

文章编号: 2095-4980(2022)07-0713-05

基于 FPGA 的短波红外图像灰度级拉伸算法实现

费 成^{1a}, 康佳龙^{1a,1b}, 刘俊良^{1b}, 康英杰^{1a}, 李华伟^{1a}, 李永富^{*1a}, 顾 溢^{2a,2b},
刘兆军^{1b}, 赵 显^{*1a}, 方家熊^{1a,2a}

(1. 山东大学 a. 光学高等研究中心; b. 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237; 2. 中国科学院 a. 上海技术物理研究所, 上海 200083; b. 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘 要: 为了增强短波红外成像仪的成像对比度, 提高目标的识别率, 介绍了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的灰度拉伸算法的实现方法。利用视频数据两帧之间灰度分布近似的特性, 通过统计上一帧图像的灰度分布, 计算图像拉伸所需要的参数, 处理当前帧的图像, 达到实时处理的效果。在灰度统计模块中, 利用 FPGA 的片上块随机存储器(Block RAM)资源, 采用非倍频的流水线数字逻辑设计, 避免了跨时钟域的操作, 降低了系统状态机的复杂度, 提高了系统的工作频率。采用国产 320×256 元 InGaAs 面阵探测器, 搭载了 Xilinx Artix-7 系列芯片的实验平台进行实验, 仿真结果表明, 该方法能有效提高短波红外图像的对比度, 具有占用资源少、运算速度快、成本低、可移植性高等优点, 满足短波红外成像仪实时灰度拉伸处理的设计要求。

关键词: 灰度统计; 灰度拉伸; 现场可编程门阵列; 块随机存储器

中图分类号: TN911.73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020455

Implementation of grayscale stretching algorithm for short-wave infrared image based on FPGA

FEI Cheng^{1a}, KANG Jialong^{1a,1b}, LIU Junliang^{1b}, KANG Yingjie^{1a}, LI Huawei^{1a}, LI Yongfu^{*1a},
GU Yi^{2a,2b}, LIU Zhaojun^{1b}, ZHAO Xian^{*1a}, FANG Jiaxiong^{1a,2a}

(1a.Center for Optics Research and Engineering; 1b.School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao Shandong 266237, China; 2a.Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083; 2b.Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: In order to enhance the contrast of short-wave infrared image and improve the recognition ratio of target, a method of grayscale stretching algorithm based on Field Programmable Gate Array(FPGA) is proposed in this paper. According to the similar grayscale distribution between two consecutive frames, the parameters needed for image stretching are obtained by calculating the grayscale distribution of the previous frame, so as to process current frame, and real-time processing is achieved. In the grayscale statistics module, the design of non-frequency-multiplied pipelined logic is applied using the Block RAM resources on the FPGA chip. The proposed method avoids clock domain crossing in the grayscale distribution calculation process, reduces the complexity of the state machine, and improves the maximum operating frequency of the system. A domestic 320×256 InGaAs detector and an experimental platform based on Xilinx Artix-7 series FPGA are utilized to carry out the experiment. The results show that this method can effectively improve the contrast of the short-wave infrared image, which has the advantages of less resource utilization, fast computing speed, low cost, high portability, etc. and meets the design requirements of the real-time grayscale stretching of the short-wave infrared camera.

Keywords: grayscale statistics; grayscale stretching; Field Programmable Gate Array; Block RAM

收稿日期: 2020-09-13; 修回日期: 2020-10-20

基金项目: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室开放课题资助项目

*通信作者: 李永富 email:yfli@sdu.edu.cn; 赵 显 email:zhaoxian@sdu.edu.cn

伴随着人类海上作业活动的日益增加,对海上目标图像获取的需求日渐增长。但受海雾散射、吸收等因素影响,成像系统的成像质量会有所下降,导致对海上目标进行识别的难度增加。近年来,飞速发展的短波红外成像技术在水汽、雾霾、晨昏微光等恶劣条件下展现出良好的成像效果^[1-2],因此在海洋监控、环境监测和微光夜视成像等众多领域有着广阔的应用前景^[3-4]。但由于海上景物目标比较单一,往往会出现图像对比度偏低和成像目标轮廓不清晰等问题。为解决这些问题,通常会对短波红外图像做灰度拉伸处理,以提高图像对比度,改善视觉效果,从而提高目标的识别率^[5-6]。

