

基于 FPGA 的双目高精度宽波段 激光告警系统

张卓奇^{1,2,3}, 张瑞^{2,3}, 牛家麒^{1,2,3}, 王志斌^{1,2,3}

- 中北大学 仪器与电子学院, 太原 030051;
- 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051;
- 中北大学 前沿交叉科学研究院, 太原 030051)

摘要: 针对传统二维激光告警系统的光斑中心提取误差大、角度测量精度差和分辨率低的问题, 设计了一种基于 FPGA 和 InGaAs 焦平面阵列探测器的高精度宽波段激光告警系统, 对传统的 Otsu (最大类间方差法) 阈值分割算法进行了推导和优化, 同时, 基于改进后的算法, 通过 FPGA 实现了光斑中心坐标提取以及方位角、俯仰角等参数的计算, 并将结果传输至上位机实时监测; 实验结果显示, 相较于传统的阈值分割算法, 改进后的 Otsu 算法使光斑中心提取精度达到了 0.06 个像素, 改进后的激光告警系统角度测量平均误差为 0.03°, 角度分辨率达到 0.05°; 实验表明, 双目高精度宽波段激光告警系统达到了实际应用的要求, 提高了系统测量的角度分辨率和精度, 对光电探测和激光告警领域的工作具有一定的意义。

关键词: 二维激光告警; Otsu; FPGA; 光斑中心提取; 光电探测

Binocular High Precision Wide Band Laser Warning System Based on FPGA

ZHANG Zhuoqi^{1,2,3}, ZHANG Rui^{2,3}, NIU Jiaqi^{1,2,3}, WANG Zhibin^{1,2,3}

- School of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- Shanxi Province Optoelectronic Information and Instrumentation Engineering Technology Research Center, Taiyuan 030051, China;
- Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of large err in extracting the center of light spot, poor measurement accuracy of angle and low resolution of traditional two-dimensional laser warning systems, a high-precision wide-band laser warning system based on FPGA and InGaAs focal plane array detectors is designed, and the traditional Otsu (maximum inter-class variance method) threshold segmentation algorithm is derived and optimized. Based on the improved algorithm, the center coordinates of spot are extracted, the parameters such as azimuth angle and pitch angle are calculated by FPGA, and the results are transmitted to the upper computer for real-time monitoring. Experimental results show that compared with traditional threshold segmentation algorithms, the spot center extraction accuracy of the improved Otsu algorithm reaches 0.06 pixels, the average angle measurement error of the improved laser alarm system is 0.03°, and the angle resolution reaches 0.05°, the binocular high precision wide band laser warning system meets the requirements of practical application, improves the angular resolution and accuracy of the system measurement, and has a certain significance for the work in the field of photoelectric detection and laser warning.

Keywords: two-dimensional laser warning; Otsu; FPGA; spot center extraction; photoelectric detection

0 引言

激光技术作为光电探测领域的重要分支, 凭借其响应快, 功率大, 应用面广的特点, 在军事领域中已经得到飞速的发展。20 世纪以来, 激光追踪、激光制导、激光雷达

和激光作战卫星等激光武器已经相继应用到战场之中, 激光武器已经成为各个国家军队竞赛的重要领域。因此, 为了应对国际上日益严重的激光威胁, 各国都在大力发展激光告警技术。激光告警系统是一种可以测得来袭激光方位角、俯仰角、光功率和波长等参数的军用告警设备, 其可

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2023-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金(62105302)。

作者简介: 张卓奇(1998-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 王志斌(1969-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师。

引用格式: 张卓奇, 张瑞, 牛家麒, 等. 基于 FPGA 的双目高精度宽波段激光告警系统[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 279-286.

以对敌军武器进行实时监测和反侦察,也可以对我方的激光设备进行定期的精度和性能检测^[1]。目前,激光告警系统主要装配在卫星雷达上,星载激光告警系统安装在易于受到反卫星激光武器攻击的部位,告警信号由星上数据处理系统快速分析与处理,判断激光武器的威胁程度,发送给卫星防护体系,并采取信号干扰、拦截和破坏等操作进行防御^[2]。

现有的激光告警技术按成像原理主要分为散射探测型、光谱识别型和光栅衍射型^[3]。散射探测型的激光告警系统结构简单,制作成本低,但是只能探测固定波长的激光,并且角度分辨率低;光谱识别型激光告警系统可以探测多波段的激光,但是其衍射效率低,角度分辨率低,并且搭建仪器较为复杂,成本较高;光栅衍射型激光告警系统凭借其测量精度高,探测波段广和制作成本低的优点,已经逐步将散射探测型和光谱识别型激光告警系统取代^[4]。自从各国开始发展激光告警技术以来,激光告警系统逐渐朝着多波段,大视场范围和高精度的方向发展^[5]。20世纪80年代初期,英国BAE公司研制的1220型激光告警机器,其探测光谱接受范围达到 $0.35\sim 1.1\ \mu\text{m}$,俯仰角水平范围达到了 $-15\sim +40^\circ$,方位角水平范围达到了 360° ,测量角度分辨率为 10° 左右^[6]。1998年,中国信阳空军第一航空学院基于CCD线阵探测器,研制了国内第一台激光告警机器,其角度分辨率达到 1.5° ,并且单个探测器的方位角视场范围达到 120° 。2010年,合肥电子工程学院设计出FPGA+DSP的激光告警装备,具有宽波段探测波长范围的优点。近几年,中北大学光电信息研究中心使用了面阵CCD探测器,解决了国内不能对俯仰角测量的问题,并且方位角视场范围达到 $\pm 45^\circ$,俯仰角视场范围达到 $\pm 35^\circ$,角度分辨率达到 0.5° ,自此国内激光告警技术逐渐走向成熟^[7-10]。

