



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

# 博士学位论文

面阵傅里叶变换太阳光谱仪数据终端关键技术研究

作者姓名: 朱晓明

指导教师: 邓元勇 研究员

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 Key Technologies**  
**of**  
**area array Fourier transform solar spectrometer data terminal**

**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 techniques and methods**

**By**

**Zhu Xiaoming**

**Supervisor: Professor Deng Yuanyong**

**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：所提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：朱晓娟

日期：2022.05.31

## 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內容，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：朱晓娟

日期：2022.05.31

导师签名：张红军

日期：2022.05.31



## 摘 要

同时或准同时多谱线太阳成像观测可以获得太阳大气三维磁场和热力学参数，是未来太阳观测望远镜焦面终端设备的重点发展方向。傅里叶变换光谱仪具有宽波段、高灵敏度、高光谱分辨率的优势，是当前中红外高分辨率太阳光谱探测的最佳选择。

当前，基于傅里叶变换光谱仪的太阳观测均采用单源探测器的点源观测。国家重大科研仪器研制项目——“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”(AIMS)，将采用了基于线阵探测器的傅里叶变换光谱仪，并通过视场扫描方式实现 10-13 $\mu\text{m}$  高分辨率太阳二维光谱观测。

面阵傅里叶变换光谱仪可以通过一次观测同时获得二维空间信息和一维光谱信息，从而进一步提高观测时间分辨率，因此用于太阳观测的傅里叶变换光谱仪下一步的发展方向必将是从线扩展到面。然而，面阵傅里叶变换太阳光谱仪的实现需要面临诸多关键技术挑战，从数据终端的角度，如纳米级精度动镜扫描驱动和等光程差采样系统；高帧频（数千帧频）、高性能、大面阵的焦面探测器；高速同步触发、实时存储的数据采集系统；海量干涉图的光谱反演和检测定标技术等。本文针对上述部分关键技术开展了系统性研究，研究内容主要包括：

1. 基于现场可编程门阵列（FieldProgrammableGateArray, FPGA）技术，采用全数字分频、倍频方案，设计了一套用于太阳观测的宽波段傅里叶变换光谱仪等光程差采样系统。采用分布式余数补偿方法，有效解决了在参考激光干涉信号倍频过程中，输出采样信号在输出信号周期间误差累积问题，并降低了输出采样信号误差及非均匀性；经功能仿真及实验测试，系统在 200 Hz–5 KHz 频率范围内，频率误差  $\delta < 0.04\%$ ，可有效满足面阵傅里叶变换光谱仪 300nm–25 $\mu\text{m}$  宽波段太阳光谱观测数据采集需求。

2. 以现有的 IFS-125HR 傅里叶变换光谱仪为实验平台，并以太阳色球谱线（H $\alpha$ 656.3nm）及其附近光球谱线为科学观测目标，基于高帧频面阵 CMOS 图像传感器，设计了一套高速数据采集软、硬件系统，实现了 10KHz 高速触发， $10^4$ fps 快速采集，0.5GB/s 数据量连续、实时存储等功能。同时设计实现的数据采集软、硬件系统架构后续可扩展到更大面阵探测器。

3. 开展了面源太阳光谱探测。分别以实验室钨灯和太阳为光源，进行等光程差间隔采样，成功获得了面阵干涉图，首次反演得到面源窄带连续谱以及656.3nm附近太阳色球和光球线。获得的太阳光谱与美国国立太阳天文台(NSO)傅里叶变换光谱仪标准光谱在同等分辨率下进行交叉定标，结果基本一致。验证了面阵傅里叶变换太阳光谱仪在太阳观测中的可行性。

本研究为后续可见光宽波段面阵傅里叶太阳光谱仪的研制奠定了技术基础，同时为“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”(AIMS)后续从线源扩展到面源观测积累了宝贵经验。

**关键词：**太阳，傅里叶变换光谱仪，数据采集



## Abstract

Simultaneous or quasi-simultaneous multi-spectral solar imaging can be used to obtain the three-dimensional magnetic field and thermodynamic parameters of the solar atmosphere, which is a key development direction of the focal plane terminal equipment for solar observations in the future. The Fourier transform spectrometer (FTS) has wide bandwidth, high sensitivity and high spectral resolution and is the best choice for the current mid-infrared high-resolution solar spectrum detection.

