

多波段线扫红外图像的实时预处理系统

黄新栋, 张 涌

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要:探讨了在实际工程应用中红外背景和弱小目标的特性,并针对弱小目标提出改进的最大中值滤波算法来提高图像信噪比,并级联 Robinson 滤波对背景进行有效抑制。两种算法在 FPGA 中实时实现,为后续的计算节省了宝贵的时间。处理后的图像通过 PCI 总线传送到主机进行验证。实验表明,该方法能够消除严重的噪声,并能对背景进行很好的抑制,具有很高的实用价值。

关键词:红外目标;背景抑制;Robinson 滤波;最大中值滤波;FPGA

中图分类号:TP751.1

文献标识码:A

Real-time Pretreatment System of Multichannel IR Image

HUANG Xin-dong, ZHANG Yong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The article discusses the characteristics of infrared background and small target in actual project application, an advanced max-median filter algorithm is proposed to improve SNR performance, and Robinson filter is used to suppresses background effectively. The two algorithms are implemented in FPGA in real time and save much time for other algorithms. The pretreated images are transmitted to PC by PCI bus. The experimental results show that the method can eliminate serious noise, and can suppress the background effectively.

Key words: infrared target; background suppression; Robinson filter; max-median filter; FPGA

1 引 言

红外告警系统通过物体的红外辐射成像。随着红外探测器和计算机技术的发展,红外成像技术越来越成熟,红外探测器向大面阵和长线列方向发展,红外系统朝多传感器方向发展,数据的容量越来越大,使得对图像处理的实时性要求越来越高。

红外告警系统中图像要进行的算法有:预处理、潜目标提取、目标跟踪、航迹处理等。后三种处理往往需要较大的计算量,而且算法的复杂度与效果成正比,为了能为后面的算法提供更多的时间裕量,要尽量减少图像预处理的时间。

随着数据融合技术的发展,为了提高红外系统的探测性能,经常会用多个探测器构成系统,以期在探测距离、虚警概率等方面有所突破^[1]。本文针对的是3个288元线列探测器构成的系统,包括2个

长波和1个中波探测器。系统扫描一周是16384列,像元分辨率是14位,那么一帧图像就有 $16384 \times 288 \times 3 \times 14\text{bit}$ 的数据量,若采用软件算法进行预处理,将会占用大量的时间,对于跟踪告警系统,留给后续跟踪算法的时间就相应减少了,不利于提高系统性能。一种能够快速完成图像滤波的方案,对于改善红外系统的性能,提高对目标的适应能力和跟踪精度,具有重要意义。

针对图像预处理阶段运算结构相对简单,本文采用现场可编程门阵列(FPGA)对图像实时预处理。提出了一种基于FPGA的高速图像滤波器的方案,通过流水操作,在很短的时间内就可以完成对这

作者简介:黄新栋(1980-),男,博士,主要从事红外系统方面的研究。E-mail:huangxindong13@163.com

收稿日期:2008-02-27

样大容量的红外图像的滤波,并通过带 wishbone 总线的 PCI 核送到 PC 机上进行了验证。

2 红外背景和目标特性分析

一幅包含小目标的红外图像 $f(x, y)$ 可以用下式描述:

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_B(x, y) + n(x, y)$$

式中, $f_T(x, y)$ 表示目标; $f_B(x, y)$ 表示背景图像; $n(x, y)$ 表示噪声。在红外应用中,一般目标距离较远,加上在大气传输环境中的能量衰减及强背景、传感器噪声的影响,造成目标在红外成像中体现为弱小特性。噪声是在数据采集、传输和处理中叠加的干扰信号,红外图像平面上的噪声主要包括白噪声、线列扫描方向上的非平稳 $1/f$ 噪声以及传输通道上的干扰,通常噪声处在图像的高频部分。在地对空的告警系统中,背景主要是大面积缓慢变化的低频成分。例如空中的云层,在空间上往往呈大面积的连续分布状态,在红外辐射的强度上也呈渐变过渡状态,从而使得背景红外图像在图像灰度空间分布上具有较大的相关性^[2-3]。