随着激光技术在基本理论和材料工艺等方面的成熟,各国对激光告警的测量精度要求日益严格,传统的激光告警系统已经不能满足现代化战争的需求。光斑中心提取的准确与否决定了激光告警系统测量精度的好坏^[11]。但是在实际应用中,由于探测器工艺生产过程中不可避免的缺陷与激光告警机器工作环境的复杂性,激光告警系统探测器的成像往往有噪点和非目标因素的干扰,这些干扰直接影响到光斑中心提取的准确性,进而影响到激光告警系统的测量精度,所以有效去除噪点和非目标因素的干扰,对激光告警系统测量的准确性至关重要^[12-14]。

近年来常见的目标分割方法主要有:1)最大熵阈值分割,该方法是在保持图像均匀性的前提下,寻找最优的阈值来分割图像的方法,但是该方法对噪声比较敏感且计算量比较大,在激光告警系统的实际应用过程中不易分割出光斑与噪点^[15],不适于光栅衍射型激光告警系统的成像特性;2)迭代阈值法,该方法是根据给定的阈值对图像进行二值化处理,不断调整阈值,直到最合适的图像位置,但是的计算速度较慢,不满足于激光告警的系统的实时性

要求^[16];3)边缘检测法,该方法主要是通过一阶导数算子或者二阶导数算子对图像做卷积来提取图像的边缘信息,该算法边缘检测较准,对噪声比较敏感,但是阈值的大小需要自己设定,自适应能力较差,不适用于激光告警系统工作时复杂变化的环境^[17]。Otsu阈值分割算法具有自动选取阈值,处理速度快和适用范围广的优点。该算法不需要人工干预,在计算类间方差时,只需要计算一次灰度直方图,并且适用于各种复杂变换的环境。因此,Otsu算法满足高精度宽波段激光告警系统实时性和复杂环境下工作的需求。

针对现有激光告警系统提取精度差,测量角度分辨率低的问题,提出了基于FPGA与改进Otsu算法的高精度宽波段激光告警系统,对Otsu算法进行了推导和改进,并将改进后的Otsu算法与探测器的成像控制相结合,有效去除了噪点和非目标因素的干扰,提高了激光告警系统的测量精度,并将测量的来袭激光的参数通过RS422接口传输至上位机实时观看。

1 基本原理

高精度激光告警系统主要包括光学衍射模块,探测器控制模块、图像处理模块和数据传输模块。光学衍射模块是将来自被探测物体的光线集中到探测器芯片上,生成电信号并传输图像。探测器控制模块是通过FPGA控制探测器将光电信号转变为模拟信号。数据传输模块是基于AD芯片和RS422接口构成的通信传输系统。图像处理模块主要包括图像阈值分割模块。图像阈值分割模块基于Otsu算法,实现了自适应阈值控制,基于计算出的阈值,对探测器采集的图像进行二值化处理。系统基于处理后的图像,进行光斑中心坐标提取和角度计算。系统原理如图1所示。

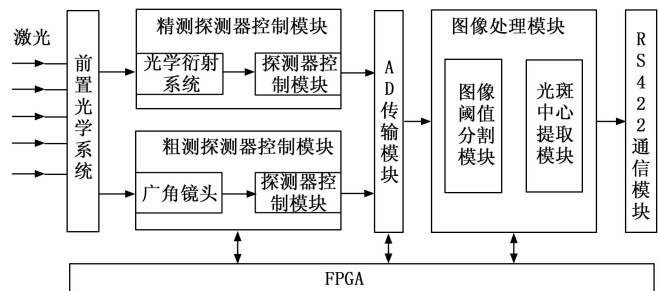


图1 激光告警原理图

1.1 光栅衍射型激光告警测量原理

系统使用两个InGaAs焦平面阵列探测器分别进行角度的精测和粗测,可以实现对波段为 $0.4\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 的可见与近红外光探测^[18-19]。粗测模块仅仅使用了广角镜头,不使用光栅,计算出的角度为激光告警系统提供大致的方位角和俯仰角。

$$\begin{cases} \alpha_{\text{粗}} = \arctan\left(\frac{x_{\text{粗}}}{f_{\text{粗}}}\right) \\ \gamma_{\text{粗}} = \arctan\left(\frac{y_{\text{粗}}}{f_{\text{粗}}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_{\text{粗}}$ 和 $y_{\text{粗}}$ 是粗测模块获得的光斑中心坐标, $f_{\text{粗}}$ 是广角镜头的焦距。 $\alpha_{\text{粗}}$ 和 $\gamma_{\text{粗}}$ 是粗测计算出的方位角和俯仰角, 可以确定光斑衍射的级数。

精测模块使用宽波段大视场二维衍射光栅, 利用多缝衍射原理将来袭激光根据不同的波段衍射成不同个数的光斑^[20], 通过计算最靠近成像中心的光斑坐标来计算出来袭激光的方位角和俯仰角。

$$\begin{cases} \alpha_{\text{精}} = \arctan\left(\frac{x_{\text{精}}}{f_{\text{精}}}\right) \\ \gamma_{\text{精}} = \arctan\left(\frac{y_{\text{精}}}{f_{\text{精}}}\right) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_{\text{精}}$ 和 $y_{\text{精}}$ 是经过宽波段二维衍射光栅衍射后离成像中心最近的光斑坐标, $f_{\text{精}}$ 是带有光栅的镜头焦距, $\alpha_{\text{精}}$ 和 $\gamma_{\text{精}}$ 是精测计算出的方位角和俯仰角。

根据式(1)和式(2)可以计算出经过光栅衍射后光斑的衍射级数 a 和 b :

$$\begin{cases} a = \text{round}\left\{\left(\sin\alpha_{\text{精}} + \sin\alpha_{\text{粗}}\right) * \frac{d}{\lambda}\right\} \\ b = \text{round}\left\{\left(\sin\gamma_{\text{精}} + \sin\gamma_{\text{粗}}\right) * \frac{d}{\lambda}\right\} \end{cases} \quad (3)$$

其中: round 是四舍五入的取整函数, d 为光栅常数。由式(1)~(3)可以得到来袭激光的方位角、俯仰角和波长为:

