



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

# 博士学位论文

太阳磁像仪空间自校正稳像观测系统的研究

作者姓名： 白阳

指导教师： 王东光 正高级工程师 中国科学院国家天文台

林佳本 正高级工程师 中国科学院国家天文台

学位类别： 理学博士

学科专业： 天文技术与方法

培养单位： 中国科学院国家天文台

2022年6月



**Research on Space Imager Self-correction Observation System**  
**for Solar MagnetoGraph**

**A dissertation submitted to**  
**University of Chinese Academy of Sciences**  
**in partial fulfillment of the requirement**  
**for the degree of**  
**Doctor of Natural Science**  
**in Astronomical technology and methods**

**By**

**Bai Yang**

**Supervisor: Professorate Senior Engineer Wang Dongguang**  
**Professorate Senior Engineer Lin Jiaben**

**National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences**

**June, 2022**



## 中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名： 白阳  
日期： 2022.05.27

## 中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名： 白阳  
日期： 2022.05.27

导师签名： 王东光 林佳本  
日期： 2022.05.29



## 摘 要

太阳物理学是一门依赖于观测的科学，磁场是当前太阳物理研究中最重要 的观测量，与太阳磁场观测研究相关的科学问题是当前太阳物理研究的前沿和热点，通过对太阳磁场的高分辨观测能够极大地推动领域内的研究工作。自1908年首次测得太阳黑子磁场以来，太阳磁场的观测已经有了110多年的历史。随着当前太阳物理研究的不断深入，对观测数据提出更高的要求，为了保证获取到高分辨率的观测数据，需要更好的观测手段。在地面上，太阳观测会受到大气的严重干扰，大气扰动会导致观测数据的时间分辨率和空间分辨率降低，无法观测到太阳大气中的短时间太阳活动，也无法观测到活动区中的小尺度结构，而将望远镜发射至大气层外可以有效改善太阳观测结果。因此，具备高时空分辨率的空间太阳磁场测量成为目前太阳磁场研究的重要方向。

太阳磁像仪是开展太阳磁场观测研究的核心仪器，其中稳像系统是空间太阳磁像仪的关键技术之一，影响着观测数据的空间分辨率。本课题针对深空探测卫星系统对载荷重量、尺寸限制严苛的要求，设计了基于图像自校正方法的稳像观测系统。本论文通过理论分析、系统研制、仿真实验和实际测试相结合，完成自校正稳像观测系统的设计、研制和试观测，并对自校正稳像观测系统的性能进行系统性分析。与此同时，开展相关跟踪器稳像优化方向的探索和研究。本课题所开展的工作中的主要内容和创新性成果如下：

### （1）完成自校正稳像观测系统的设计和研制工作

为了满足深空探测或微小卫星平台上太阳磁像仪实时稳像观测的需要，本课题设计了一套基于FPGA与DSP硬件平台的自校正稳像观测系统，通过基于自相关算法的高精度稳像方法设计，并结合精确偏振调制、准确交替采样控制等硬件系统和软件系统的设计，克服由于卫星平台抖动、指向误差等因素造成的图像模糊和线性偏移，实现实时相关、校正、深积分的稳像观测系统。目前，针对1K×1K面阵、20 fps的CCD探测器，实现了1像元以内的实时稳像观测。在实验室仿真实验中，对稳像运算时间和稳像精度进行测试，试验结果表明，稳像运算总时间消耗为72.9ms，稳像误差在[-0.5,0.5]，实现稳像系统设定目标。在完成实验室测试后，于2021年6月18日，在国家天文台怀柔太阳观测基地35 cm太

阳磁场望远镜上开展了实际测试验证，数据结果表明该系统能够有效地完成太阳磁像仪自校正稳像观测，获得了更高空间分辨率的太阳磁场数据。稳像系统的成功研制不仅可以为深空太阳磁像仪的研制提供轻量化、高可靠的精密稳像观测技术方案，也可以为地面太阳磁像仪提供不依赖于操作系统的便捷观测系统。

## (2) 开展相关跟踪算法优化设计工作

由于相关跟踪器技术的特征依赖特性，用于进行相关跟踪算法的开窗区域选择对于低分辨率全日面观测数据的稳像精度至关重要，特别是在特征不显著的太阳宁静区，全日面上的特征更加不明显。因此，针对稳像算法的基础开展相关跟踪器稳像优化方向的探索和研究，即对用来进行图像偏移量计算的特征区域的选择进行研究，设计了一个特征区域选择算法，在一段时间内提取一个特征区域，以此来进行一定观测时间段内的偏移量计算。

在本课题中，提出了一种基于Hessian矩阵和二维信息熵约束的区域提取方法，用于优化局部相关跟踪算法的偏移量检测性能，以更好的获得不同图像之间的线性位移。该选区方案由三个步骤组成：1) 首先，使用Hessian矩阵提取特征点；2) 然后，利用尺度空间和阈值筛选出比较好的特征点；3) 最后，计算特征点对应特征区域的二维信息熵，利用熵值约束选定特征区域。模拟仿真实验和实际观测测试结果均表明，本文的区域选择方法可以有效地检测线性位移并提高地基全日面太阳磁图的质量。具有选定区域的局部相关跟踪算法可以获得与全局相关跟踪一样好的图像偏移量检测结果，同时显著减少了稳像的平均计算时间。

本课题研制的自校正稳像观测系统体积小、重量轻，可以在深空探测器和小卫星平台上实现稳定可靠的运行。该方案通过观测算法和观测流程的优化，在保证观测精度的前提下，弥补或替代部分硬件器件，获得高精度的稳像观测数据，可以作为常规空间太阳磁像仪硬件稳像系统可靠性加强组件，实现硬件稳像与软件稳像的备份方案，也可以为正在推进的太阳极轨等项目提供了技术方案支撑。

**关键词：**太阳磁场，空间太阳观测仪器，图像处理，稳像，FPGA，DSP，Hessian矩阵，二维信息熵



## Abstract

Solar physics is a science that depends on observation, and magnetic field is the most important observation in current solar physics research. Scientific problems related to solar magnetic field observation are the frontier and hot spot of current solar physics research, and high-resolution observation of solar magnetic field can greatly promote the research work in this field. Since the sunspot magnetic field was first measured in 1908, the observation of the solar magnetic field has a history of more than 110 years. With the development of solar physics research, higher requirements are put forward for observation data. In order to obtain high-resolution observation data, better observation methods are needed. On the ground, the solar observation will be seriously disturbed by the atmosphere. The atmospheric disturbance will reduce the temporal and spatial resolution of the observation data, and it is impossible to observe the short-term solar activity in the solar atmosphere and the small-scale structure in the active area. Launching a telescope outside the atmosphere can effectively improve the solar observation results. Therefore, the measurement of space solar magnetic field with high spatial-temporal resolution has become an important research direction of solar magnetic field.

Solar magnetic imager is the core instrument for observing solar magnetic field, and image self-correction system is one of the key technologies of space solar magnetic imager, which affects the spatial resolution of observed data. Aiming at the strict requirements of the deep space exploration satellite system on load weight and size, this paper designs an image self-correction observation system based. In this paper, through the combination of theoretical analysis, system development, simulation experiment and actual test, the design, development and trial observation of the image self-correction observation system are completed, and the performance of the image self-correction observation system is systematically analyzed. At the same time, we explore and study the optimization direction of the correlation tracker. The main contents and innovative achievements of this project are as follows:

(1) Complete the design and development of image self-correction observation system.

In order to meet the needs of real-time image self-correction observation of solar magnetic imager on deep space exploration or micro-satellite platform, this paper designs a set of image self-correction observation system based on FPGA and DSP hardware platform. Through the design of high-precision image self-correction method based on autocorrelation algorithm, combined with the design of hardware system and software system such as precise polarization modulation and accurate alternate sampling control, the image blur and linear deviation caused by satellite platform jitter and pointing error can be overcome, and the observation system with real-time correlation, correction and deep integration can be realized. At present, aiming at  $1K \times 1K$  area array CCD detector with 20 fps, real-time image self-correction observation within one pixel has been realized. In the laboratory simulation experiment, the time and precision of image correction are tested. The experimental results show that the total time consumption of image self-correction is 68.9ms, and the error of image correction is  $[-0.5, 0.5]$ , which achieves the set goal of the image self-correction system. After the laboratory test, on June 18th, 2021, the actual test was carried out on the 35 cm solar magnetic field telescope of Huairou Solar Observation Base of National Astronomical Observatory. The data results show that the system can effectively complete the self-calibration image self-correction observation of the solar magnetic imager, and obtain the solar magnetic field data with higher spatial resolution. The successful development of the image self-correction system can not only provide a lightweight and highly reliable precise image self-correction technical scheme for the development of the deep-space solar magnetic imager, but also provide a convenient observation system independent of the operating system for the ground solar magnetic imager.

(2) Carry out the optimization design of related tracking algorithms.

Because of the characteristic dependence of correlation tracker technology, the selection of windowing area for correlation tracking algorithm is very important for the image correction accuracy of low-resolution all-day observation data, especially in the quiet areas of the sun where the features are not obvious, the features on the

all-day surface are even less obvious. Therefore, aiming at the basis of image correction algorithm, the exploration and research of image correction optimization direction of correlation tracker is carried out, that is, the selection of feature areas used for image offset calculation is studied, and a feature area selection algorithm is designed, which extracts a feature area in a certain period of time to calculate the offset in a certain observation period.

In this topic, we propose a region extraction method based on Hessian matrix and two-dimensional information entropy constraint, which is used to optimize the offset detection performance of local correlation tracking algorithm, so as to better obtain the linear displacement between different images. The selection scheme consists of three steps: 1) Firstly, using Hessian matrix to extract feature points; 2) Then, using scale space and threshold to screen out better feature points; 3) Finally, the two-dimensional information entropy of the feature points corresponding to the feature areas is calculated, and the feature areas are selected by using entropy constraints. The results of simulation experiment and actual observation and test show that the region selection method in this paper can effectively detect linear displacement and improve the quality of all-day solar magnetic map of foundation. The local correlation tracking algorithm with selected areas can obtain the same good image offset detection results as the global correlation tracking, and at the same time significantly reduce the average calculation time of image correction.

The image self-correction observation system developed in this paper is small in size and light in weight, and can operate stably and reliably on deep space detectors and small satellite platforms. By optimizing the observation algorithm and process, this scheme can make up for or replace some hardware devices on the premise of ensuring the observation accuracy, and obtain high-precision image correction observation data. It can be used as the reliability enhancement component of image self-correction hardware system of conventional space solar magnetic imager, realize the backup scheme of the image correction of hardware or software, and can also provide technical scheme support for projects such as solar polar orbit being promoted.

**Keywords:** Solar magnetic field, space solar observation instrument, image processing, image stabilization, FPGA, DSP, Hessian matrix, two-dimensional information entropy

## 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 课题的背景和意义 .....	1
1.1.1 太阳磁场观测 .....	1
1.1.2 稳像方法对磁场观测的重要意义 .....	2
1.2 国内外的研究进展 .....	3
1.2.1 国外空间稳像系统的研究进展 .....	3
1.2.2 国内空间稳像系统的研究进展 .....	5
1.3 课题的主要内容 .....	6
1.4 论文的章节安排 .....	7
第2章 空间自校正稳像观测方法的原理及分析 .....	9
2.1 太阳磁场测量 .....	9
2.1.1 太阳光谱线的Zeeman效应 .....	9
2.1.2 偏振光的参数描述 .....	10
2.2 数据采集方法的原理及分析 .....	12
2.2.1 偏振调制 .....	13
2.2.2 光电控制 .....	15
2.2.3 数据调制 .....	15
2.3 稳像方法的原理及分析 .....	15
2.4 自校正稳像方法的原理及分析 .....	19
2.5 小结 .....	21
第3章 自校正稳像观测系统研制 .....	23
3.1 自校正稳像观测系统总体设计 .....	23
3.2 系统硬件设计 .....	26
3.2.1 系统硬件组成 .....	26
3.2.2 高压偏振调制设计 .....	31
3.2.3 光电转换控制设计 .....	31
3.2.4 数字信号处理设计 .....	37
3.2.5 辅助电路设计 .....	39
3.2.6 硬件系统研制总结 .....	39
3.3 系统软件设计 .....	39
3.3.1 图像稳像算法设计 .....	40
3.3.2 辅助算法设计 .....	41
3.4 小结 .....	43

第4章 自校正稳像观测系统测试与分析 .....	45
4.1 测试软件设计 .....	45
4.2 稳像精度测试 .....	46
4.3 太阳观测数据仿真实验 .....	48
4.3.1 整像元仿真实验 .....	48
4.3.2 亚像元仿真实验 .....	49
4.3.3 抗噪声性能分析 .....	50
4.4 实际观测 .....	51
4.5 小结 .....	53
第5章 自动化选区算法设计 .....	55
5.1 自动化选区算法设计分析 .....	55
5.2 图像特征提取算法原理 .....	55
5.3 特征点提取算法 .....	56
5.3.1 SIFT特征点提取算法 .....	56
5.3.2 SURF特征点提取算法 .....	57
5.3.3 ORB特征点提取算法 .....	58
5.4 特征点提取结果对比 .....	59
5.5 特征区域选择算法 .....	61
5.6 特征区域稳像精度测试 .....	62
5.6.1 仿真实验测试 .....	62
5.6.2 实时检测测试 .....	65
5.7 小结 .....	69
第6章 总结与展望 .....	71
6.1 工作总结 .....	71
6.2 未来展望 .....	72
参考文献 .....	73
致谢 .....	77
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果 .....	79

## 图形列表

2.1 纯发射线的Zeeman效应：(a)纵向观测，(b)横向观测。·····	10
2.2 纯吸收线的Zeeman效应：(a)纵向观测，(b)横向观测。·····	11
2.3 自然光、线偏振光、圆偏振光示意图。·····	11
2.4 偏振分析器光学结构示意图。·····	14
2.5 四象限探测器结构示意图。·····	16
2.6 边缘探测器结构示意图。·····	17
3.1 稳像实验平台。·····	24
3.2 稳像系统工作流程图。·····	25
3.3 TMS320C6678器件的功能框图。·····	30
3.4 IPX-1M48-L CCD实物图。·····	32
3.5 FPGA综合电路图：相机与KD*P控制。·····	33
3.6 相机触发信号（CH2）与K*DP控制信号（CH1）。·····	33
3.7 触发输入信号和单帧触发输出信号。·····	35
3.8 全局快门模式。·····	35
3.9 卷帘快门模式。·····	36
3.10 复合快门模式。·····	36
3.11 图像数据调制流程。·····	37
3.12 Cameralink数据解码综合电路。·····	38
3.13 FIFO IP核。·····	38
3.14 相关跟踪算法流程图。·····	41
3.15 二维傅里叶变换算法流程图。·····	42
4.1 测试软件：数据接收。·····	45
4.2 测试软件：磁场观测。·····	46
4.3 测试图像：(a)稳像，(b)直接叠加，(c)基准数据。·····	47
4.4 测试目标局部特征：(a)稳像，(b)直接叠加，(c)基准数据。·····	47
4.5 磁场强度折线图。·····	48
4.6 计算误差随SNR变化曲线·····	50
4.7 磁场图像：(a)直接叠加，(b)稳像。·····	51
4.8 局部磁场图像特征：(a)直接叠加，(b)稳像。·····	52
4.9 磁场强度折线图。·····	52
5.1 SURF 不同方向上的二阶高斯偏导：左图为y方向，右图为xy方向。·	57

5.2 FAST角点检测。 .....	59
5.3 频域增强后特征点提取结果对比。由左到右分别是SURF提取结果，ORB提取结果，SIFT提取结果。 .....	59
5.4 原始图像数据特征点提取结果对比。由左到右分别是SURF提取结果，ORB提取结果，SIFT提取结果。 .....	60
5.5 算法选择区域及对比测试区域实例：(a) 边缘区域，(b) 中心对比区域，(c) 二维信息熵较低的特征对比区域，(d) 二维信息熵值最大的算法选择区域。 .....	63
5.6 太阳左、右偏振叠加图像及太阳磁场图像。 .....	65
5.7 特征区域相关跟踪图像偏移量计算结果：左侧结果是左、右偏振像X轴（水平）方向位移量，右侧结果是左、右偏振像Y轴（垂直）方向位移量。 .....	66
5.8 磁场结果示例。由左至右分别是：特征区域相关全日面磁场、直接叠加结果局部磁场、特征区域相关局部磁场、全局相关局部磁图。 ..	66
5.9 直接累加、全局相关跟踪和特征区域相关跟踪的灰度曲线。 .....	67
5.10 全局相关和局部相关的等值宽度与直接叠加结果的比值。 .....	68
5.11 全局相关和局部相关的图像能量与直接叠加结果的比值。 .....	69



## 表格列表

2.1 KD*P调制方案的偏振元件工作状态 .....	14
3.1 FPGA性能参数 .....	28
3.2 DSP性能参数 .....	29
3.3 CCD性能参数 .....	32
3.4 Cameralink接口协议 .....	34
4.1 抛物线拟合的亚像元精度结果 .....	49
5.1 太阳偏振像中特征点提取数量 .....	60
5.2 不同区域x和y像元偏移量平均检测误差 .....	64
5.3 不同区域x和y亚像元偏移量平均检测误差 .....	64



## 第1章 绪论

### 1.1 课题的背景和意义

太阳主宰着世间万物，影响着人类的生产生活。自古以来，太阳就是人类关注的重要天体，例如，我国古代就有夸父追日、后羿射日等神话传说。从1610年伽利略第一次将望远镜指向太阳、发现太阳黑子以来，天文学不断发展，人类对太阳的认识、理解也在不断深入。现在，人们知道太阳大气是一个巨大的磁等离子体，其间的一切现象和过程都和磁场相互作用密不可分，当今太阳物理的重大成就和主要困难都与太阳磁场的观测及理论研究有关(邓元勇等, 2020)。同时，现代太阳物理学研究表明，太阳耀斑和日冕物质抛射等剧烈太阳活动的根源就是磁场和磁能释放，这些剧烈的太阳活动会对当今人类社会的高科技领域，如卫星导航、航空航天等，产生破坏性影响。因此，开展太阳磁场的观测和研究具有重要的科学意义和社会意义。

#### 1.1.1 太阳磁场观测

当前，太阳磁像仪是对太阳磁场进行观测研究的核心仪器。太阳大气中的到处存在磁场，太阳磁场大体可以分为活动区磁场、极区磁场和宁静区磁场等类型。自1908年Hale(Hale, 1908)观测到太阳黑子磁场以来的百年间，研究者们一直致力于改善太阳磁场的观测技术，并取得了诸多突破性的进展。我国的太阳磁场观测仪器的研究开始于上世纪六十年代，1986年，由艾国祥等人基于双折射滤波器研制的太阳磁场望远镜(艾国祥, 1989)(Solar Magnetic Field Telescope, SMFT)在国家天文台怀柔太阳观测基地投入使用。

随着太阳物理研究的深入，对太阳磁场的观测数据提出了越来越高的要求。在地面上，望远镜会受到大气的严重干扰，一方面，大气扰动会导致观测数据的时间分辨率和空间分辨率降低，无法观测到太阳大气中的短时间太阳活动，也无法观测到活动区中的小尺度结构；另一方面，由于大气层对光谱的吸收作用，无法在地面观测中进行全波段的太阳观测，而将望远镜发射至大气层外可以有效改善太阳观测结果。自20世纪90年代起，国外就开始了空间望远镜稳像技术的研究探索，并发射了用于观测太阳磁场的空间卫星。相对于地基太阳观测来说，空间太阳观测有更多优势，可以避免大气干扰，提高太阳观测数据

的空间分辨率。因此，具备高时空分辨率、高偏振测量精度的空间太阳磁场测量成为目前太阳磁场研究的重要方向。太阳磁像仪的空间观测将以高时间分辨率、高空间分辨率和高灵敏度开展全波段连续稳定观测，为太阳的物理研究提供更精细更丰富的观测信息，助力太阳物理研究。

### 1.1.2 稳像方法对磁场观测的重要意义

在太阳磁场观测中，微弱磁场有几高斯(林佳本 等, 2006a)，需要多帧短曝光数据通过深积分来获得高灵敏度的磁场数据，为了提高磁场信号的信噪比，无论是在空间还是在地面观测，都需要采用深积分或者长时间曝光的方法才能获得高分辨的磁场数据。这种观测方法或是要求太阳望远镜具备极高精度的指向跟踪能力，或是要求磁像仪数据采集系统具备图像错位识别-对齐-积分的高性能数据处理能力。其中，第一种方案通常需要复杂的硬件系统（例如Tip/Tilt Mirror系统）来实现，对于空间太阳磁像仪来说这就意味着更多的载荷重量和硬件可靠性的考虑，例如Tip/Tilt Mirror等硬件设备的位置和使用寿命等；而第二种方案并不依赖于望远镜上稳像相关的硬件系统，它是通过数据采集系统中的软件算法来实现图像错位识别-对齐-积分的观测流程，从而实现太阳磁场高分辨的观测，该方案可以大大降低磁像仪载荷的重量和硬件复杂度，以提高系统在轨运行的可靠性。

近年来，深空太阳探测成为空间太阳观测的热点方向，空间天文观测可以摆脱地球大气的影响，实现接近望远镜衍射极限的角分辨率成像，得到更加精确的天文数据(gehrz, 2006; chandrasekaran 等, 2010; 史少龙, 2014; 李成浩, 2020)。国内正在开展关于极轨、环黄道面、L2点等深空探测任务的论证工作，因此为深空太阳磁像仪探索一种稳定可靠的软件稳像观测技术方案成为当务之急。在调研工作中，发现小卫星平台中对载荷的重量、硬件复杂度等都有苛刻的要求。另外，载荷在卫星平台上，会受到卫星姿态变化、卫星平台和仪器设备的振动等因素的影响，导致探测器靶面上的图像出现抖动、模糊，影响空间分辨率。因此，更需要稳像系统来获取高空间分辨率的科学数据。目前，太阳磁像仪通常使用相关跟踪器(Deng 等, 1999; 林佳本 等, 2006b; Shen 等, 2013)或边缘探测器(et al., 2011; Emilio 等, 2010; 郑兆瑛 等, 2020)消除图像位移，保证磁场测量的精度，其中边缘探测器多应用于全日面观测，而对于局部区域磁场的稳像观测，则需要相关跟踪器来实现。为了更好地在小卫星技术平台上应用太阳磁像

仪，提出了本课题——通过FPGA+DSP硬件系统及固化在其上的软件算法设计、优化实现自校正稳像，从而实现太阳磁像仪空间高分辨观测。

本课题的研究将为上述太阳观测项目的磁场观测方法提供新的技术路线：大批量的减少对硬件设备的依赖，降低磁像仪载荷的硬件复杂程度，进而降低了载荷的重量和功耗，并提升其在轨运行的可靠性。本课题将为太阳磁像仪空间化奠定技术基础，同时，本课题的研究还可以为怀柔基地地基太阳磁场观测设备的发展储备技术基础。

## 1.2 国内外的研究进展

### 1.2.1 国外空间稳像系统的研究进展

1995年，第一颗空间太阳观测卫星太阳和日球层探测器（Solar and Heliospheric Observatory, SOHO）成功发射，由欧洲航天局(ESA)和美国宇航局(NASA)运营，其上搭载了迈克尔逊多普勒成像仪(Scherrer 等, 1995) (Michelson Doppler Imager, MDI)。MDI是一种太阳速度场和磁场的观测仪器，由光学部分和电子学部分两个部分组成，其中，光学部分包含了所有的光学设备：望远镜、稳像系统、光谱和偏振滤光片、光束分配系统、快门、CCD相机，以及对噪声敏感的电子设备；电子学部分包含用于仪器控制和通信的电路板、图像处理器和电源。其上搭载的图像稳定系统是一个闭环的伺服控制系统，将图像投影到引导图像焦平面的四个正交探测器上，每个探测器由一对光电二极管组成，光球特征的抖动将造成强度变化，可以转换为高速误差，并使用三点式压电转换器来驱动摆镜以消除图像误差。

2006年9月23日，由日美欧共同研制的太阳观测卫星Hinode(Shimizu 等, 2008)，又称“Solar-B”或“日出”卫星发射升空，该卫星上搭载了3个载荷，分别是：使用矢量磁场和白光观测研究光球磁场的太阳光学望远镜（Solar Optical Telescope, SOT）、观察日冕和过渡区的等离子体的极紫外成像光谱仪（Extreme ultraviolet Imaging Spectrometer, EIS）、获得高温日冕等离子体高分辨率图像的X射线望远镜（X-Ray Telescope, XRT）。SOT由光学望远镜组件(Optical Telescope Assembly, OTA)和焦平面组件(Focal Plane Package, FPP)组成。OTA是一个50cm衍射极限的格里高利望远镜(Gregorian telescope)主镜、副镜、热转储镜、准直透镜、辅助视场光阑、倾斜折叠镜和偏振调制器(polarization modulator, PMU)

组成；焦平面组件包含有窄带(NFI)和宽带(BFI)滤光片，以及斯托克斯分光偏振计(Stokes Spectropolarimeter, SP)。太阳光学望远镜具有非常稳定的点扩散函数和一个性能优于0.01角秒的图像稳定系统，提供了高分辨率光球和色球的矢量磁场图像。在运行过程中，基于光谱仪的托克斯分光偏振计取得了大量的高质量数据。SOT配备了一个由相关跟踪器和倾斜镜组成的图像稳定系统，可以大大减少图像分辨率的下降和由图像抖动而引起的偏振串扰。相关跟踪器利用了一种580Hz的高速CCD相机，可以通过检测焦平面中图像抖动，然后将偏移信号高速反馈到闭环控制器上。闭环控制器由数字伺服器、压电设备的模拟驱动器和倾斜镜组成，通过相关跟踪器反馈的误差信号来进行稳像处理。

