150105100C1502)

作者简介:高文清(1979-),男,黑龙江双鸭山人,工学学士,工程师,主要研究方向为信号与信息处理。

(scene based)的校正。

一点校正法对于各像元响应度接近的焦平面阵列图像的不均匀性校正可以得到优质的图像,而且实现起来非常简单。但一点校正法是建立在焦平面阵列各像元的响应率随温度变化相同这一假设的前提下,只是修正了输出信号的偏移因子,而无法确定增益因子,因而不能很好地消除固定图像噪声对像质的影响。图1b是一点校正算法的示意图,从算法和图1中不难看出这种算法实质上只对光敏元的偏置系数作了补偿,没有对增益校正,因而当目标的辐射通量偏离定标点时,空间噪声很大,校正范围很小。



(a)器件的响应曲线 (b)一点校正示意图 (c)两点校正示意图

图1 非均匀校正示意图

两点校正法是最早研究的基本方法之一,其原理简单,计算量小,实时实现比较容易,是目前焦平面阵列成像系统中使用最广泛的一种校正方法。从非均匀性的产生原因中可以看到,非均匀性主要表现为下面两种形式:其一是独立于输入信号的偏移量(即直流分量)非均匀性;其二是由于探测单元对输入的响应不均匀而造成的增益非均匀性。由于偏移量非均匀性与增益非均匀性产生的固有噪声强加在图像上而产生误差,通过对焦平面阵列各像元的增益与偏移量非均匀性进行校正,能有效地提高图像的质量。两点校正法是建立在两个假设条件下:①每个探测单元的响应是线性的。这一假设在探测单元响应的大部分区域是成立的,只有在输入很小和接近饱和时才有比较大的非线性,在忽略两端误差的情况下可以认为探测单元的响应是线性的。根据线性模型的数学公式,只需对直线上两点进行定标测量,便可求出直线,从而对非均匀性进行校正。②探测单元的响应必须具有时间的稳定性,否则,定标数据在使用时就会失去意义^[2-4]。在此条件下,红外阵列探测器在均匀辐射背景下任一像元的响应输出可以表示为

$$X_i(\Phi) = R_i\Phi + O_i \quad (1)$$

式中, $X_i(\Phi)$ 为像元的响应输出值; Φ 为辐射通量;

R_i 和 O_i 为红外阵列探测器第*i*行像元的增益和偏移量,对于每一个像元, R_i 和 O_i 的值在两个标定点内是固定的,并且不随时间变化。图1a是具有不同增益和偏移量的两个像元的响应输出曲线示意图,从中可以看出响应输出曲线的截距反映出偏移量的不均匀性,曲线的斜率反映出增益的不均匀性。非均匀性校正就是要使曲线A、C重合于标准曲线B。将曲线A、C作平移变换可得到图1b所示的3条曲线,再将A、C曲线以B曲线为标准做旋转变换得到图1c所示的一条曲线,这样就实现了曲线A、C的校正。其校正增益和偏置系数的计算如下

$$X_n(\Phi) = K_i X_i(\Phi) + A_i \quad (2)$$

式中, K_i 、 A_i 分别为两点校正中的校正增益和校正偏移量,其中 $K_i = \frac{X_n(\Phi_2) - X_n(\Phi_1)}{X_i(\Phi_2) - X_i(\Phi_1)}$, $A_i = X_n(\Phi_2) - K_i X_i(\Phi_2)$; $X_i(\Phi)$ 为校正前的输入值(像元响应值); $X_n(\Phi)$ 为校正后的输出值。

2 利用FPGA内宏模块的电路逻辑设计实现两点校正

两点校正算法的硬件采用现场可编程门阵列(FPGA)实现。文中选用Altera公司Stratix II系列EP2S60F1020C5,单片容量可达254万门,可提供255个M4K RAM、144个18 bit乘法器,信号处理速率高达100 MHz以上。在Quartus II 9.0集成环境下,使用Verilog硬件描述语言进行编译。由于Quartus II 9.0中的MegaWizard提供了优化过的乘法器、加法器等模块,所以利用这些MegaWizard可以较灵活实现两点校正算法,能够很精确的控制数据延时。