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin\left(\frac{a\lambda}{d} - \sin\alpha_{\text{粗}}\right) \\ \gamma = \arcsin\left(\frac{b\lambda}{d} - \sin\gamma_{\text{粗}}\right) \\ \lambda = \pm d(\sin\alpha_{\text{精}+1} + \sin\alpha_{\text{粗}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, α 和 γ 是激光告警系统真正测出的方位角和俯仰角, λ 为测得来袭激光的波长。

1.2 Otsu 算法原理

Otsu 算法又称作最大类间方差法, 是一种经典的非参数, 无监督的自适应阈值选取法, 该算法是通过计算一帧图像的灰度直方图信息, 使目标因素和非目标因素的方差取得最大时的像素值作为分割图像的最佳阈值^[21-22]。

传统 Otsu 算法的基本思想是: 假设一副图像的灰度值范围是 $[L_0, L_1]$, 灰度值为 i , 算法通过设置灰度值 t 把图像分为 a_0 和 a_1 两部分, 则 a_0 区域的灰度值取值范围为 $[L_0, t]$, a_1 区域的灰度值取值范围为 $[t+1, L_1]$ 。则 a_0 和 a_1 的灰度概率为:

$$\omega_0 = \sum_{i=L_0}^t P_i \quad (5)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=t+1}^{L_1} P_i \quad (6)$$

则这两个区域所有像素点的平均灰度值为:

$$u_0 = \frac{\sum_{i=L_0}^t iP_i/\omega_0}{\omega_0} \quad (7)$$

$$u_1 = \frac{\sum_{i=t+1}^{L_1} iP_i/\omega_1}{\omega_1} \quad (8)$$

由式(5)~(8)可得到传统的 a_0 和 a_1 类间方差表示为:

$$g = \omega_0\omega_1(u_0 - u_1)^2 \quad (9)$$

满足式(9)取得最大时的阈值 t , 即为最大类间方差获得的最佳分割阈值:

$$t = \text{Arg}\{\max(g)\}, L_0 \leq t \leq L \quad (10)$$

但是传统的 Otsu 算法计算的阈值 t , 只考虑到类间方差的大小, 没有考虑各类本身的内聚性, 在目标区域和背景区域相差较大时, 会导致图像得不到有效的分割^[23]。为了对来袭激光衍射的光斑图进行有效的分割, 引入了类内绝对差和类间差的比值作为阈值判别的依据, 改进后的算法公式表示为:

$$g = \omega_0\omega_1 |u_0 - u_1| \quad (11)$$

$$\sigma_0 = \sum_{i=L_0}^t |i - u_0| P_i, \sigma_1 = \sum_{i=t}^{L_1} |i - u_1| P_i \quad (12)$$

$$\sigma_i = \sigma_0 + \sigma_1 \quad (13)$$

则新的最佳阈值判别函数为:

$$G(t) = \frac{\sigma_i}{g} \quad (14)$$

满足式(14)取得最大时的阈值 t , 即为改进后的 Otsu 算法的最佳分割阈值。

改进后的 Otsu 算法只需计算绝对值, 而无需计算平方, 降低了算法的复杂程度和计算量, 并且采用了类内绝对差和类间离差的比值作为判别函数, 使得目标和背景分类效果最优的同时, 目标类内的内聚性也比较好, 使得式(14)计算出的阈值更接近实际的最佳阈值。

2 双目高精度激光告警系统硬件设计

高精度激光告警系统硬件部分重点设计了 InGaAs 探测器驱动电路、RS422 串口通信电路、模数转换电路和 FPGA 控制电路。

2.1 InGaAs 探测器驱动电路设计

系统使用两个 InGaAs 焦平面阵列探测器分别进行角度的精测和粗测。其中 LINE1 和 DATAVALID 端口为探测器第一行数据有效标志和行数据有效标志, 由探测器向 FPGA 输入数据, FPGA 通过端口的高低电平进行处理。SERDAT 为探测器的串口数据输入端口, FPGA 通过 SPI 通信协议向 SERDAT 端口输入寄存器组, 以此来配置探测器的积分电容, 输出通道控制和功耗控制等初始工作模式。INT 为系统帧同步信号端口, 由 FPGA 对端口进行控制, FPGA 向探测器输入高电平时探测器进行数据处理, 低电平时不进行数据处理工作, FPGA 通过配置 INT 端口来配置探测器的积分读出工作模式。MC 为探测器时钟端口, 由 FPGA 向探测器输入工作时钟。VDDA 和 VDDA3 为探测器的模拟电源, 典型电压为 3.3 V。SUBPV 引脚为探测器的外部输入偏置电压, 推荐电压为 2.25~2.95 V。系统使 TPS7A7002DDAR 电压基准芯片为 SUBPV 和 VBLM 供电。VLOG、VBP 和 VREF 为探测器内部产生电压。

InGaAs 焦平面阵列探测器的参数如表 1 所示, 探测器驱动电路设计如图 2 所示。

表 1 面阵探测器主要参数

型号	GH-VSW640-F15c
像元阵列规格	640 × 512
像元尺寸	15 μm × 15 μm
光谱响应	0.4~1.7 μm
外形尺寸	36 mm × 25.4 mm × 7.2 mm
感光像元面积	9.6 mm(H)×7.68 mm(V)
像素可操作率	> 99.5%
帧频	两通道<60 Hz、四通道<120 Hz
系统时钟	2~12 MHz
信号读出方式	积分再读出(ITR)、积分同时读出(IWR)
最小积分时间	37 μs