Currently, solar observations based on fourier transform spectroscopy use point-source observations from single-source detectors. The Major Scientific Research Instrument Development project of NSFC- the "The Infrared System for the Accurate Measurement of Solar Magnetic Field" (AIMS), will adopt a Fourier transform spectrometer based on a linear array detector and achieve 10-13  $\mu\text{m}$  high-resolution solar two-dimensional spectral observation by field of view scanning.

The area array Fourier transform spectrometer can obtain two-dimensional spatial information and one-dimensional spectral information at the same time through one observation, so as to further improving the observation time resolution. Therefore, the next development direction of the Fourier transform spectrometer for solar observation will be from line to surface. However, the realization of the area array Fourier transform solar spectrometer needs to face many key technical challenges. From the perspective of data terminals, such as nano precision moving mirror scanning drive and equal optical path difference sampling system; Detector with high frame rate (thousands of frames), high performance and large array; Data acquisition system with high-speed synchronous trigger and real-time storage; Spectral inversion, detection and calibration of massive interferograms. This paper has carried out systematic research on the above key technologies, and the research contents mainly include:

1. we designed a sampling system with fully digital frequency division and multiplication scheme based on FPGA technology. The distributed remainder compensation method is adopted to effectively solve the problem of error accumulation in the process

of frequency multiplying of the reference laser signal, and the non-uniformity of the output sampling signal is also reduced. After simulations and experimental measurements, the system frequency error  $\delta$  is less than  $\delta < 0.04\%$ , in the frequency range of 200Hz-50KHz, which meets the FTSS' s broadband spectral observation requirements of 300 nm–25  $\mu\text{m}$ . This study has laid a solid technical foundation for the development of FTSS in visible and infrared bands

2. Combining with the above system and the existing point source FTS at the Huairou Solar Observing Station and targeting the visible light chromosphere line ( $\text{H}\alpha$  656.3 nm) and its nearby photosphere line, we design a set of high-speed data acquisition software and hardware systems for the scientific needs of area array Fourier transform solar spectrometers based on the high frame rate area array CMOS image sensor. It realizes the 10kHz high-speed triggering, fast acquisition of 10,000 frames per second, 0.5GB/s large data volume continuous, real-time storage and other functions. At the same time, the software and hardware system scheme of data acquisition designed and implemented has the ability of compatibility and expansion to larger area array detectors.

3. We used the laboratory tungsten lamp and the sun as the light source, and performed equal optical path difference interval sampling, and successfully obtained the area array interferogram. We obtained the narrow-band continuum spectrum and the solar chromosphere and photosphere line near 656.3nm. Using the cross-calibration method, we compared our solar spectrum at the same resolution with the standard spectrum obtained by the National Solar Astronomical Observatory' s NSO Fourier Spectrometer, and the results are basically the same, verifying the performance of the feasibility of area array Fourier Transform Solar Spectrometer in solar observation.

This research lays a technical foundation for the wide-band solar FTS of plane array in visible region, and at the same time accumulates valuable experience for the subsequent extension of "The Infrared System for the Accurate Measurement of Solar Magnetic Field" (AIMS) from the line source to the plane source

**Keywords:** Sun, Fourier transform solar spectrometer, Data acquisition

## 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 面阵 FTSS 技术的发展	3
1.3 课题研究内容	6
第 2 章 面阵 FTSS 技术基础理论	9
2.1 面阵 FTSS 原理	9
2.2 面阵 FTSS 技术基础	12
2.2.1 光谱分辨率	12
2.2.2 干涉图采样	15
2.2.3 干涉图数据处理	19
2.3 面阵 FTSS 数据终端面临的技术挑战	24
2.4 本章小结	27
第 3 章 宽波段等光程差间隔采样系统	29
3.1 等光程差间隔采样方法	29
3.1.1 参考激光干涉仪	29
3.1.2 激光触发采样和 Brault 采样	31
3.2 可调等光程差间隔采样系统设计与实现	32
3.2.1 可调等光程差间隔采样系统设计	32
3.2.2 参考激光干涉信号检测	33
3.2.3 数字分、倍频器	38
3.3 系统测试与结果	47
3.4 本章小结	48
第 4 章 高速数据采集系统	49
4.1 采集系统技术参数与结构	49
4.2 探测器	50
4.2.1 CCD 与 CMOS	50
4.2.2 探测器重要技术参数	51
4.2.3 探测器选择	53
4.3 高速采集与存储	54
4.3.1 高速图像采集卡	54
4.3.2 高速存储	54