实现短波红外图像实时灰度拉伸的关键在于实时灰度统计。通过统计上一帧图像的灰度分布计算拉伸参数,来处理当前帧图像,并采用流水线式的方法进行处理,可达到实时视频流输出的效果。

目前常用的短波红外图像的实时灰度统计方法主要包括利用高性能 DSP 芯片的方法和基于 FPGA 芯片 Block RAM 资源的像素时钟倍频方法 2 种。前者成本较高,且灵活性不足。后者由于需要倍频时钟,在不同的时钟周期内分别完成 Block RAM 数据的读出、累加、写入等操作,系统状态机设计复杂^[7-8]。此外,Block RAM 的读写操作频率受 FPGA 速度等级的限制,对像素时钟进行倍频来读写 Block RAM 实际上严重限制了像素时钟频率,降低了系统运行速度。

为了解决上述问题,本文采取了基于 FPGA 芯片 Block RAM 资源的非倍频流水线数字逻辑设计,与 DSP 芯片为核心的方法相比,该方法具有更大的灵活性、便利性和推广性^[9],并且简化了 FPGA 系统的状态机设计,提高了系统的工作频率,其成本较低,占用资源少,兼具上述 2 种方案的优点,一定程度上改善了上述 2 种方案的不足。

1 图像灰度拉伸原理介绍

由于大多数自然图像的灰度分布集中在较窄的区间内,其图像层次细节通常不够清晰^[10-11]。灰度拉伸的作用是让原图像的灰度再变换后广泛地分布在整个灰度级上,从而达到增强图像对比度和改善图像质量的目的。

图像灰度拉伸变换的表达式为:

$$G(x,y) = \left[\frac{F(x,y) - A}{B - A} \right] Z_{\max} \quad (1)$$

$$A = \min[F(x,y)] \quad (2)$$

$$B = \max[F(x,y)] \quad (3)$$

式中: x,y 为像元的行、列坐标; $F(x,y)$ 为位于第 x 行、第 y 列像元的灰度值; $Z_{\max}$ 为图像数据所能输出的最大灰度值。即如果图像数据输出的是 8 位二进制数,则 $Z_{\max}$ 对应的值为 255; A 为图像灰度的最小值; B 为图像灰度的最大值; $G(x,y)$ 为经过拉伸变换后图像的灰度值。

基于 FPGA 的短波红外图像拉伸算法实现的关键在于短波红外图像的实时灰度分布统计,根据统计结果求出图像灰度的最小值 A 和最大值 B 。用上一帧图像统计得到的参数,来对下一帧图像的数据进行拉伸,实现实时视频流的输出。考虑到短波红外图像受盲元与噪声等因素的影响,在统计其灰度分布的最小值与最大值时会有一定误差。为减小这个误差,选取一帧图像一定百分比数据最小值中的最大值作为 A ,选取一帧图像一定百分比数据最大值中的最小值作为 B 。一般情况下,这 2 个百分比建议分别设置为比死像元率和过热像元率稍大的值。

2 拉伸算法的 FPGA 实现方案

对于一幅分辨率为 $M \times N$ 的短波红外图像,若其灰度级属于 $[0,L-1]$ 这个区间,则在 FPGA 上配置一个深度为 L ,数据位宽为 K ,且保证 $2^K \geq M \times N$ 的 Dual-Port RAM,为了提高系统的工作频率,在 RAM 输出端口增加一级寄存器。用图像的灰度值作为 RAM 的地址, RAM 中的数据来表征相应灰度所对应的像元个数。

短波红外图像拉伸算法实现所使用的软件编程语言为 Verilog HDL,在 Vivado 集成开发环境下综合。算法采用 Mealy 型有限状态机实现,其结构如图 1 所示。该状态机共有