2.2 RS422 串口通信电路设计

二维激光告警系统的接口模块使用了 RS422 串口通信电路, RS422 是一系列规定采用 4 线, 全双工, 差分传输和多点通信的数据通信协议, 具有传输速率高、传输速率远、不易受到干扰的特点^[24]。电路使用了 MAX3490ESA 低功耗收发器, 每个器件中都具有一个驱动器和一个接收器, 可以减小电磁干扰, 并降低由不恰当的终端匹配电缆引起的反射, 实现最高 250 kbps 的无差错数据传输。其原理如图 3 所示, 电路中 MAX3490ESA 收发芯片的工作电源为 3.3 V, D2、D7、D8、D9、D10、D11 均为瞬态抑制二极管, 阻值设置为 120 Ω, 用于对接口的保护。

2.3 模数转换电路设计

激光告警系统具有高传输速度的要求, 为了匹配 InGaAs 探测器最高 8 通道的模拟信号输出, 系统设计选用了

型号 AD9288 的模数转换芯片, 该芯片拥有最高 125 Msps 的采样速率, 可以满足激光告警系统的传输要求。为了保证探测器和 AD 芯片传输时的最大效率, 在电路每个接地端口均放置了去耦电容, 并将其差分端口 INA+、INA-和 INB+、INB-探测器输出端口相连接, 以供 FPGA 进行数据读取。其电路设计如图 4 所示。

2.4 FPGA 控制电路设计

激光告警系统主要通过 FPGA 进行探测器芯片控制、图像处理和数据传输。系统选用的 FPGA 控制芯片为 Intel 公司的 EP4CE55F23I7N 芯片, 该芯片是一款架构先进、高性能、低功耗的 FPGA。该芯片能够使用的 IO 引脚多达 374 个, 芯片的逻辑单元高达 55 000 个, 片内 RAM 的存储容量为 2 340 kbit, 满足激光告警系统的设计需求。FPGA 控制器的输入电压由整机系统电源模块输出的 5 V 电压提供, 随后需要将 5 V 电压转化为 FPGA 芯片内部 I/O 口需要的数字电源电压 3.3 V、PLL 锁相环需要的模拟电源电压 2.5 V 以及内核数字电源电压 1.2 V。因此, 系统选择使用电压精度芯片 TLV62130 完成 3.3 V 和 1.2 V 电压转换。FPGA 控制电路如图 5 所示。

3 双目高精度激光告警系统软件设计

系统软件部分基于 EP4CE55F23 型号的 FPGA 芯片、Quartus II 开发环境和 Verilo HDL 编程语言, 实现了 InGaAs 探测器控制、RS422 串口通信、Otsu 图像分割算法。

3.1 InGaAs 探测器时序控制

FPGA 芯片控制 InGaAs 探测器将来袭的激光信号转换为模拟信号, 再通过 AD 芯片传输给 FPGA 处理。为了提高激光告警系统的采样频率, 同时满足实时性的要求, 使探测器工作在边积分边读取模式, 这种工作模式下, InGaAs

