

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513825

高轨卫星目指自准直测量光斑实时定位方法^{*}

张 旭^{1,2}, 段发阶¹, 孙广开^{2,3}, 朱云鸿^{2,3}, 祝连庆^{2,3}

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072; 2. 北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192; 3. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100016)

摘 要:针对高轨卫星目标指向在轨自准直测量系统无法在有限的计算和存储资源下实现光斑实时定位的问题,提出了一种基于并行流水线的自准直仪光斑无存储实时定位方法。基于质心计算的分解特性设计了分解质心计算方法,计算行或列质心后再合成二维质心,实现了光斑质心的无存储计算,避免了对原始图像数据的全局存储需求;基于并行流水线架构设计了滑动相关滤波方法及其 FPGA 实现方案,采用高斯负二阶导数模板,通过滑动窗口内像素与模板的实时相关性计算有效抑制背景梯度噪声和随机噪声,依托流水线乘法器、加法树累加器等硬件优化设计,确保在数据流式输入过程中同步完成滤波运算,降低噪声影响的同时保证了计算的实时性。采用仿真和实机部署方式完成验证,结果表明分解质心法在确保计算精度的前提下仅利用 FPGA 片内少量 RAM 即可在读取光斑信息后 246 个时钟周期内完成滤波和质心计算,在 25 MHz 时钟下计算时间仅为 9.84 μs ,计算结果的平均偏差为 0.032 pixels,具有较高实时性和计算精度。分解质心法可显著提升高轨卫星光学载荷视轴指向在轨监测数据反馈实时性,为高速机动目标的跟踪定位提供实时数据支持,在航天遥感领域有重要应用价值与前景。

关键词: 光斑定位;无存储;流水线;FPGA

中图分类号: TH712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Real-time light spot localization method for target-pointing measurement with autocollimators in high-orbit satellites

Zhang Xu^{1,2}, Duan Fajie¹, Sun Guangkai^{2,3}, Zhu Yunhong^{2,3}, Zhu Lianqing^{2,3}

(1. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 3. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: Aiming at the problem that high-orbit satellite target-pointing on-orbit autocollimation systems cannot achieve real-time light spot localization under limited computational and storage resources, this paper proposes a storage-free real-time localization method for autocollimator light spots based on a parallel pipeline architecture. By utilizing the decomposition characteristics of centroid calculation, a stepwise centroid computation method is designed: The row or column centroids are calculated first and then combined into a two-dimensional centroid, realizing storage-free computation of the light spot centroid and avoiding the global storage requirements for the original image data. A sliding correlation filtering method and its FPGA implementation scheme are developed based on the parallel pipeline architecture. A Gaussian negative second derivative template was used to effectively suppress background gradient noise and random noise through real-time correlation calculation between pixels in the sliding window and the template. Hardware optimization designs such as pipeline multipliers and additive tree accumulators were utilized to ensure synchronous filtering operations during data streaming input, reducing noise impact while ensuring real-time computation. The method was verified through simulations and actual hardware deployment. Results demonstrate that, under the premise of ensuring computational accuracy, the proposed method completes filtering and centroid calculation within 246 clock cycles after reading the light spot information, utilizing only a small amount of FPGA

收稿日期: 2025-03-16 Received Date: 2025-03-16

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(52375524)项目资助

on-chip RAM. At a 25 MHz clock frequency, the computation time is only 9.84 μs , with an average deviation of 0.032 pixels, achieving both high precision and real-time capability. This method can significantly improve the real-time feedback of on-orbit monitoring data for optical payload line-of-sight pointing in high-orbit satellites, providing real-time data support for tracking and locating high-speed maneuvering targets, with important application value and prospects in aerospace remote sensing.

Keywords: light spot localization; storage-free; pipeline; FPGA

0 引 言

高轨遥感卫星在飞机、舰船等高机动高动态目标定位领域具有重要应用价值,随着目标机动性持续增强,其视轴指向定位的实时性已成为核心指标。近年来,遥感卫星的成像与数据传输技术不断突破,成像帧率已提升至每秒数十甚至上百帧^[1-2],这对卫星的视轴指向定位提出了毫秒级实时性要求。由于空间环境复杂恶劣,卫星大型遥感载荷的支撑结构易受环境影响产生形变,导致视轴指向偏差并直接影响目标定位精度。为实现高精度定位,必须采用有效的在轨监测手段实时获取视轴指向变化量。遥感卫星视轴指向变化量的测量要求目前尚未形成详细的标准,相关技术指标通常由具体卫星型号的实际工程需求决定,为确保对动态目标的实时定位,在工程实践中需要实现对视轴指向变化量的微秒级测量。这要求配套的在轨测量技术和装置不仅要保证监测精度,更要满足严格的实时性要求,从而确保系统能够对结构形变引发的指向误差做出快速响应,最终保证高动态目标定位精度和实时性。提升测量系统的实时处理能力已成为突破当前技术瓶颈的关键所在。

光电自准直测量作为一种高精度角度测量方法,被广泛应用于包括光学技术^[3-6]、精密测量^[7-11]、机械工程^[12-16]、航空航天^[17-22]等诸多领域。光电自准直测量通过发射测量光束,并精确计算反射光斑的位置变化来实现角度变化的高精度测量,具有测量精度高、系统稳定可靠等优势,能够准确测量遥感卫星载荷支撑结构在轨变形,进而解算视轴指向变化,为高精度目标指向定位反馈关键数据。

自准直测量的主要环节在于对反射光斑图像的处理,对光斑目标的快速识别和准确计算是实现高精度实时测量的关键。2022 年呼延焱等^[23]设计了一种兼容多种卷积算子的计算引擎,通过优化批归一化和并行化策略,在 150 MHz 频率下实现了 1 382.4 千兆次浮点运算每秒(giga floating-point operations per second, GFLOPs)性能、0.29 ms 计算时间和 105.45 GFLOPs/W 能效,显著提升了目标检测效率。2023 年 Su 等^[24]设计了一种基于现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)的多核异构处理系统用于空间目标检测,单帧图像处理时间为 22.064 ms,处理速度达到 45 fps,检测率达

到 96.36%,功耗控制在 15 W 以内。2021 年周海等^[25]提出了一种基于深度学习的增强型红外小目标检测网络(enhanced infrared small target detection network, EISTDnet),通过卷积核尺寸归一化、归一化(batch normalization, BN)层融合及特征映射层简化,构建高性能并行架构,处理速度提升 1.33 倍,运算操作数减少至 48.46%,在 180 MHz 时钟下达到 32.37 ms 周期,满足实时处理需求,有效提高了算法效率。2024 年 Panousopoulos 等^[26]提出了一种基于 Zynq-7020 FPGA 的星跟踪系统,通过快速高斯拟合(fast gaussian fitting, FGF)算法,实现了 1.9 Gbit/s 的吞吐量和 26 ms 的处理时间,质心误差低至 0.001 pixels,处理速度提升了 8 倍。2024 年马浚轩等^[27]提出了一种基于分步策略的高精度光斑质心实时结算方法,实现了 50 MHz 时钟下 24.8 ms 的计算速度以及 0.029 pixels 的测量标准差。以上研究针对目标图像的高速高精度处理进行了很多探索,但这些研究对于运算和存储资源有着较高的要求,而航天器在轨应用对计算资源有着严格的限制。同时空间环境对元器件等级的要求以及卫星型号任务对国产化率的要求要求进一步加深了资源限制。现有自准直测量光斑定位算法虽然可用于地面测试,但在轨应用时却因资源限制难以满足实时性要求。因此,亟需研究不依赖额外存储器件同时满足实时性要求的光斑定位算法。