红外图像预处理的目的是为了抑制背景和噪声,增强目标能量,以简化后续算法的复杂度。

3 算法描述

在去噪方面,近年来很多学者提出了一些算法,如均值滤波、中值滤波和最大中值滤波等,以及在此基础上提出的一些改进算法。均值滤波是线性滤波,对加性高斯噪声有着较好的平滑作用,但对脉冲式高频分量的抑制效果却不理想。为此,研究者提出了中值滤波理论。尽管中值滤波对于窄脉冲干扰具有良好的抑制效果,尤其是去除探测器椒盐噪声方面有很好的效果,但同时也会使目标强度降低或直接使小目标被滤除^[4]。因此在中值滤波的基础上提出了最大中值滤波方法,其在去除噪声的同时,可有效保护图像的几何特征。

背景抑制是目标检测中非常重要的一步,如何抑制背景突出目标成为近年来的研究热点,同时也发展了多种以图像滤波为主的实用方法,如高通滤波、Robinson 算子、形态学滤波等。

性能好的算法普遍为复杂度较高或者先验依赖较强,实用的算法往往需要在性能、复杂度和先验依赖性之间进行折中。综合考虑到在 FPGA 结构中算法的实现和效果,本文采用了最大中值滤波和 Rob-

inson 算子级联的方法。

3.1 最大中值滤波

最大中值滤波是在图像中选取一个滑动窗口,分别计算该滑动窗内像素的水平、垂直和对角 4 个方向上的中值,选择最大中值作为输出图像的结果。设最大中值滤波器输出为:

$$y(m, n) = \max(z_1, z_2, z_3, z_4)$$

其中, z_1, z_2, z_3 和 z_4 分别为两个对角方向、水平中心线以及垂直中心线的中值^[5]。

滤波模板的形状和大小会影响到弱小目标的提取。在文献[3]中提到,最大中值滤波会减小目标的大小。本文认为,这取决于窗口大小和目标大小。对于 5×5 的窗口,如果目标点小于 3×3 的情况下,会发生这种情况。而实际上由于探测器及光学扩散等方面的影响,在远距离探测时,目标的大小一般在 2 个像素以上^[6]。并且在外场实验中,我们也证实,在地对空的红外图像中,飞机和导弹的成像一般为至少几个像素以上,就算距离再远也很难出现单个像素的点目标的情景。考虑到小于 3×3 目标的情况,我们对最大中值模板进行改进,采用圆形的模板,如图 1 所示。由于模板的各向同性,对图像和图像中目标的旋转不敏感,同时四个方向的中值我们用次大值代替,这样保证了只要目标有 2 个像素就不会被滤除,这样在滤除噪声的同时,最大限度的保留了目标的大小和能量。

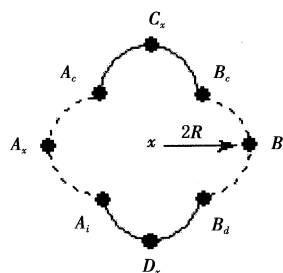


图1 最大中值模板

3.2 Robinson 滤波

对于 5×5 的 Robinson 滤波是在图像中取滑动窗口,取窗口边缘数据的最大值 $Z_{\max}$ 和最小值 $Z_{\min}$,将中心值与 $Z_{\max}$ 和 $Z_{\min}$ 进行比较,若中心值在二者之间,则对中心值取 0,否则,取中心值与 $Z_{\max}$ 或 $Z_{\min}$ 的差值的绝对值。数学表达式如下:

$$X = \begin{cases} X - \max(X_i) & X \geq \max(X_i) \\ \min(X_i) - X & X < \min(X_i) \\ 0 & \min(X_i) < X < \max(X_i) \end{cases}$$

针对天空中具有大量云层的红外图像,实际常用带保护带的非线性非参数滤波器 Robinson 算子,滤波器尺寸为 5×5 ,保护宽度为 1,其抑制背景、突出小目标的能力较好^[7-8]。

用 Robinson 算子做背景预测的好处就是直接可以得到残差图,不必像其他算法一样先预测背景,再将背景图与原图像进行相减得到残差图。这样不仅简化算法,在硬件设计的时候又节省了资源。

4 硬件实现

预处理系统框图如图 2 所示,图像接收采用 LVDS 接收方式,提高了抗干扰能力。图像在 FPGA 内进行先进行非均匀性校正,然后由最大中值滤波滤除噪声,接着用 Robinson 算子进行背景预测。将图像通过 PCI 总线传给 PC 机进行后续处理。这里 PCI 协议采用了开放 IP 组织 Opencores 提供的 WB-PCI 桥核来实现。用户端只需要关心 wishbone 总线协议的接口设计即可。这里略去非均匀性校正的处理。