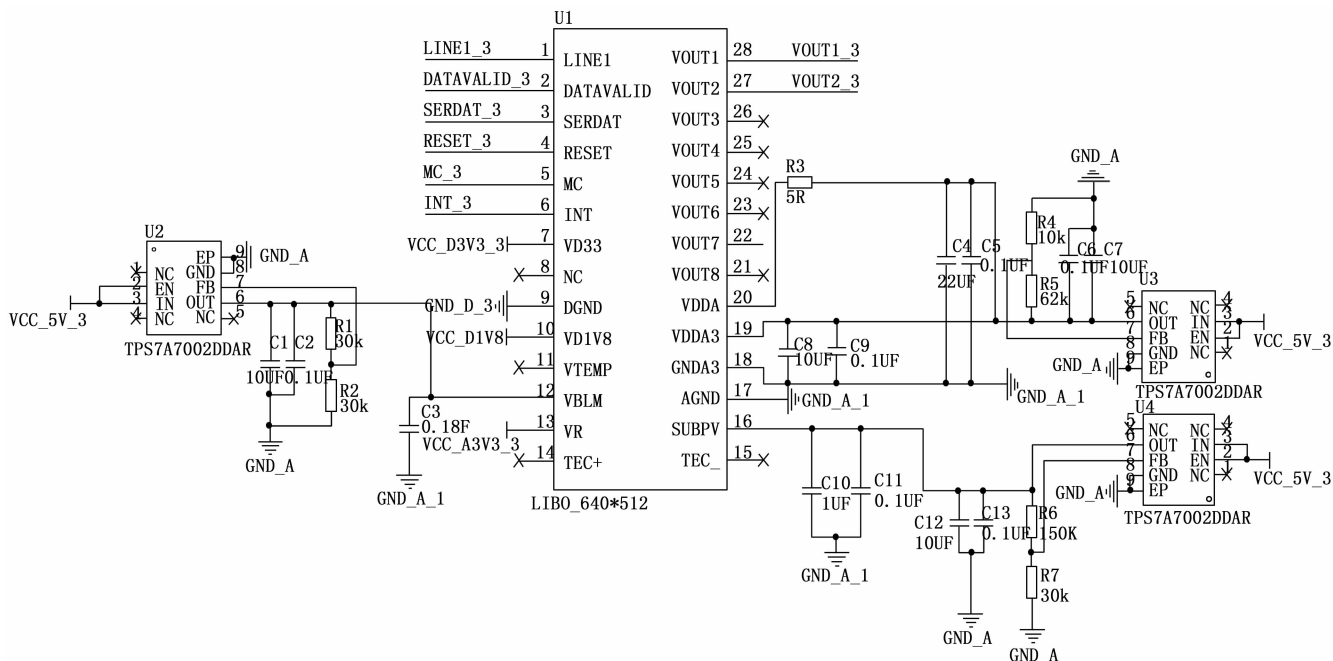


图 2 InGaAs 探测器驱动电路原理图

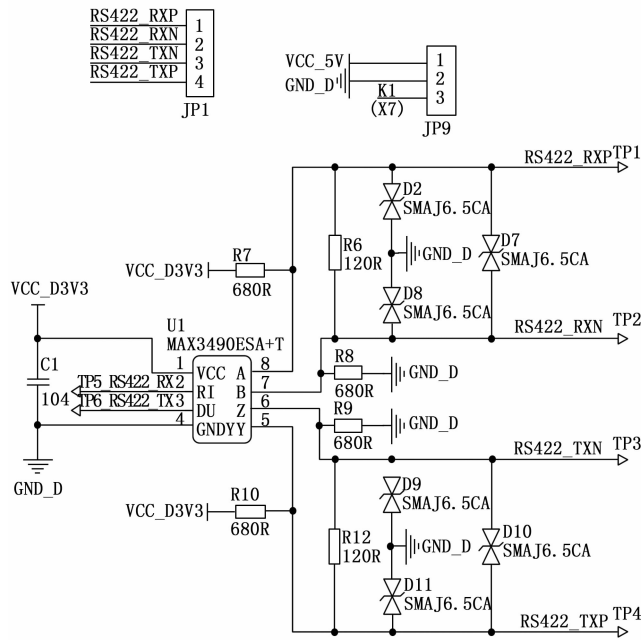


图 3 RS422 串口通信电路原理图

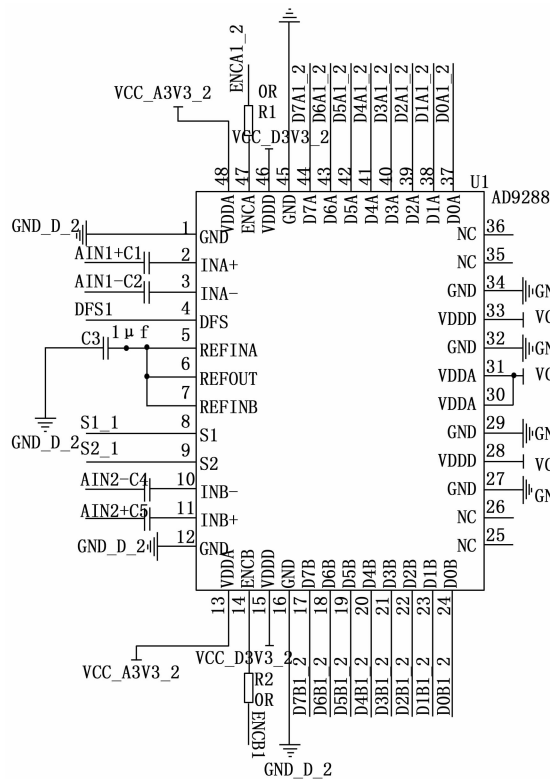


图 4 AD9288 模数转换芯片电路原理图

探测器在输出前一帧图像的同时, 同时对当前帧信号进行积分处理操作, 实现一边积分, 同时一边读出的功能。每个信号读出的时间为一个时钟周期 T_{mc} , 帧周期近似等于读出时间, 积分时间几乎和输出时间重叠。探测器工作流程如图 6 (a) 所示, 其各个端口的 FPGA 工作时序如图 6 (b) 所示。

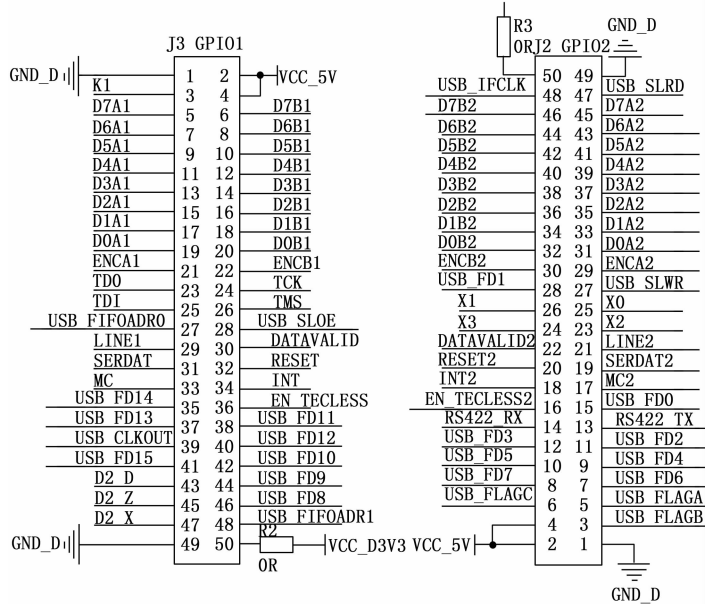
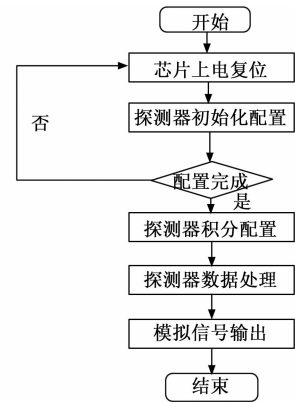


图 5 FPGA 控制电路



(a) InGaAs 探测器整体控制流程图



(b) 双探测器 IWR+非CDS 工作时序图

图 6 InGaAs 探测器逻辑控制图

3.2 Otsu 算法图像分割

Otsu 图像分割模块根据式 (14) 计算出的结果, 调整最优阈值 t , 从而实现对探测器图像输出的阈值控制。阈值的大小通过 FPGA 的 Otsu 模块传到两个探测器的控制模块, 并根据计算出来的 t , 将探测器输出的数据进行二值化处理: 灰度值大于阈值的数据设置为 1, 灰度值小于阈值的数据设置为 0。将处理后的光斑数据传输给图像处理模块, 进行光斑中心坐标、来袭激光俯仰角和方位角的计算。其 FPGA 的 RTL viewer 如图 7 所示。