针对高轨遥感卫星在轨资源使用特点,提出了一种面向高轨遥感卫星在轨应用的自准直仪光斑定位方法。该方法针对卫星在轨资源受限的情况,设计了基于分解质心计算的光斑中心定位方法;针对像素读出数据流设计了基于相关计算的图像滤波方法;设计了光斑中心计算方法的整体 FPGA 实现方案,实现了基于并行流水线的无存储、实时光斑质心计算,为高轨遥感卫星对高速机动目标的实时跟踪定位提供有效的数据支撑。

1 自准直测量光斑定位方法

1.1 空间结构夹角自准直测量原理

自准直仪是一种基于光学自准直原理的测量设备,主要用于测量微小的角度变化。自准直仪内部的光源通过光阑形成特定模式的光斑后通过透镜组成的准直系统变为平行光并射出,平行光遇到待测物体上的反射镜后被反射回到自准直仪,并在成像器件上成像。通过对成

像光斑的中心偏移进行计算,即可测得待测物体上反射镜的微小角度变化,进而计算待测物体的角度变化。

航天器在轨运行时受外界因素的影响,其温度和应力的分布会发生变化,从而导致结构角度、视轴指向等关键参数的微小变化,并体现在关键位置坐标的角度变化上。自准直测量系统通过测量关键位置的坐标角度变化能够对关键参数的变化进行测量和反演,从而为航天器状态监测提供数据支撑。根据结构变形模式的不同,可以使用单台自准直仪测量俯仰和偏摆角度变化,也可以使用两台自准直仪组合测量俯仰、偏摆和滚转角度变化。空间结构夹角测量原理如图1所示。

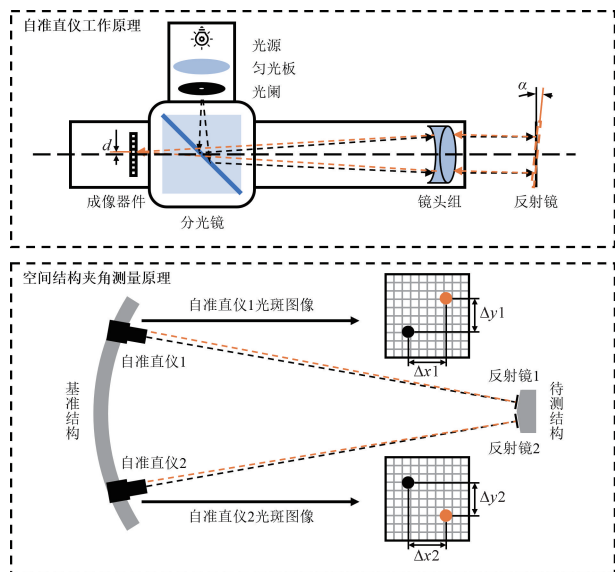


图1 空间结构夹角自准直测量原理

Fig. 1 Autocollimator schematic

1.2 光斑定位方法

传统的光斑定位方法包括质心法、拟合法等。其中质心法是一种简单且高效的光斑定位技术,通过计算光斑区域内所有像素的灰度加权平均位置来确定光斑中心。首先对包含光斑的图像进行阈值分割以区分背景和目标区域,然后根据二维质心公式计算目标质心,公式如式(1)所示。

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum x_i I(x_i, y_i)}{\sum I(x_i, y_i)} \\ y_c = \frac{\sum y_i I(x_i, y_i)}{\sum I(x_i, y_i)} \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_c, y_c 为质心的位置坐标, x_i, y_i 为参与计算的像素的位置坐标, $I(x_i, y_i)$ 为该位置处的像素值。质心法实现简便、速度快,但其精度依赖于图像质量和阈值的选择。

拟合法假设光斑遵循特定的数学模型,并使用最小二乘法等优化算法对该模型进行拟合,从而确定光斑中心位置,公式如式(2)所示。

$$E = \sum (I(x_i, y_i) - \text{Model}(x_i, y_i, x_c, y_c, \dots))^2 \quad (2)$$

其中, Model 为所选择的模型, E 为图像与模型之间插值的平方和。利用数值优化算法对 Model 的参数进行估计, E 最小时即可得到当前模型下光斑质心坐标的最优估计。相比质心法,拟合法能够提供更高的定位精度,尤其适用于形状规则且与所选模型匹配良好的光斑,但其计算复杂度较高,需要更多的计算资源和时间。

以上方法均涉及到对原始光斑图像的滤波处理,需要对原始图像进行多次读取,甚至会涉及到迭代过程。这种处理方式需要对原始图像进行存储,并且需要进行较为复杂的计算。在航天器结构测量的应用中,国产宇航级存储和计算器件无论是可获得性还是存储容量均难以满足上述算法的要求。因此,设计了一种基于相关滤波和分解质心的光斑定位方法,通过相关滤波和一维质心法计算每行图像的质心,之后使用二维质心法计算光斑整体的中心。该方法能够在保证光斑中心计算结果稳定的前提下快速实现光斑定位,同时对于能够多通道并行读出的图像传感器有着很好的兼容性。

2 算法设计与 FPGA 实现

2.1 噪声分析

理想的自准直仪光斑为中心对称的,强度分布近似高斯分布的光斑。然而实际工程应用中,由于光阑加工、光源安装等多种因素的影响,实际光斑形状通常会发生变形,变成椭圆形、水滴型以及其他不规则形状。根据自准直仪的结构,光源的安装位置往往离探测器较近,如果光源遮光不严产生漏光,会为光斑图像添加一个梯度远小于光斑的不均匀的背景噪声。同时,自准直仪电路系统的随机噪声也会对光斑图像造成影响。不同类型的光斑图像缺陷及其组合如图2所示。

2.2 算法设计

根据自准直仪光斑特性及其噪声特征,设计了分解质心法。针对光斑变形,采用光斑的质心作为定位中心。质心法对光斑变形有较好的适应能力,能够在光斑移动时提供较为稳定的中心计算结果,能够提供亚像素级的光斑定位精度。质心法计算时采用光斑一定大小的邻域内的数据,受个别噪声较大的像素的影响较小,具有良好的抗噪声能力。此外,针对光斑图像非均匀的背景噪声,采用基于高斯二阶导数的滑动相关滤波法进行处理。基于高斯负二阶导数的滑动相关滤波模板同时具有大于0和小于0的部分,且模板自身的和为0,能够在提取光斑

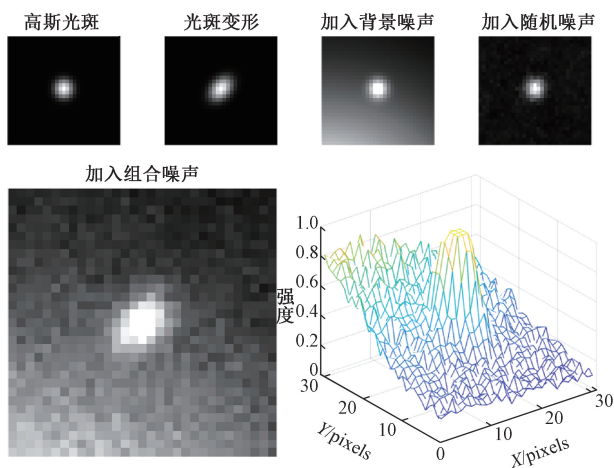


图 2 不同类型的缺陷及其组合

Fig. 2 Different types of defects and their combinations

的同时将梯度远小于光斑的背景噪声剔除;同时,该方法还具有一定的噪声平滑效果,可以在一定程度上抑制坏点,避免对后期光斑定位造成干扰。分解质心法具体步骤为:

1) 滑动相关滤波

滑动相关滤波是一种计算相关模板与滑动窗口内数据相关程度的滤波方法,其计算公式如式(3)所示。

$$y_i = \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{M} \quad (3)$$

其中,向量 \mathbf{M} 为相关模板,向量 \mathbf{X}_i 为以 i 为中心,宽度与 \mathbf{M} 相同的邻域, y_i 为 \mathbf{X}_i 与 \mathbf{M} 的相关程度。