4.4 采集系统软件设计	55
4.5 系统测试与结果	59
4.6 本章小结	60
<b>第 5 章 太阳光谱观测</b>	<b>61</b>
5.1 太阳光谱观测方案设计	61
5.1.1 方案设计	61
5.1.2 方案论证	62
5.2 太阳光谱观测实验	63
5.2.1 引光系统	63
5.2.2 观测系统集成与测试	65
5.2.3 太阳光谱观测	67
5.3 观测结果与分析	68
5.4 本章小结	69
<b>第 6 章 总结与展望</b>	<b>71</b>
6.1 总结	71
6.2 展望	72
参考文献	75
致谢	81
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	83

## 图形列表

1.1 太阳磁场三维数据立方体 (蔡云芳, 2018) .....	2
1.2 牛顿的色散实验七色光 .....	3
1.3 太阳光谱 .....	3
1.4 窄带可调式滤光器透过轮廓 (叶式辉, 1997) .....	4
1.5 光栅光谱仪原理 .....	5
2.1 面阵 FTSS 基本原理 .....	10
2.2 干涉图与光谱图 (黄旻, 2009) .....	12
2.3 干涉图截断示意图 .....	13
2.4 仪器线性函数及与矩形窗函数卷积后的单色光光谱示意图 (黄旻, 2009) .....	14
2.5 仪器极限分辨率原理 .....	15
2.6 干涉图离散采样及傅里叶变换过程 (邹曜璞, 2016) .....	16
2.7 采样间隔对光谱反演影响 .....	17
2.8 单边干涉采样 .....	18
2.9 双边干涉采样 .....	19
2.10 Blackman 窗函数及频谱 .....	20
2.11 Cosine 窗函数及频谱 .....	20
2.12 Hamming 窗函数及频谱 .....	21
2.13 Hann 窗函数及频谱 .....	21
2.14 Triangular 窗函数及频谱 .....	21
3.1 稳频参考激光触发采样示意图 .....	30
3.2 宽波段等光程差间隔采样系统设计框图 .....	33
3.3 经 IFS-125HR 调制后的参考激光余弦干涉信号 .....	34
3.4 面阵 FTSS 数据采集系统探测器触发电路 .....	35
3.5 He-Ne 激光过零触发模块的工作原理 .....	35
3.6 参考激光余弦干涉信号过零检测模块主检测电路 Multsim 仿真 .....	36
3.7 过零检测模块主检测电路仿真结果 .....	36
3.8 a 滤波电路、b 主检测电路、c 过零检测模块实物图 .....	37
3.9 a 参考激光余弦干涉信号滤波后信号、b 过零检测后输出波形、c 整形后触发电路、d 触发信号放大示意图 .....	38
3.10 数字分、倍频原理 .....	38
3.11 触发脉冲位置误差 .....	40

3.12 触发位置误差引起的反演光谱相对误差	41
3.13 数字分、倍频器模块	42
3.14 同步测周期模块 RTL 图	43
3.15 同步测周期模块仿真结果	43
3.16 分频器 RTL 图	44
3.17 分频器仿真结果	44
3.18 4 倍频仿真结果	46
3.19 16 分频仿真结果	46
3.20 4 倍频测试结果	47
3.21 16 分频测试结果	47
4.1 数据采集系统方案框架	50
4.2 CCD、CMOS 相机工作原理 (Janesick, 2002)	51
4.3 CCD、CMOS 像素值输出过程 (Litwiller, 2005)	51
4.4 2M360MCL 探测器及量子效应	53
4.5 X64 Xcelera-CL PX4 采集卡	54
4.6 2M360MCL 探测器触发采集时序	56
4.7 环形缓冲区	57
4.8 数据采集流程图	58
4.9 数据采集控制软件操作界面	59
4.10 数据采集系统测试	60
5.1 面阵 FTSS 太阳光谱观测方案	61
5.2 IFS-125HR 光路	62
5.3 60cm 口径太阳望远镜 3D 设计图	64
5.4 引光光路设计图	65
5.5 观测系统获得的钨灯光源二维图像和干涉图	66
5.6 图 5.5(c)(d)(e)(f) 反演获得的 656nm 附近单像素连续光谱图	66
5.7 面阵 FTSS 不同叠加方式干涉图、光谱图显示	67
5.8 观测系统获得的太阳二维图像和干涉图	68
5.9 图 5.9(c)(d)(e)(f) 反演获得的 656nm 附近单像素连续光谱图及与 NSO 太阳光谱对比	68