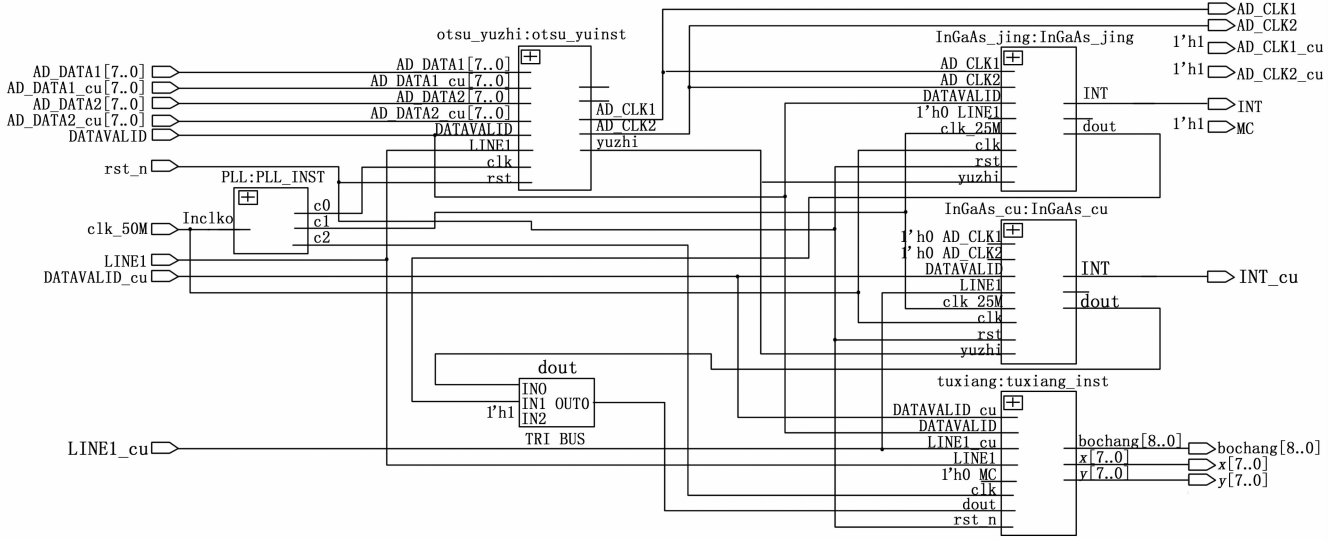


图 7 激光告警系统 RTL 视图

3.3 RS422 串口通信

基于 RS422 通用全双工收发传输器规定的设备之间传输的帧格式。FPGA 向上位机模拟发送了 8 字节进行串口通信验证，发送的数据为：17 h、70 h、00 h、10 h、00 h、14 h、AAh 和 55 h，传输波特率设置为 115 200 波特，RS422 串口通信的工作时序如图 8 所示。

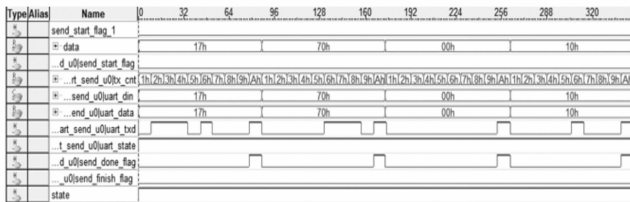


图 8 RS422 的工作时序图

4 实验结果分析

在上述理论研究和系统设计的基础上，基于实验室的光学平台和测试仪器，搭建的双目高精度激光告警系统实验装置如图 9 所示。

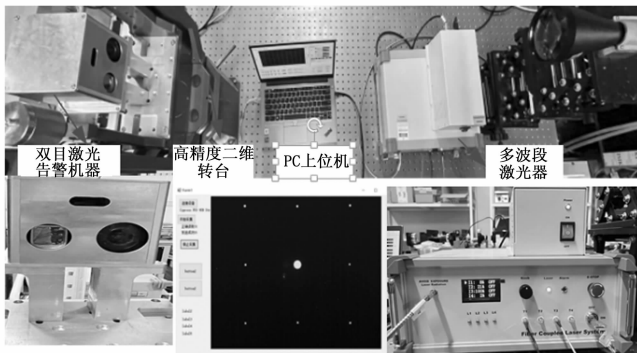
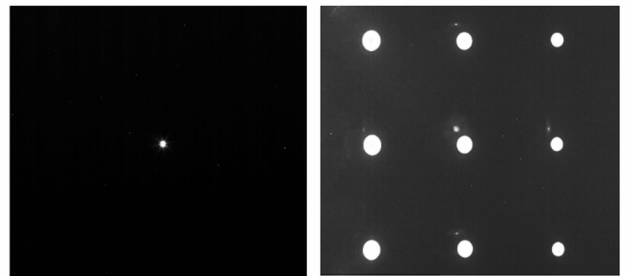


图 9 双目高精度宽波段激光告警实验图

多波段激光器模拟 523 nm、1 064 nm 和 1 550 nm 的 3 种波段的来袭光源，作为激光告警系统测试的发射光源。高精度二维转台使激光告警系统在不同角度的光照射下，进行数据采集、标定和验证，并且转台转动精度达到 0.01°。PC 上位机通过 RS422 接口实时检测激光告警的测量数据。

4.1 探测器图像采集

在合适光照强度的照射下，用 1 064 nm 波段的模拟光源照射激光告警系统，将探测器采集到的光斑衍射图通过 FPGA 芯片和 USB2.0 通信协议传输至上位机实时观看。采集到的光斑如图 10 所示。



(a) 1 064 nm 粗测光斑图

(b) 1 064 nm 精测光斑图

图 10 不同波段激光采集

从图 10 中可以看出，探测器可以成功采集来袭激光的衍射光斑图，并且采集到的图像清晰无坏点，但是由于探测器工艺生产不可避免的缺陷，InGaAs 探测器在成像过程中往往有噪点和盲元的干扰，并且由于光栅衍射效率的影响，在波长 1 064 nm 激光的照射下，精测光斑图像会有零级光斑衍射产生的光晕的干扰，这些噪点和光晕会影响后续对中心光斑的坐标计算，进而影响到激光告警系统对方位角和俯仰角等参数测量的准确性。