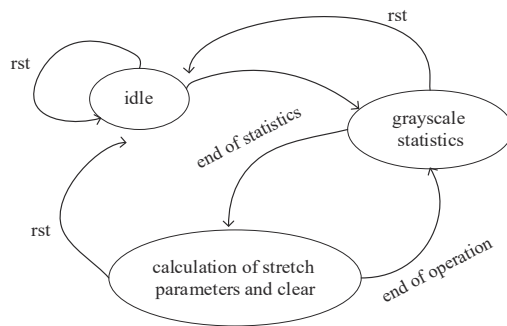


Fig.1 Design of system state machine
图 1 系统状态机设计

空闲、灰度统计和参数计算与清零这 3 种状态。当 rst 信号有效时，系统会一直处于空闲状态，否则跳转到灰度统计状态进行灰度分布统计；完成一幅图像的灰度分布统计后，再跳转到图像拉伸参数计算与清零状态来完成统计结果的读出与 RAM 的清零；而参数计算与清零完成后状态机又跳转到灰度统计状态，周而复始。

短波红外图像灰度统计状态下的结构原理图如图 2 所示，Pix_clk 为像素时钟，Pix_data 与 Data_valid 分别为像元的灰度数据与数据有效信号。图中的 RAM 用来完成短波红外图像灰度分布统计，其读出延迟为 2 个时钟周期。

在灰度统计状态下，RAM 的读出延迟为 2 个时钟周期，从读使能信号 Enb 有效到统计值的回写需要 3 个时钟周期，时序如图 3 所示。

在时钟上升沿来临时将 Addr_b_r2, Addr_b_r3, Addr_b_r4 (Addr_b_r2, Addr_b_r3, Addr_b_r4 分别是 Addr_b 延迟 2, 3, 4 个时钟周期后的值) 作比较，根据 Addr_b_r2, Addr_b_r3, Addr_b_r4 这 3 个值的关系，确定常数 C 的值为 1, 2 或 3。