## 表格列表

2.1 常用切趾函数 .....	20
3.1 宽波段 FTSS 等光程差采样系统基本指标需求 .....	33
3.2 分布式余数补偿采样信号序列 .....	45
3.3 不同输入信号频率及分频、倍频条件下输出采样信号频率值 .....	48
4.1 面阵 FTSS 采集系统基本指标需求 .....	49
4.2 常见 RAID 方案 .....	55





## 第1章 绪论

### 1.1 引言

太阳是太阳系的中心天体，也是距离地球最近的一颗恒星，它位于显示恒星分类的赫罗图上主序星的中部，光谱型为 G2V，是目前人类唯一可进行高时空分辨率、高光谱分辨率、高灵敏度观测的星体 (林元章, 2001)。太阳质量约  $1.989 \times 10^3 \text{ kg}$ ，占太阳系总质量的 99.86%，半径约为  $6.963 \times 10^5 \text{ km}$ ，表面有效温度约 6000K，内部温度约 1516MK，总辐射功率  $4 \times 10^{26} \text{ J/s}$ ，平均密度约为  $1.4 \text{ g/cm}^3$ 。它的巨大的空间和高温、高压等极端的物理条件，为人类提供了一个地球上无法模拟的等离子体物理学研究的实验室 (汪景琇, 1998)。对太阳的观测研究涵盖了光谱学、量子辐射理论、原子物理、等离子体物理、流体和磁流体力学，计算物理等一系列重要基础物理学科 (吉布森 等, 1981)。通过对太阳的观测研究我们可以了解一些基本的天体物理过程，比如磁场的产生和演化、粒子的加速和传播、天体爆发的物理机制等。太阳给地球带来了光明与温暖，孕育了璀璨的地球文明，构建了人类赖以生存的日地环境。但与此同时，太阳上的剧烈活动（如太阳黑子、耀斑、日冕物质抛射等）及其周期变化对日地空间和人类环境产生着巨大影响，对空间飞行器安全及人类生活造成威胁。因此，对太阳及太阳活动的观测研究具有极其重要科学意义和实际应用价值。

人类对太阳的观测历史悠久，中国是最早有太阳观测记录的国家，在公元前 28 年到 1618 年，有史料记载的太阳黑子观测记录就超过百余次。1607 年至 1611 年，伽利略制作了世界上第一台望远镜，人类第一次用望远镜观测并记录到了白光太阳黑子，开启了太阳科学观测的时代。太阳在结构上大致可分为日核、辐射层、对流层及太阳大气，其中太阳大气按温度随高度的变化又分为光球层、色球层和日冕层。目前人类能够直接探测的主要是太阳大气。研究表明，在不同的太阳大气层次往往表现特定太阳活动，光球层位于太阳大气的最内层，太阳黑子、光斑等现象主要发生在光球层，色球层处于太阳大气中间层，主要太阳活动现象有日珥、耀斑等，而日冕层处于太阳大气最外层，日冕物质抛射 (CME)、太阳风等都出现日冕层。这些太阳活动现象都与太阳磁场密切相关，近代太阳物理的诸多重大进展都与太阳磁场的观测研究进展密不可分 (邓元勇 等,

2020a)。例如，上世纪初，千高斯太阳磁场的观测发现揭示了磁场与太阳活动有密切关系，开启了太阳和恒星爆发活动成因研究的先河；上世纪中叶，百高斯横向磁场的观测揭示了大尺度磁场的演化，为太阳和天体磁场的起源研究奠定了基础；当今，太阳物理学尚未解决的重大科学难题以太阳发电机、太阳纤维化的磁对流过程以及日冕加热等最具挑战性，而这些难题无一不与太阳磁场的精确测量有着密切关系 (Liu 等, 2019; 邓元勇 等, 2020b)。因此，通过对太阳大气不同层次太阳磁场的精确测量，研究太阳磁场的产生和演化，获得不同太阳大气层之间物理过程的内在联系，构建完整的太阳大气三维磁场模型，将会有助于人类更好地理解太阳磁活动的成因、能量积累和释放过程 (白先勇, 2014)。同时或准同时多谱线太阳成像观测可以获得太阳大气三维磁场和热力学参数 (Fang 等, 2010; Tennyson, 2019)，通过太阳成像光谱探测，在获得日面的两维空间信息的同时获得一维光谱信息，构成太阳磁场三维数据立方体。