4.2 改进的 Otsu 算法验证

为了验证改进的 Otsu 算法的分割结果, 基于 MATLAB 开发软件, 分别用传统的阈值分割算法, 传统的 Otsu 算法和改进的 Otsu 算法, 对探测器采集的光斑图像进行阈值分割。3 种不同方法的分割结果如图 11 所示。

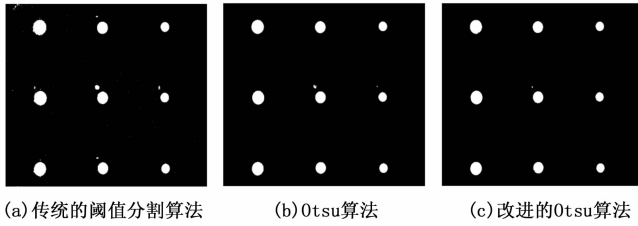


图 11 光斑分割效果比较图

从图 11 不同算法的分割结果比较图可以看出, 在 1 064 nm 的模拟光源照射下, 传统的 Otsu 算法相对于传统的阈值分割算法, 可以有效避免由于探测器工艺产生的噪点和无效像元的影响, 但是零级光斑附近还是存在较大光晕的影响。相比于传统的阈值分割算法和 Otsu 算法, 改进的 Otsu 算法不仅抑制了噪点和无效坏点的干扰, 还可以有效抑制了衍射光晕的影响, 提高了探测器的成像质量, 为激光告警系统计算的准确性提供了一定的保障。

4.3 高精度激光告警系统验证

在有效抑制噪点和光晕的干扰后, 为了验证激光告警系统的精度, 通过转台调整激光告警系统的方向, 使其在不同方位角和俯仰角的模拟激光照射下工作, 通过灰度质心法, 对传统阈值分割法下的光斑中心坐标和改进的 Otsu 法下的光斑中心坐标进行多次计算, 并和理论光斑中心坐标进行对比, 两种不同方法的对比结果如表 2 所示。

表 2 不同角度下衍射光斑的中心坐标

理论光斑中心坐标/像素	传统阈值分割法光斑中心坐标(均值)/像素	改进的 Otsu 算法下光斑中心坐标(均值)/像素
(320, 256)	(319.01, 256.73)	(320.07, 256.09)
(355, 280)	(356.13, 280.47)	(355, 280.05)
(400, 300)	(400, 300.17)	(400.12, 299.93)
(413, 421)	(413.65, 421.55)	(413.09, 421.07)
(300, 390)	(300.93, 390.81)	(300, 390.02)
(295, 360)	(295.5, 360.52)	(295.03, 360.04)
(288, 257)	(289.3, 257.21)	(287.98, 257.04)
(280, 244)	(280.71, 244.96)	(279.98, 244.01)
(275, 240)	(275.66, 240.09)	(275.06, 240.11)
(266, 195)	(266.23, 193.86)	(266.03, 194.89)
平均误差/像素	0.64	0.06

由表 2 可知, 传统阈值分割法光斑中心坐标像素误差在 0.64 个像素左右, 而改进的 Otsu 算法误差在 0.06 个像素左右, 实验结果表明, 相较于传统的阈值分割算法, 改进后的 Otsu 算法使光斑中心提取精度达到了 0.06 个像素,

有效抑制了盲元和光晕对光斑中心提取的影响, 提高了激光告警系统对光斑提取精度。

基于改进后的 Otsu 算法, 将灰度质心法提取出来的光斑中心坐标 x 粗、 y 粗、 x 精、 y 精代入式 (1) ~ (4) 中得到来袭激光的方位角、俯仰角和波长。以转台的角度为基准, 激光告警系统测量的方位角与俯仰角和转台角度对比结果如表 3 所示。

表 3 激光告警系统测量角度对比

转台角度/(°)	激光告警系统测量角度/(°)
(0, 0)	(0, 0)
(0, 20)	(0.05, 19.95)
(0, 40)	(0, 40.05)
(20, 30)	(20.05, 30)
(55, 40)	(55.1, 40)
(10, 10)	(10, 9.95)
(10.05, 10)	(10.05, 9.95)
(10.1, 10)	(10.1, 9.95)
(10.15, 10.05)	(10.15, 10)
(10.15, 10.1)	(10.15, 10.05)
(10.15, 10.15)	(10.15, 10.15)
平均误差/(°)	0.03

由表 3 可知, 双目高精度宽波段激光告警系统的方位角和俯仰角测量最大误差为 0.1°, 平均误差为 0.03°, 角度分辨率达到了 0.05°, 相比较传统激光告警系统, 从测量精度和角度分辨率两个方面都有了较大的提升。

为了验证双目高精度宽波段激光告警系统的视场范围, 在转台俯仰角为 0° 时, 使方位角以 0.05° 的步进依次增加, 记录出可测范围内 x 精和转台角度的关系, 如图 12 (a) 所示。转台方位角为 0° 时, 可测范围内 y 精和转台角度的关系, 如图 12 (b) 所示。

由图 12 可知, 随着转台角度的不断变化, 距离成像中心最近的光斑中心坐标 x 精和 y 精呈现周期性变化, 符合光栅衍射的成像原理, 并且双目高精度宽波段激光告警系统测量的方位角视场范围可以达到 ±60°, 俯仰角视场范围可以达到 ±50°。

5 结束语

本文针对激光告警系统采集的光斑中心提取误差大, 角度测量精度差和测量分辨率低的问题, 设计了一种基于 FPGA 和改进的 Otsu 算法的高精度宽波段激光告警系统。系统通过将改进的 Otsu 阈值分割算法和探测器图像输出相结合起来, 通过自适应计算出合理的阈值, 有效抑制了探测器固有噪声和衍射光晕的干扰, 提高了探测器的成像质量, 突出了探测目标的信息。经验证, 改进后的激光告警系统对光斑中心提取平均误差在 0.06 个像素, 系统的方位角视场范围达到 ±60°, 俯仰角视场范围达到 ±50°, 在满足