目前，空间矢量磁场观测数据的主要来源是太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory, SDO)上搭载的日震和磁成像仪(W. 等, 2012)(Helioseismic and Magnetic Imager, HMI)。HMI实现了全日面太阳矢量磁场的首次空间观测，能够提供连续高时空分辨率的全日面光球观测图像，使得太阳磁场的精细研究成为可能，旨在研究对流区动力学和太阳发电机，太阳黑子、活动区域和活动复合体的起源和演化，太阳磁场活动和扰动的来源和驱动因素，日冕和日球层内部过程和动力学之间的联系，以及用于空间天气预报的太阳扰动前兆。HMI仪器是迈克尔逊多普勒成像仪(MDI)仪器的增强版本，该仪器是太阳和日球层天文台的一部分。HMI继承了MDI的重要传统，经过修改以允许更高的空间分辨率和时间分辨率，并添加了第二个相机以提供额外的偏振测量。

2020年2月10日，由欧空局领导并开发的太阳探测器太阳轨道卫星(Müller 等, 2020) (Solar Orbiter, SO)，可以首次对于太阳的极区进行高分辨率的观测。SO上搭载的极化和日震成像仪(Polarimetric and Helioseismic Imager, PHI)测量Fe i 617.3 nm谱线中的塞曼效应和多普勒频移，该仪器使用可调谐的LiNbO<sub>3</sub> Fabry-Perot进行窄带成像光谱偏振测量，而偏振调制则使用液晶可变延迟器 (liquid crystal variable retarders, LCVRs)完成。SO/PHI载荷由两个望远镜组成：一个是全日面望远镜 (Full Disc Telescope, FDT)，它覆盖了轨道所有阶段的整个太阳日面，而另一个是高分辨率望远镜 (High Resolution Telescope, HRT)，可以在最近的近日点解析太阳上小至200公里的结构。SO/PHI在HRT通道中实现了基于相关跟踪器的自适应图像稳定系统，使用一个帧频600fps的快速相机对太阳进行成像，根据系统内置相关跟踪器计算偏移量，在7×7的像素场中可以识别到亚

像元级别的偏移误差；然后，相关跟踪器将检测到的偏移量转换为倾斜角信号，然后将该信号发送至闭环控制器中，通过调整快速倾斜镜校正太阳偏移，完成稳像。

### 1.2.2 国内空间稳像系统的研究进展

国内的太阳磁场及磁活动相关研究领域的研究开始于1986年投入使用的国家天文台怀柔太阳观测基地的太阳磁场望远镜(艾国祥, 1989)(Solar Magnetic Field Telescope, SMFT)，近年来，随着科学技术的不断研究，“先进天基太阳天文台”(Advanced Space Solar Observatory, ASO-S)工程研制于2018年正式启动，该工程由中国科学院空间科学先导专项支持，目前处于正样试验阶段，计划2022年底发射。其上搭载的全日面矢量磁像仪(Deng Y Y, 2019)(Full-disk MagnetoGraph, FMG)与HMI和PHI大致相仿，但具有更好的磁场测量精度(邓元勇 等, 2020)。

FMG配备的高精度稳像控制系统，是通过四象限边缘探测器(郑兆瑛 等, 2020)对太阳入射倾斜偏差进行测量的，通过边缘探测器中的光电二极管对探测器上的光强变化进行计算，得到偏移量误差，并将太阳入射倾斜偏差反馈至摆镜控制系统，通过压电陶瓷调整偏摆镜。

根据国内外空间太阳望远镜的研究，在现有的观测设备中，稳像系统主要采用光机电组成的补偿系统，由偏移量探测器和伺服执行器件构成，一般采用偏摆镜等硬件设备按照实时检测出的偏移量进行光路补偿。首先由偏移量探测器检测出太阳入射光路的偏移信号，送入伺服执行器件，通过计算出的相应补偿驱动电压信号，驱动偏摆镜对入射光路进行实时补偿。目前的稳像系统主要分为两类：一类是依据四象限探测器设计稳像系统的，另一类是依据相关跟踪算法来设计稳像系统的。

国家天文台怀柔太阳观测基地于1998年第一次采用后处理的方式实现了相关跟踪算法，先将采集到数据存储到硬盘上，观测结束后再进行相关、移位、叠加等处理。2006年再次升级了该系统(林佳本 等, 2006a,b)，这次采用了FFT算法和IPL图像处理函数库，系统的时间分辨率大大提高，但不能做到实时的图像流处理。经过多次升级改造，于2012实现了一个基于GPU的太阳磁场实时相关跟踪图像处理系统(Shen 等, 2013)，并在怀柔观测基地稳定运行。

以怀柔观测基地稳像系统为基础，本课题研制的太阳磁像仪空间自校正稳像观测系统也是一种图像后处理系统，以FPGA芯片和DSP芯片为硬件基础，通

过软件算法对采集到的图像数据进行稳像和积分，摆脱对偏摆镜等伺服执行器件的依赖，减小了载荷体积和重量，加强了在轨运行的可靠性。

### 1.3 课题的主要内容

目前，国家天文台怀柔太阳观测基地已实现基于GPU及PC机的自校正稳像算法并已完成实际观测验证。因此，针对太阳磁像仪空间化的关键技术——自校正稳像观测方法提出了基于现场可编程门阵列（FPGA）和数字信号处理器（DSP）的软件处理算法的自校正稳像观测方案：

（1）自校正稳像观测系统的核心为稳像算法的软件设计，本课题基于DSP芯片设计并优化自相关运算算法，对观测图像位置偏移实时校正，完成自相关运算和积分运算，且其总时间消耗小于0.1ms，可以满足单核10fps的图像处理速度；

（2）设计并完成硬件系统，通过基于FPGA芯片实现硬件电路的综合，完成相机和KD\*P高压控制模块、数据采集模块，通过由同一晶振信号产生的偏振调制信号和相机控制信号完成太阳偏振数据交替采样，并实现数据的转码和保存；

（3）设计并完成软件辅助系统，通过在上位机与DSP芯片建立通讯连接，实时接受并保存由DSP芯片发送的数据，并且通过软件设计实现一键获取太阳磁场数据，从而实现太阳磁场的高分辨观测；

（4）开展实验室仿真实验和地面望远镜现场实地测量，通过实验室仿真实验验证稳像算法的有效性，并在怀柔观测基地35cm太阳望远镜上获得更高空间分辨率的观测数据。

本项目方案减少了以往空间太阳观测系统中对硬件稳像系统（如Tip/tilt Mirror）的依赖，为空间太阳磁场观测提供新的技术路线，能够大批量的减少硬件设备，降低载荷的重量和功耗，降低磁像仪载荷的硬件复杂度和实现代价，并提升其在轨运行的可靠性。该方案不仅为深空太阳磁场观测设备探索一种轻量化、高可靠的软件稳像观测技术方案，积累宇航产品研制经验；而且为地基太阳磁场观测提供新型的、不依赖于操作系统的观测系统。

另外，开展了自动化选区算法的设计工作。开展用于优化相关跟踪算法的特征区域选择算法的研究，对于低空间分辨率全日面观测等特征较少的太阳偏



振数据，设计了一个特征区域选择算法，在一段时间内提取一个特征区域，以此来对一定观测时间段内的偏移量计算。

#### 1.4 论文的章节安排

本文分六章进行描述。第一章对课题的背景意义、国内外的研究现状、课题的主要内容进行了简单介绍。第二章介绍了太阳磁场的观测原理和自校正稳像系统的原理，介绍了各组成部分的设计原理和分析。第三章介绍了自校正稳像观测系统总体设计和各个组成部分的研制方案。第四章介绍了基于自校正稳像系统进行的实验室仿真实验和地面望远镜的实际测试，并对各个实验结果进行总结和分析。第五章介绍了关于稳像系统优化——自动化特征区域选择算法的原理，及进行的实验的结果总结和分析。第六章总结了本文的研究工作，叙述了系统研制过程中的主要成果和下一步工作的展望。



## 第2章 空间自校正稳像观测方法的原理及分析

### 2.1 太阳磁场测量

目前, 国内外的太阳磁场测量仪器基本都是基于谱线的塞曼效应(Zeeman effect)。1896年, 荷兰物理学家塞曼(Zeeman)发现当把产生光谱的光源放置在足够强的磁场中时, 磁场作用使光谱发生变化, 一条谱线即会分裂为几条偏振化的谱线, 该现象即被称为塞曼效应。1908年, 美国天文学家海尔(Hale)利用塞曼效应完成了太阳黑子区域磁场强度的测量。磁场的测量实质上是一种光的偏振测量, 一般通过偏振光Stokes参数转移方程可以测定太阳磁场。在本节中介绍太阳光谱线的Zeeman效应(章振大, 1992; 褚圣麟, 1979)和偏振光Stokes参数描述。

#### 2.1.1 太阳光谱线的Zeeman效应

##### (1) 纯发射线的Zeeman效应

根据原子光谱理论, 对于处在外磁场中的原子, 即当 $B \neq 0$ 时, 其原子能级将发生空间量子化。根据Zeeman效应, 一条谱线的上下能态将分裂为 $(2J+1)$ 子能态, 各子能态的磁量子数 $M$ 不同。于是上能态中的某个子能态与下能态中的某个子能态之间的跃迁产生各条Zeeman分裂子线。太阳磁场观测通常需要使用三分裂谱线, 即太阳光谱线在外磁场中分裂为三条子线: 其中一条 $\pi$ 子线波长不变, 另外两条 $\sigma$ 子线的波长产生位移。这种特殊的三分裂称为正常Zeeman三分裂(王东光, 2003)。塞曼裂距的定义如式所示:

$$\Delta\lambda = 4.67 * 10^{(-13)} g \lambda^2 B \quad (2.1)$$

式中 $g$ 为磁敏因子;  $B$ 为磁场轻度, 单位为高斯;  $\lambda$ 为 $B=0$ 时的单色光波长, 单位为埃。

对于三分裂的纯发射线, 波长不变的 $\pi$ 子线为线偏振, 偏振方向与磁场平行; 而对于紫端和红端的两条子线 $\sigma_v$ 和 $\sigma_r$ , 则是与磁场垂直的平面内的圆偏振, 两条子线的点振动矢量的旋转方向相反。如图 2.1(a)所示, 当迎着磁场方向进行观测时, 即纵向观测时,  $\sigma_v$ 为左旋,  $\sigma_r$ 为右旋; 如图 2.1(b)所示, 当观测视向与

磁场垂直时，即横向观测时，三条子线均为线偏振， $\pi$ 子线的偏振方向分别与磁场平行，两条 $\sigma$ 子线的偏振方向与磁场垂直(王东光, 2003)。

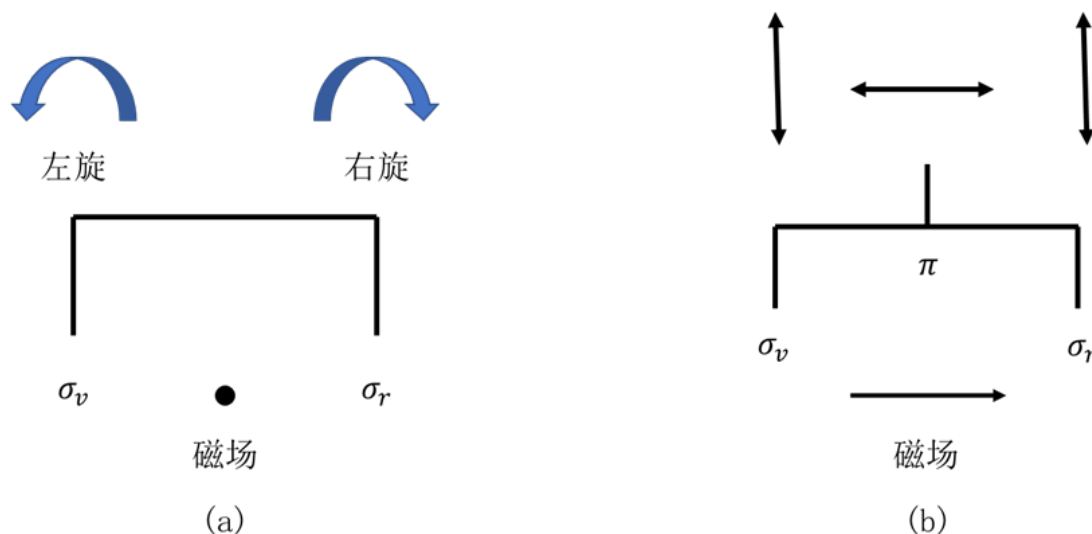


图 2.1 纯发射线的Zeeman效应：(a) 纵向观测，(b) 横向观测。

Figure 2.1 The Zeeman effect of pure emission line: (a) longitudinal observation, (b) transverse observation.

## (2) 纯吸收线的Zeeman效应

当白光射进处于磁场中的吸收气体时，由于磁场中气体原子的能级分裂，产生的吸收线也呈现Zeeman分裂，这种现象称为逆Zeeman效应。对于谱线为三分裂的情形，产生三条吸收子线，分别为 $\sigma_v$ 、 $\pi$ 和 $\sigma_r$ ，对应的波长分别为 $\lambda-\Delta\lambda$ 、 $\lambda_0$ 和 $\lambda+\Delta\lambda$ 。当迎着磁场方向进行观测时（即纵向观测）， $\sigma_v$ 为右旋， $\sigma_r$ 为左旋，如图 2.2(a)所示。当观测视向与磁场垂直时（即横向观测），三条子线中 $\pi$ 子线的偏振方向与磁场垂直的线偏振，两条 $\sigma$ 子线的偏振方向与磁场平行的部分线偏振，如图 2.2(b)所示(王东光, 2003)。

### 2.1.2 偏振光的参数描述

一般的，可以使用自然光 $F_0$ ，电矢量振动 $0^\circ$ 方向线偏振光 $F_1$ ，电矢量振动 $45^\circ$ 方向线偏振光 $F_2$ 和圆偏振光 $F_3$ 来描述偏振光(Stenflo, 1995)，各参数的示意图如图 2.3所示。

在辐射转移方程中，通常采取Stokes参数来进行偏振光的描述。Stokes参数的 $I, Q, U, V$ 四个参数均为可测量的辐射强度量纲，以此四个参数便可以确定光的强度和偏振状态。由于在空间中，用来描述光的电矢量和磁矢量是相互垂直

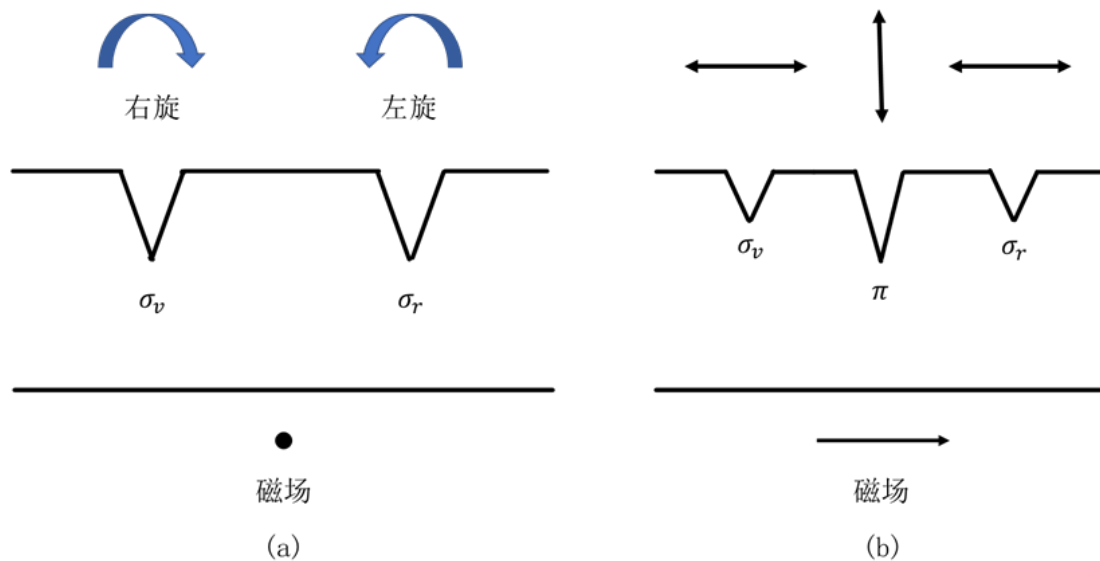


图 2.2 纯吸收线的Zeeman效应：(a) 纵向观测，(b) 横向观测。

Figure 2.2 The Zeeman effect of pure absorption line: (a) longitudinal observation, (b) transverse observation.

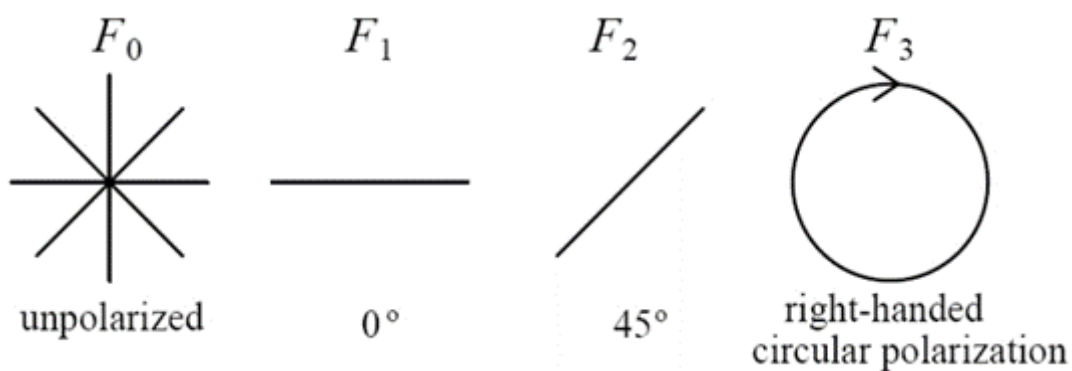


图 2.3 自然光、线偏振光、圆偏振光示意图。

Figure 2.3 Schematic diagram of natural light, linearly polarized light and circularly polarized light.

的，并且存在着固定的相位关系，因此可以使用电矢量来进行光的描述(王东光, 2003)。沿观测者方向（z轴）传播的任意光束可以分解为：

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos(\omega t - \varepsilon_x) \\ E_y = B_y \cos(\omega t - \varepsilon_y) \end{cases} \quad \dots (2.2)$$

式中， $\omega$ 为圆频率， $A_x$ 和 $B_y$ 为振幅， $\varepsilon_x$ 和 $\varepsilon_y$ 为相位。

Stokes参数可以定义为：

$$\begin{cases} I = \langle A_x \rangle^2 + \langle B_y \rangle^2 \\ Q = \langle A_x \rangle^2 - \langle B_y \rangle^2 \\ U = 2 \langle A_x B_y \cos(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \rangle \\ V = 2 \langle A_x B_y \sin(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \rangle \end{cases} \quad \dots (2.3)$$

式中，使用符号表示对观测时间的平均，即实际观测到的宏观参量。

偏振光的Stokes参数表达式即为：

$$I = (I, Q, U, V)^T \quad (2.4)$$

一般情况下，大部分自然光为部分偏振光，其偏振度定义为：

$$P = \sqrt{\frac{Q^2 + U^2 + V^2}{I^2}} \quad (2.5)$$

在采集到通过偏振分析器调制的左旋信号和右旋信号后，获取到四个Stokes参数，由此转换为观测磁场数据。

## 2.2 数据采集方法的原理及分析

数据采集是太阳磁像仪的最前端，也是最基础的部分，只有实现了太阳像的准确采集才能实现磁场的精确测量。在太阳磁场的观测过程中，为了提高磁场信号的信噪比，无论是在空间还是在地面观测，都需要采用长时间曝光或者多帧短曝光叠加的方法才能获得高分辨的磁场数据，其中SDO/HMI通过45s或更长时间的长曝光实现磁场观测，而怀柔太阳观测基地的地基望远镜SMFT、

SMAT以及目前正在研制的FMG都是通过多帧短曝光叠加的方式来获取高分辨的磁场数据。

数据采集需要实现的主要功能有：偏振调制、光电控制和数据解析等。

### 2.2.1 偏振调制

偏振分析器的作用是分离并测定太阳磁敏线的偏振成分，是用来观测太阳磁场的必要的物理光学器件。偏振探测是一种新兴的目标探测手段和技术，与传统光电成像探测技术不同，偏振成像技术不仅能够得到目标场景的光强度信息，而且可获得偏振度、偏振角、椭圆率等偏振参数，增强被测目标场景的信息量，在突显目标、提高目标和背景对比度、反演被测目标物理特性等方面有着独特的优势(侯俊峰等, 2015)。

偏振状态由Stokes向量(I, Q, U, V)表示。偏振分束器将线偏振Q和U以及圆偏振V转换为强度的正弦变化。Stokes Q、U和V被编码为强度的谐波变化，周期分别与 $T/4$ 、 $T/4$ 和 $T/2$ 成比例。信号矢量Q与信号U的相位相差 $22.5^\circ$ （相对于波片的旋转相位）。通过将每个样本添加或减去对应于四个斯托克斯状态的四个存储器来获得I、Q、U和V的光谱。

分时偏振成像系统通过旋转检偏器(偏振片或格兰棱镜)实现Stokes参数(I, Q, U)的测量(刘敬等, 2013)。利用电光效应实现的调制叫电光调制，电光调制的物理基础是电光效应，即是某些晶体在外加电场的作用下，其折射率将发生变化，当光波通过此介质时，其传输特性就受到影响而改变。

快速偏振调制和超窄带滤光是当前太阳光学望远镜实现磁场探测的核心技术途径，而液晶调制是目前唯一可同时满足偏振测量和窄带调谐滤光的电光调制技术，而且，液晶调制器具有口径大、光谱范围宽、调制速度快、无旋转机构以及相位延迟连续可调的优势，使其成为下一代太阳望远镜磁场探测技术的最佳选择(侯俊峰等, 2021)。

KD\*P电光调制器是通过交变高压实现光学滞后量的调制器件。KD\*P晶体调制由于其光学质量较好且调制速度快（约为几十 Hz~kHz），自20世纪80年代开始被广泛使用，但由于其对装配要求和晶体质量要求极高，目前多数望远镜开始使用液晶器件来代替该方案，目前有SMFT和SMAT(Zhang等, 2007)(Solar Magnetism and Activity Telescope)望远镜还在使用。由KD\*P电光晶体确认的偏

振分析器光学结构示意图如图 2.4所示：包含有1个光轴方位角为45°的1/4波片、1个光轴方位角为45°的KD\*P电光晶体、1个光轴方位角为0°的偏振片。

在进行磁场测量时，需要在KD\*P电光晶体上加载高低压信号，通过不断变化的高压引起KD\*P电光晶体的相位变化，磁场测量过程中偏振元件工作状态如表 2.1所示。

按照系统要求20 fps的采集频率，KD\*P高压控制频率应为50Hz，且需要与相机控制同步处理，实现太阳偏振像的正确采集。

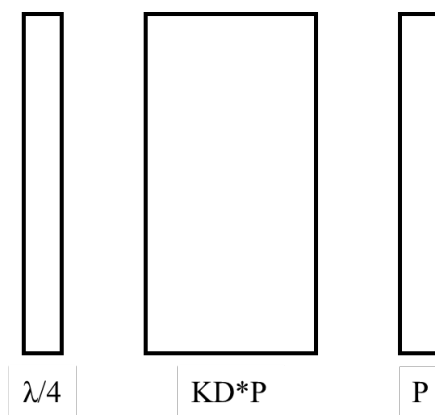


图 2.4 偏振分析器光学结构示意图。

Figure 2.4 Schematic diagram of optical structure of polarization analyzer.

表 2.1 KD\*P调制方案的偏振元件工作状态

Table 2.1 Working States of Polarizing Elements in KD \* P Modulation Scheme.