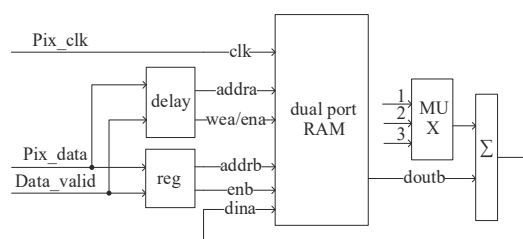


Fig.2 Schematic diagram of statistical state
图 2 统计状态原理图

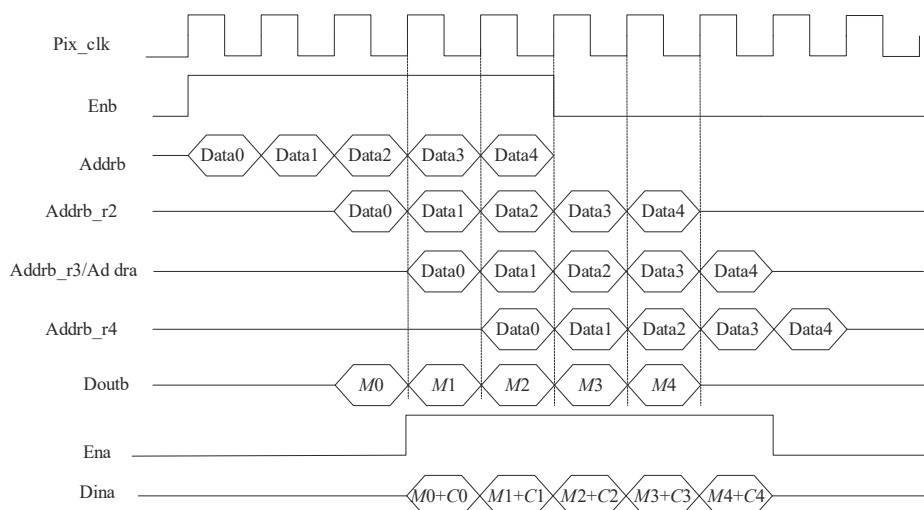


Fig.3 Sequence diagram of statistical state
图 3 统计状态时序图

当 Addr_b_r2, Addr_b_r3 和 Addr_b_r4 相等时，则将 Doutb 的输出值加 3 后回写到 RAM；当 Addr_b_r2 等于 Addr_b_r3，但不等于 Addr_b_r4 或者 Addr_b_r2 等于 Addr_b_r4，但不等于 Addr_b_r3 时，则将 Doutb 的输出值加 2 后回写到 RAM；其他情况时，则将 Doutb 的输出值加 1 后回写到 RAM。需要注意的是，在比较时，为了避免每次像元有效信号来临前，数据线上非像元数据与有效像元数据相等，造成回写数据有误的情况，应将像元有效信号与像元数据拼接起来进行比较。

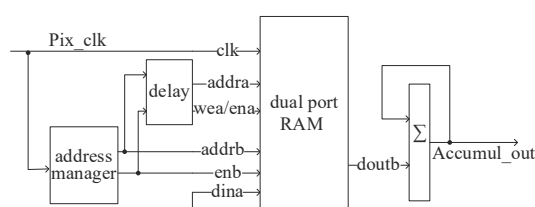


Fig.4 Schematic diagram of parameter calculation
图 4 参数计算状态原理图

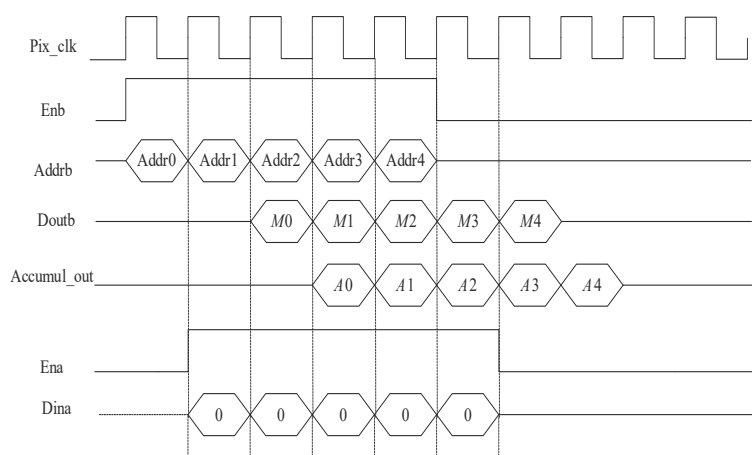


Fig.5 Sequence diagram of parameter calculation
图 5 参数计算状态时序图

短波红外图像拉伸参数计算与清零状态下的结构原理图如图 4 所示。Pix_clk 为像素时钟, address manager 为地址管理模块, 负责发送读取统计结果所需要的地址, 而 Accumul_out 则为统计结果进行累加后的输出值。

在拉伸参数计算与清零状态, 将 RAM 的读地址 Addr_b 与读使能 En_b 延迟 1 个时钟周期后, 送给写地址 Addr_a 与写使能 En_a, 并将写数据 D_{in} 赋值为 0, 来完成 RAM 数据的读取与清零, 其时序如图 5 所示。

在时钟上升沿来临时, 将统计结果 Dout_b 累加, 赋值给 Accumul_out。如图 5 所示, $A_0=M_0$, $A_1=M_0+M_1$, $A_2=M_0+M_1+M_2$, 以此类推。在时钟上升沿进行判断, 当累加结果 Accumul_out 小于一个较低的阈值时(整幅图像像素个数乘以一个较小的百分比), 则将该累加值所对应的灰度(RAM 的地址)赋值给 A , 直到累加结果大于等于该阈值时, 停止给 A 赋值, 此时累加值对应的灰度就是 A 的最终值; 当累加结果小于一个较大的阈值时(整幅图像像素个数乘以一个较大的百分比), 则将该累加值所对应的灰度赋值给 B , 直至累加结果大于等于该阈值时停止赋值, 此时累加值对应的灰度就是 B 的最终值, A 和 B 即是图像拉伸所需要的参数。