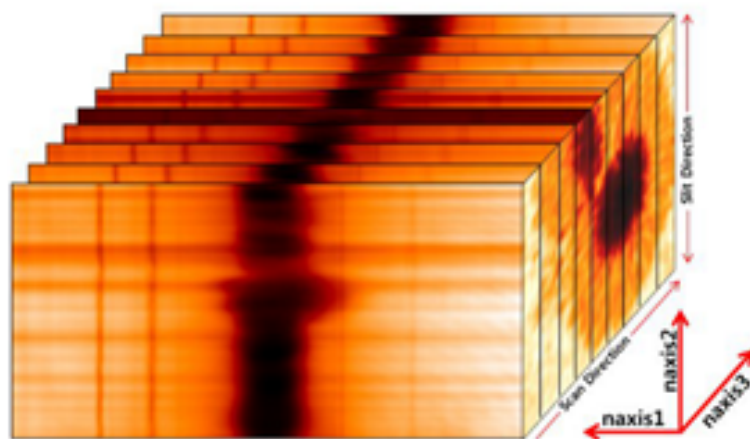


图 1.1 太阳磁场三维数据立方体 (蔡云芳, 2018)

我们对太阳光谱的探测由来已久。在 1666 年，牛顿的色散实验利用三棱镜将太阳光分解成七色光带，这是人类第一次对太阳光谱的研究实验。1802 年，英国化学家及物理学家沃拉斯顿在牛顿色散实验的基础上，通过在三棱镜前增加一条狭缝，发现了太阳光谱中存在的暗线。1814 年，德国物理学家夫琅和费，将望远镜引入色散实验中，制成了人类有史以来第一台太阳光谱仪，通过对太阳进行分光观测，在太阳光谱中找到 500 多条狭细的暗线，而现在科学家已经在太阳光谱中发现了大约 3 万多条这样的谱线，这些暗线也被称为“夫琅和费谱线”。1868 年法国天文学家詹森和英国天文学家洛克耶通过研究日全食时观测到的“夫琅和费谱线”发现了太阳大气成分中的氦元素。1853 年，瑞典物理学家

安德斯·埃格斯特朗确定了夫琅和费谱线中氢的 H $\alpha$  谱线。1870 年，德国物理学家基尔霍夫提出了光谱三定律：炽热的固体、液体或高压气体发出连续光谱；低压稀薄的炽热气体发出单独的明亮光谱，即发射线；较冷的气体在连续光谱前面而产生吸收谱线，基于基尔霍夫三定律，通过对太阳大气“成谱”观测，天文学家便能获得特定层次太阳大气中温度、密度、速度、磁场等丰富的物理信息。而 1889 年，美国天文台学家海尔，研制了首台太阳单色照相机，通过对线源作机械扫描，开启了太阳成像观测 (陈丹, 2010)。随着 Zeeman 效应的发现，通过太阳成像观测，可跟踪太阳磁场形态演化，理解太阳磁活动的动力学过程，对太阳突发式灾变现象进行监测和预报。随着探测技术的发展，太阳物理研究进一步深入，要求对太阳大气活动进行多波段、多视角、高时空分辨率、高精度探测，多谱线太阳成像观测将成为是当前和未来太阳观测焦面终端设备的重点发展方向。