	1/4波片	KD*P	P
+Q	45	-90°	0
-Q	45	90°	0
+U	0	90°	0
-U	0	-90°	0
+V	-	90°	0
-V	-	90°	0



### 2.2.2 光电控制

早期的太阳磁场观测一般使用胶片相机作为数据采集器件，之后，相机主要分为两种：电荷耦合元件(Charge-coupled Device, CCD)图像传感器和互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)图像传感器。目前采用的高速CCD图像传感器很难同时满足高时空分辨的要求，近年来，随着CMOS图像传感器逐渐发展，目前可以同时满足大面阵和高速帧频的需求，CMOS图像传感器开始应用于太阳磁场观测。目前，中国科学院国家天文台怀柔太阳观测基地研制的ASOS/FMG载荷使用了CMOS图像传感器作为数据采集器件，面阵大小为4K\*4K。

在进行科学数据观测时，主要控制的相机参数有：曝光时间、帧频、数据增益等参数。按照太阳磁像仪空间自校正稳像观测系统要求的20fps的采集频率，相机数据采集控制频率应为50Hz，且需要与KD\*P高压控制同步处理，实现太阳偏振像的正确采集。一般的，可以采用外触发模式来进行曝光触发，方便与偏振控制信号同步处理。

### 2.2.3 数据调制

数据调制系统首先对相机输出的低压差分信号进行解析，通过Camera Link的标准接口协议解析数据；然后对Camera Link接口输出的数据进行调制，一般将各路数字信号按照协议进行拼接，合成科学数据的各个像素点，按照数据有效、行有效、场有效等参数，组合为科学图像数据，最后保存到内存上。

Camera Link是专门为数字摄像机的数据传输提出的接口标准,数据传输速率最高为2.38 Gbps。该标准规定了接口模式、相机信号、端口配置、图像数据位配置、连接器引脚定义及连接线、标准接收器芯片组。采用这种标准后，使得数字摄像机的数据接口输出更具有通用性。其最主要的特点是采用了低压差分信号(Low Voltage Differential Signaling, LVDS)技术，该技术采用低振幅高速差动传输数据，极大的提高了数据传输速率，而且是一种低功耗、低误码率、低串扰、低辐射的技术。

## 2.3 稳像方法的原理及分析

根据国内外空间太阳望远镜的研究，在现有的观测设备中，稳像系统主要

采用光机电系统反馈偏移信息进行稳像，主要步骤是：首先使用偏移量检测系统对入射光轴抖动进行实时检测，然后通过光机电系统反馈偏移信息，最后通过高频控制的偏摆镜等硬件设备对偏移量进行补偿。其中，偏移量检测系统主要是通过检测太阳成像光斑的位置偏移量来进行。目前，主要的光斑位置的偏移检测方法有基于四象限探测器的图像偏移量检测、基于边缘探测器的图像偏移量检测、基于重心法的图像偏移量检测和基于相关跟踪算法的图像偏移量检测。

(1) 基于四象限探测器的图像偏移量检测

基于四象限探测器的图像偏移量检测方法是通过四个相同性能的光电二极管接受太阳入射光，之后由四个象限的光电二极管分别输出电流，其检测原理是基于光电二极管的光伏效应。四象限探测器结构图如图 2.5 所示，I、II、III、IV 为四象限探测器的四个光敏面，通过其上的光电二极管输出检测信号。

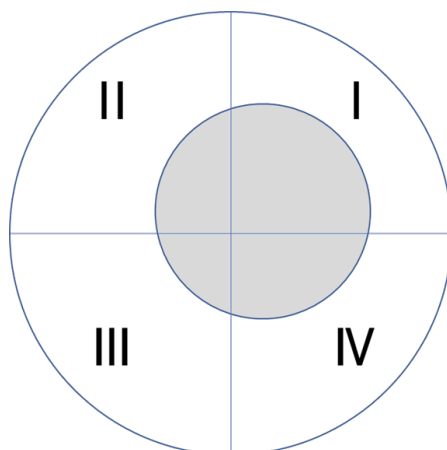


图 2.5 四象限探测器结构示意图。

Figure 2.5 Schematic diagram of four-quadrant detector structure.

理论上，太阳光斑被四象限探测器接收后，如太阳光斑的质心处于四象限探测器中心位置，则四个光敏面的光电流输出应该一致；如入射光发生偏移，太阳光斑在四象限探测器上的位置也相应的有所偏移，四个光敏面的光斑面积发生变化，其上光电二极管的光电流输出发生相应改变，可以通过电流变化计算得到光斑偏移量，偏移量计算公式为：

$$\begin{cases} \Delta x = k * \frac{(I_2+I_3)-(I_1+I_4)}{I_1+I_2+I_3+I_4} \\ \Delta y = k * \frac{(I_1+I_2)-(I_3+I_4)}{I_1+I_2+I_3+I_4} \end{cases} \dots (2.6)$$

其中,  $\Delta x$ 为水平方向上的偏移量,  $\Delta y$ 为竖直方向上的偏移量,  $k$ 为比例系数,  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ 分别为 I、II、III、IV 四个光敏面的电流输出。

根据四象限探测器的检测原理, 需要光斑被探测器全部检测到, 但是在太阳像上存在的如黑子、耀斑等太阳活动区带来太阳像光强分布变化, 会影响四象限探测器的探测准确性, 会导致成像时能量不稳, 影响到检测结果, 另外, 四象限探测器光敏面大小也会受太阳像成像面大小的制约。

## (2) 基于边缘探测器的图像偏移量检测

边缘探测器的工作原理与四象限探测器类似, 通过利用太阳像的边缘区域进行偏移探测, 相较于四象限探测器, 边缘探测器的响应速度更快、计算复杂度更低, 同时减弱了大部分太阳活动对探测准确性的影响, 因此, 基于边缘探测器的倾斜偏差探测技术在国际空间太阳观测设备上得到广泛应用, 例如MDI、HMI、FMG等设备均采用了基于边缘探测器的偏移测量技术。

边缘探测器由位于探测器中心的光锥和4个位于探测器边缘的光电二极管组成, 边缘探测器中所用的4个光电二极管位置对称, 形状面积相同且性能相同。边缘探测器结构示意图如图 2.6所示(郑兆琪等, 2020), 通过位于探测器中心的光锥将入射光斑的非边缘区域反射, 仅允许太阳光斑的边缘区域入射至探测器上, 由位于边缘区域的光电二极管接收光斑信号, 并反馈偏移量信号。

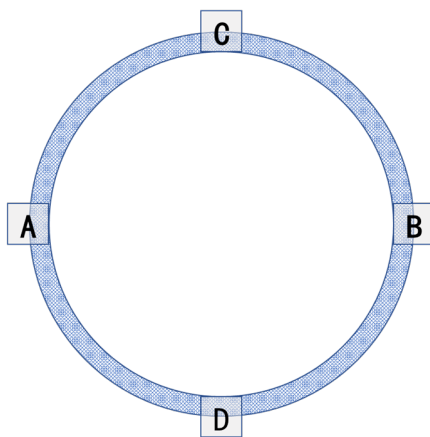


图 2.6 边缘探测器结构示意图。

Figure 2.6 Structure diagram of edge detector.

假定A、B、C、D四个区域光电二极管采集到的入射光功率分别为 $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 、 $P_D$ , 其中, 由A、B两个区域来确定水平方向上的倾斜偏差, 由C、D两个区域来确定竖直方向上的倾斜偏差:

$$\begin{cases} x = \frac{P1-P2}{P1+P2} \\ y = \frac{P3-P4}{P3+P4} \end{cases} \dots (2.7)$$

### (3) 基于相关跟踪算法的图像跟踪器

在国外，基于相关跟踪算法的稳像技术在20世纪80年代就已经开始应用并长期研究，自从1987年 Edwards等人(Edwards 等, 1987)将相关跟踪技术引入到太阳望远镜上并实现图像稳像的功能后，位于NSO/SP (National Solar Observatory at Sacramento Peak)的VTT (Vacuum Tower Telescope (Iuehe 等, 1989)、IAC (the Solar Correlation Tracker prototype built by the Instituto de Astrofísica de Canarias)(Ballesteros 等, 1996)、THEMIS(G.Molodij, 1996)、BBSO (Big Bear Solar Observatory)使用的65cm真空望远镜(Didkovsky 等, 2003)以及SVST (Swedish Vacuum Solar Telescope)(Shand 等, 1999)等设备上也采用相关跟踪稳像技术。在空间设备上，Hinode搭载的空间太阳望远镜采用基于相关跟踪器的技术方案实现稳像系统。2008年，中国科学院国家天文台的李长松等人，对空间太阳望远镜(李长松, 2008) (Space Solar Telescope, SST) 的基于相关跟踪器的稳像系统进行了研究。

基于相关跟踪法的图像跟踪器采用CCD或者CMOS作为图像探测器，采集太阳光斑图像数据。这种方法的检测原理是，首先采集一张太阳光斑图像作为基准图像，然后在之后的一段时间内连续采集序列图像，通过实时对比序列图像中每一帧数据与基准图像数据的差异，计算太阳光斑的实时偏移量。偏移量的计算方法有重心法和相关跟踪法。

相关跟踪算法，即求参考图像与活动图像的互相关函数。对于给定大小均为 $M * N$ 的图像 $h(x, y)$ 和 $g(x, y)$ ，两幅图像的相关函数的定义如式所示。

$$R_{fg}(m, n) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} h(x, y) g(x - m, y - n) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g(x, y) h(x + m, y + n) \quad (2.8)$$

由定义式可以证明：

$$F \{R_{fg}(m, n)\} = F \{h(x, y)\} \times F^* \{g(x, y)\} = H(u, v) \times G^*(u, v) = R(u, v) \quad (2.9)$$

式中,  $H(u, v)$ 是 $h(x, y)$ 的傅里叶变换形式,  $G^*(u, v)$ 是 $g(x, y)$ 的傅里叶变换的共轭变换。然后, 将互相关函数计算结果 $R(u, v)$ 取傅里叶逆变换, 其矩阵中的最大值元素所在的位置即是两幅图像相关性最强的位置, 计算图像偏移量。

## 2.4 自校正稳像方法的原理及分析

本课题预研的自校正稳像系统突破以往空间太阳观测系统中对硬件稳像系统器件(如偏摆镜等设备)的依赖, 通过内嵌了高速高效率的图像配准算法来计算参考图像与观测过程中采集的序列图像之间的图像偏移量, 为空间太阳磁场观测提供新的技术路线。

图像配准是使用某种算法, 基于设定的评估标准, 将一副或多副、局部或全局图片映射到目标图片上的方法。图像配准在计算机视觉、医学图像处理、材料力学、遥感等领域有广泛应用。因为现有的图像种类较多, 因此对于特定种类图像有特征种类特征来得到图像配准的最优解, 图像配准方法也在不断的优化过程中。迄今为止, 在国内外的图像处理研究领域已经有了相当多的图像配准研究工作, 提出了不少图像配准方法。

图像配准算法依据图像特征表示可以分为基于灰度信息法和基于特征法。其中, 基于灰度信息法一般不需要对图像进行复杂的预处理运算, 而是利用图像本身具有的点或面的图像特征进行配准, 主要有相关算法、重心法等空间域灰度信息配准。另外一种基于特征法的配准方法, 一般需要通过一定的手段获取特征区域并表述其特征, 然后将两张或多张图特征进行比对, 以获取图像相似信息, 以完成图像配准。

其中, 相关算法对于全日面和局部日面太阳像均可以获得比较好的图像偏移量测量效果, 目前已经搭配偏摆镜等硬件稳像伺服系统在多个地基或天基望远镜上进行使用。对于全日面观测而言, 重心法观测也是一个比较有效的方法, 它和圆拟合也多应用于太阳的指向和跟踪算法。

### (1) 基于重心法的偏移量检测

重心法, 通过计算各个图像重心位置, 然后进行对比获取图像偏移量, 具体计算方法如下所示: 对于给定大小为 $M*N$ 的图像 $f(x, y)$ , 首先, 设置阈值 $T$ 对图片进行二值化处理:

$$f_{ij} = \begin{cases} 0 & P_{ij} < T \\ 1 & P_{ij} \geq T \end{cases} \quad (2.10)$$

然后，计算灰度图像中心 $h(x_0, y_0)$ ， $g(x_0, y_0)$ ：

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_i f_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij}} \\ y_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_i f_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij}} \end{cases} \quad \dots (2.11)$$

最后，依据各个图像的重心位置计算图像偏移量。

### (2) 基于角点检测的偏移量检测

角点在图像中也被称为兴趣点，它在一定程度上体现出了图像中比较重要的信息，例如图像中各个方向梯度变化的极大值点、边缘曲线上曲率极大值点、多边缘的焦点等。目前常用的角点检测算法主要有Moravec角点检测(Moravec, 1977)、Harris角点检测及其改进算法(Qiao 等, 2013; 卢伟家 等, 2017; Wang 等, 2017)、SUSAN角点检测及其改进算法(Smith, 1997; He 等, 2013)、FAST角点检测技术(王冠群 等, 2016; Miroslav 等, 1998)等。其中，Moravec角点检测用来检测区域内最小灰度值变化的最大值，Harris角点检测用来检测局部区域梯度最大值，FAST角点检测技术用来检测图像中某点邻域内通过该点的任意一条直线上的灰度变化情况。角点检测一般是对图像全局进行处理，所需要消耗的时间较多，可以通过与区域选择算法等方法相结合，通过筛选减少特征点遍历区域，减少运算量。

### (3) 基于相关跟踪的偏移量检测

在国外，基于相关跟踪的稳像系统在20世纪80年代就已经开始应用并被长期研究，目前已经应用于多个地基太阳望远镜上；在国内，怀柔太阳观测基地于1998第一次采用后处理的方式实现了相关跟踪算法，并开始进行长期研究和多次改进，目前，怀柔太阳观测基地已经实现了基于GPU技术的实时相关跟踪图像处理系统，该系统可以进行实时相关-移位-叠加的深积分磁场观测。该系统不在磁场望远镜硬件系统中增加任何部件，通过观测终端处的图像处理算法的优化和改进实现了高分辨磁场观测。该系统研制的技术和经验，将为本课题的研究提供良好参考。

综合上述图像配准算法的归纳总结和对比，本课题拟采用相关算法作为稳像系统中图像偏移量的计算方法，实时检测参考图像与序列图像间的图像偏移量，实现更高空间分辨率的太阳磁场观测目标。

## 2.5 小结

在本章中，首先介绍了太阳磁场的测量原理，简单介绍了何为太阳磁场和太阳磁场是如何计算的，引出太阳磁场观测所需要的各种仪器；然后对稳像系统的整体结构和功能做出分析，为之后的系统研制奠定基础；再次，分别介绍了自校正稳像系统中的两大组成部分：数据采集系统模块和图像稳像系统模块，前者主要介绍了数据的采集方法和标准，后者主要介绍了现有的稳像系统以及部分系统的稳像设计原理。

依据对现有的稳像系统和图像配准算法的总结介绍，提出了使用相关跟踪算法作为稳像处理的核心算法，替代以往通过偏摆镜等稳像设备的方案，减轻载荷的重量，加强深空探测器或小卫星探测器在轨运行的可靠性。





## 第3章 自校正稳像观测系统研制

在上一章中，对太阳磁场观测的原理进行了简述，也对进行太阳磁场观测的自校正稳像系统的原理进行了分析，在这一章将依据以上原理和分析进行系统的研制，阐述研制过程中的设计和优化，完成一个可以实现观测目标的观测系统。

### 3.1 自校正稳像观测系统总体设计

国家天文台怀柔太阳观测基地于1998年第一次采用后处理的方式实现了相关跟踪算法，经过多次升级改造，于2012实现了一个基于GPU的太阳磁场实时相关跟踪图像处理系统。GPU芯片是一种超长图形流水线的设计，以吞吐量最大化为设计目标，并且辅以高效的并行性和运算的高密集性，使其对大规模的数据流并行处理方面具有明显优势。相对来说，可用于宇航级的硬件系统在运算能力上有明显消弱，以目前使用较多的FPGA和DSP芯片为例，FPGA芯片底层由电路组成，晶振频率低于GPU主频，虽然不存在限程限制，但是浮点计算能力较弱，一般芯片上集成的DSP乘法器等运算单元的效率也低于GPU；DSP芯片的主频略低于与GPU，虽然浮点运算乘法器运算能力较强，但是单核情况下无法进行并行运算，且核数及流处理单元远低于GPU。因此，如何在运算能力受限的宇航级芯片上实现高精度稳像算法是自校正稳像观测系统总体设计的核心问题。

随着数字信号处理器(DSP)和现场可编程门阵列器件(FPGA)的发展，采用FPGA和DSP的数字硬件系统正显示出它的优越性。越来越受到人们的重视。通用DSP的优点是通过编程可以应用到广泛的产品当中去，且已经能满足算法控制结构复杂、运算速度高，寻址方式灵活和通信性能强大等需求。但是传统DSP的结构本质上是串行的，对于需要处理的数据量大，处理速度高，但是运算结构相对简单的底层信号处理算法来说，并没有优势可言，而这恰好是FPGA硬件的强项。采用DSP+FPGA的数字硬件系统正好把两者的优点结合到一起，兼顾了速度和灵活性，既满足了底层信号处理的要求，又满足了高层信号处理的要求。DSP+FPGA系统最大优点是结构灵活，有较强的通用性。适合

模块化设计；同时开发周期较短，系统易于维护和扩展，因此特别适合应用于实时信号处理系统。

在总结对比各种稳像设备的基础上，本课题选用性能对标当前宇航级芯片性能的K7 FPGA 芯片和C6678 DSP芯片作为系统的算法设计芯片，在FPGA芯片和DSP芯片上实现了基于相关跟踪法的图像偏移量的实时探测、校正及深积分。依据选用的芯片和设备，完成了太阳磁像仪自校正稳像观测系统硬件链路的设计和搭建，实现了基于FPGA+DSP 的相关跟踪和积分算法，通过系统联调和优化，实现针对像素尺寸为1K\*1K面阵、帧频20 f/s的相机完成1像元以内的稳定精度的实时稳像观测，实时观测结果通过网口传输至上位机保存并显示。稳像平台如图 3.1所示，系统工作流程如图 3.2所示。



图 3.1 稳像实验平台。

Figure 3.1 Experimental platform for image stabilization.

稳像系统的工作流程如下：

- (1) 由FPGA晶振信号发送同步的相机控制信号和偏振调制信号；
- (2) FPGA接收相机数据，进行数据解调、转存，在完成一帧数据保存后与DSP通讯，发送数据处理信号；
- (3) DSP接收数据发送信号，通过Ping-Pang门铃控制将不同类别的数据分

别保存到不同地址上，并通知不同C66x核处理；

(4) C66x开始处理FPGA转存的图像数据，依次进行稳像（相关）算法和深积分（叠加）运算，完成单帧运算后通知总控；

(5) DSP总控核识别运算核的通知信息，当累加帧数达标后，开始建立与上位机之间的通讯，发送观测数据。

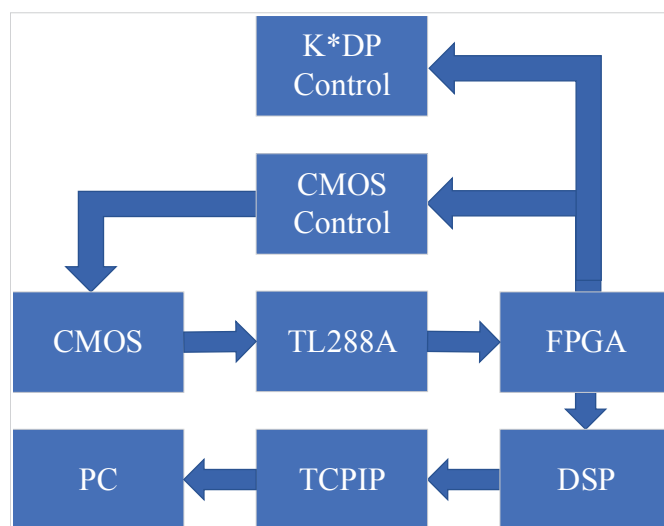


图 3.2 稳像系统工作流程图。

Figure 3.2 Flow chart of image stabilization system.

本课题设计的自校正稳像观测系统需要实现图像数据的采集和图像数据的实时自校正稳像处理，另外，为了进行实际观测试验，设计了软件程序，实时采集显示磁场数据图像。自校正稳像系统通过固化在FPGA芯片上的相机和KD\*P高压控制模块、数据采集模块实现偏振调制和数据交替采样，然后通过固化在DSP芯片上的图像稳像模块实现对观测图像位置偏移实时校正和深积分计算。因此，需要实现相机图像采集、高压偏振控制、图像数据处理、科学数据获取等功能，实现太阳左右偏振像的采集、处理和保存。

在太阳磁像仪的工作过程中，稳像系统的工作频率不应低于相机采集频率，以保证数据的实时处理；另外，依据深空探测卫星系统对载荷重量、尺寸限制严苛的要求，需要考虑硬件设备在轨运行的可靠性和稳定性。经过分析，在FPGA和DSP芯片上编写高性能软件算法可以有效实现基于相关跟踪法的实时稳像观测。其中，在FPGA芯片上实现偏振调制和数据交替采样，在DSP芯片上实现对观测图像位置偏移实时校正和深积分计算。

## 3.2 系统硬件设计

自校正稳像观测系统的硬件组成主要包含有：图像数据采集卡、FPGA芯片和DSP芯片，本课题系统设计主要围绕FPGA芯片和DSP芯片展开，通过各部分设计和协同处理，实现从望远镜磁像仪光信号到电信号的变换、调制、交替采样，然后通过图像数据的相关、校正、积分实现稳像观测。

### 3.2.1 系统硬件组成

自校正稳像观测系统以FPGA芯片和DSP芯片为硬件基础进行设计，选用高速运算的软件算法替代偏摆镜等光机电反馈系统进行图像自相关稳像校正，降低卫星载荷的体积、重量和功耗等需求。目前在FMG等含有光机电反馈硬件系统的载荷设计中，除了采集和计算的硬件芯片及辅助电路外，还需要有偏摆镜等硬件系统，而自校正稳像观测系统可以通过减少该部分硬件设备降低载荷所需的体积、重量和功耗。

#### 3.2.1.1 FPGA

FPGA是一种数字集成电路芯片，中文名称为“现场可编程逻辑门阵列”，其具有的一个最重要特点是可编程特性，即可以通过程序编译指定FPGA来实现某一特定的数字电路。本课题的电路设计采用FPGA芯片作为控制处理器件，在目前的电路设计工作中，FPGA作为一种非常实用的半定制专用集成电路应用广泛，已经应用于通讯、汽车、工业及电子产品，运用Verilog HDL语言编写程序代码，定制各种高性能的信号处理器，为嵌入式应用提供了灵活的配置方案。另外，FPGA芯片中有抗辐射加固的宇航级设备，可以稳定的工作于航空航天相关项目，有着很好的抗总剂量辐射和抗单粒子反转等效应。

FPGA性能稳定，使用FPGA芯片作为电路设计的主要器件，可以大大减少设计过程中存在的风险，成本也有所降低；可以进行模块化设计，大大减少了设计周期，也更有利于下一步设备性能的优化和改进；可以进行并行设计，使用空间换取时间，在设备性能富余的情况下，并行操作以缩短1次运算的时间周期，完成实时计算。

FPGA的内部组成有：可配置逻辑块（Configurable Logic Block, CLB），输入输出单元（Input/Output Blocks, IOB），可编程互联资源（Programmable Interconnect），存储器，DSP，时钟管理模块（Clock Management Unit, CMT），GTP

(Gigabit Transceiver with Low Power) 收发器。其中：

(1) CLB是FPGA内部的基本逻辑单元，FPGA的各种功能均是由CLB通过逻辑组合来实现的；

(2) IOB是FPGA内部的信息交换单元，在设备中地位极为重要，FPGA中所有信号的输入和输出都要经过IOB的处理，具有高性能的可编程驱动器和接收器，可以设置不同的电压转换速率，设置不同的输出驱动强度，支持多种接口协议标准；

(3) 可编程互联资源是可以在FPGA芯片内部进行灵活布线，在CLB与IOB之间传送信号；

(4) FPGA内部内置了Block RAM随机存储单元，为FPGA提供了较大且集中的RAM空间，且均具有完全独立的端口，多个存储器件间可以互相共享存储数据；

(5) 目前，一般的FPGA芯片会内置DSP计算资源，如DSP乘法器等，用来优化FPGA计算性能；

(6) CMT是FPGA内部的时钟管理单元，通常每个CMT单元由包括了一个MMCM (Mixed-mode Clock Manager) 和一个PLL (Phase-locked loop)。其中，MMCM是由上一代的DCM升级换代而成，PLL是基于MMCM简化设计。7系列的设备支持最多24个CMT，MMCM和PLL可以用作频率合成器，用于去抖动和偏斜；

(7) FPGA中的GTP收发器，同时结合了发射器和接收器的功能，且双向互相独立，是面向分布式应用的数据传输平台，根据需求，提供满足应用需要的通用传输功能；

(8) 除以上提到的重要功能单元之外，还有其他比较重要的模块单元，如专用的存储器控制器模块 (MCB)，每种控制模块对应1个单芯片的存储器 (DRAM，例如DDR2或DDR3，或是其他类型存储器)。

自校正稳像观测系统选用与宇航级设备性能接近的工业级的TL6678F-Easy EVM开发板来完成设计，其上搭载了Xilinx Kintex-7 FPGA芯片为硬件核心，芯片的硬件性能参数如表 3.1所示。通过硬件描述语言Verilog HDL等程序可以用来描述完整的电子系统，通过编译映射为对应的门结构电路。本系统主要依靠FPGA芯片实现相机控制、K\*DP高压偏振控制、数据调制、信号转发等功

表 3.1 FPGA性能参数

Table 3.1 The performance parameters of FPGA.