为了滤除背景噪声,采用高斯函数的负二阶导数作为相关模板。自准直仪光斑图像中光斑区域的每一行或列的强度分布均可以近似看作为高斯函数的形式,为了获得最好的滤波效果,以信噪比为指标对相关模板的函数宽度进行了分析,如图 3 所示。

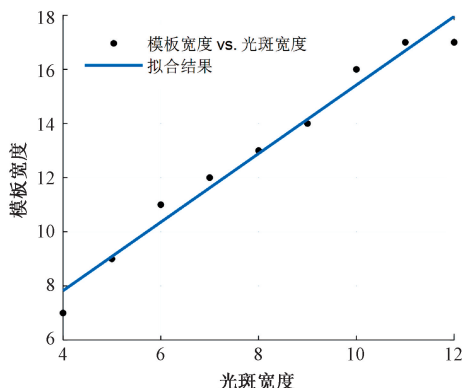


图 3 模板宽度与光斑宽度的关系

Fig. 3 Relationship between template width and spot width

图 3 中的散点为对于特定光斑宽度信噪比最大的模板宽度,根据图中结果,模板宽度与光斑宽度的关系如

式(4)所示。

$$mw = 1.2sw + 2.82 \quad (4)$$

其中, mw 为模板宽度, sw 为光斑宽度。该公式为后续滤波模板宽度的选择提供依据。

2) 光斑判断

分解质心法设计为只对图像进行一次读取且没有图像存储介质,因此需要在完成滑动相关滤波后立即判断该行或列是否存在光斑信息。判断当前行或列存在光斑信息需要满足 2 个条件,首先是存在局部极大值,其次是局部极大值大于强度阈值。强度阈值可以是在设备测试阶段估计得出,也可以根据前一帧图像的全局最大值进行估算。

3) 计算行质心

将完成滑动相关滤波的数据存入先入先出队列 (first input first output, FIFO), FIFO 的宽度由相关模板宽度决定,确定了质心法的邻域范围。同时判断当前行或列是否存在光斑信息,如果存在,则对 FIFO 输出的数据进行一维质心计算。以先计算每行一维质心,再计算二维质心为例,一维质心计算公式如式(5)所示。

$$C_{x,y} = \frac{\sum_x x \cdot I(x,y)}{\sum_x I(x,y)} \quad (5)$$

其中, x, y 为行列坐标, $I(x, y)$ 为对应位置的像素值, $C_{x,y}$ 为第 x 行的一维质心。计算得到的行质心被累加到特定寄存器以供后续质心合成使用。

4) 计算二维质心

利用包含光斑信息的行的质心和像素值的和即可计算二维质心,二维质心计算公式如式(6)所示。

$$\begin{cases} C_x = \frac{\sum_y C_{x,y} \sum_x I(x,y)}{\sum_y \sum_x I(x,y)} \\ C_y = \frac{\sum_y y \sum_x I(x,y)}{\sum_y \sum_x I(x,y)} \end{cases} \quad (6)$$

其中, C_x 和 C_y 为二维质心的行坐标和列坐标。

2.3 仿真验证

设计自准直仪光斑仿真图像验证算法性能。仿真图像大小为 1 001 pixels × 1 001 pixels, 其中光斑中心位于 (101, 901), 强度分布为二维高斯分布, x 方向的半高全宽为 4, y 方向为 x 方向的 $\sqrt{2}$ 倍, 光斑顺时针旋转 45° , 强度为 0.5。同时在光斑图像中加入背景噪声, 具体为位于 (0, 2 002) 处的半高全宽为 2 002 的高斯光斑, 强度为 1.5。之后再加入复合的随机噪声, 具体成分包括强度为 0.01 的符合标准正态分布的热噪声, 散粒噪声以及强度为 0.1 的闪烁噪声。

根据前述的模板宽度与光斑宽度的关系, 选择半高

全宽为 8 的高斯函数生成滑动相关滤波模板,模板大小为 47 pixels。原始图像和经过滑动相关滤波后的图像如图 4 所示。

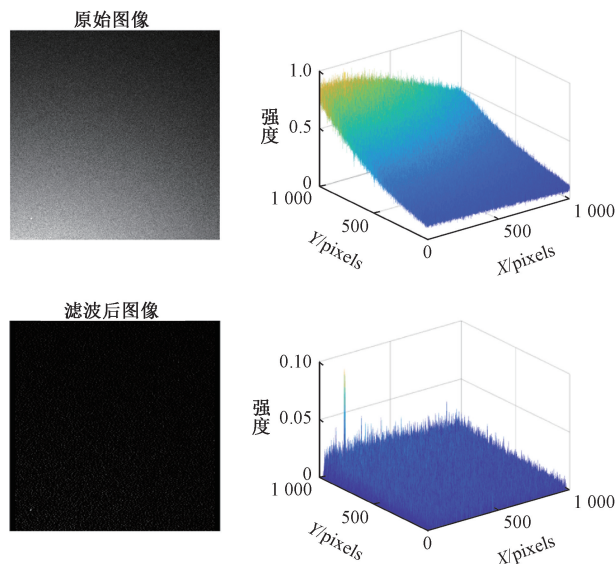


图 4 原始图像和滤波后的图像

Fig. 4 Original image and filtered image

可以看到经过滤波后光斑图像的背景噪声被较好的去除,光斑对比度有较大提升,经过 2 次质心法计算后即可得到光斑质心。生成 100 张光斑图像进行仿真,计算结果如图 5 所示,最大误差为 0.467 1 pixels。

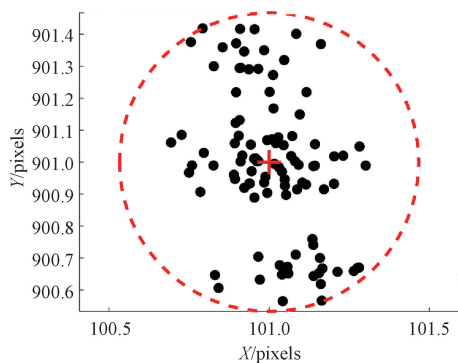


图 5 光斑质心误差分布

Fig. 5 Distribution of centroid error of spot

从图 5 可以看出,计算得到的光斑质心,其在 y 方向上的误差大于在 x 方向上的误差,原因是在计算行质心时使用了邻域范围内所有的行数据,而在计算二维质心时,由于阈值选取使得部分行质心没有参与计算,导致计算二维质心的 y 坐标时使用的光斑信息少于计算 x 坐标时。

2.4 误差分析

光斑的质心由光斑的强度分布决定,当光斑的强度

分布不发生相对变化时其质心也不会发生相对变化,因此主要分析背景噪声和随机噪声对算法精度的影响。

1) 背景噪声

为了分析背景噪声对算法精度的影响,设计了包含背景噪声的光斑图像。其中背景噪声为中心位于 (501, 501) 处,半高全宽为 501,强度为 0.5 的二维高斯分布。分别取 X 、 Y 轴坐标为 101~901,间隔为 10 个 pixels 的共 6 561 个位置添加光斑。计算得到的光斑位置与实际光斑位置的误差如图 6 所示。