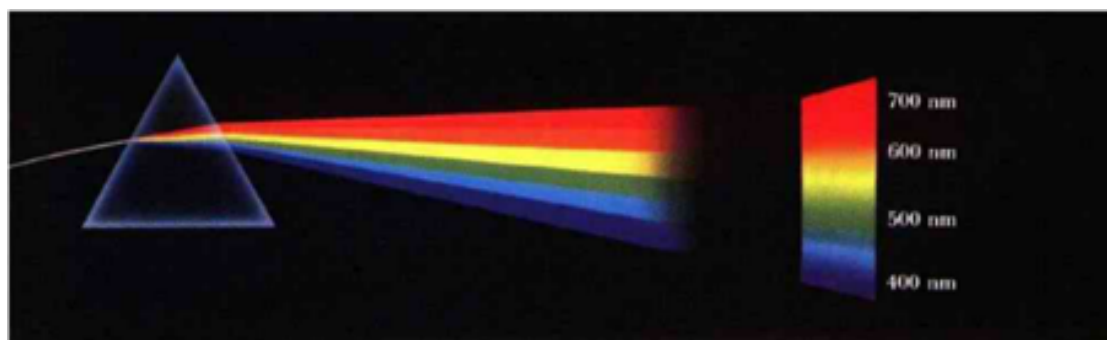


图 1.2 牛顿的色散实验七色光

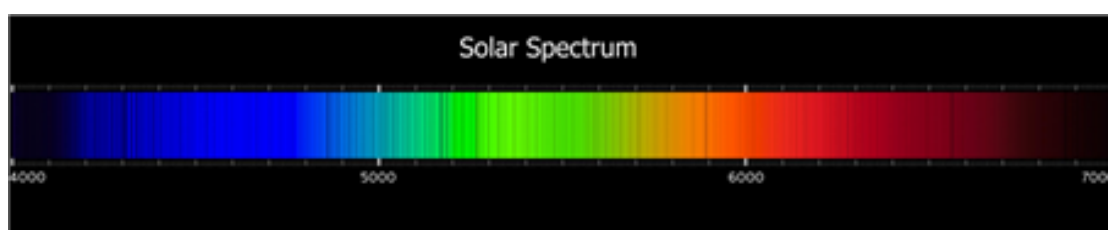


图 1.3 太阳光谱

## 1.2 面阵 FTSS 技术的发展

目前可见光波段多谱线太阳成像的探测方案包括两类：一类是基于窄带可调式滤光器；另一类基于光栅光谱仪 (Deng 等, 2009; Li 等, 2019; Iglesias 等, 2019)。窄带可调式滤光器包括双折射滤光器 (Birefringent Filter, UBF)、法珀干涉仪 (Farbry-Perot Interferometer, FPI)、迈克尔逊偏振干涉仪等；或者为双折射滤光器

与法珀干涉仪(图 1.4)、双折射滤光器与迈克尔逊干涉的组合。这类设备先成像,然后通过调节滤光器透过带中心波长的位置来实现太阳光谱成像观测。如美国萨克峰天文台(Sac Peak)配备的窄带可调式滤光器(Cauzzi.G, 1992),工作波长为 $4200 - 7000\text{\AA}$ ,单色像视场 $100'' \times 100''$ ;德国 1.5m 的 GREGOR 望远镜的窄带可调滤光器(Puschmann 等, 2012),工作波长 $5300 - 8600\text{\AA}$ ,视场 $50'' \times 38''$ ;中国科学院国家天文台怀柔太阳观测基地的 35cm 磁场望远镜(艾国祥等, 1986a)(工作波长: FeI  $5324\text{\AA}$  和  $H\beta 4861\text{\AA}$ , 透过带宽约  $0.125\text{\AA}$ )、60cm 多通道望远镜(艾国祥等, 1986b,c, 1987)(工作波长:  $5173\text{\AA}$ 、 $5250\text{\AA}$  和  $5247\text{\AA}$ )、全日面磁场望远镜(Zhang 等, 2007)(工作波长:  $5324\text{\AA}$ ),这些望远镜都是采用双折射滤光器进行窄带滤光,并且透过带可以进行小范围调整。但窄带可调式滤光器光谱分辨率相对较低。光栅光谱仪则通过控制太阳像沿垂直狭缝方向运动进行空间方向扫描观测。美国国家太阳天文台的邓恩太阳望远镜(DST)配备的 Advanced Stokes Polarimeter(ASP)(Tomczyk 等, 1992)、大熊湖天文台的新太阳望远镜(NST)上的 Fast Imaging Solar Spectrograph(FISS)(Ahn 等, 2008; Chae 等, 2012)、印度真空太阳望远镜(SVST)上的 La Palma Stokes Polarimeter(LPSP)(Martínez Pillet 等, 1999)、中国云南天文台的 1m 新真空望远镜(NVST)(Liu 等, 2014)上的多波段光谱仪及近红外大色散光谱仪以及世界最大的美国太阳望远镜 DKIST(Tritschler 等, 2015)上的 Visible Spectro- Polarimeter(ViSP)和 Cryogenic Near Infra-Red Spectro- Polarimeter(Cryo-NIRSP)都采用的狭缝扫描形式的光栅光谱仪。