2.1 两点校正流程

采用一种480×6扫描型线阵探测器。这种红外线阵探测器经AD转换芯片输出14 bit的数字信号,输出信号并非按顺序依次输出,而是交替输出,需要对信号进行重新排序整理以利于后面处理。

两点校正流程图如图2所示。主要分3个步骤:

(1)首先统计256个数据包(每个数据包包含480个数据)。在FPGA内部设置内部存储器RAM,统计各像素点(共480个像素点)时域数据(每个像素点对应256个数据)的总和,以及整帧像素点(480×256=122 880个数据)之和。

(2)计算各像素点的时域均值、整帧均值,按式

(2)计算校正增益和偏置系数,并存储在内部ROM存储器中。

(3)读出ROM存储器中增益和偏置系数,按式(1)做数据转换运算。包含1个乘法和1个加法运算。

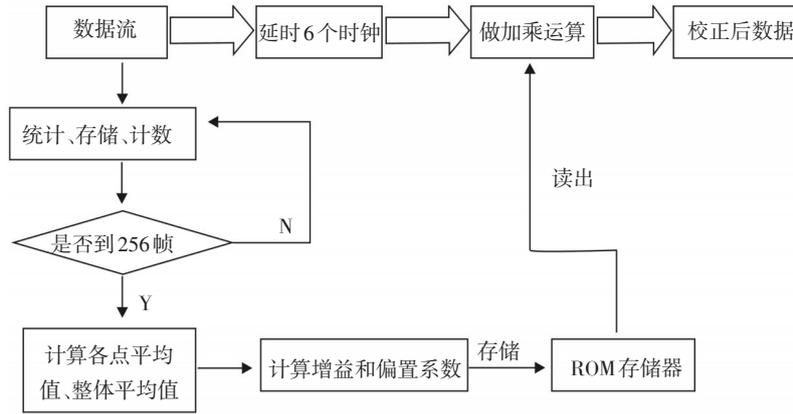


图2 两点校正流程图

2.2 两点校正的电路逻辑设计

下面就利用 Quartus II 9.0 中的 MegaWizard 模块,实现红外图像非均匀性两点校正算法。以 480×6 线阵红外探测器为例。

首先需要统计 256 个数据包(每个包含 480 个数据),计算各像素点的时域平均值和整帧平均值。 $X(i)$ 数据为 14 bit 数据,FPGA 用 Altera 公司的 Ep2s60,选用 FPGA 内部 2 块存储器,其大小为 512×32 bit 的 RAM,用 Verilog HDL 硬件描述语言编写相应的逻辑控制时序、寄存器的读写时序、数据的统计运算和数据的均值计算。通常情况下,一片内部 512×32 bit RAM 即可以作为统计存储用,但在实时操作过程中,对 RAM 的即读又写的顺序操作,虽然可以通过流水设计实现,但时钟的抖动对它的影响很难控制。所

以文中设计采用 2 个 RAM 存储器做类似乒乓操作,这样就省去了对时钟倍频或流水操作,确保了系统的稳定性。实际上 256×14 bit=22 bit(22 位)数据宽度已足够用,为了与 RAM 数据端口一样,将 14 bit 数据扩展为 32 bit 数据,高位用零补充。每个包的 480 个计数作为 RAM 的读、写地址(1 到 480 有效)。在数据有效传输期间,每个时钟的上升沿先从一个 RAM 中读出相应地址里面的数据,在下降沿与当前数据累加,并存储在另外一片 RAM 中,直到 256 个数据包结束。具体电路逻辑图如图 3 所示。

对于两点校正来说,校正过程需要做高低两个不同温度的黑体辐射。分别计算在这两种情况下的整帧平均值、各像素点的时域平均值。通过串口命令,控制 RAM 的读使能,得到不同温度下的均值。按