FPGA	Xilinx Kintex-7 XC7K325T-2FFG676I
Logic Cells	326080
DSP Slice	840
GTX	8
IO	251

能。

进行FPGA程序设计的常用编程语言是硬件描述语言，有Verilog HDL和VHDL，其中Verilog HDL比较常用，本课题采用Verilog HDL进行设计。典型的FPGA设计开发流程为：

(1) 器件选型：在FPGA项目开始前，需要根据系统功能定义不同的模块，根据不同的需求选择相应的器件类型；

(2) 代码编译：，完成器件选择后，根据不同的功能和具体需求，设计不同模块程序，编写相应功能的代码；

(3) 功能仿真：在完成代码编译后，对代码进行逻辑功能的仿真，即在进行电路编译前对代码进行功能验证，可以使用当前Xilinx Vivado软件内部的仿真器进行；

(4) 综合优化：综合是将较高级抽象层次的描述转化为较低层次的描述，优化是根据预期目标和相应要求优化由综合所转化得到的逻辑连接，将逻辑结构设计转化为平面的设计；

(5) 综合后仿真：进行综合后仿真是为了验证代码在经过综合后的运行结果是否与原代码设计目标一致；

(6) 实现与布局布线：通过工具将已完成的逻辑设计映射到目标器件上，并进行最佳布局，同时将各输入输出接口进行连线，生成网表文件；

(7) 时序仿真：在完成布局布线后进行，主要是用来验证所编译的程序在目标器件中的时序关系；

(8) 板极仿真与验证：验证高速电路中的信号完整性，以及对影响较大的电磁干扰等特性进行必要的分析；

(9) 芯片编程与调试：将由代码所编译的数据流文件下载至芯片上，进行程序调试。

### 3.2.1.2 DSP

DSP，即数字信号处理，是利用数字处理来执行各种各样的信号处理操作，一般采用C语言进行程序设计。稳像系统选用与宇航级设备性能接近的TMS320C6678 DSP芯片为数据处理部分的硬件核心，DSP端硬件性能参数如表 3.2所示。

表 3.2 DSP性能参数

Table 3.2 The performance parameters of DSP.

DSP	TMS320C6678, 8 C66x
Frequency	1.0GHz /C66x
Fixed-Point	40 GMAC /C66x
Floating-Point	20 GFLOP /C66x
Peripherals	Four Lanes of SRIO 2.1, 5 Gbit/s Per Lane

TMS320C6678是TI基于KeyStone的多核结构的固定和浮点数字信号处理器，DSP集成8个C66x 核心，每核心主频1.0G/1.25GHz，最高可以达到10 GHz。单核运算能力可高达40GMACS和20GFLOPS；存储资源丰富：每核心32KB L1P、32KB L1D、512KB L2，4MB多核共享内存，8192个多用途硬件队列，支持DMA传输；拓展资源丰富：支持PCIe、SRIO、HyperLink16等多种高速接口，同时支持I2C、SPI、UART等常见接口；开发资料齐全：官方网站提供了丰富的开发例程，入门简单，提供编程软件CCS(Code Composer Studio) v5或v7，使用C语言编译，编译简单。该设备支持高性能的信号处理应用，如成像、通讯、图像处理和自动化。C6678平台是高效和易于使用的，C66x CorePac DSP是完全向后兼容所有现有的C6000系列定点和浮点DSP。TMS320C6678器件的功能框图如图 3.3所示。使用CCS 7.4.0进行软件的编译和调试，使用C语言编写程序代码。

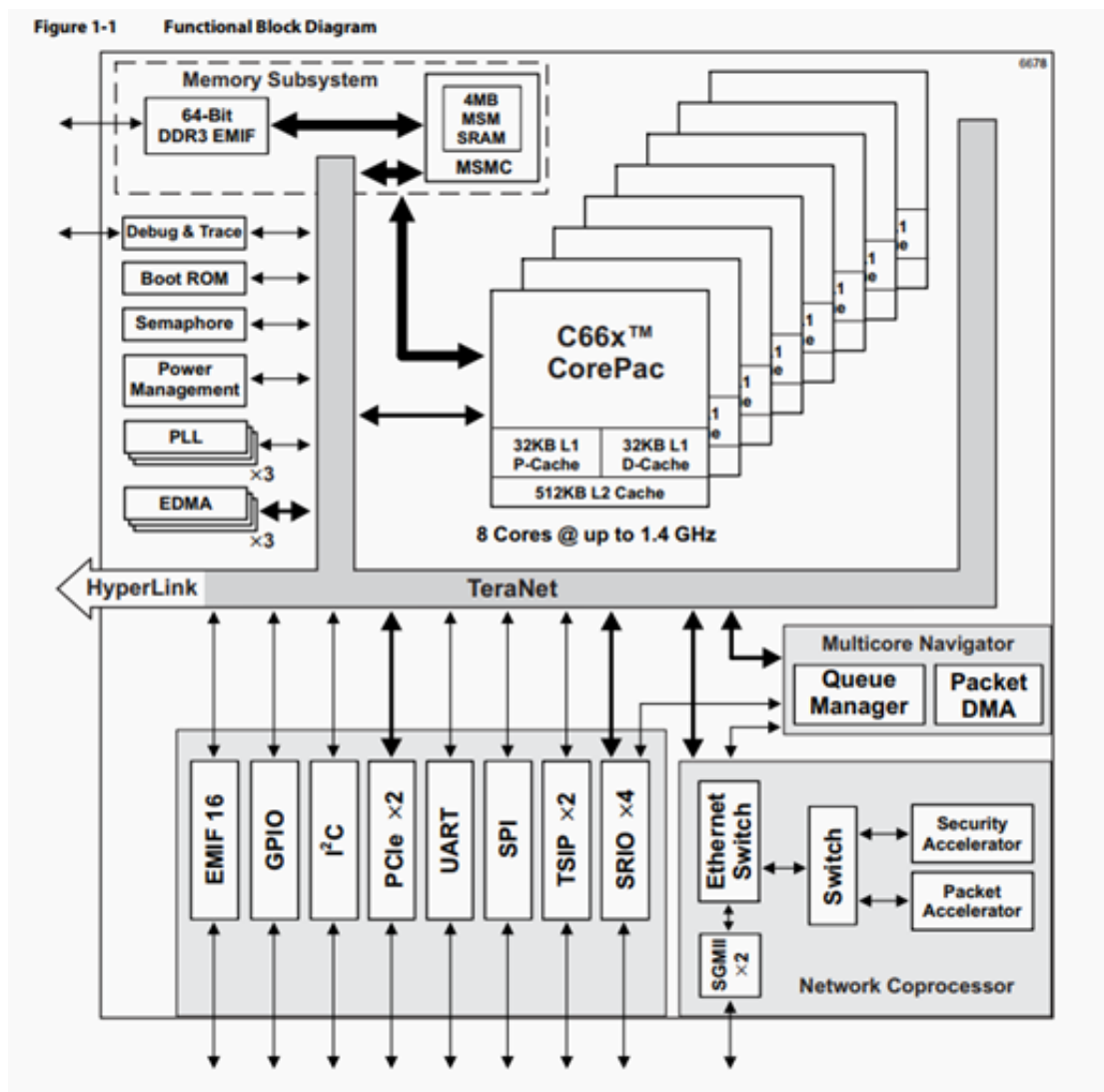


图 3.3 TMS320C6678器件的功能框图。

Figure 3.3 Functional block diagram of TMS320C6678 device.



### 3.2.2 高压偏振调制设计

KD\*P电光调制器是太阳磁场观测过程中必要的一种物理光学器件，通过馈入交变电压实现光学滞后量的调制，KD\*P电光调制器的工作原理如2.2.1节所述。目前，国家天文台怀柔观测基地使用KD\*P高压调制系统(林佳本等, 2013)，该系统完全达到了光学系统对KD\*P高压调制系统的需求指标：当输出高压脉冲序列达到1000V时，上升沿所消耗的时间应该小于 $2\mu\text{s}$ ，电压波纹应小于2V。当使用该设备进行自校正稳像观测时，设置的KD\*P高压调制时间与相机曝光时间的间隔2ms远大于上升沿所消耗时间，所以可以实现左旋和右旋偏振数据的准确采集。

根据太阳磁像仪的工作原理，要实现磁场测量需要保证左旋光和右旋光分别进行积分，然后根据公式计算获得太阳磁场。因此在磁场观测过程中，KD\*P反转和相机曝光要实现同步配合，才能保证获取到的磁场数据有足够的灵敏度(艾国祥等, 1981; 王东光, 2003; 林佳本等, 2013)。在本系统中，通过在FPGA芯片上设计由同一个晶振信号输出，使KD\*P控制信号与相机控制信号完成同步，KD\*P控制信号是一个频率为20Hz的方波信号，每个高电平或低电平的持续时间为50ms，为保证相机可以准确采集，两个信号之间设定2ms延时，使相机在K\*DP完成偏转后进行曝光，完成太阳偏振像的采集。相机与KD\*P控制电路的FPGA综合电路图如图3.5所示，相机触发信号与KD\*P控制信号波形如图3.6所示。

### 3.2.3 光电转换控制设计

在太阳磁像仪的工作过程中，数据采集与处理系统的工作频率不应低于相机采集频率，以保证数据的实时处理；另外，依据深空探测卫星系统对载荷重量、尺寸限制严苛的要求，需要考虑硬件设备在轨运行的可靠性和稳定性。经过分析，在FPGA和DSP芯片上编写高性能软件算法可以有效实现基于相关跟踪法的实时稳像观测。其中，在FPGA芯片上实现偏振调制和数据交替采样。

目前怀柔太阳观测基地SMFT上的35cm太阳望远镜采用的是IPX-1M48-L CCD，如图3.4所示。性能参数如表3.3所示。

相机为了可以在曝光时间内精确采集太阳偏振像，需要保证偏振调制器件与相机触发同步处理，本系统由FPGA上的同一偏振信号发送两路波形，相机与KD\*P控制电路的FPGA综合电路图如图3.5所示，信号波形如图3.6所示，其

表 3.3 CCD性能参数

Table 3.3 The performance parameters of CCD.

Item	parameter
Resolution	1000 x 1000 pixels
Active image area	8.90 mm x 8.20 mm (0.350" x 0.320" )
Pixel size	7.4 $\mu$ m
Video output	Digital, 8/10/12 bit, one or two outputs
Data clock	40.000 MHz
Nominal frame rate	48 fps
Binning	1 x 1, 2 x 2



图 3.4 IPX-1M48-L CCD实物图。

Figure 3.4 Physical drawing of IPX-1M48-L CCD.

中CH1为周期方波信号，表示为偏振控制波形；CH2为周期脉冲信号，表示为相机曝光触发波形，两路信号设定有2ms延时，在偏振器件调制完成后，触发曝光，完成偏振像的精确采集。

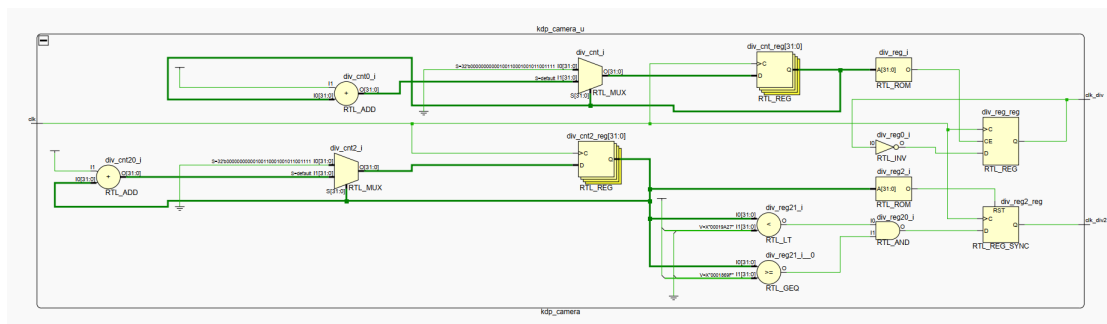


图 3.5 FPGA综合电路图：相机与KD\*P控制。

Figure 3.5 The integrated circuit diagram of FPGA: camera and KD\*P control.

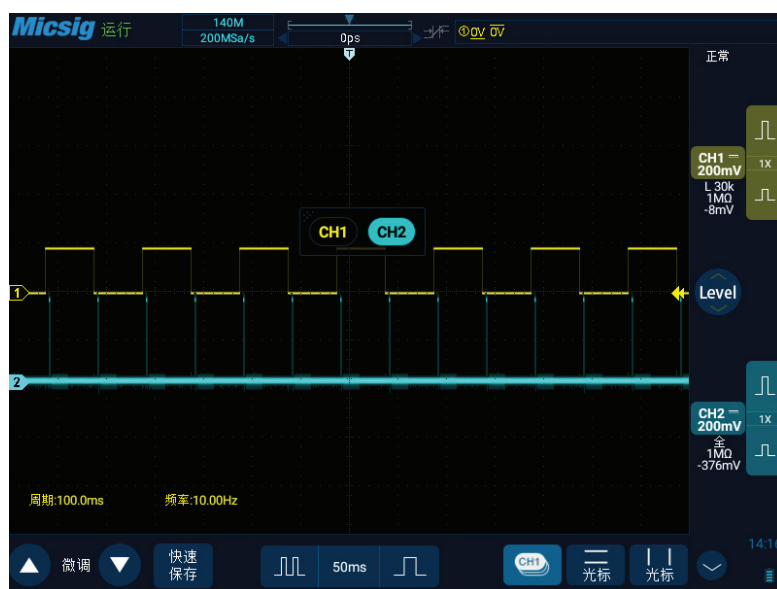


图 3.6 相机触发信号（CH2）与K\*DP控制信号（CH1）。

Figure 3.6 The camera trigger signal (CH2) and K\*DP control signal (CH1).

FPGA通过硬件描述语言Verilog HDL编译程序，由芯片自带的25M时钟发出方波信号，用来触发相机拍摄。相机的拍照模式一般有自触发和外触发两种。自触发模式下，通过配置相机的曝光时间和帧频，由相机发出自触发拍摄信号，进入连续拍照模式。外触发模式是通过外部信号激励，触发拍照模式，如图3.6中CH2（脉冲信号）所示，即为曝光触发信号，曝光触发信号通过TL288A图像采集卡发送到相机进行曝光触发，实现偏振数据的采集。自校正稳像观测系

统的科学目标是实现1秒20帧的稳像观测，因此数据采集频率为1秒20帧，即脉冲信号周期为50HZ，每周期信号约有200 μ s得到高电平信号，其余为低电平信号。另外，相机在接收到脉冲信号后，准备开始曝光，触发类型可设定为上升沿也可以设定为下降沿。

本课题设计的自校正稳像系统中FPGA与相机之间数据的交互均通过Cameralink接口实现，例如曝光触发信号、图像数据信号等，Cameralink接口协议如表 3.4所示。

表 3.4 Cameralink接口协议

Table 3.4 The interface protocol of Cameralink.

Pin No.	I/O	Name	Note
1,26	I	VCC	12V
13,14	I	GND	
6(-),19(+)	O	TxOUT3	Cameralink data
4(-),17(+)	O	TxOUT2	Cameralink data
3(-),16(+)	O	TxOUT1	Cameralink data
2(-),15(+)	O	TxOUT0	Cameralink data
5(-),18(+)	O	TxCLK	Clock
7(-),20(+)	I	RXD	Serial Com
8(-),21(+)	O	TXD	Serial Com
9(-),22(+)	I	Trigger	CC1 Ext. Trigger in
10(-),23(+)	I	Reserve	CC2 Reserve
11(-),24(+)	I	Reset	CC3 Reset foe Camera
12(-),25(+)	I	Reserve	CC4 Reserve

由FPGA晶振信号产生的曝光触发信号可由“CC1 Ext. Trigger in”发送至相机，触发曝光开始，使用的是单帧触发模式。当由此端口输入一个触发信号时，按照相机设置参数产生单帧触发输出信号，触发输入信号和单帧触发输出信号如图 3.7所示，在阴影部分可以接收下一个触发输入信号。

相机接收到曝光触发信号后，将感光元件进行复位，完全复位后开始曝光，曝光模式根据快门方式确定。快门是相机用来控制感光片有效曝光时间的机构。快门的速度即为曝光时间，快门控制进光时间长短，控制曝光量，控制画面效

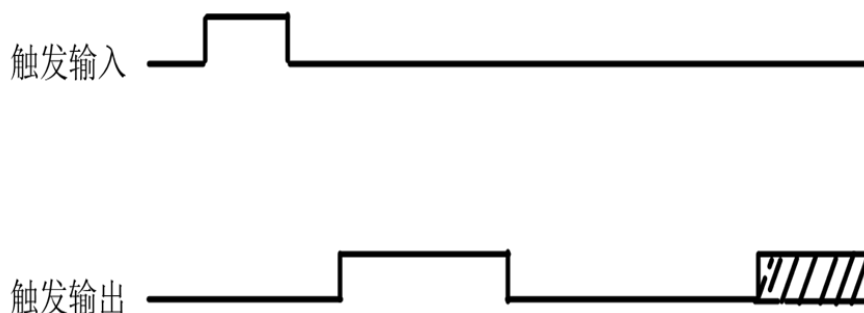


图 3.7 触发输入信号和单帧触发输出信号。

Figure 3.7 Trigger input signal and single frame trigger output signal.

果。一般的CCD相机包含有全局快门（Global shutter, GS）、卷帘快门（Rolling shutter, RS）以及两者相结合的复合快门三种曝光控制方式。全局快门是按全局图像直接进行曝光，曝光结束后，逐行读出数据，如图 3.8所示；卷帘快门是以行为单位进行曝光，每行的开始时间和结束时间不同，但是持续时间相同，每行的数据曝光完毕后，以行为单位读出，如图 3.9所示，此模式对物体的运动行为比较敏感；混合快门是按全图进行曝光，然后逐行读出，在逐行读出过程中不中断曝光，因此图像自上而下的曝光时间逐渐加长，如图 3.10所示，但是此方式仍对物体的运动比较敏感。

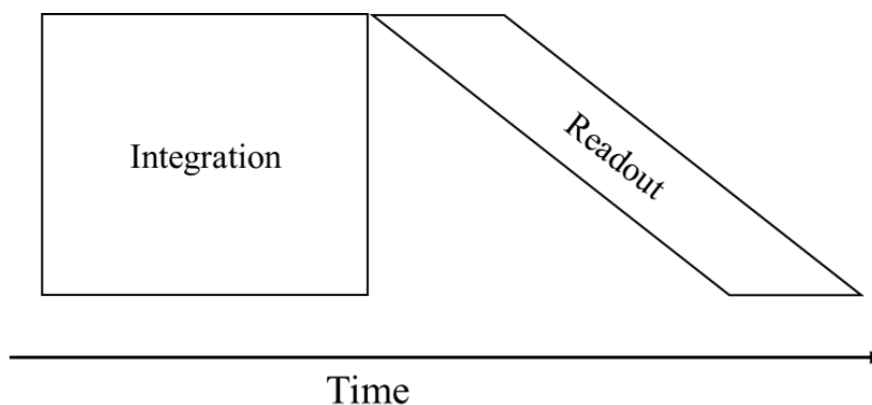


图 3.8 全局快门模式。

Figure 3.8 The Global Shutter Mode.

文献段帷等(2020)中对先进天基太阳天文台ASO-S上搭载的全日面矢量磁像仪FMG载荷的CMOS图像传感器进行了分析，依据基于滤光器型太阳磁像仪观测的原理，比较分析了CMOS图像传感器上可选用的全局快门和卷帘快门，指出全局快门更适合全日面矢量磁像仪。因此在当前观测模式下选用全局快门

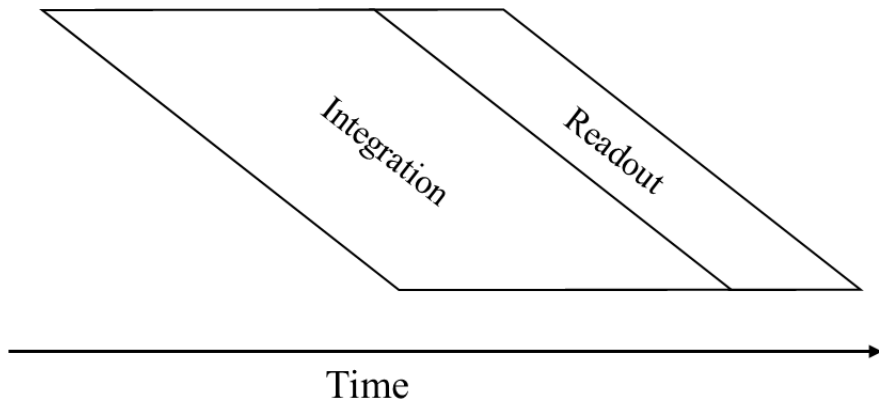


图 3.9 卷帘快门模式。

Figure 3.9 The Rolling shutter mode.

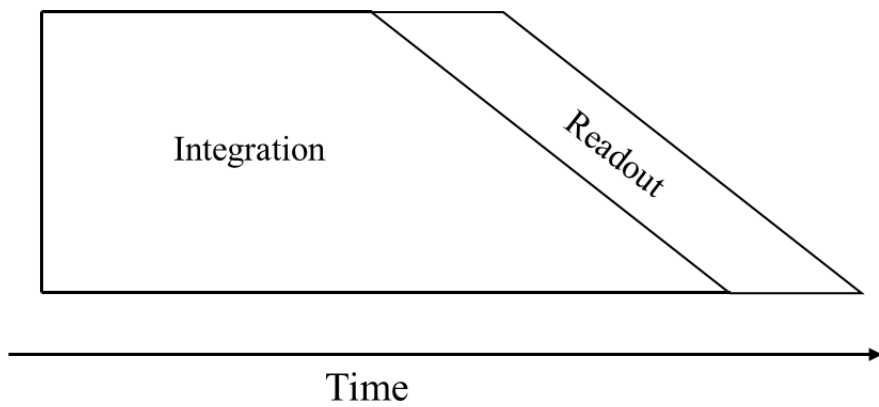


图 3.10 复合快门模式。

Figure 3.10 The Compound shutter mode.

控制相机曝光。

### 3.2.4 数字信号处理设计

在相机触发单帧曝光模式，开始采集太阳偏振像后，FPGA芯片数据调制系统准备接收数据，并保存在输出端所连接的内存上，完成整幅图像保存后，转发至下一级进行处理，数据通过PING-PANG门电路分别将高低压状态下采集的数据分别保存在两个不同的地址，分类保存，不仅可以避免计算能力不足导致的数据覆盖，也可以确保左旋和右旋偏振数据的正确采集。

FPGA芯片上的图像数据调制主要是对Cameralink采集的图像数据进行解码，依照DS90CR288A芯片手册和Cameralink协议规范，可分离出行有效信号、帧有效信号、数据有效信号和像素数据，并根据帧有效信号和行有效信号，将图像数据写入FIFO（First Input First Output）中，数据调制流程如图 3.11所示，图像数据调制的相关综合电路图如图 3.12所示。怀柔太阳观测基地SMFT 35cm局部太阳磁场望远镜和SMAT 10cm全日面磁场望远镜使用的是12bit数据进行成像观测的。

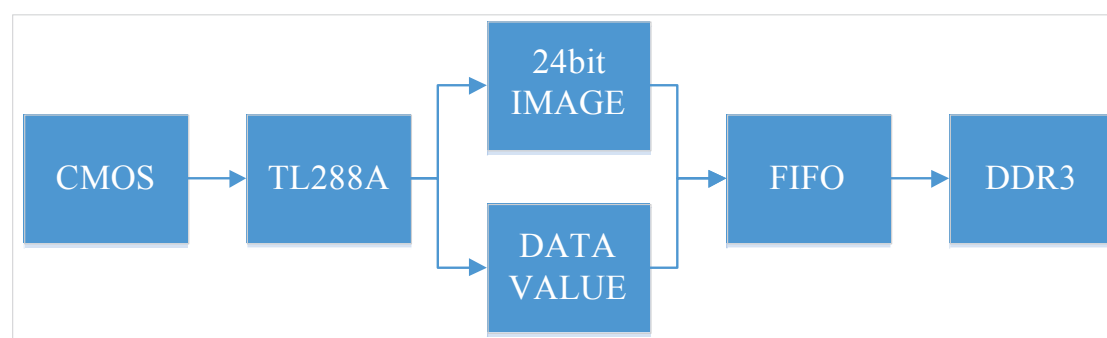


图 3.11 图像数据调制流程。

Figure 3.11 The data conversion process.

FIFO，即先进先出队列，目的是改变写快读慢问题，使数据可以写入内存，不会因此而发生数据丢失。基于FPGA的FIFO IP核如图 3.13所示。

在写入方面，FIFO中的数据是非满的，就可以写入；如果FIFO是满的，就禁止写入。在读取方面，FIFO中的数据是非空的，就可以实行读操作；如果FIFO是空的，就禁止读数据。如图 3.13所示，wr\_clk为写入时钟，与相机读入数据时钟相同；wr\_en为写入使能；din为FIFO输入32位数据；rd\_clk为读出时钟，由SRIO端数据输出时钟确定，调整FIFO数据读出；rd\_en为读出使能；dout为FIFO输

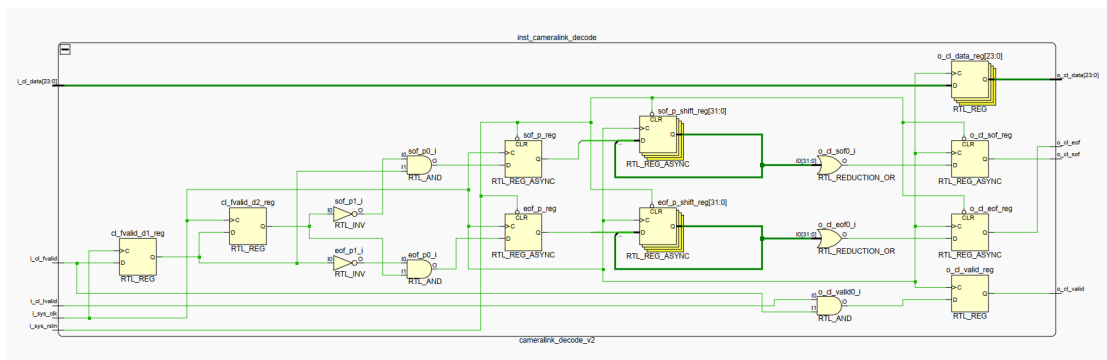


图 3.12 Cameralink数据解码综合电路。

Figure 3.12 Cameralink data decoding circuit diagram.