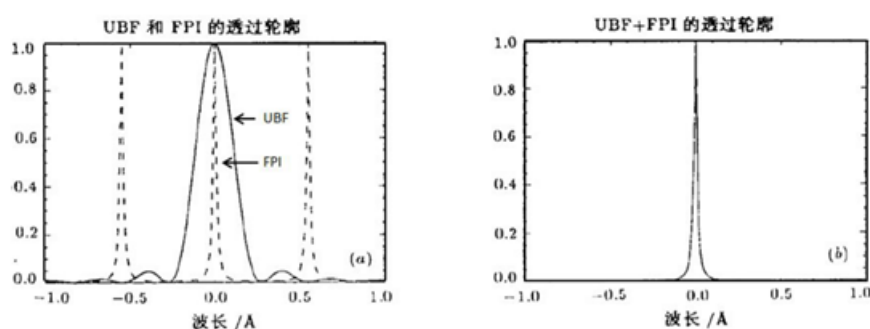


图 1.4 窄带可调式滤光器透过轮廓(叶式辉, 1997)

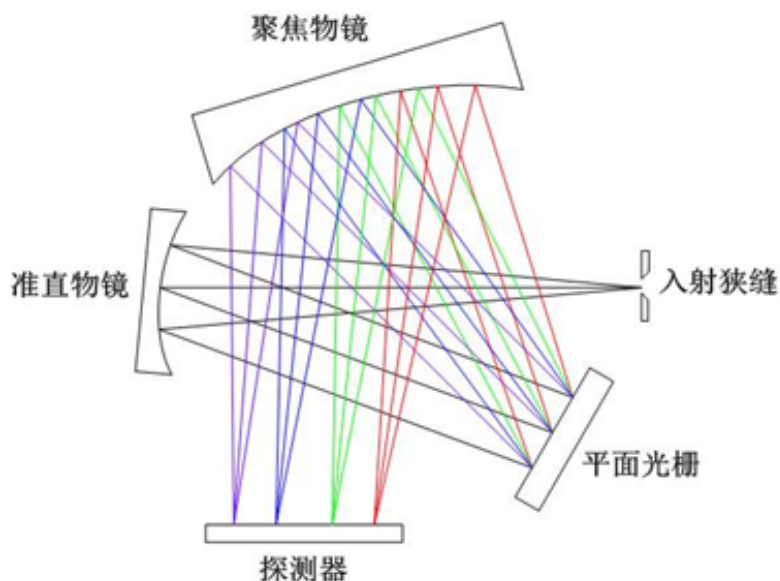


图 1.5 光栅光谱仪原理

但当我们开展中红外太阳观测时，光栅光谱仪受限于光栅大小，无法实现高分辨率光谱观测，同时中红外可调谐窄带滤光技术也并不成熟。而傅里叶变换太阳光谱仪（FTSS）具有宽波段、高灵敏度、高光谱分辨率的优势 (Stenflo, 2017; Bai 等, 2021)，其技术原理将在 2.1 节详细介绍。FTSS 无需狭缝，辐射通量高，容易获得高灵敏度。在中红外波段，光栅光谱仪限于光栅的大小只适于开展中低分辨率的光谱观测，高分辨率的光谱观测通常采用大型的 FTSS（动镜在一维导轨上可以轻松移动数米的量级，米级的光栅加工难度很大）。此外，因傅里叶变换光谱仪光程差通过动镜控制，观测时采用不同的动镜行程可以获得不同的光谱分辨率，具有光谱分辨率可设置的特点。

FTSS 的上述特点，使其在太阳观测中具有自身特色 (Bai 等, 2021)：(1) 宽波段使得一次可以观测多条不同吸收深度的谱线，不同吸收深度对应不同的形成高度，因而可以对太阳大气从低层光球到高层色球进行精细的层析诊断，在太阳大气的三维磁场、速度场、温度结构、太阳活动在不同层次的响应等科学目标上均具有显著优势。(2) 高灵敏度使其可以获得较高的信噪比，更容易实现高磁场和速度场灵敏度。(3) 高光谱分辨率便于诊断因塞曼效应或斯塔克效应导致的光谱精细分裂，有利于太阳磁场和电场的测量。(4) 光谱分辨率可调，使得可以针对不同的科学目标需要的不同光谱分辨率开展观测，有利于提高观测数据的时间分辨率，比如白光耀斑在中红外响应的观测，更关注于连续谱，需要快速、

低光谱分辨率、宽波段的观测，FTSS 可以同时满足上述需求。(5) 小尺度太阳活动的观测要求高光谱、高时间分辨率的观测，此时可以通过欠采样的方式提高时间分辨率，这些也在美国国立太阳天文台的点源 FTSS 上实现过。