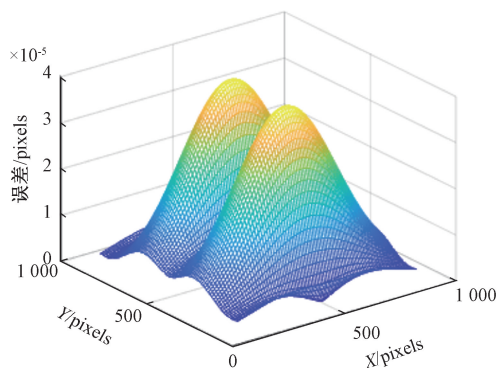


图 6 光斑计算位置与实际位置的误差

Fig. 6 Error between calculated and actual positions of spots

从图 6 可以看出,光斑质心计算的误差分布呈现类似马鞍的形状,这是由于在计算二维质心时 Y 方向的不对称导致被选中参与计算二维质心的行质心数据被阈值筛选,部分数据没有参与计算,因此质心的 Y 坐标出现了较大误差。根据图 6 中质心误差水平,背景噪声造成的质心误差较小,可以忽略,算法对背景噪声具有较强的抑制作用。

2) 随机噪声

光斑图像中的随机噪声主要由热噪声、散粒噪声以及闪烁噪声组成,其中热噪声由系统中电子的随即热运动引起,符合高斯分布;散粒噪声由光子到达传感器的随机性引起,符合泊松分布;闪烁噪声通常被认为由材料缺陷和表面状态引起,其功率谱密度与频率成反比。

分别验证不同强度下 3 种噪声对质心解算的影响,以及 3 种噪声的综合影响。其中热噪声设计为标准正态分布与强度系数相乘,强度系数为光斑强度的 1%~10%。散粒噪声设计为以像素值强度为 λ 的泊松分布,光斑强度为 10%~100%。闪烁噪声根据光斑图像的空间频率分布生成,其功率谱密度与频率成反比,并与强度系数相乘,强度系数为光斑强度的 1%~10%。分别对 3 种噪声的影响进行了 100 次仿真,3 种噪声对质心计算的影响如图 7 所示。

可以看出对于热噪声,随着噪声强度的增加光斑质心的计算误差也在单调增加,当热噪声强度为光斑的

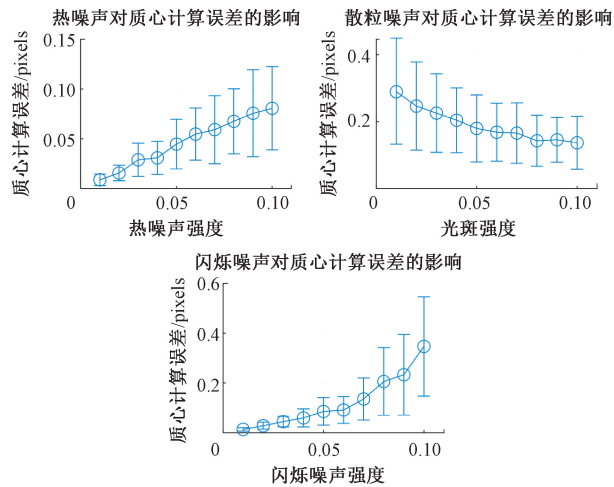


图 7 3 种噪声对质心计算的影响

Fig. 7 The impact of three types of noise on centroid calculation

10%时质心计算误差为 0.08 pixels,影响相对较小;对于散粒噪声,随着光斑强度的增大,散粒噪声的影响逐渐下降,当光斑强度达到探测器饱和值时,散粒噪声造成的质心计算误差为 0.14 pixels,因此应尽可能提高光斑的强度;对于闪烁噪声,质心计算误差会随着闪烁噪声的增大而增大,闪烁噪声强度为光斑 10%时对光斑质心计算的影响为 0.35 pixels,可以认为是噪声影响中的主要因素。

2.5 FPGA 实现

为了实现对光斑图像的无存储和实时计算特性,设计了基于并行流水线的算法架构,其中主要包括由流水线乘法器和加法树累加器组成的滑动相关滤波器、判别器以及流水线除法器。算法的整体架构图如图 8 所示。

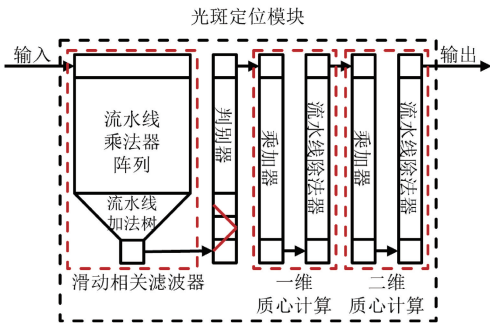


图 8 算法整体架构

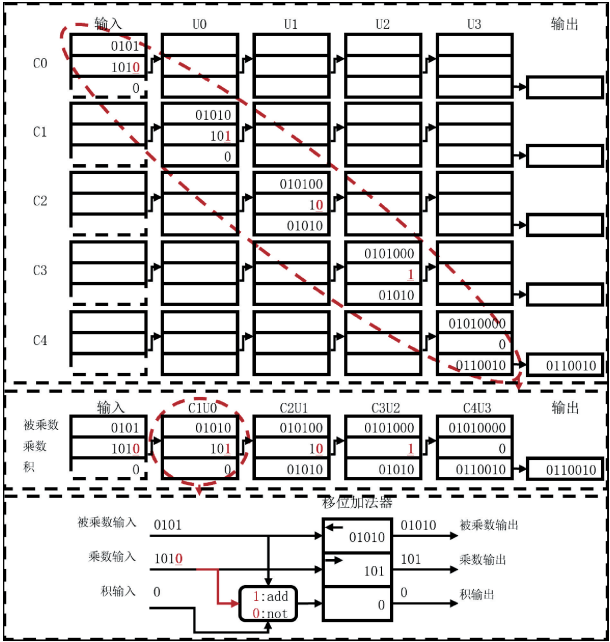
Fig. 8 Algorithm architecture diagram

其中各主要组件设计为:

1) 流水线乘法器

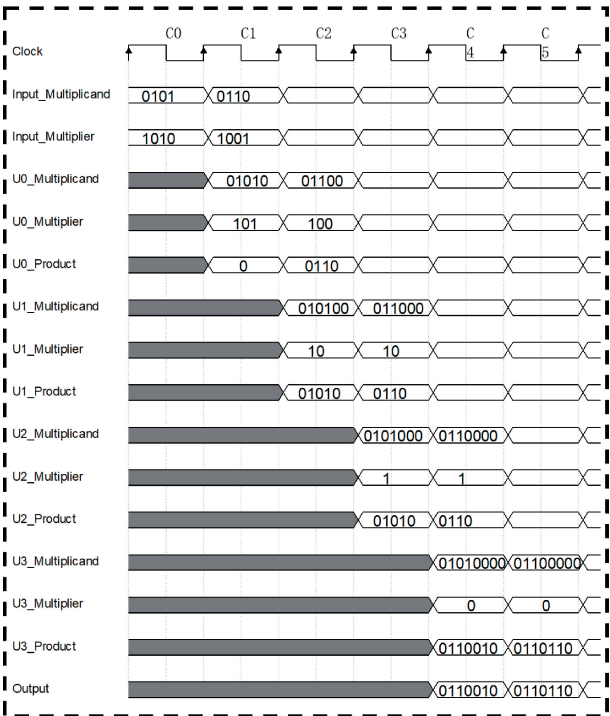
FPGA 中通常会配备有硬件乘法器,以实现在单周期内实现乘法运算。但硬件乘法器数量通常有限,在滤波模板宽度较大,或者同时有多行或列图像数据同步计

