

文章编号: 1672-8785(2018)04-0007-05

线列红外偏振成像系统的设计

黄 飞^{1,2,3} 李范鸣^{1,3}

(1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 作为近年来偏振探测技术研究的新热点, 焦平面分割型偏振探测器在增强目标与背景对比度和伪装目标识别方面具有明显效果。基于线列短波红外微偏振探测器, 设计了一种以 Jetson TX1 为处理核心的成像系统。该系统主要包括控制模块和处理模块。其中, 控制模块由探测器驱动板和 FPGA 控制板构成, 用于实现探测器信号 AD 转换和图像信号 usb 传输等; 处理模块采用 Jetson TX1 平台, 用于实现图像信号 usb 接收、积分时间调节、非均匀性校正、偏振度计算以及 GPU 并行算法。开展了目标场景红外与偏振成像实验, 获得了分辨率为 500×268 的红外图像和红外偏振图像。

关键词: 红外; 偏振; FPGA; Jetson TX1

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.04.002

Design of Linear Infrared Polarization Imaging System

HUANG Fei^{1,2,3}, LI Fan-ming^{1,3}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

Abstract: As a new hot spot in the field of polarization detection technology in recent years, the focal plane segmented polarization detector has obvious effect both in the enhancement of the contrast between target and background and in the recognition of camouflaged targets. On the basis of a linear near-infrared micro-polarization detector, an imaging system which uses a Jetson TX1 as the core is designed. The imaging system mainly includes a control module and a processing module. The control module which consists of a detector driver board and a FPGA control board is used to implement the AD conversion of detector signals and the usb transmission of image signals. The processing module which uses the Jetson TX1 platform is used to implement the usb reception of image signals, the adjustment of integral time, the correction of non-uniformity, the calculation of polarization degree and the parallel algorithm by GPU. Infrared and polarization imaging experiment is

收稿日期: 2018-03-04

基金项目: 国家“十三五”国防预研项目(Jzx2016-0404/Y72-2);上海市现场物证重点实验室基金资助项目(2017xcwzk08)

作者简介: 黄飞(1989-), 男, 江苏淮安人, 博士生, 主要从事图像处理方面的研究。

E-mail: hfkllzj@163.com

carried out on target scenes and the infrared and infrared polarization images with the resolution of 500×268 pixels are obtained.

Key words: infrared; polarization; FPGA; Jetson TX1

0 引言

除了强度信息之外, 红外目标辐射还具有诸多特征信息, 比如光谱和相位等。偏振就是一种基于相位的重要特性。通过引进红外辐射的偏振特性, 便可从根本上改变红外检测系统在探测目标时对辐射强度的依赖^[1]。

红外偏振成像技术一般需要获得不同偏振方向上的入射光强信息, 并计算出偏振度的大小。常用的红外偏振成像系统主要分为时间分割型、振幅分割型和焦平面分割型三种。本文采用焦平面分割型探测器。

作为当前红外偏振成像探测系统的前沿研究, 焦平面分割型系统采用基于微偏振阵列的四象限探测器技术, 将微偏振片直接附在探测器像元上。其优点是可以实时获取 4 个偏振方向上的强度信息, 且结构简单; 缺点是探测器的加工难度大, 面临视场角不均匀^[2]、消光比不够高以及存在像元间串扰^[3]等问题。图 1 所示为焦平面分割型偏振成像的典型结构。

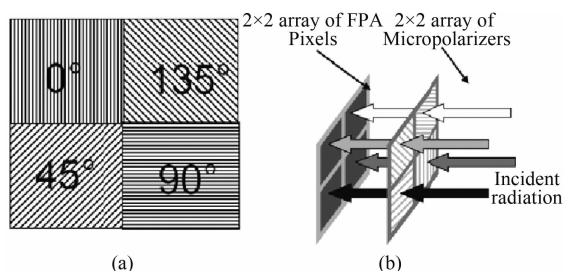


图 1 焦平面分割型偏振成像的示意图

本文首先介绍了偏振成像的基本理论, 给出了偏振度计算方法; 随后介绍了线列红外偏振探测器的结构, 搭建了基于嵌入式 GPU 的红外偏振成像处理系统。与传统的基于 FPGA 或 DSP 处理核心的系统相比, 本文系统具有更快的处理速度和更加友好的开发环境, 而且无需将 PC 用作上位机进行软件开发与显示。最后开展了成像实验, 获取了目标的红外和偏