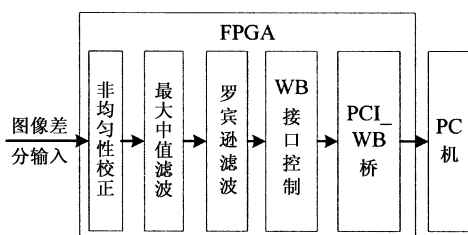


图2 预处理系统框架

空域模板卷积滤波是最常见也是使用最多的滤波方法。模板卷积滤波主要是采用一个滑动的滤波模板,在图像空间内对进入窗口的数据进行特定的变换操作。在硬件实现中分三步实现空域模板操作,第一步:控制存储器,把图像数据按要求的格式写入存储器;第二步:控制数据从存储器读出,并对数据进行整理形成模板形式;第三步:进行排序、比较等操作。如图 3 所示。

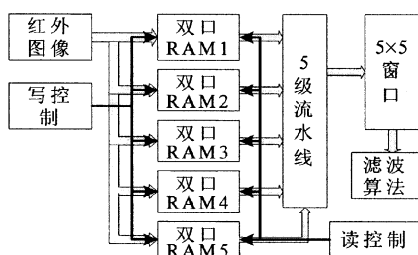


图3 FPGA实现框图

本设计采用了FPGA片内存储资源来构造双口

RAM,这样不但省去了外接存储器的麻烦,更重要的是,双口RAM具有两套独立的地址、数据和控制信号,使得读与写操作能够在一个周期内完成,能够满足流水线操作的要求。

由于是 5×5 的窗口,设计了5个双口RAM,每个双口RAM能够缓存1列数据。在往双口RAM写数据的时候,由图像列同步信号和像素时钟产生读写地址及读写控制信号,列数据依次循环往双口RAM写。在读数据的时候,每个时钟同时读出5个双口RAM的数据,再进行5级流水线延迟缓存,这样读一个 5×5 的窗口只需要5个时钟周期。

为了保证数据的同步性和顺序性,5个双口RAM共用了读写控制信号和地址信号,只是在写的时候控制RAM的写使能切换。对于最大中值滤波和Robinson滤波, 5×5 窗口的实现是相同的,只是后面对窗口数据的操作不同。

对于最大中值滤波,由于模板为圆形,所以在对角方向为3个数排序,在水平和垂直方向为5个数取次大值。这里主要说明对5个数据的排序。如图4所示, a, b, c, d, e 为5个待排序的数,在第一级A1中去掉最小值,保留两个大值进入第二级A2,同样取两个大值,在第三级中对3个数取中值,最后输出即为5个数的次大值。这样处理的方法比直接对5个数数据进行排序要快,思路简单,能够在1个时钟周期内得到比较结果,保证了流水线操作的有效性。

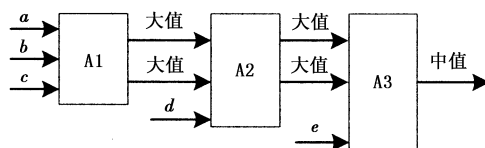


图4 五点排序

对于Robinson滤波,窗口边缘有16个数,要取出最大值和最小值,将16个数分成4组,如图5所示, $A1, A2, A3, A4$ 为四点比较器,其结构如图6所示。由4个4点比较器对四组数做第一级比较,每组输出一个最大值和一个最小值,将得到的4个最大值送入B1得到最大值,将4个最小值送入B2得到最小值,然后根据公式与模板中心值进行比较处理。两级运算并行运行,在一个时钟周期便可输出比较值。为了保证时序的可靠稳定,可在级间插入D触发器。

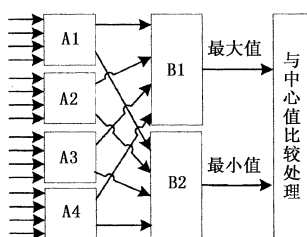


图5 Robinson 滤波

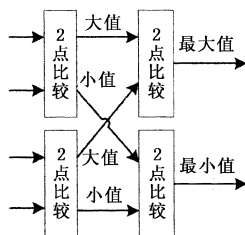


图6 四点比较器

对于 5×5 的模板运算,上下边缘的两行和数据无法处理到,本设计把边缘像素的结果保留成原值不进行处理。这样只对每列的第三个数据开始操作。由于是线列 360° 扫描,所以图像头尾衔接,不存在左右边缘的处理问题。