算时硬件乘法器数量往往无法满足需求,同时还要考虑到时序和移植问题,因此需要手动实现流水线乘法器。流水线乘法器的结构及时序图如图 9 所示。



(a) 流水线乘法器结构

(a) Structure diagram of pipeline multiplier



(b) 流水线乘法器时序图

(b) Timing diagram of pipeline multiplier

图 9 流水线乘法器结构及时序图

Fig. 9 Structure and timing diagram of pipeline multiplier

流水线乘法器由多个移位加法器组成,每一个移位加法器根据输入的乘数最低位控制加法运算,当乘数最

低位为 1 时将被乘数与输入的积相加并输出,同时将输入的被乘数左移一位,乘数右移一位并输出。移位加法器的个数与乘数的位数相同,图 9 为乘数为四位时的示例。完成对乘数所有位的操作后即可完成乘法运算,该设计能够以流水线的形式对不断输入的数据进行乘法运算,结果输出的时延周期数即为乘数的位数。

2) 流水线加法树

滑动相关滤波要求在一个时钟周期内完成多个加数的求和,采用组合逻辑在单周期内计算大量数据的加法会导致延迟问题,影响时序性能,因此设计了加法树的计算形式,将单周期大量加法的计算需求分摊到时间和空间上,以保证时序性能。流水线加法树的结构及时序图如图 10 所示。

加法树累加器同样支持流水线的工作方式,可以实现在每个时钟周期内完成多个加数的求和,结果输出的延时期数约为 \log_2 (加数数量)。

3) 滑动相关滤波器

滑动相关滤波器需要在每个时钟周期实现多个乘法和多个加数的累加,其中多个乘法的同时实现由多个流水线乘法器并行完成,多个加数的累加由流水线加法树实现。滑动相关滤波器的结构及时序图如图 11 所示。

构成滑动相关滤波器的流水线乘法器和加法树累加器均支持流水线工作方式,所以滑动相关滤波器也是按照流水线的方式实现滑动滤波计算。

4) 判别器

判别器主要用于判断当前处理的行或列是否包括有效的光斑数据,其判断的标准为同时满足:(1) 经过相关滤波处理后的数据是否存在局部极大值点;(2) 局部极大值点的数值是否超过强度阈值。其中的强度阈值指的是判断存在光斑的像素最小值,由于无法完全去除噪声

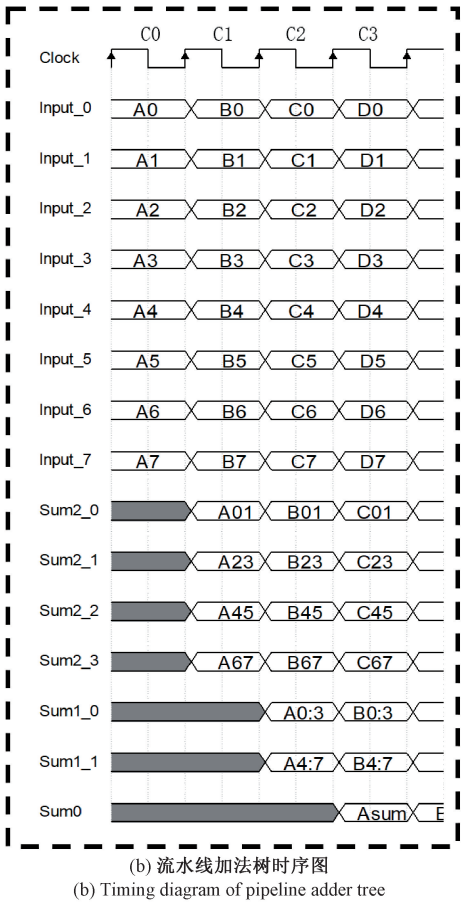
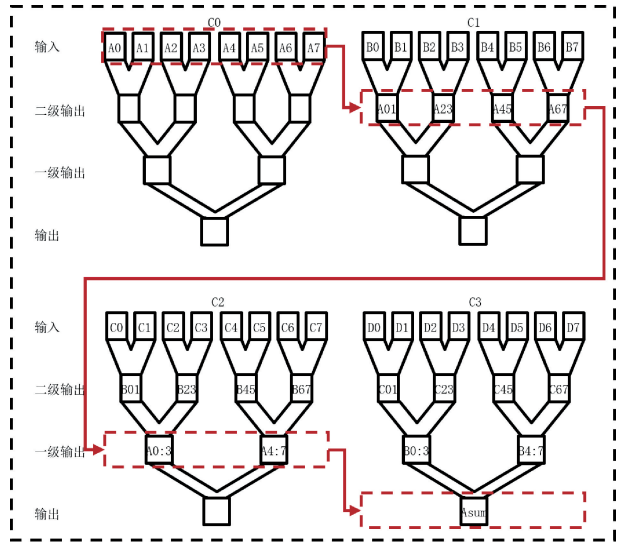


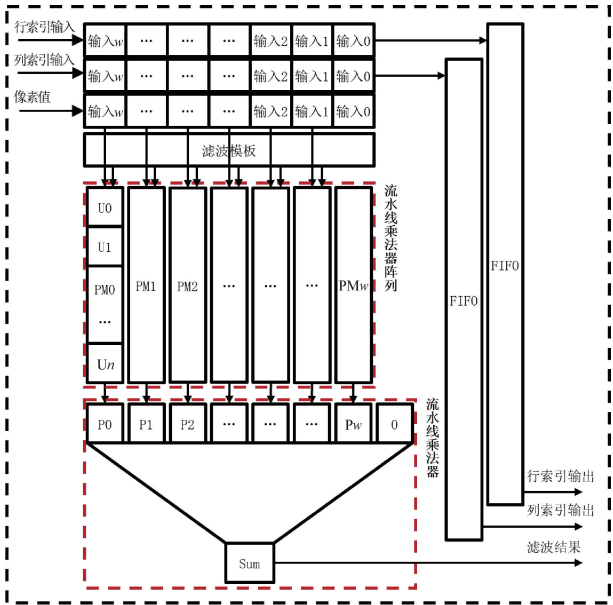
图 10 流水线加法树的结构及时序图

Fig. 10 Structure and timing diagram of pipeline adder tree



(a) 流水线加法树结构

(a) Structure diagram of pipeline adder tree



(a) 滑动相关滤波器结构

(a) Structure diagram of the sliding correlation filter

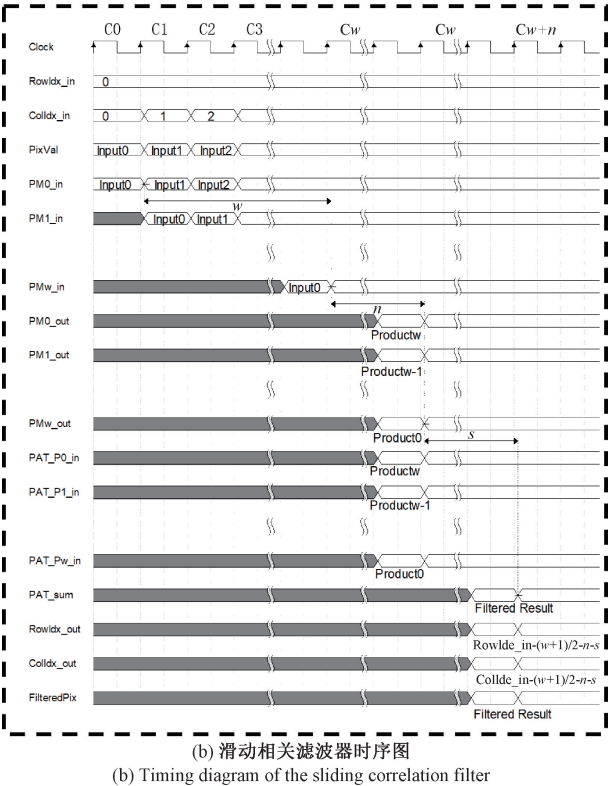


图 11 滑动相关滤波器的结构及时序图

Fig. 11 Structure and timing diagram of the sliding correlation filter

影响,因此需要通过阈值来区分噪声和光斑。强度阈值可以在测试阶段根据实采图像进行选择,也可以在实际使用过程中根据上一帧光斑图像的全局最大值来确定。为了后端的累加能够获得正确的数据,判别器包括一个 FIFO,用于对数据流添加合适的延时。同时判别器还会输出一个有效信号,以指示是否找到光斑信号。判别器的结构及时序图如图 12 所示。