振图像。

1 偏振成像的基本理论

与传统红外成像基于辐射度的表示方法不同, 偏振成像系统使用斯托克斯矢量 $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 表示偏振光^[4], 其定义如下:

$$S_0 = E_x^2 + E_y^2 \quad (1)$$

$$S_1 = E_x^2 - E_y^2 \quad (2)$$

$$S_2 = 2E_x E_y \cos \Delta \varphi \quad (3)$$

$$S_3 = 2E_x E_y \sin \Delta \varphi \quad (4)$$

式中, S_0 为光波的总强度; S_1 为平行与垂直方向上的线偏振光的强度差; S_2 为 $+\frac{\pi}{4}$ 与 $-\frac{\pi}{4}$ 方向上的线偏振光的强度差; S_3 为右旋圆偏振分量与左旋圆偏振分量之差。偏振度可由斯托克斯矢量表示为 $p = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}$, 即偏振光强度与总光强的比值。由于圆偏振光分量与线偏振光相比很小, 在实测情况下可以忽略不计。于是偏振度便可表示为 $p = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$ 。在实际线偏振片测量中, 与参考方向成 θ 角度的方向上的光强为

$$I(\theta) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta) \quad (5)$$

当 θ 分别取 0° 、 45° 、 90° 和 135° 时, 可以得到:

$$S_0 = \frac{1}{2} [I(0) + I(45) + I(90) + I(135)] \quad (6)$$

$$S_1 = I(0) - I(90) \quad (7)$$

$$S_2 = I(45) - I(135) \quad (8)$$

2 短波红外微偏振探测器的结构

传统的偏振信息获取方法是在红外探测器前放置一个线偏振片, 通过旋转线偏振片的角度分别获得 4 个角度的偏振光强, 并算出偏振

度的大小。这种方法不能同时获取 4 个角度的偏振信息, 因此无法完成实时红外偏振成像。而本文则直接将微偏振片附在红外探测器像元上, 能够同时获取 4 个角度的偏振光。图 2 所示为线列红外微偏振探测器的像元结构。

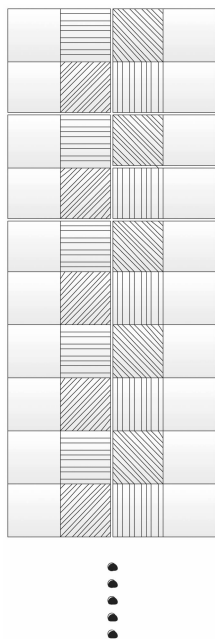


图 2 线列红外微偏振探测器的结构示意图

如图 2 所示, 该探测器共有 270×4 个像元, 其中第一行从左到右分别为红外像元、 0° 光栅像元、 135° 光栅像元、红外像元; 第二行从左到右分别为红外像元、 45° 光栅像元、 90° 光栅像元、红外像元; 下面以此类推。

3 红外偏振成像系统设计

探测系统采用国内首次研制出的焦平面分割型红外偏振探测器——中国科学院上海技术物理研究所研制的 InGaAs 线列红外偏振探测器。成像系统利用转台搭载 AD 板和 FPGA 信号处理板, 可实现探测器驱动、信号控制以及探测器输出信号的 AD 转换。外部的 Jetson TX1 板用于采集通过 usb 模块传下来的数据并对其进行处理和显示。图 3 为本文系统的总体框图。