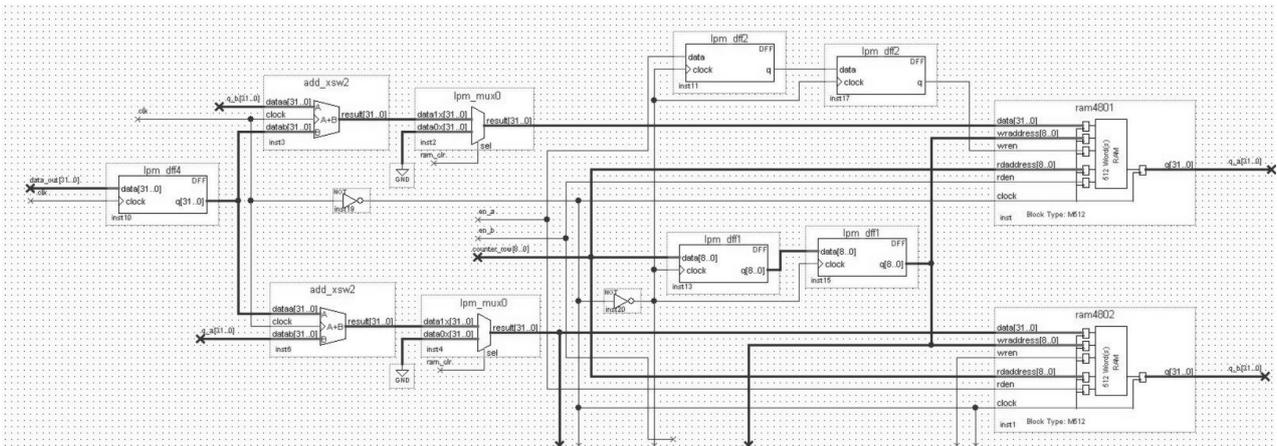


图3 像素累加存储的电路逻辑

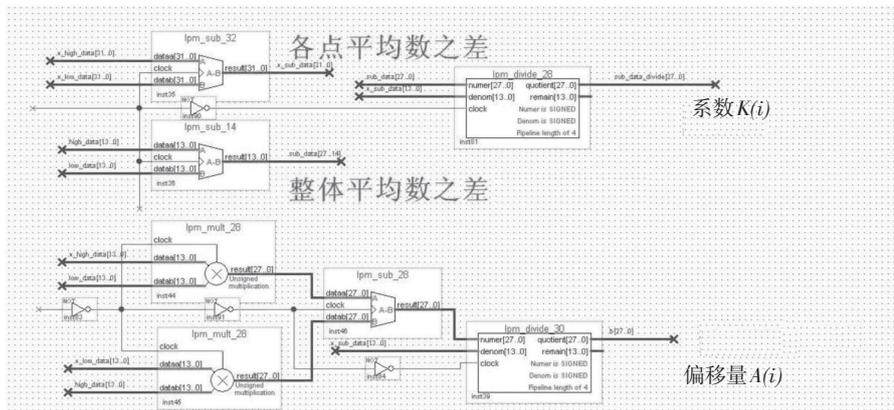


图4 校正系数计算的电路逻辑

式(2)计算系数 $K(i)$ 和偏移量 $A(i)$,在调用除法模块时,为了保证精度,把被除数 $X_n(\Phi_2) - X_n(\Phi_1)$ 左移14位。经除法运算后得到结果的低14位(总28位)即为实际运算结果。具体电路逻辑图如图4所示。

得到的校正系数 $K(i)$ 和偏移量 $A(i)$,为了方便存

取,选用一个 480×32 bit的RAM存储器,低16位存储偏移量,高16位存储乘系数。这样无论是读出数据还是写入数据,可以在同一时钟完成两个系数的读或写,同步性好。通过实际操作,在得到比较满意的图像后,可以利用Quartus II中的在线系统寄存器内