为了确保后续累加能够得到正确的数据,判别器会缓存一维质心计算窗口长度一半长度的数据,同时判断局部极值需要额外 3 个周期,因此其结果输出延时周期数为一维质心计算窗口长度的一半再加 3。

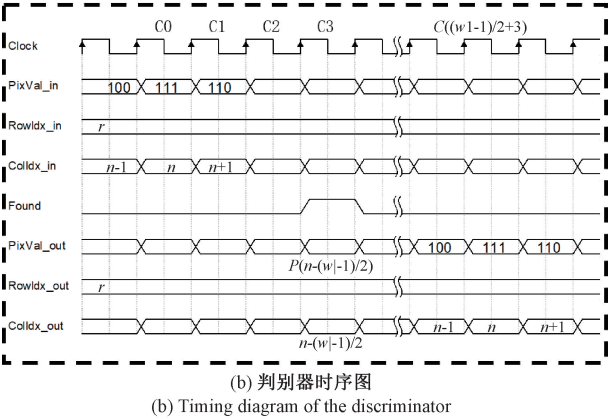
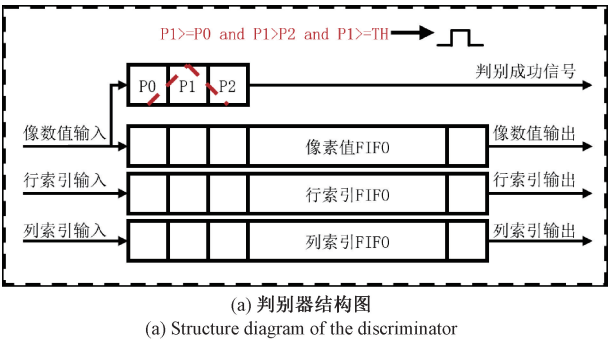


图 12 判别器的结构及时序图

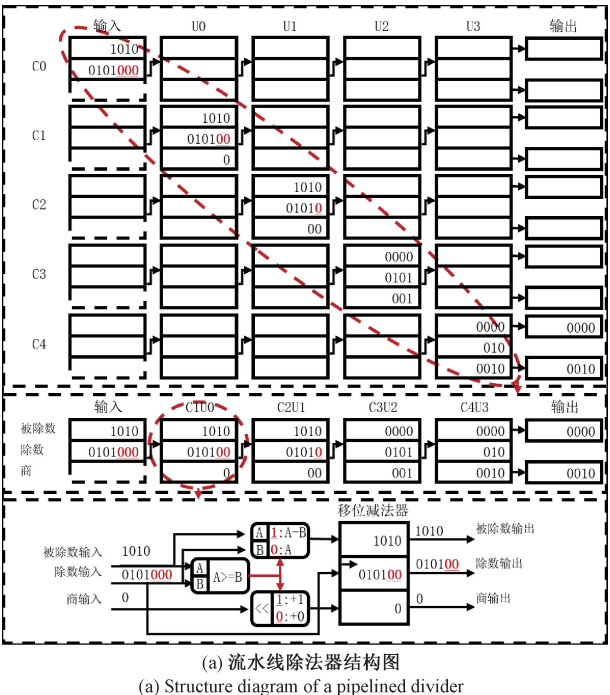
Fig. 12 Structure and timing diagram of the discriminator

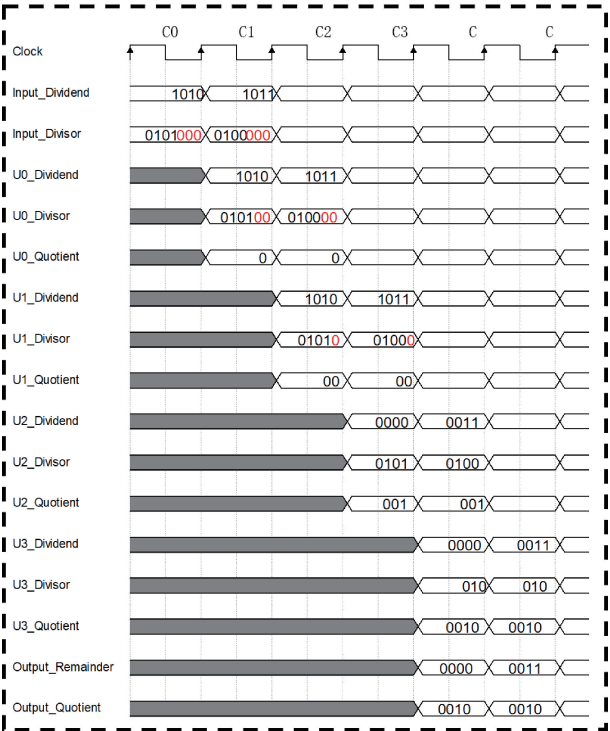
5) 流水线除法器

由于除法的复杂性更高,且不同应用中对除法的需求差异较大,因此 FPGA 中通常不会内置除法器,除法逻辑需要用户根据自身需求自行实现。考虑到对不同组合模式的光斑图像的兼容,除法器也使用流水线的形式。流水线除法器的结构及时序图如图 13 所示。

与流水线乘法器相反,流水线除法器的每个计算单元根据余数和移动到相应位置的除数的大小关系决定是否从余数中减去除数。该设计结果输出时延周期数即为被除数的位数。

完成算法实现后进行功能仿真,为了提高仿真效率,设计了较小的仿真光斑图像。图像大小设置为 101 pixels×101 pixels,使用 and 上位机算法仿真相同的





(b) 流水线除法器时序图
(b) Timing diagram of a pipelined divider

图 13 流水线除法器的结构及时序图

Fig. 13 Structure and timing diagram of a pipelined divider

光斑和随机噪声设置,光斑位置设置为(31,71),背景噪声设置为半高全宽为202,位于(0,202)的高斯光斑,强度为1。仿真时序如图14所示。

由仿真时序可知,当图像整体按行依次输入算法模块时,从最后一行有效光斑数据进入滑动相关滤波器到得出计算结果经过了246个时钟周期,此时光斑图像的读取尚未结束,说明算法能够实现对光斑的实时定位。

3 实验验证

3.1 实验系统搭建

在气浮光学平台上搭建自准直仪测量系统,包括自准直仪单机以及反射镜组件。反射镜组件放置于旋转台上,以实现自准直仪像面光斑位置的调整。

自准直仪成像器件采用长光辰芯的 GMAX2505 互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 图像传感器,图像采样大小取为 1 100 pixels×1 100 pixels。通过 422 接口传输自准直仪光斑定位结果,同时通过 CameraLink 接口传输采集到的原始图像以供定位结果的验证。实验系统如图 15 所示。