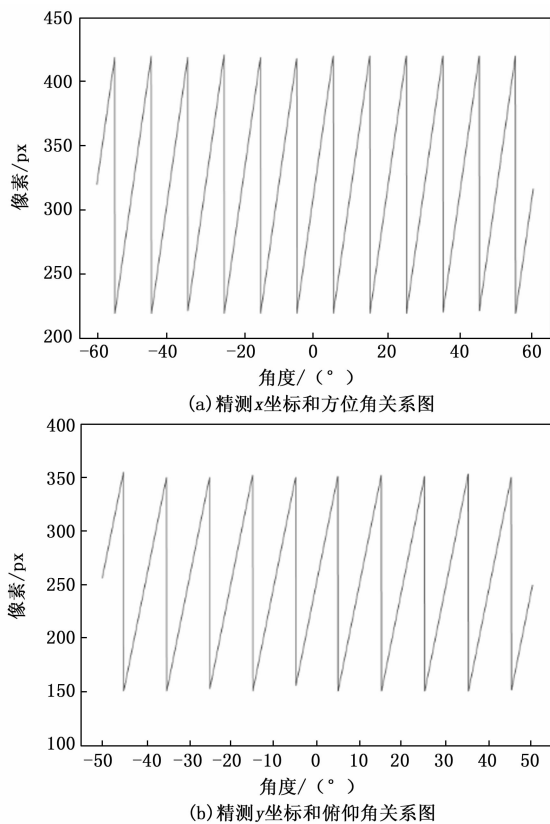


图 12 光斑中心坐标与角度关系图

大视场范围的同时, 角度分辨率达到 0.05° , 角度测量平均误差为 0.03° 。实验证明, 双目高精度宽波段系统在测量精度和视场范围等方面都有了一定的改善, 满足了激光告警系统在现代化战争的应用需求。

参考文献:

- [1] 任 宁, 姜丽新. 光电告警技术与国外典型装备发展分析 [J]. 光电技术应用, 2020, 35 (3): 12-16.
- [2] 石 金. 激光告警多参数测量控制系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [3] 尚 琰. 光栅衍射型宽波段大视场激光告警图像处理 [J]. 激光杂志, 2021, 42 (11): 92-96.
- [4] 吴 琼, 张 瑞, 石 金, 等. 高精度二维宽波段激光告警参数计算算法 [J]. 应用光学, 2022, 43 (1): 111-118.
- [5] 蔡普照, 王志斌, 曹俊卿, 等. 基于 TMS320DM642 的光栅型激光告警系统的设计与实现 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2016, 30 (2): 125-128.
- [6] 丁 鑫. 二维高精度星载激光告警装置及其通信系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [7] 杜伟豪. 二维激光告警中宽波段图像数据采集系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [8] 杨雪梅. 大视场宽波段激光告警光学系统集成设计 [D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [9] 杨雪梅, 张 瑞, 石 金, 等. 基于黑白光栅的宽波段大视场激光告警 (英文) [J]. 光学精密工程, 2022, 30 (19): 2295-2304.
- [10] 辛晨光, 亓 杰, 张 瑞, 等. 双光栅结构光学自成像效应位移检测应用研究 [J]. 光学技术, 2021, 47 (6): 689-694.
- [11] JIN S, RUI Z, et al. Research on two-dimensional laser warning integrated detection technology [J]. Optik, 2022, 270: 170034.
- [12] 陈熙源, 戈明明, 姚志婷, 等. 雨雪天气下的激光雷达滤波算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (7): 172-181.
- [13] NEJAD M S, SHESHKELANI R N. Design and performance analysis of a fisheye-based optical head for an imaging laser detecting system [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science, 2020, 44 (5): 1595-1604.
- [14] 袁智勇, 占文信, 刘耀光. 新媒体背景下精密激光测距弱信号检测方法研究 [J]. 激光杂志, 2021, 42 (7): 50-54.
- [15] 吴圳桦, 唐文艳, 吕文阁, 等. 基于 ISSA 和积分图的二维熵图像多阈值分割快速算法 [J]. 广东工业大学学报, 2023, 40 (5): 47-55.
- [16] 董烈乾, 王 岩, 霍 禹, 等. 基于中值滤波和 seislet 阈值法联合压制混叠噪声方法 [J]. 物探化探计算技术, 2019, 41 (6): 705-711.
- [17] SHUBIN W, YI L, et al. Compound feature attention network with edge enhancement for low-dose CT denoising. [J]. Journal of X-ray Science and Technology, 2023, 31 (5): 915-933.
- [18] 赵媛媛, 武传龙, 高鹏飞. 一种 InP/InGaAs PIN 光电探测器芯片的设计与制作 [J]. 电子质量, 2022 (7): 44-47.
- [19] BYOUNGGUE M, SUP H Y, et al. Analysis of issues in gate recess etching in the InAlAs/InGaAs HEMT manufacturing process [J]. ETRI Journal, 2022, 45 (1): 171-179.
- [20] 武银子, 杨利红, 陈贯文, 等. 远红外宽波段高性能四向偏振光栅的研究 [J]. 西安工业大学学报, 2022, 42 (3): 263-269.
- [21] 董英楠, 郭 辉, 潘江如, 等. 基于改进的 Otsu 法对红花图像分割的研究 [J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51 (8): 68-74.
- [22] VINAY V K, KANMANI G P P. Magnitude normalized and Otsu intensity based brain tumor detection using magnetic resonance images [J]. IETE Journal of Research, 2023, 69 (8): 5079-5089.
- [23] 杨强强, 陈思林, 秦伦明, 等. 结合显著性检测及改进天津算法的紫外图像分割 [J]. 现代信息科技, 2023, 7 (20): 50-53.
- [24] 甄国涌, 闫凯荣, 张凯华. 基于 RS422+SRIO 高速长线通信的设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2022, 41 (11): 180-187.