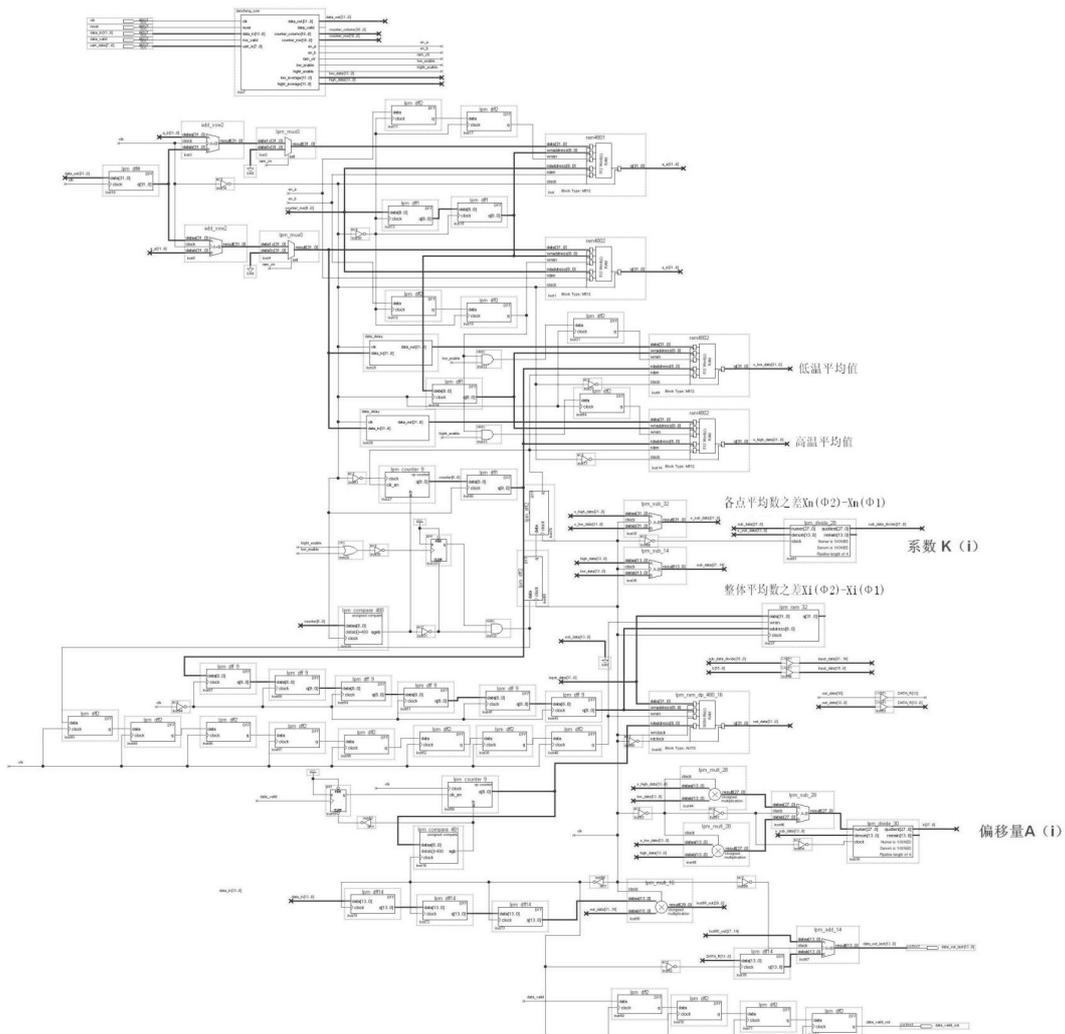


图5 算法实现的整体逻辑电路

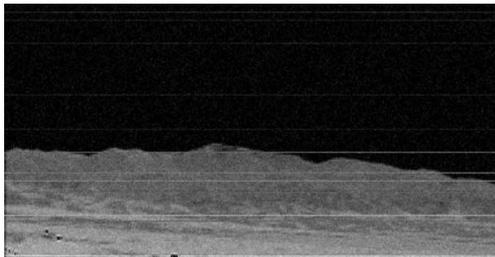
容编辑器(in-system memory content editor)对RAM进行初始化设置。首先对片内RAM设置一个480×32 bit的HEX初始化文件;做完两点校正后可以从in-system memory content editor窗口下读出RAM中存储的内容,导出并另存这个32 bit的HEX文件;用这个文件替代RAM设计中的初始化文件。这样就避免将校正数据存入FPGA外部存储器的麻烦,在程序下载到E²PROM时会自动把这个初始化文件同时烧写到E²PROM中。