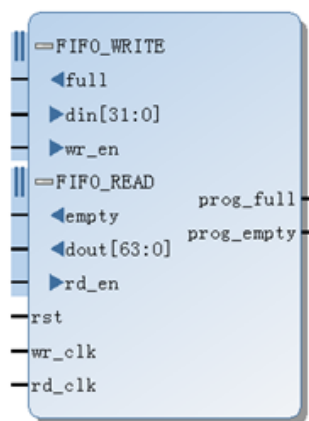


图 3.13 FIFO IP核。

Figure 3.13 FIFO IP Core.



出64位数据。

### 3.2.5 辅助电路设计

在完成主要输出信号和数字信号处理等控制模块设计后，需要完成辅助电路设计，以保证前端采集到的数据信号可以准确传递并完成处理，辅助电路设计主要是通信功能的实现。FPGA通信功能模块的主要目的是建立FPGA芯片与DSP芯片之间的通信功能，以便于将FPGA缓存的数据传输至DSP芯片的DDR3上。在FPGA存储满一帧图像后，通过高速Rapid IO发送至DSP，并发送DOORBELL（门铃）信息通知DSP核读取相应数据，通过不同的门铃信息将左右旋数据分别存储到不同地址上。

Rapid IO协议由逻辑层、传输层、物理层构成。其中，逻辑层定义了所有协议和包格式，传输层是数据包从一个终端到另一个终端的所有必要信息，物理层描述了设备之间的接口协议。Rapid IO可以分为并行Rapid IO标准和串行Rapid IO标准两种，其中，串行Rapid IO是指物理层采用串行差分模拟信号传输的Rapid IO标准，又被称为SRIO。本系统是基于FPGA设计SRIO IP核实现图像数据的输出功能，使用2X模式，每个通道的速率为5G bit/s，数据有效带宽为 $5 \times 2 \times 80\% = 8\text{G bit/s}$ 。

### 3.2.6 硬件系统研制总结

数据采集系统是稳像系统的必要组成部分，精准的数据采集是图像数据稳像功能实现的前提。通过本节的硬件系统的分析和设计，在FPGA芯片上可以实现相机外触发控制和高压偏振调制，通过同一晶振信号产生的同步信号精准采集太阳偏振像；并在FPGA芯片上实现数据调制和转发，将相机曝光信号差分处理并实现图像数据的保存和转发，以便于图像数据在DSP芯片进一步处理，使空间太阳磁像仪自校正稳像系统具备实时观测的数据采集能力。

## 3.3 系统软件设计

为了获取到高空间分辨率的磁场数据，需要通过图像稳像算法在数据深积分前进行图像偏移量计算，实现图像偏移纠正，以实现数据的实时校正和积分，因此，软件算法系统设计的重点和难点在于构建和优化稳像算法，实现数据的实时处理。

### 3.3.1 图像稳像算法设计

基于DSP的图像处理算法主要包含有稳像算法和深积分算法两部分，其中稳像算法是自校正稳像观测系统的核心软件算法，算法性能决定着是否能够稳定有效的完成图像稳像计算。目前的系统中稳像算法选用相关跟踪算法，算法流程如图 3.14所示。

首先，判断图像是否为有效的首帧图像，如果是，则将首帧图像作为参考图像作为保存，并开窗提取局部二维傅里叶变换结果进行保存。在国家天文台怀柔观测基地的望远镜观测过程中，采用太阳指向和跟踪等手段使太阳处于焦面数据采集范围内，并通过多帧短曝光（7ms-10ms）数据叠加提高信噪比，依次得到的观测数据保证了数据的有效性；另外在空间观测中，同样有星敏仪等设备保证载荷的指向和跟踪精度，同样采用短曝光保证数据有效性。

然后，将在首帧参考图像之后输入的图像作为序列图像，依次提取序列图像的对应开窗区域数据，计算二维傅里叶变换的共轭结果；最后通过基准图像与序列图像的相关系数矩阵，计算得到基准图像与序列图像的图像偏移量，这样得到的图像偏移量为整移量。

通过上述流程计算出序列图像相对于参考图像的图像偏移量后，进行图像校正和积分，依次将校正后的图像数据叠加至基准图像上，获得多帧曝光的图像数据。考虑到DSP芯片在单核运算时是流处理器，采用两核C66x同步处理稳像算法，同时，将左旋偏振像和右旋偏振像按照FPGA与DSP芯片间的中断信号进行不同地址的分别保存，由此实现左右旋同步处理。

使用相关跟踪算法计算图像偏移量，主要是计算图像的二维傅里叶变换和二维傅里叶逆变换。为了优化计算，可以对输入图像进行分割求解，以便于下一步进行并行运算的设计，二维傅里叶变换求解流程如图 3.15所示。

另外，为加快傅里叶变换算法速度，采用基2法的快速傅里叶变换进行计算。假设开窗大小为 $N * N$ ，则离散傅里叶变换的复杂度为 $O(N^2)$ ，而基2法的快速傅里叶变换的复杂度为 $O(\log_2 N)$ ， $N$ 越大，计算量的差距越大。

在完成图像偏移量运算后，需要通过图像位移调整来纠正图像偏移，并将纠正后的图像数据依次叠加至首帧参考图像上。在当前的系统设计中，对于32位1K×1K面阵的图像数据积分的时间消耗为65ms左右，与自相关运算的总耗时为72.9ms左右，基本满足单核10fps的稳像效率，但是对于2K×2K或更大面

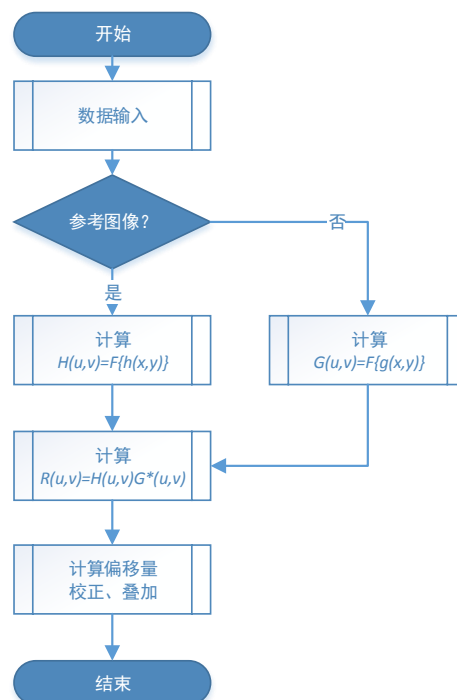


图 3.14 相关跟踪算法流程图。

Figure 3.14 The flow chart of correlation tracking algorithm.

阵的图像数据来说无法满足实时积分的需求，需要进一步优化运算方法和设计，通过多核并行运算来满足实时稳像和运算的需求。

### 3.3.2 辅助算法设计

基于DSP芯片的辅助算法设计主要是通信系统的设计，通信设计主要分为3个部分：DSP与FPGA之间的通信、DSP核间通信、DSP与PC机间的通信。

#### (1) DSP与FPGA之间的通信

DSP芯片与FPGA芯片之间的通信是通过门铃来进行控制的，DSP芯片Core0核接收到的图像数据由两种门铃中断信息判断，分别存储到DDR3内存的两个不同地址上，由此将采集到的左右旋图像分别存储，以便后续计算。

#### (2) DSP核间通信

TMS320C6678采用基于KeyStone架构的核中断控制器INTC (Interrupt Controller)、激活处理器触发相应的中断服务程序来完成通信。DSP芯片上Core0核在接收到FPGA传送的门铃信息后，通过判断分别激活Core1核和Core2核，来进行图像处理。在Core1核和Core2核完成图像处理进程后，发送中断信息到Core0核

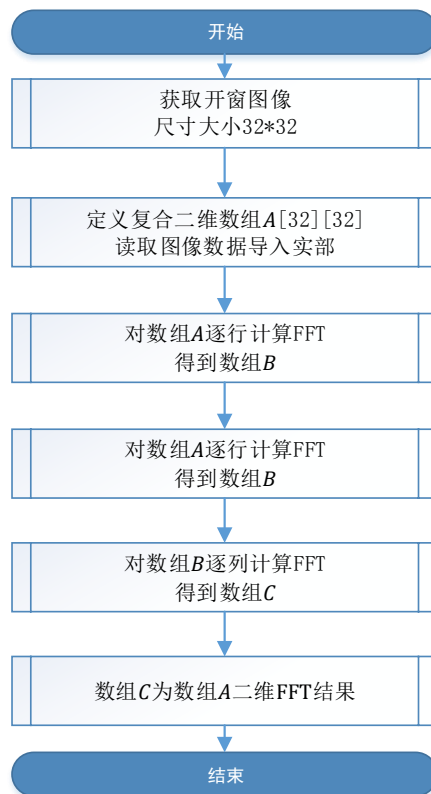


图 3.15 二维傅里叶变换算法流程图。

Figure 3.15 Flow chart of two-dimensional Fourier transform algorithm.

进行下一步判断处理。

### (3) DSP与PC之间的通信

DSP芯片和PC机之间通过TCP IP建立数据通信，在Core1核和Core2核发送的中断信息中判断达到深积分设定的数量后，通过网络端口将图像数据发送到PC端。

## 3.4 小结

本章作为整个论文的工作重点，在需要大数据计算能力的稳像观测系统空间化应用中，选用性能对标宇航级器件的工业芯片，在计算能力较低的情况下来实现大数据运算等各类算法，设计并完成自校正稳像观测系统的研制。通过模块化设计和模块间的协同处理，完成自校正稳像观测系统的研制。首先，通过偏振调制、光电转换和数据采集等各模块的设计，完成以FPGA芯片为基础的硬件电路设计；然后通过优化后的相关算法和积分运算，在性能较低的DSP芯片上完成图像数据的实时稳像运算，完成太阳偏振像的稳像观测。在当前的系统设计中，对于32位1K×1K面阵的图像数据稳像观测的总时间消耗为72.9ms左右，基本满足单核10fps的稳像效率，实现双核20fps的稳像观测。

完成的自校正稳像观测充分发挥了各个硬件设备的优良特性，实现结构与算法的统一，采用模块化设计，优化了算法性能，不仅方便并行运算的设计优化，而且通过各模块的独立优化，可以进一步提高系统性能，方便进行后续的系统改进。



## 第4章 自校正稳像观测系统测试与分析

基于第2章自校正稳像观测系统的原理和分析，在第3章完成了该系统的研制工作，为了验证基于FPGA+DSP的相关跟踪算法的有效性，通过在实验室内进行的仿真实验来验证相关跟踪算法对图像偏移量检测的有效性和准确性，然后在怀柔观测基地SMFT的35 cm太阳磁场望远镜上进行了实际观测，获得了实际稳像观测结果。

### 4.1 测试软件设计

为了方便进行地面测试，在PC端设计如图 4.1和图 4.2所示的控制软件，其中，如图4.1所示的软件实现数据保存和显示功能，可以保存当前采集的数据，并将采集到的数据中的左旋图像和右旋图像分别显示在界面中；在如图 4.2显示的软件中集成了串口命令发送、串口数据接收、图像数据的接收和保存、磁场图数据的计算及磁场图像的显示等功能，在图形界面上显示当前目录中数据的磁场图像。

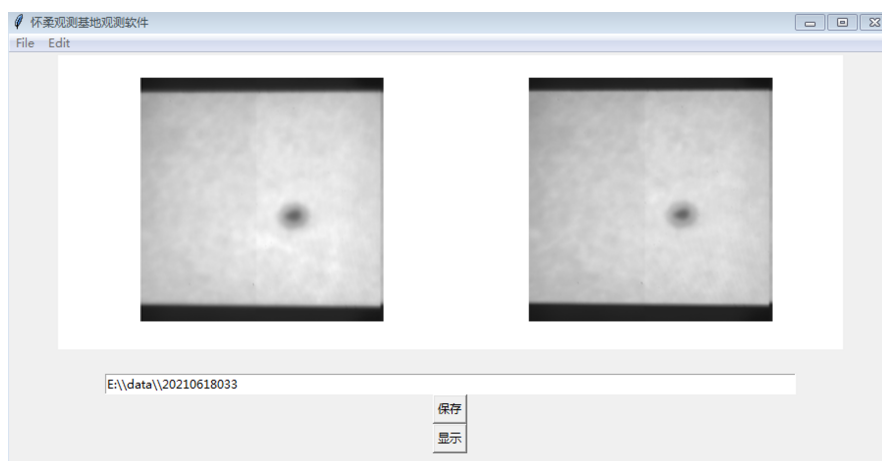


图 4.1 测试软件：数据接收。

Figure 4.1 The Software: Data Receiving.

观测软件可以实现的功能有：

- 1) 观测指令参数控制：通过串口指令控制开窗位置、开窗大小等参数；
- 2) 数据保存：通过网络建立通讯，获取太阳偏振像数据并保存；

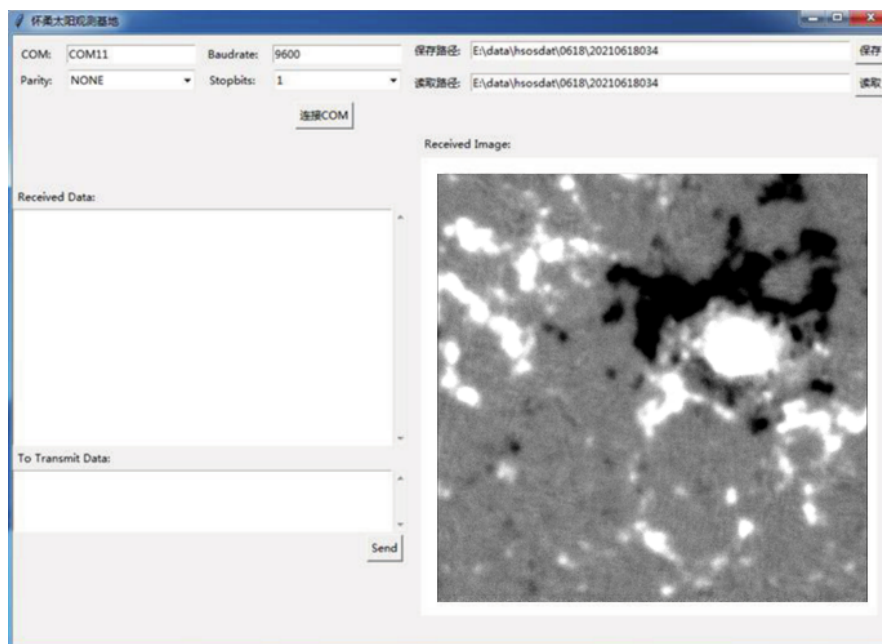


图 4.2 测试软件：磁场观测。

Figure 4.2 The Software: magnetic field observation.

3) 数据读取：提取数据，完成太阳磁场的计算和显示。

软件通过串口发送指令到DSP芯片，用来配置网口信息、开窗位置等参数；然后建立TCP/IP协议，通过网口接收由DSP端发送出的图像数据。在软件内集成磁场数据生成的算法，可以在软件内显示磁场图像，磁场计算如式所示：

$$\begin{cases} mag = k \times \frac{\sum L - \sum R}{\sum L + \sum R} \\ L = \frac{I+V}{2} \\ R = \frac{I-V}{2} \end{cases} \dots (4.1)$$

式中， $mag$ 是磁场强度， $\sum L$ 是左旋图像深积分， $\sum R$ 是右旋图像深积分， $k$ 代表太阳磁场望远镜标定系数， $I$ 表示的是强度， $V$ 表示的是圆偏振。

#### 4.2 稳像精度测试

在完成系统研制后，在实验室内搭建平台测试实际观测情况下的稳定精度。对含有斑点的目标进行无干扰拍摄和有干扰拍摄，以无干扰拍摄数据作为基准图像，对比有干扰拍摄过程中获取到的直接叠加结果和稳像叠加结果，图 4.3所示，目标的特征区域对比如图 4.4所示，取其中一个目标斑点画灰度折线图，如



图 4.5所示。

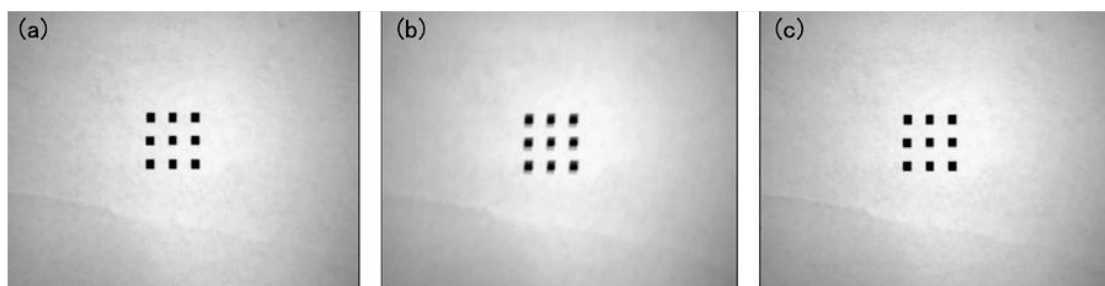


图 4.3 测试图像：(a)稳像，(b)直接叠加，(c)基准数据。

Figure 4.3 Testing image: (a) correlation, (b) directly accumulated, (c) reference data.

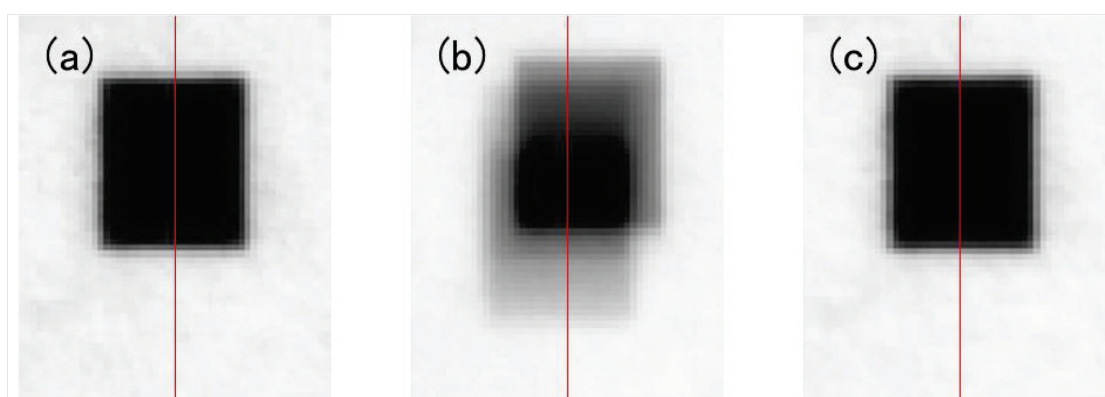


图 4.4 测试目标局部特征：(a)稳像，(b)直接叠加，(c)基准数据。

Figure 4.4 The feature region of testing object: (a) correlation, (b) directly accumulated, (c) reference data.

论文使用半高全宽来评价图像分辨率。半高全宽，又称为半峰宽，指的是吸收谱带高度最大处高度50%处的谱带的全宽，也即峰值高度一半时的透射峰宽度。常用来表示能量分辨率。按照半高全宽进行评价，取灰度值19000线作为阈值进行对比，其中基准图像的像素点位置范围为[23.52,56.75]；稳像图像的像素点位置范围为[23.90,57.01]；两者边界误差为[0.38,0.26]。综合误差结果可以看出，在实际观测过程中，对于有线性偏移的目标，系统可以完成1像元以内的稳定精度。

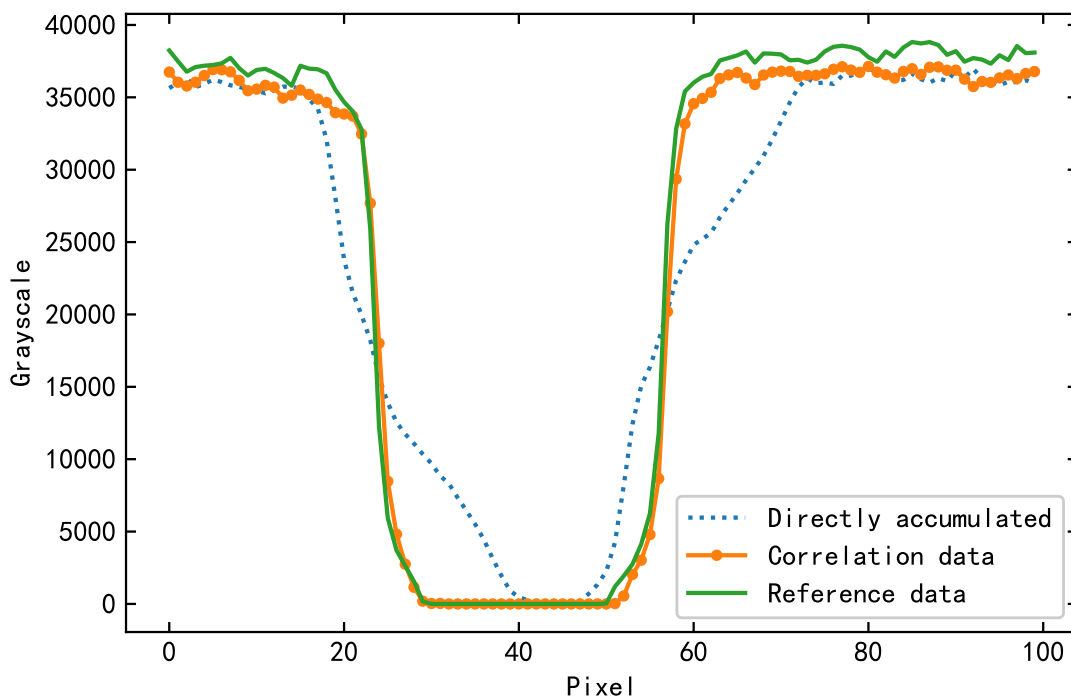


图 4.5 磁场强度折线图。

Figure 4.5 The line chart of magnetic field intensity.

### 4.3 太阳观测数据仿真实验

#### 4.3.1 整像元仿真实验

在完成实验室精度测试后，进行了太阳偏振像的仿真实验，分别对地基太阳望远镜和空间太阳望远镜的观测数据进行仿真实验，对比数据结果。其中地基太阳望远镜数据采集自国家天文台怀柔观测基地35CM磁场望远镜，空间太阳望远镜数据采集自SDO/HMI载荷。

首先进行地基太阳观测数据的分析，通过对2021年6月18日在怀柔观测基地35CM磁场望远镜上观测所得的10张局部太阳偏振像进行处理，将每张太阳偏振像作为基准图像，将每张图像在 $[-7,7]$ 的范围内进行步长为1的平移，获得225张待配准图像，共计获得2250张待配准图像。分别将每组基准图像和待配准图像输入图像稳像系统中，计算基准图像与每张待配准图像的位移量，并与手动位移量计算误差值，其中 $(x, y)$ 坐标的平均值均为0，综上，稳像系统可以很好的完成手动位移图像的偏移纠正。

然后进行空间太阳观测数据的分析，通过对2021年6月18日HMI载荷的45s全日面太阳偏振像数据进行处理，将每张太阳偏振像作为基准图像，将每张图像

在[-7,7]的范围内进行步长为1的平移，获得225张待配准图像，共计获得2250张待配准图像。分别将每组基准图像和待配准图像输入图像稳像系统中，计算基准图像与每张待配准图像的位移量，并与手动位移量计算误差值，其中(x,y)坐标的平均值均为0，综上，稳像系统可以很好的完成手动位移图像的偏移纠正。为了对比地基望远镜与空间望远镜的太阳偏振数据配准效果，进一步通过亚像元精度来比较数据结果，分别对经过(0.2, 0.7)、(0.2, -0.3)、(-0.8, 0.7)、(-0.8, -0.3)亚像素位移的两组图像数据进行处理，与基准图像进行相关运算后得到的位移量均分别为(0, 1)、(0, 0)、(-1, 1)、(-1, 0)，可以看出，系统使用的稳像算法在地基和空间数据的偏移量计算均可以实现1像元内的稳像精度，达到预期目标。

### 4.3.2 亚像元仿真实验

对太阳观测数据进行亚像元精度分析，使用抛物线拟合法和基于修正矩的重心法对HMI和怀柔SMFT 35CM磁场望远镜数据进行分析计算。通过将单帧太阳偏振像分别在[-3,3]的区域内以步长为0.1进行整移，每张单帧太阳偏振像可以获得3721个序列图像数据，进行基准图像与获得的3721个序列图像数据分别计算图像偏移量误差。使用抛物线拟合法计算亚像元精度并进行对比。

首先由曲面拟合 $f(i, j) = a_1i^2 + a_2i + b_1j^2 + b_2j + c$ ，然后利用最小二乘法计算公式中的各个参数 $a_1, a_2, b_1, b_2, c$ ；消除相关矩阵的对角线元素，简化为抛物线拟合。对于图像 $M$ ，依据相关矩阵最大值点(x,y)计算亚像元位移量：

$$\begin{cases} \Delta x = 0.5 * \frac{M(x-1,y)-M(x+1,y)}{M(x-1,y)+M(x+1,y)-2*M(x,y)} \\ \Delta y = 0.5 * \frac{M(x,y-1)-M(x,y+1)}{M(x,y-1)+M(x,y+1)-2*M(x,y)} \end{cases} \dots (4.2)$$

表 4.1 抛物线拟合的亚像元精度结果

Table 4.1 Sub-pixel accuracy results of parabola fitting.