通过对旋转台的调整,实验在行列坐标分别为 100、500、900 等共 9 个点的附近进行了各 100 次图像和定位结果的采集。

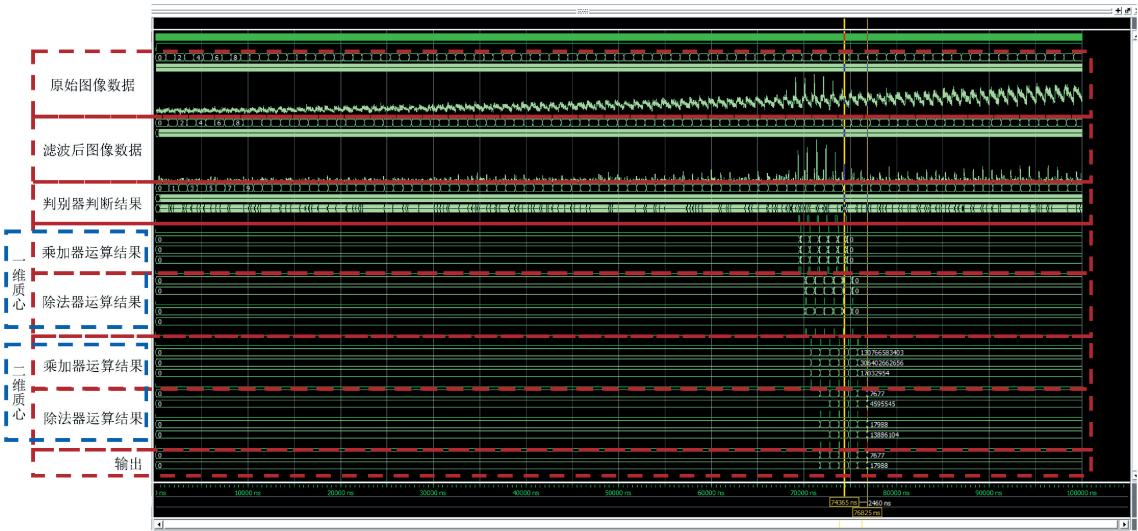


图 14 算法仿真时序图

Fig. 14 Algorithm simulation timing diagram

3.2 算法部署

将设计的算法部署在自准直仪内部的 FPGA 芯片上,生产厂家为复旦微电子,型号为 FMQL45T900。外围程序将从 GMAX2505 芯片采集到的图像整理为逐行输出的包括行索引和列索引的数据流,并输入算法模块。

算法在 FMQL45T900 上的资源消耗如表 1 所示。

3.3 实验结果分析

在 FPGA 部署分解质心法和分步法^[14],实验过程中同步采集 FPGA 计算结果和光斑原始图像,并在上位机采用基于 OTSU 阈值分割的质心法和以最大值为初始

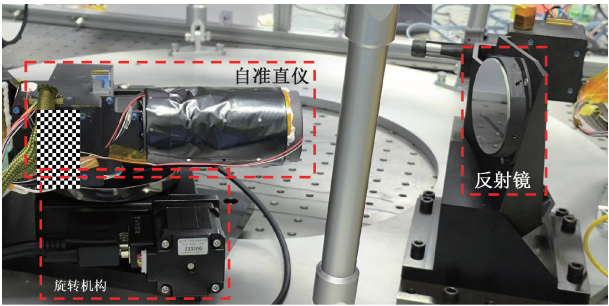


图 15 自准直仪光斑定位实验系统

Fig. 15 Autocollimator spot positioning experimental system diagram

表 1 FPGA 资源使用情况
Table 1 FPGA resource utilization

逻辑	使用	可用	使用率/%
LUTs	82 291	218 600	38
FF	60 244	437 200	14
IO	78	362	22

迭代位置的高斯拟合法对原始光斑图像进行计算。采集到的原始图像如图 16 所示。

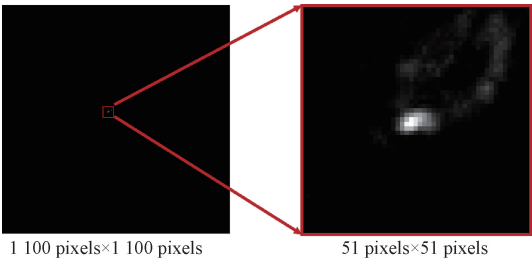


图 16 实验系统采集到的光斑原始图像

Fig. 16 Original image of the spot captured by the autocollimator

对 100 次结果进行平均,FPGA 计算结果和上位机计算结果对比如表 2 所示。

天津法 (Nobuyuki Otsu method, OTSU) 质心法和高斯拟合法的计算过程涉及到复杂的遍历或迭代过程,无法在资源紧张的星载下位机 FPGA 上实现。而分解质心法和分步法根据 FPGA 的并行计算特性进行优化,适合在星载 FPGA 上部署。

从计算结果可以看出,分解质心法在 9 个位置的平均偏差优于分步法和 OTSU 质心法,并且分解质心法对于不同位置处亮度不一的光斑具有较好的稳定性,而分步法和 OTSU 质心法在一些位置会出现偏差较大的情况。同时,对比同样可在 FPGA 部署的分步法,分解质心法的单帧计算时间在 25 MHz 时钟下为 9.84 μ s,而分步

表 2 光斑中心计算结果对比 Table 2 Comparison of calculated results for the center of spot (pixels)				
光斑 目标位置	分解质心法 平均偏差	分步法 平均偏差	OTSU 质心法 平均偏差	高斯拟合法 平均偏差
X:100 Y:100	0.074 4	0.269 7	0.086 3	0.034 5
X:100 Y:500	0.023 5	0.016 6	0.061 6	0.027 6
X:100 Y:900	0.025 6	0.022 1	0.106 6	0.027 6
X:500 Y:100	0.025 6	0.018 6	0.150 0	0.027 9
X:500 Y:500	0.027 1	0.090 5	0.010 5	0.029 4
X:500 Y:900	0.025 3	0.017 4	0.060 2	0.026 5
X:900 Y:100	0.030 6	0.021 7	0.169 9	0.029 6
X:900 Y:500	0.026 8	0.018 9	0.059 6	0.027 6
X:900 Y:900	0.029 4	0.019 8	0.064 6	0.029 5
平均偏差	0.032 0	0.055 0	0.085 5	0.028 9
能在星载下 位机使用	√	√	×	×

法单帧计算时间在 50 MHz 时钟下为 24.8 ms,在计算精度和计算速度上分解质心法均优于分步法。

4 结 论

针对高轨遥感卫星在轨自准直测量系统无法在有限的计算和存储资源下实现光斑实时定位的问题,提出了一种基于并行流水线的自准直仪光斑无存储实时定位方法,实现了光斑质心的无存储计算;设计了滑动相关滤波方法及其 FPGA 并行流水线计算架构,降低噪声影响的同时保证了计算的实时性。实验证明,分解质心法能够在无额外存储器件的条件下在完成光斑数据读取后的 246 个时钟周期内完成光斑质心计算,在 25 MHz 时钟下计算时间仅需 9.84 μ s,平均偏差为 0.032 pixels。在之后的研究中,将进一步优化滤波算法,降低随机噪声对定位精度的影响,同时进一步优化算法架构,将片内 DSP 资源融入算法架构中,进一步降低算法规模,使自准直测