3.1 红外偏振探测器

红外偏振探测器内集成了热电制冷器, 可对工作温度进行控制。表 1 列出了该探测器的主要性能参数。

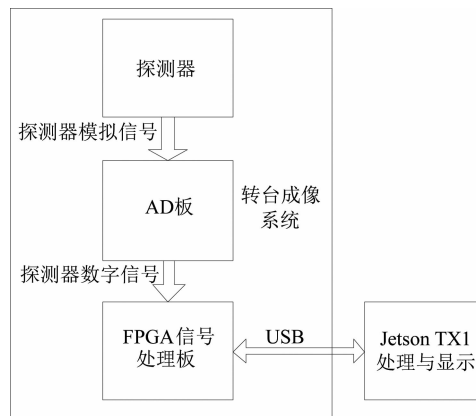


图 3 线列红外偏振成像系统的设计框图

表 1 红外偏振探测器的性能参数

特性参数	典型值
探测器规格	270×4
像元尺寸	$30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$
光谱响应波段	$0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$
帧频	Up to 110 Hz
工作温度	$-20 \sim +60^\circ\text{C}$
动态范围	$\geq 60 \text{ dB}$
盲元率	$\leq 0.1\%$

3.2 硬件电路设计

为了获取红外偏振图像数据, 需要为探测器提供正常工作的偏压和驱动信号。FPGA 通过驱动 AD 将探测器输出的模拟信号转换为数字信号, 然后通过 usb3.0 芯片将经 SDRAM 缓存的数据传送给 Jetson TX1 嵌入式 GPU 平台进行处理与显示。

3.2.1 探测器驱动电路设计

探测器驱动电路主要完成以下功能:

- (1) 提供探测器正常工作的模拟电源和数字电源。为了保证电源质量, 采用线性电源。
- (2) 提供探测器正常工作所需的驱动信号。该信号由 FPGA 产生, 经电平转换后驱动探测器, 使其产生模拟图像信号。

3.2.2 FPGA 核心处理板设计

FPGA 核心板主要完成以下功能:

- (1) 产生探测器所需的驱动信号;
- (2) 对探测器产生的模拟信号进行 AD 转换;

(3) AD 输出的数字信号经 SDRAM 缓存后, 通过 usb 模块发送给 Jetson TX1 平台。

如图 4 所示, FPGA 核心处理板主要由 FPGA、AD 转换模块、电平转换模块、电源模块和 SPI 存储器构成。

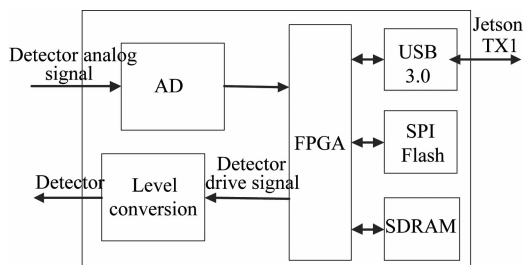


图 4 FPGA 核心处理板的设计框图

3.3 GPU 并程序序设计

Jetson TX1 是 NVIDIA 公司推出的一种嵌入式 ARM+GPU 平台, 核心板只有信用卡一般大小, 包含 8 个 ARM 核心和 256 个统一计算设备架构 (Compute Unified Device Architecture, CUDA) 核心, 其单精度浮点运算能力达到 1 TFLOPS。Jetson TX1 板主要用于图像数据 USB 接收^[5]、红外和红外偏振图像的非均匀性校正^[6]、盲元补偿^[7]、16 bit~14 bit 动态范围压缩^[8]以及偏振度计算。

在非均匀性校正和偏振度计算时, 每个点的计算与其他点的计算之间并没有彼此依赖的关系。在 CPU 中只能用传统的串行或者多核多线程执行, 而使用 GPU 则可充分发挥远超过 CPU 的多核心并行计算的优势。整个并行计算使用 CUDA C 编写。其代码主要可以分为三个部分: (1) 使用 CPU 将需要处理的数据写入内存, 在显存内开辟所需空间, 并将内存中的数据拷贝到显存里; (2) 使用 GPU 进行计算; (3) 计算完成后, 从显存中将结果拷贝到内存里, 并释放显存空间。