建立好系数的查找表存储器后,对原始数据做乘、加运算,得到最终的校正结果。因为在做系数计算过程中,从数据有效到系数得出相当于延迟8个时钟。在对原始数据转换过程中,由于做乘法与加法运算已经有了2个时钟的延时,所以还要对数据做6个时钟的延时。整体逻辑框图如图5,至此校正结束。

2.3 非均匀性校正结果

基于480×6长波致冷型线阵红外探测器,该长波致冷型线阵红外探测器定标温度范围为-30~+70℃。采用上述两点法,由FPGA硬件实现红外线阵列探测器的实时非均匀性校正,形成图像大小为480×512。

由于线阵红外探测器采用机器扫描方式形成图像,校正前的线阵图像呈线条状,看不清楚图像轮廓,图6a是480×6线阵探测器非均匀校正前形成的图像。此图像经过坏元替换和适当的图像增强滤波处理后,采用文中设计的两点法非均匀校正算法进行非均匀性校正,得到图6b的图像,从图像的均匀度



(a) 480×6线阵探测器非均匀校正前形成的图像



(b) 480×6线阵探测器非均匀校正后形成的图像

图6 校正前后形成的图像对比

和清晰度上看效果比较理想。

两点校正法技术成熟、硬件实现容易、校正效果明显、图像较为均匀,缺点是长时间工作对探测器的漂移需要周期性采样定标,更新参数,需遮挡镜头停止工作。

3 结束语

非均匀校正一直是红外图像处理中的关键技术,两点非均匀性校正的最大优点就是算法实现的简单性,易于在实时系统中实现。本设计使用FPGA的片内存储器存储校正系数,充分利用了FPGA的硬件资源,考虑了FPGA的结构特点。像素统计实时存储的稳定和速度是实现两点校正的前提,乘法和加法运算是实现两点校正的核心。采用FPGA实现乘加运算,是硬件实现过程,容易实现硬件运算操作。FPGA同时从片内存储器读取增益和偏值系数,然后执行乘法和加法运算,整个过程延迟大约几纳秒,非常容易实现实时的非均匀性校正。

参考文献

- [1] 沈晓燕,皮德福.一种红外焦平面非均匀性校正改进方法的研究[J].红外技术,2002,24(1):4-7.
- [2] 刘会通.红外焦平面阵列剩余非均匀性校正[J].激光与红外,1998(5):305-307.
- [3] 刘志才.基于场景的SPRITE热像仪的非均匀性校正[J].红外技术,2000(1):37-39.
- [4] Harris J G.Nonuniformity correction using the constant-statistics constraint[J].SPIE,1997,3061:895-905A.
- [5] 张永量,肖山竹,卢焕章.基于电路逻辑设计的图像处理[J].红外技术,2000(2):91-94.
- [6] 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(6):608-610.
- [7] Zhou Huixin, Li Qing, Liu Shangqian, et al. Nonuniformity and its correction principle of infrared focal plane arrays[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(6): 446-448.
- [8] 陈锐,谈新权.红外图像非均匀性校正方法综述[J].红外技术,2002(1):1-3.
- [9] 王钰,陈钱,殷德奎,等.实时红外图像非均匀性校正技术研究[J].红外与毫米波学报,1999,18(2):151-154.
- [10] 李洋,刘亚侠.TDI CCD相机系统响应非均匀性校正[J].仪器仪表学报,2006,27(S2):1226-1227.
- [11] 赵岩.红外焦平面阵列非均匀校正算法研究[D].长沙:国防科技大学,2007.
- [12] 刘宇,吴志明,蒋亚东.非制冷红外探测器非均匀性的校正方法[J].传感器技术,2004(5):59-64.