5 实验结果

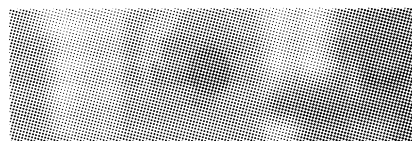
本系统采用 Xilinx 公司的 Virtex 系列的 xc2v1000 器件,这款芯片拥有 100 万个逻辑门,5120 个 Slices, 720Kbit Block RAM, 160 Kbit 的分布 RAM。设计在 Xilinx 公司的开发工具 ISE 7.1 下实现。

三个探测器数据并行进入 FPGA。一组滤波需要 $288 \times 5 \times 16\text{bit}$ 的存储器,每帧图像需要两组滤波。那么,级联算法总共所占用的存储资源是 $(288 \times 5 \times 16) \times 2 \times 3 = 135\text{Kbit}$ 。

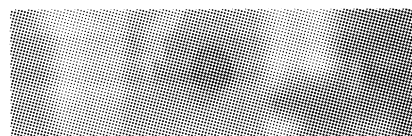
线列扫描图像时钟是 7.5MHz,每帧是 16384 列 $\times$ 288 行,加上列间的无效数据,传输一帧线扫图像的时间大约为 0.75s。考虑到输出延迟,每级算法延迟 2 列数据,再加上 5 个数据的流水线延迟,那么两级算法总共延迟的时间是 $(288 \times 2 + 5) \times 2 / (7500000)$,约为 $155\mu\text{s}$,与一帧图像 0.75s 的时间相比,几乎不占用处理时间,完全满足实时性要求,且为后面的算法留下了大量宝贵的时间。

通过连接真实头部采集的红外信号进行算法处理,并通过 PCI 总线传到 PC 机上进行显示。如图 7 所示,截取图像为平行光管实验中长波局部 800×288 的图像。图 7(a)是在极致条件下的噪声图像,图 7(b)为最大中值滤波后的图像,图 7(c)为 Robinson 滤波后的图像。图像中噪声全部被滤除,小目

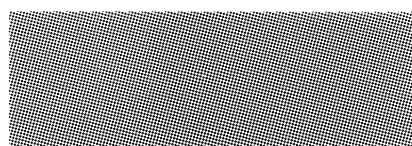
标大小和能量没有得到明显削弱,信噪比有了显著的提高,可以看到效果比较理想。



(a) 极致条件下的噪声图像



(b) 最大中值滤波后的图像



(c) Robinson 滤波后的图像

图7 平行光管实验中长波局部图像

6 结 语

本文设计的级联算法具有极高的实时性,保证了后级的目标提取和跟踪算法的具有充裕的时间进行更为复杂和有效的算法。改进的算法使用信噪比得到很大的提高,同时保留了目标的大小和能量,具有较高的实际工程应用价值。

参考文献:

- [1] 朱牡丹,曾祥鸿,等. 双波段红外目标数据融合的研究[J]. 红外技术,2003,25(6):39-41.
- [2] 惠建江,刘朝晖,等. 红外图像的噪声分析和弱小目标的增强[J]. 红外技术,2005,27(2):135-138.
- [3] 于振红,朱振福,等. 基于双门滤波的红外点目标检测方法[J]. 系统工程与电子技术,2005,26(9):1195-1197.
- [4] 周进,吴钦章. 深空大视场弱小目标的实时检测方法[J]. 光学技术,2006,32(1):134-140.
- [5] Desponde S D, ER M H, Ronda V, et al. Max-mean and max-median filters for detetion of small-targets[J]. SPIE, 1999,3809:74-83.
- [6] 王卫华,牛照东,等. 基于时空域融合滤波的红外运动小目标检测算法[J]. 红外与激光工程,2005,34(6):714-718.
- [7] 关文龙,张涌,等. 复杂背景下红外小目标实时识别方法研究[J]. 红外与毫米波学报,2001,20(6):433-436.
- [8] 罗军辉,姬红兵,等. 一种新的红外小目标检测算法及其应用[J]. 半导体光电,2007,25(2):290-293.
- [9] 章毓晋. 图像处理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.