数据	Mean X error (pixel)	Mean Y error (pixel)
HMI	0.0435±0.0004	0.0298±0.0003
SMFT	0.1333±0.0012	0.0900±0.0010

抛物线拟合的亚像素精度结果如表 4.1所示。经过对比分析，亚像素拟合算法在空间观测数据上有明显优化效果，地面观测数据优化效果不明显。

### 4.3.3 抗噪声性能分析

在探测器成像的过程中，会存在影响图像质量的噪声。这些噪声会对相关算法产生一定程度的影响。由于实际的噪声多种多样，本文利用高斯白噪声来模拟实际的物理噪声。在HMI数据上按照一定信噪比加入高斯白噪声，研究信噪比与相关运算精度之间的关系。

图像的信噪比定义为：

$$SNR = 10 * \ln \frac{m^2}{\sigma} \quad (4.3)$$

其中， $m$ 为数据的灰度均值， $\sigma$ 为添加的高斯噪声方差。将添加了高斯白噪声的数据进行如上一节的亚像素位移，计算平均误差，计算误差随图像信噪比变换的曲线如图 4.6所示，其中，当信噪比为10-40dB时，计算误差有所波动；信噪比大于40dB时，取得稳定结果。由此可见，相关函数在信噪比大于10dB的情况下有比较好的抗噪声效果。

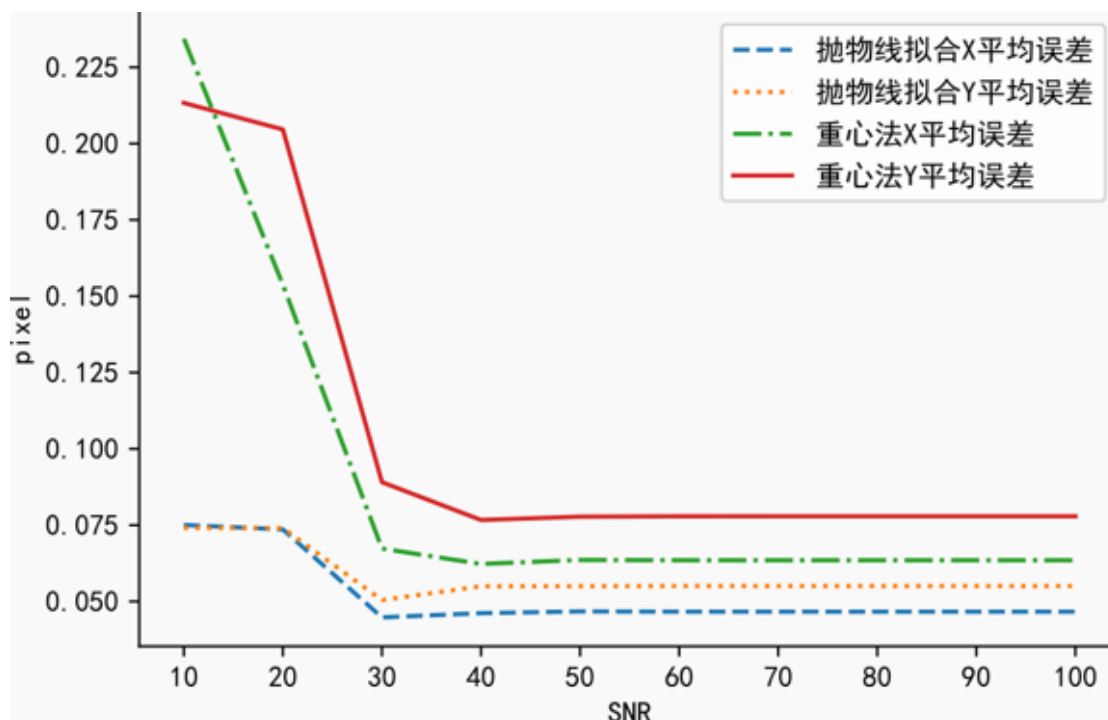


图 4.6 计算误差随SNR变化曲线

Figure 4.6 The curve of error variation with SNR.

#### 4.4 实际观测

同时，系统在完成实验室测试后，于2021年6月18日，在国家天文台怀柔太阳观测基地35cm太阳磁场望远镜上进行了试观测，获得提高了分辨率的磁场数据。添加相关跟踪算法得到的磁场图像和直接叠加得到的磁场图像如图 4.7所示。

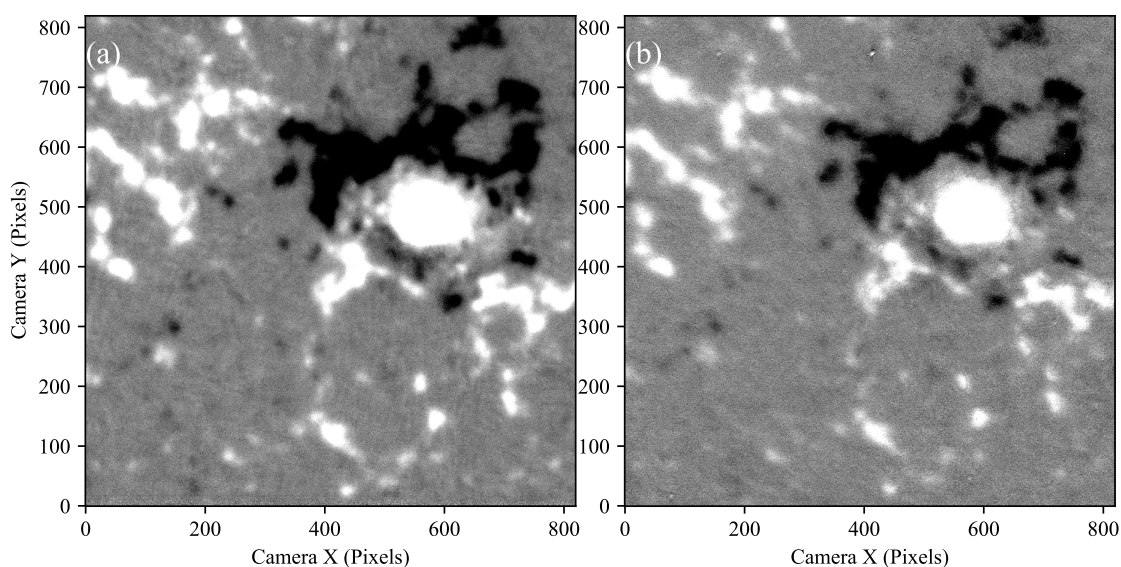


图 4.7 磁场图像：(a)直接叠加，(b)稳像。

Figure 4.7 The magnetic field: (a) directly accumulated, (b) correlation.

图 4.7(b)中经过稳像算法后获取的磁场数据比直接叠加得到的磁场数据 4.7(a)的精度更高。图 4.7中部分细节如图 4.8所示，图 4.8中横线位置的灰度谱线如图 4.9所示，经过对比，发现图 4.8(a)的精度更高，稳像处理后的数据对应的曲线具有更多的细节变化，同时，极值点处磁场强度（灰度值）更高。因此，实验结果表明该系统可以有效地计算得到图像位移量，实现图像的运动补偿，获得空间分辨率更高的太阳磁场数据。

但是目前自校正稳像观测系统获取到的磁场数据依旧有很多地方需要优化：一方面，磁场图像中含有一些不是太阳磁场的结构，文章梁波等(2014)认为这是由于在积分计算磁场数据的时候，分别采用左右旋偏振图像的首帧数据作为基准帧引起的，这两帧图像由于大气抖动或者其他原因，彼此会有一定的相对位移，而这种位移在左旋和右旋2个偏振态的数据相减的时候，就会产生异常结构，目前通过校正左、右旋叠加图像数据间出现的偏移进行一定修正，磁场图像有一定程度上修正。但是这种方法由于是使用叠加后的数据进行校正，因

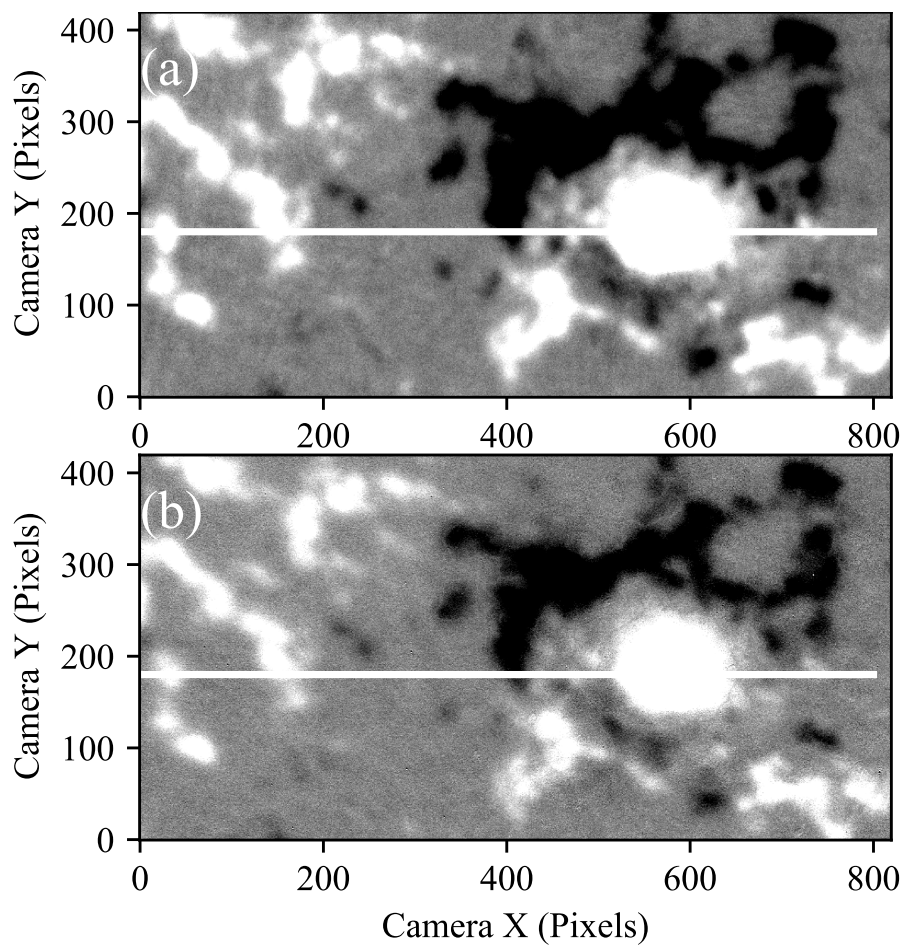


图 4.8 局部磁场图像特征：(a)直接叠加，(b)稳像。

Figure 4.8 The feature region of the magnetic field: (a) directly accumulated, (b) correlation.

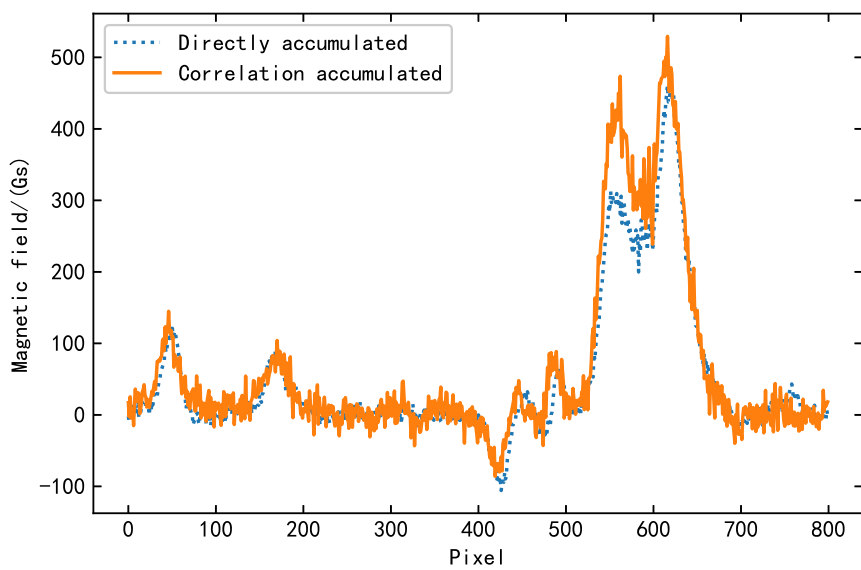


图 4.9 磁场强度折线图。

Figure 4.9 The line chart of magnetic field intensity.

此会有比较大的误差，文章梁波等(2014)提出了使用左右旋平均视场来代替单帧图像作为基准图像的方法，将每帧图像的偏移量进行统计计算并保留在头文件中，在校正左右旋的偏移上取得更好的效果。另一方面，自校正稳像观测系统与当前采用的光机电反馈系统最大的不同在于使用采集到图像数据进行位移，这会导致望远镜或探测器中存在的固有误差随着稳像校正而移动，在磁场数据中出现黑斑等影响磁场灵敏度的异常结构体，这方面的噪声可以通过平场处理等方式进行消除，但是目前在DSP的运算过程中加入该处理会导致计算压力加大，无法实现单核10fps的处理性能，需要进一步优化处理；另外，平场处理本身会带如一些噪声，这方面需要进一步的深入研究。

#### 4.5 小结

本章基于第3章完成的自校正稳像观测系统，分别进行了实验室仿真测试和怀柔观测基地SMFT 35 cm太阳磁场望远镜实际观测测试，通过对测试结果分析，当前结果实现了系统的设计目标，能够在面阵为1K×1K大小，帧频为20 fps的采样情况下，完成实时稳像观测，稳像精度为1像元以内的误差。但是该系统依旧存在需要改进方向：

(1) 自校正稳像数据提高了太阳磁场的空间分辨率，但是随着图像的校正，望远镜光路或探测器中存在的固有噪声会随之移动，最终在磁场数据中出现斑点等异常结构，为了进一步提高磁场灵敏度，可以通过添加平场处理等方式进一步优化稳像处理算法，提高灵敏度；另一方面，平场处理本身会带如一些噪声，需要进一步的深入研究；

(2) 现在的普遍探测器尺寸已经是2K×2K，需要进一步优化相关和积分算法的效率，以便于可以完成2K×2K数据的实时处理，满足空间望远镜使用设备的性能要求；

(3) 受工作效率的限制，目前使用整数位移来进行稳像计算，稳像误差为(-0.5, 0.5)之间，需要有足够的计算空间进行亚像元误差计算和亚像元位移处理，同样需要优化整体运算；

(4) 在地面测试中，发现对于低空间分辨率的全日面数据进行稳像计算时，效果时好时坏，在日面存在活动区时，选择活动区所在区域作为开窗区域可以实现较好的稳像效果，但是在非活动区，则不好判断区域选定标准，因此

需要设计一种特征区域选择算法来优化稳像性能。



## 第5章 自动化选区算法设计

在通过第4章对系统测试结果分析后，继续对图像处理算法进行研究，分析了如何加强局部相关跟踪算法的性能，总结并提出几个可以改进方向，提出了特征区域选择算法的设计方案，在本章对以上优化方案进行算法的原理阐述、算法设计、仿真测试和结果分析。

### 5.1 自动化选区算法设计分析

当前，随着科学技术的不断发展，各类探测器不断更新换代，特别是科学相机的分辨率越来越高，图像尺寸越来越大。在进行图像处理算法的过程中，图像的尺寸大小直接影响着特征提取的时间消耗。一般的，直接从原始尺寸图像中提取特征会增加计算量，这会导致时间消耗的增加。以互相关算法为例，直接使用原尺寸图像进行图像相关性运算会消耗掉大量的时间，当前，如何在获取到有效图像偏移量检测结果的同时，达到实时检测，是当前图像配准的重要需求。

局部相关跟踪算法，是目前天文太阳观测领域的一种常用方法，目前已经在多个地基望远镜和空间望远镜上实现并稳定运行，使用局部开窗来替代全局图像进行图像偏移量的实时检测，完成图像稳定较好的持续观测。但是，在某些环境下，如在地基望远镜空间分辨率较低或开窗位置位于太阳宁静区特征不明显的地方时，稳像精度会受到一定程度的影响。因此，实时智能化地选择一个有良好图像偏移量检测能力的开窗区域是自校正稳像观测系统优化的一个有效方向。而如何在全局图像中实时挑选出一个有效开窗区域，是下一步攻克的重点。

### 5.2 图像特征提取算法原理

近年来，随着计算机等计算设备的不断发展，以机器计算为基础的图像处理算法不断开拓创新，图像特征提取、图像特征匹配、图像特征重建、图像特征的学习和识别等方向上的研究已经成为当下研究的热点，创新型的图像处理算法也不断被开发出来。

基于特征的图像处理方法是目前常用的图像处理方法，这类算法一般只需要提取图像中的点、线、边缘等特征信息，便可以对该图像的特征进行描述，而且基于灰度值的特征信息一般都存在着一定的内在联系。其中，基于点特征的图像处理算法有Harris(Papageorgiou 等, 2000; Viola 等, 2005)算法、SUSAN算法等，基于边缘特征的图像处理方法有Robert算子、Sobel算子和LOG算子等。目前常用的图像提取算法如尺度不变特征变换(Lowe, 2004) (Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)、加速稳健特征(Bay 等, 2006) (Speeded Up Robust Features, SURF)算法在图像的不变特征提取方面拥有优势，已经取得比较好的成绩。另外，ORB(Rublee 等, 2011) (Oriented FAST and Rotated BRIEF)算法是目前最快速稳定的特征点检测和提取算法，是Oriented FAST + Rotated BRIEF的缩写，许多图像拼接和目标追踪技术利用ORB特征进行实现。

### 5.3 特征点提取算法

目前，使用较多的图像配准算法基本上是基于尺度不变特征变换、加速稳健特征或ORB等点特征匹配算法进行的，在对太阳偏振像和磁场图像进行分析时，很多学者(Yang 等, 2018; Yue 等, 2015; 冯涛; 唐剑; 季凯帆 等, 2019; 张成军, 2020)使用SIFT等算法对局部太阳磁场图像或单色像进行特征点匹配来进行图像配准，获得了不错的效果。为了获取到更快更有效的特征区域，在这里依次对三种算法的特征点提取方式进行阐述，比较它们的特征提取方式和提取效果。

#### 5.3.1 SIFT特征点提取算法

SIFT特征，即尺度不变特征变换，用来侦测与描述图像中的局部特征。该算法是在不同的尺度空间上查找特征点。SIFT所查找到的特征点是不会因光照、仿射变换和噪音等因素而变化的点，如角点、边缘点、暗区的亮点及亮区的暗点等。算法流程如下所示：

(1) 尺度空间的极值检测：尺度空间指一个变化尺度( $\sigma$ )的二维高斯函数 $G(x, y, \sigma)$ 与原图像 $I(x, y)$ 卷积（即高斯模糊）后形成的空间，尺度不变特征应该既是空间域上又是尺度域上的局部极值，极值检测的大致原理是根据不同尺度下的高斯模糊化图像差异寻找局部极值，这些极值所对应的点即为特征点(Lowe, 2004)。

(2) 关键点定位：在完成尺度空间的极值检测后，使用二次曲面来模拟每个极值点附近的灰度函数，求出理论极值点，设定阈值，筛选出实际点与理论点相差较小的点作为特征点。

### 5.3.2 SURF特征点提取算法

SURF，即加速稳健特征，是一种稳健的图像识别和描述算法。它是SIFT算法的变种，与SIFT一样也是提取图像的尺度不变特征，但是其提取局部极值的方式与SIFT有所不同。SURF使用Hessian矩阵的行列式值作特征点检测并用积分图加速运算(Bay 等, 2006)。Hessian矩阵定义为：

$$H(X, \sigma) = \begin{pmatrix} D_{xx}(X, \sigma) & D_{xy}(X, \sigma) \\ D_{xy}(X, \sigma) & D_{yy}(X, \sigma) \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

(1) 首先使用不同尺度的盒式滤波器对图像进行滤波，不同组间图像的尺寸都是一致的；

(2) 特征点检测：SURF使用Hessian矩阵来检测特征点，该矩阵是x, y方向的二阶导数矩阵，可测量一个函数的局部曲率，其行列式值代表像素点周围的变化量，特征点需取行列式值的极值点。用方型滤波器，如图5.1所示取代SIFT中的高斯滤波器，利用积分图大幅提高运算速度；

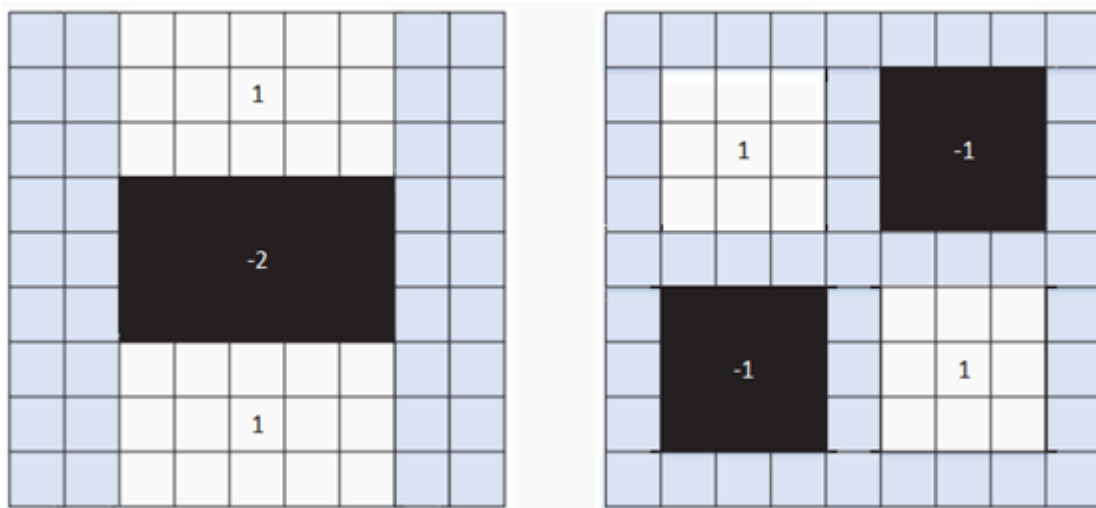


图 5.1 SURF 不同方向上的二阶高斯偏导：左图为y方向，右图为xy方向。

Figure 5.1 Second-order Gaussian partial derivative in different directions of SURF: the left picture shows the Y direction, and the right picture shows the xy direction.

(3) 特征点定位：与SIFT类似，通过特征点邻近信息插补来定位特征点。通过图像金字塔提取不同尺度的空间特征，完成尺度空间的建立后，通过非极大值抑制来搜索定位特征点。在尺度空间内，通过响应图像中的每个像素点与其邻域的26个像素点的比较，提取该区域的极大值点，确定其为特征点。

### 5.3.3 ORB特征点提取算法

ORB包含Oriented FAST和Rotated BRIEF两部分：Oriented FAST是特征检测算法，Rotated BRIEF是向量创建算法。该特征检测算法是在著名的FAST特征检测和BRIEF特征描述子的基础上提出来的，其运行时间远远优于SIFT和SURF，可应用于实时性特征检测，可以对图像中的关键点创建特征向量用来识别图像中的目标。ORB特征检测具有尺度和旋转不变性，对于噪声及其透视变换也具有不变性。

Oriented FAST特征提取算法是由FAST算法发展而来的，FAST角点（特征点）检测方法是比较像素点与周围像素点的像素差，当像素差大于阈值时判定该像素点为角点。FAST检测角点仅仅只是对比像素值，因此角点并不具备方向性和旋转不变性。ORB算法则在FAST算法的基础上，提取了特征点的方向。Oriented FAST特征提取算法原理如下：

#### (1) FAST角点检测

如图5.2所示，在以像素P点为中心，半径为3的Bresenham圆上，取16个像素点（ $P_1$ 、 $P_2$ 、...、 $P_{16}$ ）。像素值分别为 $I_P$ ， $I_i$ ( $i=1,2,3,\dots,16$ )。设定一个阈值T，若圆上有n个连续的像素点的灰度值小于 $I_P-T$ 或大于 $I_P+T$ ，那么这个点可以初步判断为特征点。

#### (2) 非极大值抑制

使用极大值抑制的方法可以解决检测到的特征点相连的问题。首先，对所有检测到特征点构建一个函数V，用来计算像素点P与周围16个像素点差值的绝对值之和，在筛选比较邻近的特征点时，保留响应值较大的特征点作为算法提取结果。

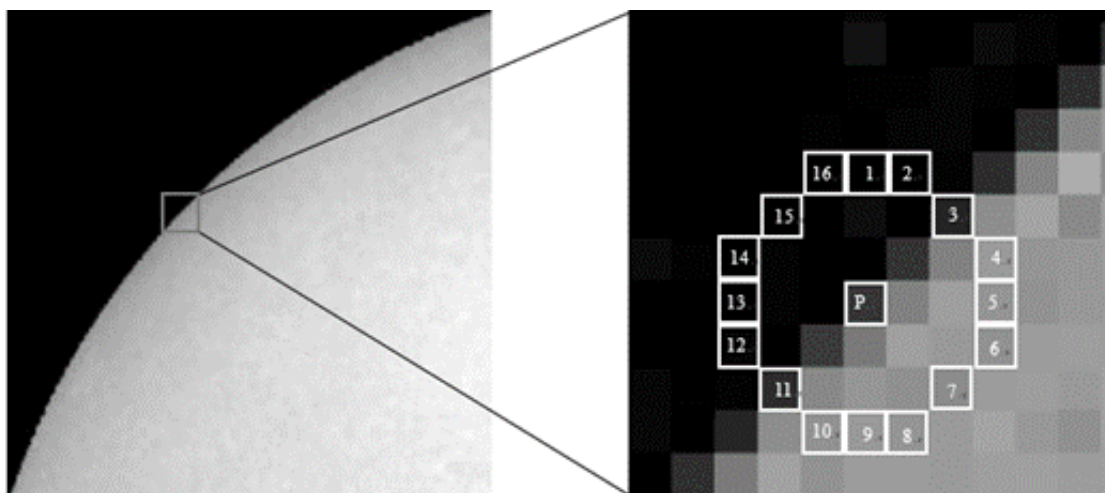


图 5.2 FAST角点检测。

Figure 5.2 FAST corner detection.