进行图像拉伸操作时, 在 FPGA 上配置一个除法器 IP 核, 利用上面所求的 A, B 与表达式(1)即可对原始图像数据做拉伸运算。整个灰度拉伸处理的总输出延迟为除法 IP 延迟加 2 个运算时钟周期延迟。对于 16 位灰度图像拉伸处理时, 除法 IP 输出延迟为 34 个时钟周期, 即总延迟为 36 个时钟周期。

采用倍频时钟进行灰度统计的方案与非倍频时钟进行灰度统计的方案相比, 在相同应用的情况下, 至少要多使用一个 PLL 进行时钟倍频, 占用的资源相对较多。且对于倍频时钟灰度统计方案来讲, Block RAM 的读出延迟为 2 个时钟周期, 完成数据的读出、累加、回写需要 5 倍频时钟来读写 Block RAM, 因此, 在相同的读写速率的情况下, 采用非倍频设计方案的系统工作频率是倍频设计方案的 5 倍。

3 算法的验证

使用中国科学院上海技术物理研究所研制的 320×256 元 InGaAs 面阵探测器搭载 Xilinx 公司的 Artix-7 系列芯片实现该算法, 为降低盲元与噪声等因素对拉伸效果的影响, 选图像灰度数据 3% 最小值中的最大值设为 A , 选图像灰度数据 2% 最大值中的最小值定为 B , 拉伸结果如图 6 所示, 上半部分为原始短波红外图像和其灰度分布图, 下半部分是拉伸后的短波红外图像和其灰度分布图。

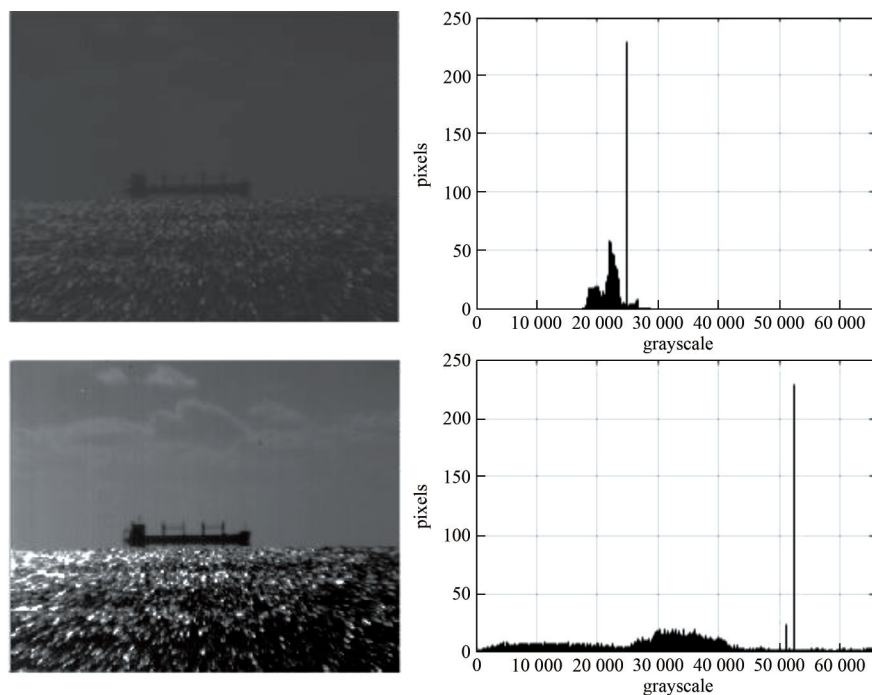


Fig.6 Results of experiment
图 6 实验结果

从图 6 中的结果可以看出, 拉伸后的图像与原图比较, 其灰度分布范围更广, 对比度更高。在视觉上, 海、天、船的细节更明显, 船的轮廓更清晰, 有效地提升了短波红外成像仪的成像质量。

4 结论

本文研究了一种基于FPGA的短波红外成像仪图像实时灰度拉伸算法实现方法，并经过搭载实际硬件电路进行实验验证。实验结果表明：该实现方法处理速度快，输出延迟低，满足设计的实时性要求，并有效提高了短波红外图像的对比度，且占用资源少，可移植性高，在短波红外图像处理领域具有较高的应用价值。