下面是计算偏振度的主要代码, 包含 CPU 代码和 GPU 核函数部分:

//CPU 代码

```
dim3 dimGrid(width/block_width,height/
block_width); //配置 GPU 的网格维度
```

```
dim3 dimBlock(block_width, block_wid-
th); //配置 GPU 的块维度
```

```
POL_Kernel<<< dimGrid, dimBlock >
>>>(valued, ad, bd, cd, dd, resultd, width, heig-
ht); //启动核函数
```

//GPU 核函数部分

```
_global_ void POL_Kernel(const int* valued,
const float* ad, float* bd, float* cd, float* dd,
float* resultd, int width, int height)
{
```

```
int Row = blockIdx.y* block_width +
threadIdx.y; //获取线程的行索引
```

```
int Col = blockIdx.x* block_width +
threadIdx.x; //获取线程的列索引
```

//每一个线程计算一个像元点的偏振度

```
float s0 = 0.5*(ad[Row*width + Col]
+ bd[Row*width + Col] + cd[Row*width +
Col] + dd[Row*width + Col]);
```

```
float s1 = ad[Row*width + Col] - dd
[Row*width + Col];
```

```
float s2 = bd[Row*width + Col] - cd
[Row*width + Col];
```

```
resultd[Row*width + Col] = sqrt(s1*s1
+s2*s2)/s0;
```

```
}
```

实验结果表明, 使用 ARM 处理 268×500 图像的非均匀性校正和偏振度计算的时间分别为 3.784 ms 和 17.681 ms, 而使用 GPU 所消耗的时间分别为 3.345 ms 和 4.054 ms。在偏振度计算方面, GPU 的计算速度是 ARM 的 4.4 倍, 其输出帧频可以达到 120 FPS, 满足实时性要求。

图 5 所示为基于 Qt 编写的上位机软件界面。

4 实验结果与分析

设置探测器的积分时间为 4 ms, 图像分辨率为 500×268 ; 在室内用白炽灯进行补光, 得到了图 6 所示的成像效果。由于偏振度计算

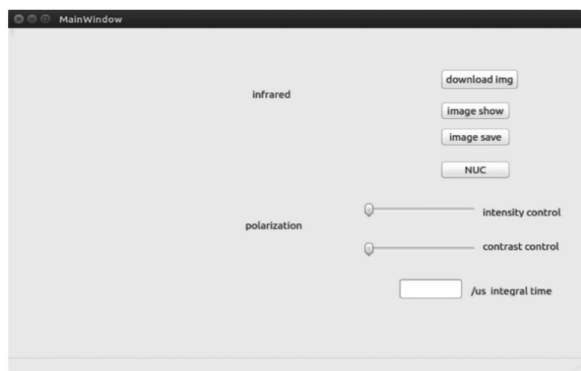


图 5 上位机软件界面

对非均匀性非常敏感, 可以很明显地看出, 原始偏振图像因为均匀性差而出现了很多白色横线, 经非均匀性校正后图像质量得到了改善。与红外图像相比, 偏振图像突显了物体的边缘

信息。其中, 铝板、铜板和电路板相对于植物背景体现出了较高的偏振特性。

5 结束语

本文基于焦平面分割型线列短波红外偏振探测器, 设计了一种以 FPGA 为控制模块、以 Jetson TX1 为处理模块的转台扫描成像系统, 实现了图像预处理算法以及积分时间调节, 获得了红外与偏振图像。在非均匀性校正和偏振度计算时, 使用 GPU 对算法进行了并行加速, 获得了满足实时性要求的良好效果。在此基础上, 对室内场景进行了成像实验, 获得了红外与偏振图像。结果表明, 该系统可以得到传统红外图像中没有的目标偏振信息, 为后续目标探测奠定了基础。



(a) 可见光图像



(b) 原始红外图像



(c) 非均匀性校正后的红外图像



(d) 原始偏振图像



(e) 非均匀校正后的偏振图像

图 6 红外与偏振图像

(下转第 21 页)