#### 5.4 特征点提取结果对比

本课题使用以上文中介绍的SURF、ORB、SIFT算法分别对太阳偏振像进行特征点提取操作。通过对比三种算法提取到的特征点数量的对比，选用能够稳定提取到较多特征点的算法来进行设计；另外使用 $75 \times 75$ 均值滤波算法来进行频域增强获取高频信息。处理后的高频图像数据在进行三种算法提取特征性能的对比，结果如图 5.3所示。

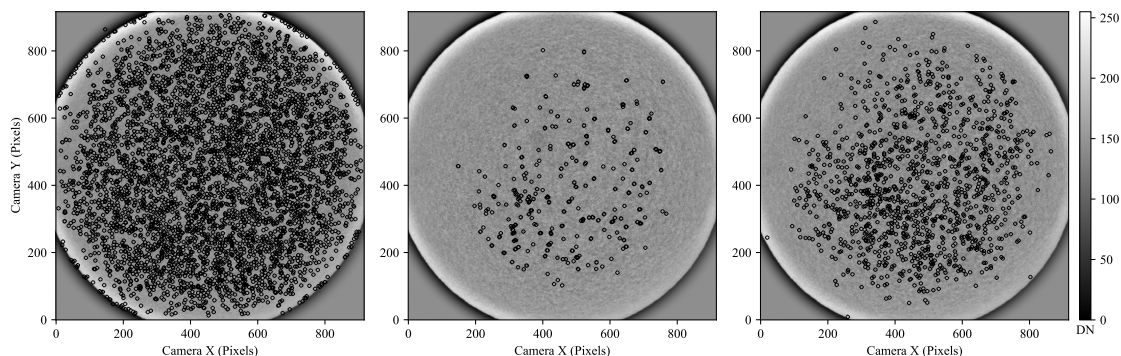


图 5.3 频域增强后特征点提取结果对比。由左到右分别是SURF提取结果，ORB提取结果，SIFT提取结果。

Figure 5.3 The feature points distribution in the frequency domain enhanced solar full-disk photospheric filtergram calculated by different methods. The left column shows the result of our method, the middle column shows the result of ORB, the right column shows the result of SIFT.

如图所示，三种方法均可以在频域增强的图像中提取到足够多的特征点，

但是进行该图像预处理的时间消耗过长，对于上述图像中917\*917大小的图像进行预处理，共计耗时11.313s，尽管采用256\*256大小图像进行处理也需要消耗0.887s的时间。而如果在参考图像上的特征是基于图像预处理产生的，那么之后在进行序列图像特征与参考图像特征配准时，也应该进行图像预处理，这对实时观测来说时间消耗太长，无法达到实时观测帧频需求。因此，采用直接对原始图像数据处理的方法，这就要求尽量提取更多特征点，通过对特征点选择区域的比较，获取更好的区域完成偏移量测试。原始图像数据的三种特征提取结果如图 5.4所示。2021年3月20日在怀柔观测基地采集了20组连续单帧数据，选用首帧作为测试目标，共计20张原始偏振数据，20组特征提取实验结果对比如表 5.1所示。

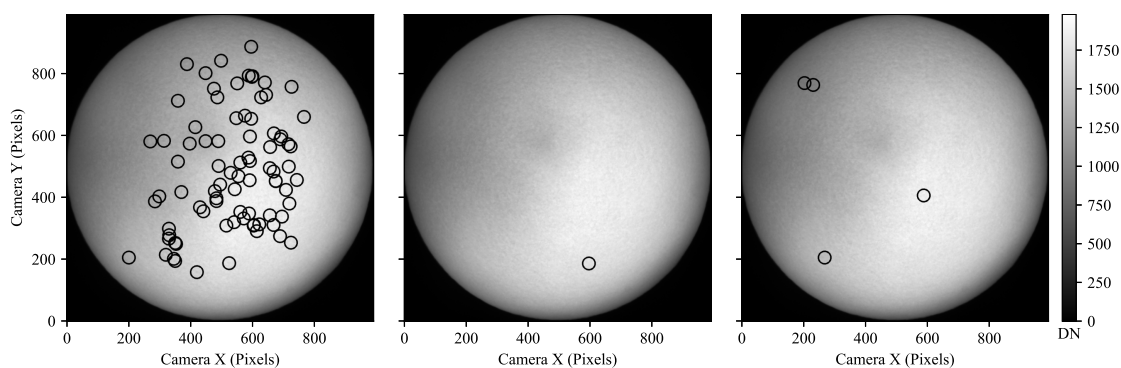


图 5.4 原始图像数据特征点提取结果对比。由左到右分别是SURF提取结果，ORB提取结果，SIFT提取结果。

Figure 5.4 The feature points distribution in the solar full-disk photospheric filtergram calculated by different methods. The left column shows the result of our method, the middle column shows the result of ORB, the right column shows the result of SIFT.

表 5.1 太阳偏振像中特征点提取数量

Table 5.1 The number of characteristic points of the solar photospheric filtergram.

Algorithm	Average Num	Maximum Num	Minimum Num
ORB	6.05±0.61	14	2
SIFT	3.35±0.27	6	1
SURF	170.15±6.79	227	113

经过实验结果分析,在对原始偏振图像数据处理时,SIFT和ORB算法无法每次都提取到足够多的特征点,且特征点多分布于比较边缘的位置,在进行实验时,使用带有太阳边缘的区域进行相关跟踪计算时,效果较差,这可能是由于大气抖动等因素导致的日面边缘模糊等问题。而SURF能够较多的提取到日面中心位置处的特征点,这有利于进行区域的选择。

### 5.5 特征区域选择算法

在完成特征点的提取后,以特征点 $(x_0, y_0)$ 为中心取一个 $256*256$ 的开窗范围 $[x_0 - 128 : x_0 + 128, y_0 - 128 : y_0 + 128]$ ,在该区域进行二维信息熵的计算。熵(Entropy)由Rudolf Clausius提出,用来描述体系的混乱程度(Renyi, 1961; 章慧等, 2011; Mahmoudi 等, 2012; Wernecke 等, 1977)。

图像的熵是一种图像特征的统计形式,反映了图像的平均信息量。图像的一维熵表示图像中灰度分布的聚集特征,灰度图像的一元灰度熵可以定义为:

$$H = - \sum_{i=0}^P P_i \ln P_i \quad (5.2)$$

其中 $P_i$ 表示图像中灰度值为 $i$ 的像素所占的比例, $P$ 为图像中存在的最大像素值。图像的一维熵可以表示图像灰度分布的聚集特征,却不能反映图像灰度分布的空间特征。为了表征这种空间特征,引入能够反映灰度分布空间特征的特征量来构建图像的二维熵。

选择图像 $(M, N)$ 中特征点的邻域灰度均值作为灰度分布的空间特征量,与图像的像素灰度组成特征二元组,记为 $(i, j)$ ,其中 $i$ 表示像素的灰度值, $j$ 表示邻域灰度均值,则某像素位置上的灰度值与其周围像素的灰度分布的综合特征及可表示为

$$p(i, j) = f(i, j) / (M * N) \quad (5.3)$$

其中 $f(i, j)$ 为特征二元组 $(i, j)$ 出现的次数, $p(i, j)$ 为特征二元组 $(i, j)$ 出现的频率, $P$ 为存在的最大像素值,离散的图像二维熵定义为:

$$H = - \sum_{i=0}^P \sum_{j=0}^P p(i, j) \ln p(i, j) \quad (5.4)$$

依此构造的图像二维熵可以在反映图像所包含的信息量的前提下,突出反映图像中像素位置的灰度信息和像素邻域内灰度分布的综合特征。

## 5.6 特征区域稳像精度测试

通过仿真实验测试和实际测试数据来验证选区效果的有效性，验证算法选择的区域是否可以很好地通过局部相关跟踪算法计算出图像之间的线性偏移量。

### 5.6.1 仿真实验测试

在仿真实验过程中，提取了中国科学院国家天文台怀柔太阳观测基地SMAT 10cm太阳磁场望远镜上采集到的不同时间的100张单帧太阳偏振像，分别对数据进行特征点和特征区域的提取。以其中一个数据为例，如图 5.5所示。依据二维信息熵最大值筛选，选用图中(d)区域作为特征区域，为了进行对比，选用二维信息熵相对较小的(c)区域作为特征对比区域，该区域计算得到的二维信息熵值为17.80，选定的区域(d)的二维信息熵值为21.15。另外，选择(a)、(b)区域作为边缘区域和中心区域来进行相关跟踪运算，计算图像间的偏移量，来比较各个区域在相关跟踪算法性能上的差异。

通过将100张单帧太阳偏振像分别在[-3,3]的区域内以步长为0.1进行整移，每张单帧太阳偏振像可以获得3721个序列图像数据，总计372100个待测试序列图像数据。之后，进行基准图像与获得的3721个序列图像数据分别计算图像偏移量误差。

$$\begin{cases} \Delta x = |x_1 - x_0| \\ \Delta y = |y_1 - y_0| \end{cases} \quad \dots (5.5)$$

式中 $x_1$ 、 $y_1$ 是通过局部相关跟踪检测得到的偏移量 $x_0$ 、 $y_0$ 是手动位移的偏移量， $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 为检测偏移量。使用3个开窗区域 (a)、(b)、(c)、(d) 和全局图像分别使用相关跟踪算法计算图像偏移量，偏移量检测误差如表 5.2所示。另外，使用抛物线拟合方法对数据进行亚像素精度的分析，其结果如表 5.3所示。

通过数据分析，发现使用全局图像进行相关跟踪计算得到的偏移量检测误差为0，但是计算所需时间较长。使用特征点提取算法和特征区域选取算法选定的区域 (d) 同样可以获取到检测误差为0的最好效果，而且该区域运算时间大量提高，相较于全局计算时间提高了96.23%。对应的，作为对比实验的区域 (c) 在x和y方向上的结果均有一定误差，尤其是对于y方向上的检测结



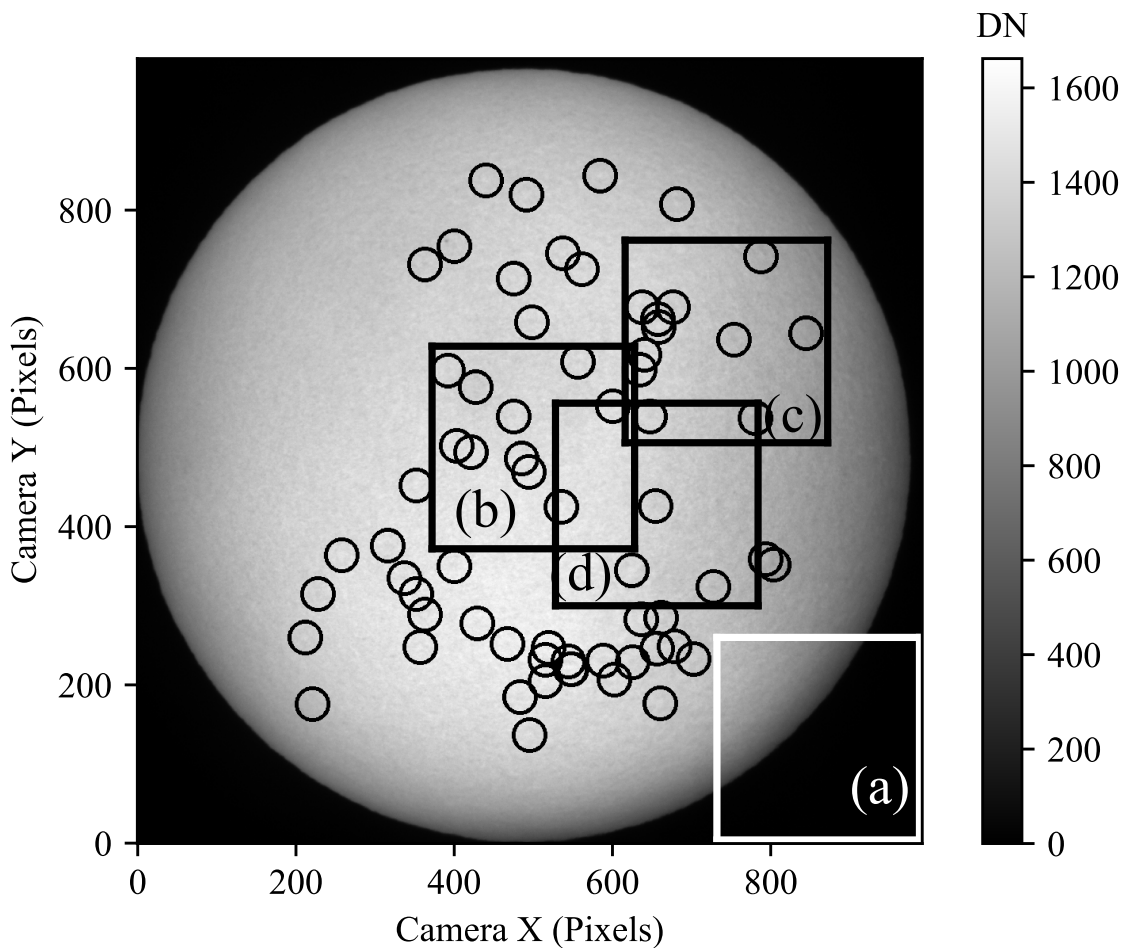


图 5.5 算法选择区域及对比测试区域实例：(a) 边缘区域，(b) 中心对比区域，(c) 二维信息熵较低的特征对比区域，(d) 二维信息熵值最大的算法选择区域。

**Figure 5.5 The regions selected for local correlation tracking. We select three regions for local CT: (a) Edge region; (a) Center region;(c) Region with low 2D information entropy; (d) Region with highest 2D information entropy.**

表 5.2 不同区域x和y像元偏移量平均检测误差

**Table 5.2 The mean detected pixel displacement error in x and y directions.**

Region	Average time (ms)	Mean x error (pixels)	Mean y error (pixels)
Region (a)	8.02±0.14	1.5246±0.0144	1.5246±0.0144
Region (b)	8.01±0.14	0.2459±0.0024	0.2459±0.0024
Region (c)	8.01±0.14	0.3109±0.0038	1.5246±0.0144
Region (d)	8.01±0.14	0.2459±0.0024	0.2459±0.0024
Global image	212.10±0.45	0.2459±0.0024	0.2459±0.0024

表 5.3 不同区域x和y亚像元偏移量平均检测误差

**Table 5.3 The mean detected subpixel displacement error in x and y directions.**

Region	Average time (ms)	Mean x error (pixels)	Mean y error (pixels)
Region (a)	8.22±0.14	1.4928±0.0142	1.5019±0.0143
Region (b)	8.21±0.14	0.0513±0.0005	0.0490±0.0005
Region (c)	8.21±0.14	0.2968±0.0044	1.4458±0.0143
Region (d)	8.21±0.14	0.0632±0.0007	0.0467±0.0005
Global image	212.30±0.45	0.0407±0.0003	0.0425±0.0004

果表示y轴方向上的唯一基本无法检测到，检测效果较差。边缘区域（a）的效果最差，在x和y方向均无法检测到图像偏移，中心区域（b）的二维信息熵值为20.99，略低于区域（d），优于区域（c），因此二维熵值一定程度上反映了校正效果的准确性。

### 5.6.2 实时检测测试

然后，在怀柔太阳观测基地SMAT 10cm太阳磁场望远镜上采集了不同时间段内的20组单帧连续数据，每组数据256帧，使用稳像算法分别对20组数据进行处理，得到20个磁场图像数据。128帧左、右旋太阳偏振叠加数据及磁场计算数据如图 5.6所示。

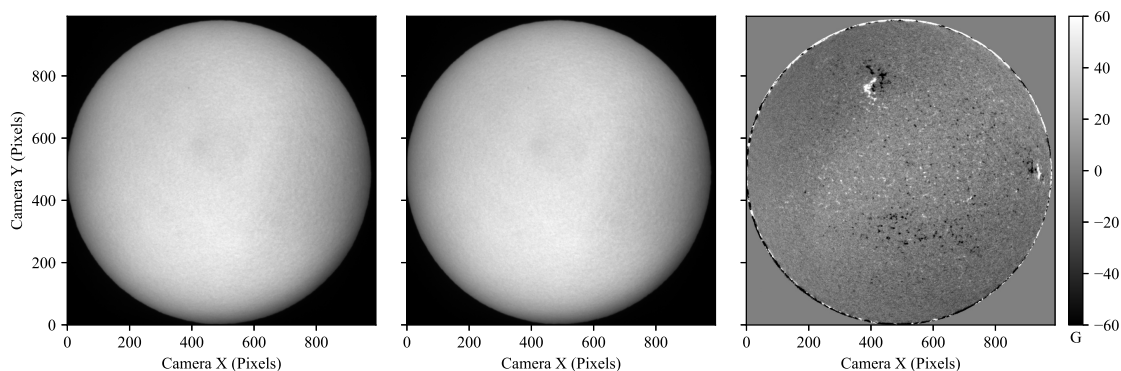


图 5.6 太阳左、右偏振叠加图像及太阳磁场图像。

**Figure 5.6 The magnetic field image calculated by local CT based on the feature region. The left column shows the left circular polarized, the middle column shows the right circular polarized, the right column shows the magnetic field image.**

为了评价稳像后磁场数据，分别使用图像偏移量、特征区域磁场能量、等值宽度（equivalent width, EW）和图像能量等参数来比较。

（1）记录了每帧序列图像相较于参考图像的位移量，并绘制曲线，主要是显示特征区域相关算法的偏移量结果，验证含有特征区域相关运算算法的稳像能力，并与未进行稳像运算而直接叠加的数据进行对比，位移量统计曲线如图 5.7所示。

偏移量统计结果显示，稳像系统可以检测出图像偏移，由于太阳磁场望远镜在y轴方向受到的望远镜恒动振动影响较弱，因此该方向的图像偏移量在（-1，1）之内，而x轴方向上的图像偏移量较大，可以实时检测出偏移结果。

（2）为了比较全局相关跟踪稳像效果和特征区域相关跟踪稳像效果，在

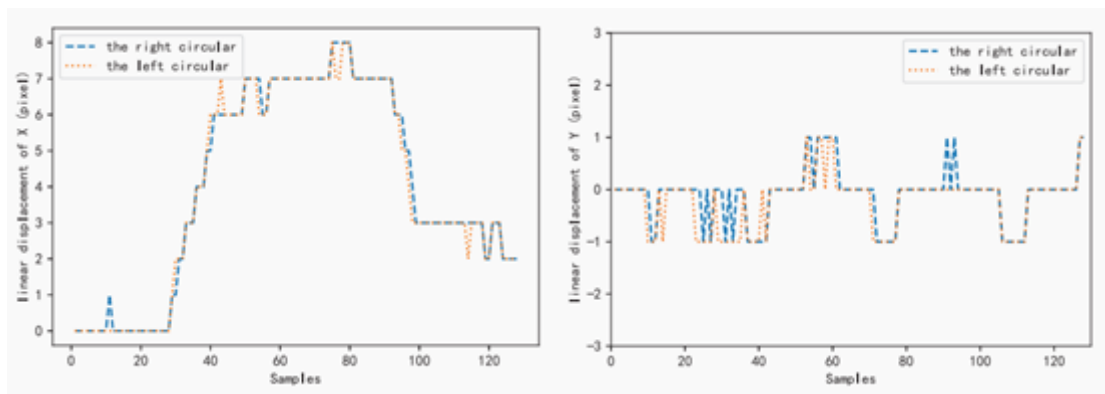


图 5.7 特征区域相关跟踪图像偏移量计算结果：左侧结果是左、右偏振像X轴（水平）方向位移量，右侧结果是左、右偏振像Y轴（垂直）方向位移量。

Figure 5.7 The linear displacement calculated by local CT based on the feature region. The left and right columns show the linear displacement of X and the linear displacement of Y.

磁场图像上提取出一个特征较多的区域进行对比，并与未经过稳像算法的叠加结果进行比较，如图 5.8所示。通过局部磁场图像的比较，发现经过稳像算法的磁场图像的特征的宽度和高度都有所减小，磁场图像的特征磁场看起来更清晰。然后，在提取到的局部磁图上取一段磁场画曲线图，通过曲线对比磁场能量，如图 5.9所示。

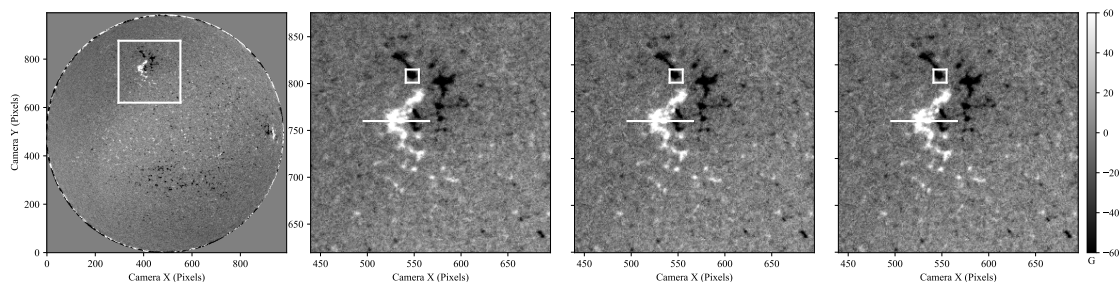


图 5.8 磁场结果示例。由左至右分别是：特征区域相关全日面磁场、直接叠加结果局部磁场、特征区域相关局部磁场、全局相关局部磁图。

Figure 5.8 An example of line-of-sight magnetograms before and after frame alignment. The first one is the full-disk image calculated by local CT based on feature region; the second one is directly accumulated image; the third one is the feature local correlation tracking; the fourth one is the global correlation tracking.

经过分析，发现全局相关跟踪和特征区域相关跟踪的曲线基本一致，而相对的，直接叠加结果有一定的偏移量，另外，经过稳像算法的磁场能量也要比

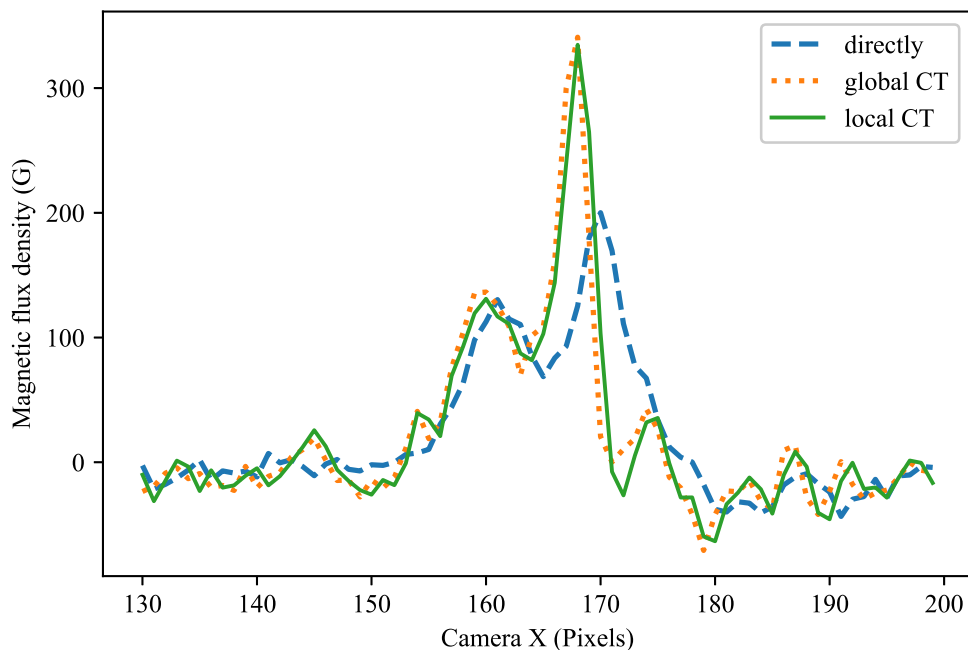


图 5.9 直接累加、全局相关跟踪和特征区域相关跟踪的灰度曲线。

Figure 5.9 The gray level profiles of directly accumulated, the global correlation tracking and the feature local correlation tracking.