参考文献：

- [1] 邵秀梅,龚海梅,李雪,等. 高性能短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. 红外技术, 2016,38(8):629-635. (SHAO Xiumei,GONG Haimei,LI Xue,et al. Developments of high performance short-wave infrared InGaAs focal plane detectors[J]. Infrared Technology, 2016,38(8):629-635.)
- [2] FEI C,LIU J,LI T,et al. Characterization and calibration of blind pixels in short-wave infrared InGaAs focal plane arrays[J]. Optical Engineering, 2019,58(10):1. doi:10.1117/1.OE.58.10.103109.
- [3] LI X,GONG H,FANG J,et al. The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance [J]. Infrared Physics & Technology, 2017(80):112-119.
- [4] 于春蕾,李雪,邵秀梅,等. 短波红外 InGaAs 焦平面噪声特性[J]. 红外与毫米波学报, 2019,38(4):528-534. (YU Chunlei, LI Xue,SHAO Xiumei,et al. Noise characteristic of short wave infrared InGaAs focal plane arrays[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2019,38(4):528-534.)
- [5] 齐楠楠,姜鹏飞,李彦胜,等. 基于视觉显著性和目标置信度的红外车辆检测技术[J]. 红外与激光工程, 2017,46(6):95-103. (QI Nannan,JIANG Pengfei,LI Yansheng,et al. Infrared vehicle detection based on visual saliency and target confidence[J]. Journal of Infrared and Laser Engineering, 2017,46(6):95-103.)
- [6] SHANDILYA R,SHARMA R K. FPGA implementation of image enhancement technique for automatic vehicles number plate detection[C]// International Conference on Trends in Electronics and Informatics(ICEI). Tirunelveli,India:IEEE, 2017:1010-1017.
- [7] 张科,徐书文,葛珊. 基于FPGA的实时直方图统计设计[J]. 电视技术, 2012,36(7):24-25. (ZHANG Ke,XU Shuwen,GE Shan. Real-time histogram statistics design based on FPGA[J]. Video Engineering, 2012,36(7):24-25.)
- [8] 李亮,李栋. 一种基于FPGA的实时直方图均衡化的方法[J]. 自动化应用, 2015(10):21-23. (LI Liang,LI Dong. A real-time histogram equalization method based on FPGA[J]. Automation Application, 2015(10):21-23.)
- [9] 殷世民,高丽伟,梁永波,等. 基于FPGA的干涉式红外成像光谱仪实时光谱复原研究[J]. 红外与激光工程, 2017,49(7):237-242. (YIN Shimin,GAO Liwei,LIANG Yongbo,et al. Real-time spectrum recovery for interferential infrared imaging spectrometer based on FPGA[J]. Journal of Infrared and Laser Engineering, 2017,49(7):237-242.)
- [10] 刘春香,李洪祚. 实时图像增强算法研究[J]. 中国光学与应用光学, 2009,2(5):395-401. (LIU Chunxiang,LI Hongzuo. Study of real-time image enhancement algorithm[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009,2(5):395-401.)
- [11] 章怡,王海峰,刘梁,等. 人眼视觉拟合函数的小波系数插值图像增强[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(6):1071-1077. (ZHANG Yi,WANG Haifeng,LIU Liang,et al. A wavelet coefficient interpolation image enhancement based on visual fitting function[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(6):1071-1077.)

作者简介：

费 成(1993-), 男, 博士, 主要研究方向为短波红外成像 .email:feicheng@sdu.edu.cn.

康佳龙(1994-), 男, 硕士, 主要研究方向为短波红外图像的嵌入式图像处理.

刘俊良(1990-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为近红外单光子探测.

康英杰(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为三维融合激光雷达.

李华伟(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为智能短波红外成像仪的嵌入式研究.

李永富(1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为短波红外感知与成像.

顾 溢(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为短波红外成像材料与器件研究.

刘兆军(1981-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为短波红外光源与探测器件研究.

赵 显(1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新型光电探测器件研究.

方家熊(1939-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为高性能短波红外探测器件研究.