量系统能够更好的应用于资源受限的航天器测量场景中,为高轨遥感卫星对高速机动目标的实时跟踪定位提供资源需求更低,实时性更好的解决方案。

参考文献

- [1] 肖超,安玮,李朝旭,等. 天基光学遥感目标智能检测技术综述[J]. 遥感学报,2024,28(7):1681-1692.
XIAO CH, AN W, LI CH X, et al. Intelligent detection for moving targets in space-borne optical remote sensing: A review[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(7):1681-1692.
- [2] CHRISTENSEN P R, SPENCER J R, MEHALL G L, et al. The Europa thermal emission imaging system (E-THEMIS) investigation for the Europa clipper mission[J]. Space Science Reviews, 2024, 220(4):38.
- [3] LIU Y, ZHEN Y, XIE L Y, et al. Roll angle of autocollimator measurement method based on hollow cube corner reflector [J]. Optoelectronics Letters, 2022, 18(2):91-96.
- [4] 李锟,丁红昌,曹国华,等. 光学连续闭环光电编码器误差检测系统[J]. 红外与激光工程,2021,51(7):322-329.
LI K, DING H CH, CAO G H, et al. Error detection system of photoelectric encoder based on optical continuous closed-loop[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021,51(7):322-329.
- [5] KERDKAEW C, KAEWPHO S, CHOMKOKARD S, et al. A calibration method of CMOS-based autocollimator using reflected diffraction pattern of strip reflector[J]. Precision Engineering, 2024, 85:191-196.
- [6] 杜卓,王伟,王允,等. 基于偏心抑制的激光差动共焦焦距高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报,2023,44(11):39-46.
DU ZH, WANG W, WANG Y, et al. High-precision measurement method of laser differential confocal length based on eccentricity suppression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(11):39-46.
- [7] MATSUKUMA H, ASUMI Y, NAGAOKA M, et al. An autocollimator with a mid-infrared laser for angular measurement of rough surfaces[J]. Precision Engineering, 2022, 67:89-99.
- [8] 裘祖荣,周磊,薛洁,等. 精密减速器检测仪测角误差补偿[J]. 光学精密工程,2021,29(11):2622-2631.
QIU Z R, ZHOU L, XUE J, et al. Angle error compensation of precision reducer tester[J]. Optics and Precision Engineering, 2021,29(11):2622-2631.
- [9] 杜明鑫,闫钰锋,张燃,等. 基于透镜阵列的三维姿态角度测量[J]. 中国光学,2022,15(1):45-55.
DU M X, YAN Y F, ZHANG R, et al. 3D position angle measurement based on a lens array[J]. Chinese Optics, 2022,15(1):45-55.
- [10] 章广威,崔健,邱丽荣,等. 激光差动共焦透镜中心偏测量系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报,2023,44(2):24-31.
ZHANG G W, CUI J, QIU L R, et al. Design and implementation of laser differential confocal centering error of the lenses measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(2):24-31.
- [11] 王若琳,胡翔,余烨,等. 基于扭摆的落体质心与光心距离的高精度测量[J]. 仪器仪表学报,2022,43(8):85-92.
WANG R L, HU X, YU Y, et al. High-precision measurement of the distance between the mass center and the optical center of falling body based on the pendulum system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(8):85-92.
- [12] 于连栋,曹家铭,赵会宁,等. 关节臂式坐标测量机的运动学建模[J]. 光学精密工程,2021,29(11):2603-2612.
YU L D, CAO J M, ZHAO H N, et al. Kinematics model of articulated arm measuring machine[J]. Optics and Precision Engineering, 2021,29(11):2603-2612.
- [13] 吴新朴,韦怀坤,刘正坤,等. 用于检测光栅线密度的长程面形仪系统[J]. 光学学报,2020,41(6):146-154.
WU X P, WEI H K, LIU ZH K, et al. Long trace profiler for measuring groove density of diffraction gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2020,41(6):146-154.
- [14] 赵长福,丁红昌,曹国华,等. 图像辅助汽车制动主缸补偿孔法线测量[J]. 中国光学,2021,14(5):1212-1223.
ZHAO CH F, DING H CH, CAO G H, et al. Image aided measurement of the automotive brake master cylinder compensation hole normal line [J]. Chinese Optics, 2021,14(5):1212-1223.
- [15] 王志臣,陈涛,曹玉岩,等. 大口径望远镜中间体拓扑优化及形位公差检测[J]. 光学精密工程,2022,30(23):3039-3044.
WANG ZH CH, CHEN T, CAO Y Y, et al. Design and geometrical tolerance detection of center section of large-aperture telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2022,30(23):3039-3044.
- [16] 杨鹏,林虎,杨禹,等. 基于球盘的转台多自由度几何误差测量方法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(11):70-76.
YANG P, LIN H, YANG Y, et al. Geometric errors measurement of rotary table based on a ball plate

- artifact[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(11):70-76.
- [17] 王慧,刘薇,于建冬,等. 航天光学相机几何参数星上监测技术[J]. 光子学报,2018,47(10):162-171.
WANG H, LIU W, YU J D, et al. Geometric parameters monitoring technology for space optical camera[J]. Acta Optica Sinica, 2018,47(10):162-171.
- [18] 刘延芳,马明阳,刘永李,等. 星上敏感器空间矢量自准直测量方法及标定试验[J]. 机械工程学报,2018,55(4):10-18.
LIU Y F, MA M Y, LIU Y B, et al. Auto-collimation measurement method and calibration experiments for space vectors of satellite on-board sensor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,55(4):10-18.
- [19] 李悦昕,祝连庆,张旭,等. 高轨遥感卫星光轴指向误差夹角测量系统标定方法研究[J]. 仪器仪表学报,2023,44(5):160-166.
LI Y X, ZHU L Q, ZHANG X, et al. Research of calibration method for optical axis pointing error included angle measuring system on high orbit remote sensing satellite[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(5):160-166.
- [20] 宋健峰,祝连庆,于明鑫,等. 基于神经网络的星敏支架指向倾角监测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(11):1-8.
SONG J F, ZHU L Q, YU M X, et al. Star tracker bracket pointing inclination monitoring method based on neural network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(11):1-8.
- [21] GAUTIER Q, ALTHOFF A, CRUTCHFIELD C L, et al. Sherlock: A multi-objective design space exploration framework[J]. ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems, 2022,27(4):33-52.
- [22] 朱进,黄垚,朱维斌,等. 磁光阱异面空间角度测量及测量不确定度评定[J]. 仪器仪表学报,2022,43(1):103-110.
ZHU J, HUANG Y, ZHU W B, et al. Measurement of spatial angle of different surfaces of magneto-optical trap and evaluation of measurement uncertainty[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(1):103-110.
- [23] 呼延焱,李映,蒋冬梅,等. 在轨高效目标检测加速技术[J]. 宇航学报,2022,43(11):1544-1556.
HUYAN L, LI Y, JIANG D M, et al. Efficient acceleration technology for on-board object detection[J]. Journal of Astronautics, 2022,43(11):1544-1556.
- [24] SU Y Q, CHEN X, LIU G R, et al. Implementation of real-time space target detection and tracking algorithm for space-based surveillance[J]. Remote Sensing, 2023,15(12):3156.
- [25] 周海,侯晴宇,卞春江,等. 一种FPGA实现的复杂背景红外小目标检测网络[J]. 北京航空航天大学学报,2021,49(2):295-310.
ZHOU H, HOU Q Y, BIAN CH J, et al. An infrared small target detection network under various complex backgrounds realized on FPGA[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021,49(2):295-310.
- [26] PANOUSOPOULOS V, PAPALOUKAS E, LEON V, et al. HW/SW co-design on embedded SoC FPGA for star tracking optimization in space applications[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2024,21(1):16.
- [27] 马浚轩,李红,张旭,等. 面向光轴指向测量系统的光斑质心高精度实时解算方法[J]. 仪器仪表学报,2024,45(6):266-273.
MA J X, LI H, ZHANG X, et al. High-precision real-time algorithm for spot centroid determination in optical axis pointing measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(6):266-273.

作者简介



张旭,2016年于北京工业大学获得学士学位,2020年于北京信息科技大学获得硕士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生,主要研究方向为光纤传感与光电器件。

Email:zhangxuBISTU@outlook.com

Zhang Xu received his B.Sc. degree from the Beijing University of Technology in 2016 and his M.Sc. degree from the Beijing Information Science & Technology University in 2020. He is currently a doctoral candidate at the School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University. His primary research focus is on optical fiber sensing and photoelectric devices.



祝连庆(通信作者),分别在1982年和1989年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位,2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为北京信息科技大学教授,主要研究方向为光纤传感技术、光纤激光器、光电精密测试技术等。

E-mail:lqzhu_bistu@sina.com

Zhu Lianqing(Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1982 and 1989, respectively, and received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber sensing technology, fiber laser and optoelectrical precision measurement technology.