直接叠加的结果更高一些。

(3) 如图5.7，在右侧3个局部磁图中选择了同一个特征区域，使用白色框体选中，比较其等值宽度，特征区域的宽度近似表示磁图的空间分辨率。等值宽度的定义是与吸收（或发射）谱线轮廓和连续谱之间所包围的面积相当的高度为1的矩形的宽度。这里，特征区域的等值宽度 $EW$ 被定义为：

$$EW = \sqrt{\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N p(m,n)} \quad (5.6)$$

式中， $p(m,n)$ 指的是 $(m,n)$ 处的灰度值，即归一化后的磁场强度， $(M,N)$ 指的是磁场图像的尺寸，然后分别计算了未稳像结果的等值宽度 $EW_D$ 、全局相关结果的等值宽度 $EW_G$ 、特征区域相关跟踪结果的等值宽度 $EW_L$ ，分别计算与未稳像结果的比值 $EW_G/EW_D$ 和 $EW_L/EW_D$ ，对比稳像后磁图空间分辨率，结果如图 5.10所示。

经过对比对结果的分析，全局相关和特征局部相关均要比直接叠加的无稳像效果要好，特征局部相关的表现在某些观测点也会优于全局相关结果，这是因为在地基望远镜上进行观测时，因大气扰动等因素，在某些不同的位置存在

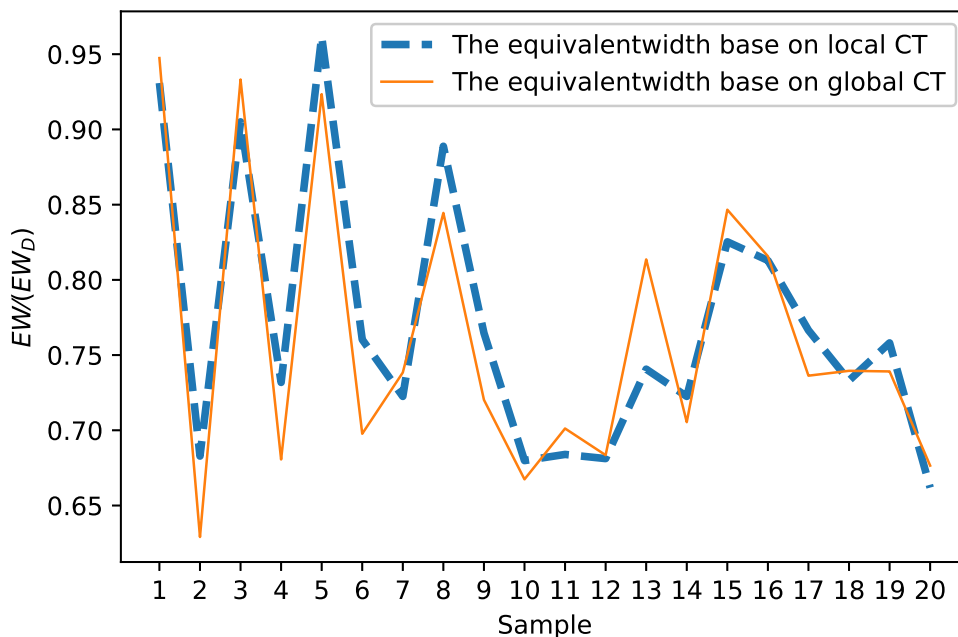


图 5.10 全局相关和局部相关的等值宽度与直接叠加结果的比值。

Figure 5.10 The ratio of the equivalent width of global CT and local CT relative to the direct accumulations.

不同的变化，这也是局部相关面临的需要解决的问题，但是在空间上进行观测时，可以忽略大气的影响。

(4) 图像的能量是对图像纹理进行描述的参考量之一，它描述了图像的纹理细节变化，一般的，图像能量越大，图像越清晰，效果越好。图像能量的计算如式：

$$E = \sqrt{\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N p^2(m, n)}, \quad (5.7)$$

式中， $p(m, n)$ 指的是 $(m, n)$ 处的灰度值，即磁场强度， $(M, N)$ 指的是磁场图像的尺寸，然后分别计算了未稳像结果的图像能量 $E_D$ 、全局相关结果的图像能量 $E_G$ 、特征区域相关跟踪结果的图像能量 $E_L$ ，分别计算与未稳像结果的比值 $E_G/E_D$ 和 $E_L/E_D$ ，对比稳像后磁图空间分辨率，结果如图 5.11所示。

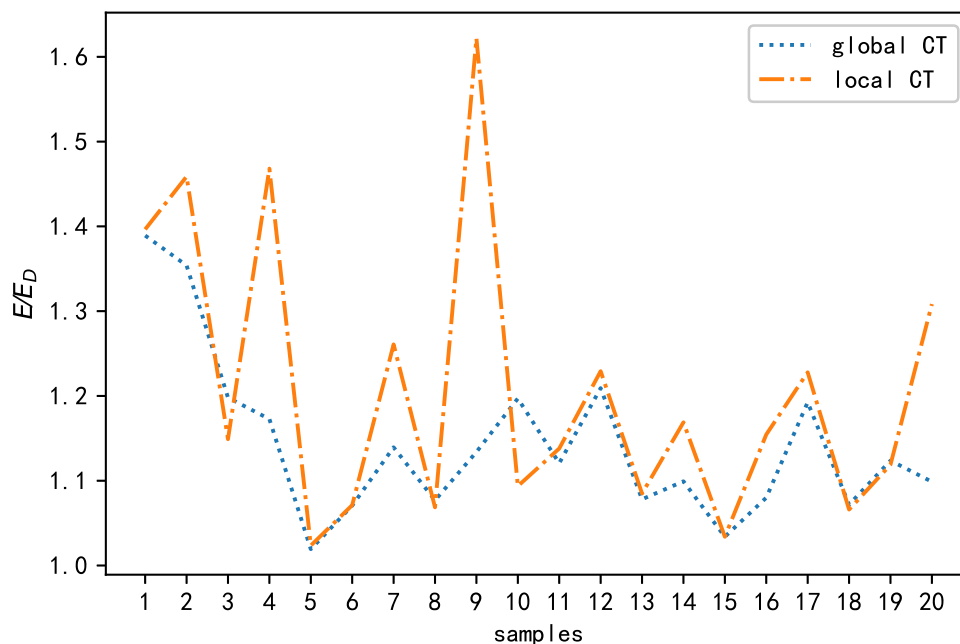


图 5.11 全局相关和局部相关的图像能量与直接叠加结果的比值。

Figure 5.11 The image energy values increased of global CT and local CT relative to the direct accumulations.

## 5.7 小结

在完成空间自校正稳像观测系统的研制和实验测试后，分析了如何加强局部相关跟踪算法的性能，以获取更准确的图像偏离量的检测。在本章中提出了特征区域选择算法，首先通过SURF算法中Hessian矩阵和非极大抑制来提取特征点，然后以二维信息熵确定特征区域，经过实验测试，该区域可以有效识别出图像偏移量，在可以获取到同全局相关一样的检测效果情况下，加快运算速度，该特征区域的图像偏移量识别效果要优于其他区域，获取到更高空间分辨率的磁场测量结果。





## 第6章 总结与展望

### 6.1 工作总结

稳像方法是空间太阳磁像仪研究中的关键技术之一，针对深空探测卫星对载荷重量、尺寸限制严苛的要求，设计了基于FPGA+DSP硬件平台的稳像观测系统。通过基于自相关算法的高精度稳像方法设计，并结合精确偏振调制、准确交替采样控制等系统软硬件设计，克服由于卫星平台抖动、指向误差等因素造成的图像模糊，实现实时相关-校正-深积分的稳像观测系统。针对1K×1K面阵、20 fps的CCD探测器,实现了1像元以内的实时稳像观测精度。2021年6月18日，在国家天文台怀柔太阳观测基地35 cm太阳磁场望远镜上开展了实测验证，稳像处理后的磁场数据对应的曲线具有更多的细节变化，而且极值点处磁场强度更高，数据结果表明该系统能够有效地完成太阳磁像仪自校正稳像观测，获得了更高分辨率的太阳磁场数据。实验结果表明基于相关跟踪算法的观测系统能够有效地进行图像纠正，获得更高空间分辨率的太阳磁场数据。本课题在研制过程中的主要成果主要包含以下几个方面：

#### (1) 完成稳像系统研制

在需要大数据计算能力的稳像观测系统空间化应用中，选用性能对标宇航级器件的工业芯片，在计算能力较低的情况下来完成大数据运算需要优化系统所使用的各类算法。本课题通过系统的分析和各模块设计，通过并行运算和算法优化，将各模块算法移植到FPGA和DSP芯片上，通过模块化设计和模块间的协同处理，完成自校正稳像观测系统的研制。首先，通过偏振调制、光电转换和数据采集等各模块的设计，完成以FPGA芯片为基础的硬件电路设计；然后通过优化后的相关算法和积分运算，在性能较低的DSP芯片上完成图像数据的实时稳像运算，完成太阳偏振像的稳像观测。在当前的系统设计中，对于32位1K×1K面阵的图像数据稳像观测的总时间消耗为68.9ms左右，基本满足单核10fps的稳像效率，实现双核20fps的稳像观测。在实验室仿真测试及地基望远镜实际观测测试中达到系统设计目标，达成在脱离稳像硬件设备（如摆镜等）的前提下，可以有效地获取到高空间分辨率的太阳磁场数据，形成一套可用于小卫星平台上太阳磁像仪在轨科学数据采集与处理系统，也为地基望远镜观测

提供一套不依赖于操作系统的便捷观测设备。

## (2) 特征区域选择算法设计

在完成现有观测系统的基础上，设计了一种特征区域选择算法来优化稳像性能，试验结果表明，通过特征区域选择算法可以选择出有利于进行相关跟踪计算的开窗区域，该区域能够有效计算出图像偏移量，而且该区域存在某种统计特征，而非肉眼可见的特征区域。特征区域的自动化选择可有利于提高磁场观测的空间分辨率，减少人工干预，为深空太阳探测中自动化观测准备基本方法。

## 6.2 未来展望

当前已完成自校正稳像系统的研制并开展地面观测测试，系统达到预定设计目标，并开展了下一步优化方向预研，但是依旧存在可以改进的方向，系统优化主要从以下几个方面进行：

(1) 当前已完成自校正稳像系统的研制，可以开展桌面联试并完成实际观测，但是并非一个完整的可用于常规观测的系统产品，需要对系统中的各个设备进行规划布局，形成一套完整的常规观测设备；

(2) 自校正稳像数据提高了太阳磁场的空间分辨率，但是随着图像的校正，望远镜光路或探测器中存在的固有噪声会随之移动，最终在磁场数据中出现斑点等异常结构，为了进一步提高磁场灵敏度，可以通过添加平场处理等方式进一步优化稳像处理算法，提高灵敏度；另一方面，平场处理本身会带如一些噪声，需要进一步的深入研究平场处理算法的高效实现；同时需要面对大面阵相机带来的大数据挑战和亚像元位移处理，获取更精细更丰富的天文观测数据，这些都需要更强的算法性能来实现实时稳像处理，需要进一步优化系统设计；

(3) 当前已开始自动化特征区域选择算法的研究，特征区域选择算法对于小面阵全日面数据的处理有较强的优化能力，需要进一步优化并完成系统芯片的移植；当前系统使用FPGA芯片和DSP芯片，但是理论上FPGA芯片具有更稳定更持久的工作能力，但是当前系统面临的大数据计算是一个重大挑战，系统整体的FPGA迁移需要更好的优化设计。

## 参考文献

- Yue X, Shang Z, Qiang Z, 等. 基于信息熵与SIFT算法的天文图像配准 (Astronomical Image Registration Combining Information Entropy and SIFT Algorithm) [J]. 计算机科学, 2015: 57-60.
- 侯俊峰, 吴太夏, 王东光, 等. 分时偏振成像系统中光束偏离的补偿方法研究 [J]. 物理学报, 2015(6): 6.
- 侯俊峰, 邓元勇, 王东光, 等. 液晶调制技术在太阳磁场探测中的应用及展望 [J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3): 9.
- 冯涛. 不同分辨率下太阳图像配准算法的研究与应用 [D]. 昆明理工大学.
- 刘敬, 夏润秋, 金伟其, 等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展 [J]. 光学技术, 2013 (1): 7.
- 卢伟家, 刘缠牢. 一种基于Harris特征点检测的改进算法 [J]. 仪表技术与传感器, 2017(12): 4.
- 史少龙. 空间望远镜精密稳像控制关键技术研究 [D]. 中国科学院大学, 2014.
- 唐剑. 太阳多波段图像配准方法的研究 [J]. 昆明理工大学.
- 季凯帆, 刘辉, 金振宇, 等. 太阳局部高分辨观测像的日球坐标自动标定 [J]. 科学通报, 2019, 64(16): 9.
- 梁波, 施正, 林佳本, 等. 太阳深积分磁场观测中异常结构的改正 [J]. 科学通报, 2014(59): 3603-3608.
- 张成军. 基于SIFT特征点匹配的CME图像配准研究 [D]. 昆明理工大学, 2020.
- 李成浩. 可用于大口径、大视场空间望远镜稳像精度测试的动态目标模拟方法研究 [D]. 中国科学院大学, 2020.
- 李长松. 空间太阳望远镜稳像系统中图像相关器的研究 [D]. 中国科学院研究生院(国家天文台), 2008.
- 林佳本, 邓元勇, 胡柯良. 局部相关跟踪算法在太阳磁场观测中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(27): 3.
- 林佳本, 邓元勇, 胡柯良, 等. 实时相关跟踪图像处理系统(英文) [J]. 天文研究与技术. 国家天文台台刊, 2006.
- 林佳本, 沈洋斌, 朱晓明, 等. 怀柔太阳观测基地全日面磁场自动化观测系统 [J]. 天文研究与技术, 2013(04): 67-71.
- 段帷, 宋谦, 白先勇, 等. CMOS图像传感器在太阳磁场观测中的应用研究 [J]. 天文学报, 2020, 61(4): 10.
- 王东光. 空间太阳望远镜偏振分析器的设计与研制 [D]. 中国科学院国家天文台, 2003.

- 王冠群, 马苗, 张艳宁, 等. 基于高斯变换的多尺度SUSAN角点检测方法 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(12): 5.
- 章慧, 龚声蓉. 基于改进的Sobel算子最大熵图像分割研究 [J]. 计算机科学, 2011, 38(12): 4.
- 章振大. 太阳物理学 [M]. 太阳物理学, 1992.
- 艾国祥. 太阳磁场望远镜(英文) [J]. 天文研究与技术, 1989(S1): 5-7.
- 艾国祥, 胡岳风. 太阳磁场望远镜中KD \*P电光调制器 [J]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 1981(04): 23-34.
- 褚圣麟. 原子物理学 [M]. 原子物理学, 1979.
- 邓元勇, 甘为群, 颜毅华, 等. 太阳磁场探测现状与展望 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 7.
- 郑兆琰, 吴桢, 章海鹰, 等. 基于边缘探测器的FMG稳像探测研究 [J]. 天文学报, 2020, 61(4): 8.
- Ballesteros E, Collados M, Bonet J, et al. Two-dimensional, high spatial resolution, solar spectroscopy using a correlation tracker .1. correlation tracker description [J]. ASTRONOMY & ASTROPHYSICS SUPPLEMENT SERIES, 1996: 353-365.
- Bay H, Tuytelaars T, Gool J V L, et al. Surf: Speeded-up robust features [J]. European Conference on Computer Vision, 2006: 404-417.
- Castro D E, Morandi C. Registration of translated and rotated images using finite fourier transforms [J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 1987: 700-703.
- chandrasekaran h, jenkins m j, li j, et al. Semi-weekly monitoring of the performance and attitude of kepler using a sparse set of targets [J]. Proceedings of SPIE, 2010.
- Deng Y, Zhang B. Application of a large-capacity real-time image acquisition system. i. "deep integration" magnetogram of quiet region on the sun [J]. astrophysics reports, 1999.
- Deng Y Y, Zhang H Y. Design of the full-disk magneto graph (fmg) onboard the aso-s [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, v.19(11): 13-24.
- Didkovsky V L, Denker C, Goode R P, et al. High-order adaptive optical system for big bear solar observatory [J]. ASTRONOMISCHE NACHRICHTEN, 2003: 297-298.
- Edwards G C, Levay M, Gilbreth W C, et al. The correlation tracker image stabilization system for hrso [J]. Bulletin of the American Astronomical Society, 1987.
- Emilio M, Kuhn J R, Bush R I. One solar cycle of solar astrometry with mdi/soho [J]. Proceedings of the International Astronomical Union, 2010, 5(S264): 21-32.
- et al. J S. Design and ground calibration of the helioseismic and magnetic imager (hmi) instrument on the solar dynamics observatory (sdo) [J]. Solar Physics, 2011, 275(1-2): 229-259.
- gehrz d r. Infrared astronomy with nasa's new spitzer space telescope [J]. PROCEEDINGS OF THE SOCIETY OF PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS (SPIE), 2006: D2050-D2050.

- G.Molodij P e a, J.Rayrole. Performance analysis for t.h.e.m.i.s image stabilizer optical system [J]. ASTRONOMY & ASTROPHYSICS SUPPLEMENT SERIES, 1996: 169-179.
- Hale G. On the probable existence of a magnetic field in sun-spots [J]. Terrestrial Magnetism & Atmospheric Electricity, 1908, 13(4): 159–160.
- He L, Zhou X. An auto-adaptive threshold pre-detection susan corner detection algorithm [C]// International Conference on Intelligent Human-machine Systems & Cybernetics. 2013.
- Hong-jun L, Shu-yan X, De-jie Y. Research of remote sensing image matching with sub-pixel accuracy [J]. Laser Technology, 2008: 49-51.
- LIU H c, YANG X q, FENG Y. Interpolation method for sub-pixel dynamic imaging system based on b-spline curve [J]. OPTO-ELECTRONIC ENGINEERING, 2006: 90-93,126.
- LIU H, CHEN W, XU Z. An image sub-pixel registration algorithm based on combination of curved surface fitting method and gradient method [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015: 180-185.
- Lowe G D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004: 91-110.
- luehe v d o, widener l a, rimmele t, et al. Solar feature correlation tracker for ground-based telescopes [J]. ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, 1989: 351-360.
- Mahmoudi L, Zaart A E. A survey of entropy image thresholding techniques [C]//International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications. 2012.
- Miroslav, Trajkovi, , et al. Fast corner detection [J]. Image and Vision Computing, 1998, 16(2): 75-87.
- Moravec H P. Towards automatic visual obstacle avoidance, proceedings of the 5th international joint conference on artificial intelligence [J]. 1977.
- Müller D, Zouganelis I, Cyr O, et al. Europe's next mission to the sun [J]. Nature Astronomy, 2020, 4(2).
- PAN B, XIE H, XU B, et al. Development of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation [J]. ADVANCES IN MECHANICS, 2005: 345-352.
- Papageorgiou C, Poggio T. A trainable system for object detection [J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 38(1): 15-33.
- Qiao Y, Tang Y, Li J. Improved harris sub-pixel corner detection algorithm for chessboard image [C]//2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC). 2013.
- Renyi A. On measures of information and entropy [J]. Maximum Entropy & Bayesian Methods in Science & Engineering, 1961.

- Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. Orb: An efficient alternative to sift or surf [J]. *Computer Vision*, 2011: 2564-2571.
- Scherrer P H, Bogart R S, Bush R I, et al. The solar oscillations investigation - michelson doppler imager [J]. *Solar Physics*, 1995.
- Shand M, Scharmer B G, Wei W. Correlation tracking and adaptive optics control using off-the-shelf workstation technology [J]. *ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC CONFERENCE SERIES*, 1999: 231-238.
- Shen Y B, Lin J B, Ji K F, et al. New real-time correlation solar observing system based on gpu for acquiring the deep-integration magnetogram [J]. *New Astronomy*, 2013, 25(Complete): 32-37.
- Shimizu T, Nagata S, Tsuneta S, et al. Image stabilization system for hinode (solar-b) solar optical telescope [M]. *Solar Physics*, 2008: 221-232.
- shortis r m, Clarke A T, short t. A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images [J]. *VIDEOMETRICS III*, 1994: 239-250.
- Smith S. Susan-a new approach to low-level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23.
- Stenflo J O. Solar magnetic fields: Polarized radiation diagnostics [J]. *Physics Today*, 1995, 48(8): 61-62.
- unser m, aldroubi a, Gerfen R C. A multiresolution image registration procedure using spline pyramids [J]. *MATHEMATICAL IMAGING : WAVELET APPLICATIONS IN SIGNAL AND IMAGE PROCESSING*, 1993: 160-170.
- Viola P, Jones M J, Snow D. Detecting pedestrians using patterns of motion and appearance [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, 63(2): 153-161.
- W., Dean, Pesnell, et al. The solar dynamics observatory (sdo) [J]. *Solar Physics*, 2012.
- Wang Z, Li R, Shao Z, et al. Adaptive harris corner detection algorithm based on iterative threshold [J]. *Modern Physics Letters B*, 2017, 31(15): 1750181.
- Wernecke S J, D'Addario L R. Maximum entropy image reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1977, 26(4): 351-364.
- Yang P, Zeng S, Liu S, et al. Registration and location method of solar magnetic field images based on scale-invariant feature point matching [J]. *Astronomical Research & Technology-Publications of National Astronomical Observatories of China*, 2018: 59-68.
- Yi H, Li Y, Wen D, et al. New measurement method of the sub-pixel image motion based on optical correlator [J]. *INFRARED AND LASER ENGINEERING*, 2011: 718-722.
- Zhang H Q, Wang D G, Deng Y Y, et al. Solar magnetism and the activity telescope at hsos [J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2007.

## 致 谢

岁月如梭，韶光易逝。四年的博士研究生生涯即将结束，回首往日，2018年刚入学的我略显青涩，步入怀柔太阳观测基地，真正进入科研领域，踏踏实实，一步一个脚印地走到现在，现如今的我，真正体会到了科研的魅力。在漫漫科研路上，有老师们的谆谆教诲，有同学们的相持互助，临近毕业，向我最尊敬的老师们、最可爱的同学们表达我真挚的感谢。

首先感谢我的博士生导师，王东光研究员和林佳本研究员，王老师是一位对工作认真负责、对学生亲切关怀的老师，王老师在百忙之中关心我的科研进度和论文进展，并给予了关键性指导和建议，让我可以不断突破难关，改正缺点，弥补不足。林老师在生活中幽默风趣，工作中严谨负责，使我的科研之路愈加严谨，在课题进展的各个环节都保持关注，在各个环节都给予了充分帮助，使我逐渐走向成熟。在此，我向两位导师致以最崇高的敬意和最衷心的祝福。

其次，感谢邓元勇研究员，感谢邓老师在生活和工作中给予的无私帮助和理解支持，感谢邓老师在学习过程中给予的关怀和指导，让我可以在博士研究生期间不断开拓进取，勇往直前。

特别感谢白先勇师兄和杨潇师姐在我的课题进展和实验测试过程中给予的倾力帮助和宝贵建议，感谢在我的论文修改过程中给予的修改意见；感谢王丙祥、汪国萍老师在我的课题进展和实验测试过程中给予的倾力帮助；感谢怀柔太阳观测基地王慧站长以及王建、张鼎波、荆帅、阮文东、苏海奇、王立东、杨桂连等后勤保障人员给予的充分支持。

感谢张洪起研究员、张玫研究员、苏江涛研究员、林刚华研究员、李文显研究员、杨尚斌老师、张志勇老师、包兴明老师、王晓帆老师、陈洁老师、刘锁老师、徐海清老师、孙英姿老师、朱丽佳老师、段帷老师在学习中的帮助，感谢侯俊峰师兄、宋永亮师兄、张洋师姐、闫璐师姐、罗琳师姐、孙文君师兄在生活和工作中给予的支持和帮助。

感谢一起度过研究生生涯的同学、师兄师姐师弟师妹们：王刚、郭晶晶、朱晓明、祝高飞、佟立越、王全、吴玮、张鑫伟、胡兴、黄威、沈宇樑、陈垂裕、王强、荀辉、王雅琦、周明尧、李鑫、胡子尧、郑州、郭思璠、高碧源、喻

子晗等在学习和生活中互相交流和帮助。

最后感谢我的父亲母亲，以及支持我的亲朋好友们！感谢你们的理解和支持！

仅以此文献给我生命中最可敬最可亲最可爱的人！



## 作者简介及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

### 作者简介:

白阳, 山东省聊城市人, 中国科学院国家天文台博士研究生。

2008年09月——2012年06月, 四川大学, 学士学位, 专业: 微电子学;

2015年09月——2018年06月, 山东师范大学, 硕士学位, 专业: 电子科学与技术;

2018年09月——2022年07月, 中国科学院国家天文台, 博士学位, 专业: 天文技术与方法。

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

1. 白阳, 林佳本, 王东光, 邓元勇. 基于FPGA的空间太阳磁像仪自校正稳像系统研制, 天文学报, 已录用. (第一作者)
2. Yang Bai, Jia-ben Lin, Xian-yong Bai et al. A region selection method for real-time local correlation tracking of solar full-disk magnetographs. RAA, 已录用. (第一作者)
3. 王刚, 林佳本, 郭晶晶等. 基于FPGA的多轴步进电机控制系统[J]. 天文研究与技术, 2020, 17(02): 185-190. DOI: 10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20191112.001. (第六作者)
4. 朱晓明, 白先勇, 林佳本等. 宽波段傅里叶变换太阳光谱仪等光程差采样系统设计, 天文学报, 已录用. (第十作者)

### 参加的研究项目及获奖情况:

国家天文台——太阳磁像仪空间自校正稳像观测方法的研究;

中科院先导专项A——先进天基太阳天文台(ASO-S)卫星全日面矢量磁像仪(FMG);

国家自然科学基金, 国家重大科研仪器研制项目<部门推荐>——用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统(AIMS)。