早在上世纪 70 年代，人类就认识到中红外太阳观测的价值 (Gingerich 等, 1971)，并开始了点源 FTSS 的研制。美国国立太阳天文台著名的 McMath-Pierce 望远镜 (Zirin 等, 1989; Deming 等, 1990)、ATMOS 卫星 (Farmer 等, 1989)、加拿大的 ACE-FTS 卫星 (Hase 等, 2010)，都采用 FTS 进行过多年太阳光谱观测，取得了众多科学成果 (Chang 等, 1983; Hewagama 等, 1993; Solanki 等, 1994; Bruls 等, 1995; Stenflo 等, 1997; Wallace 等, 1998; Ayres, 2002; Penn, 2014; Li 等, 2020; Hong 等, 2020)。主要贡献有：(1) 生成了可见光到中红外日面宁静区、黑子半影、本影标准太阳光谱（约 2 万条），并进行了谱线认证；(2) 发现了中红外高磁场灵敏度谱线，并通过偏振光谱观测开展了有限观测；(3) 开展了通过偏振测量获取太阳电场信息的开创性工作；(4) 开展了中红外恒星光谱观测；(5) 开展了实验室光谱工作，建立了高分辨率分子光谱数据库 (HITRAN)。

遗憾的是，限于当时技术水平的限制，点源 FTSS 只在光谱分辨率、时间分辨率方面达到了太阳观测的需求，观测效率较低。太阳观测是面源，通过点源扫描线源观测效率极低，导致许多科学目标无法实现。自 2015 年起，国家天文台承担了国家重大科研仪器研制项目、同时也是我国天文领域首个中红外太阳磁场望远镜——“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统” (AIMS)(Deng 等, 2016) 的研制。AIMS 观测波段为 8-14  $\mu\text{m}$  中红外波段，为获得 10–13  $\mu\text{m}$  高分辨率太阳光谱，AIMS 采用线源 (64 × 2) FTSS，并可以通过视场扫描实现二维面源观测。其 FTSS 主要参数指标为：光谱分辨率 0.6  $\text{\AA}$ ，时间分辨率 30 s，观测视场 192" × 192"，探测器大小为 64 × 2 (像元分辨率 1.5")。AIMS 完成了傅里叶变换太阳光谱仪从点到线的重大突破，遵循太阳观测设备“点 → 线 → 面 → 体”辩证发展规律，我们认为 FTSS 下一步的发展方向将从线扩展到面，以更好的满足太阳磁场和磁活动短时标演化观测研究需求。

### 1.3 课题研究内容

从光学设计角度，傅里叶变换光谱仪具备面源观测视场，限制其从线源扩展到面源视场的主要因素是探测器、视场效应等。近年，随着 CMOS 图像传感器、

精密控制、计算机技术的迅猛发展，在可见光和近红外波段，探测器面阵大小和帧频相比传统 CCD 探测器有了质的提升，性能也越来越好，使得面阵傅里叶变换太阳光谱仪研制成为可能，而傅里叶光谱仪的优势也将得以充分发挥，符合当前中红外太阳观测所追求的高时间、高空间、高光谱分辨率以及高精度的偏振测量的要求。针对面阵傅里叶变换太阳光谱仪的实现，在其数据终端关键技术方面，我们开展了相关研究工作。

本文主要研究内容及安排如下：第一章对太阳光谱观测历程，多光谱太阳成像观测的意义，面阵傅里叶变换太阳光谱仪的发展进行了简要介绍。第二章介绍了面阵 FTSS 技术基本原理。第三章详细介绍了基于稳频参考激光，设计实现的宽波段等光程差间隔采样系统，包括采样方式、方法，软硬件设计实现过程及相应测试结果。第四章介绍了 FTSS 高速采集系统的实现过程。包括系统中关键设备的选型，系统采集控制软件的设计实现，系统测试与结果。第五章搭建太阳光谱观测系统并进行了太阳光谱观测实验，包括观测系统设计，测试，太阳光谱观测实验，并对观测结果进行了分析总结。第六章对研究工作进行总结，并对未来工作进行展望。





## 第2章 面阵 FTSS 技术基础理论

面阵 FTSS 具有具有宽波段、高灵敏度、高光谱分辨率的优势，能够在获得观测目标二维空间信息的同时获得一维光谱信息，获得的二维图像中的每个像元都可以提取出一条宽波段光谱 (Porter 等, 1987; 李苏宁, 2011)。但 FTSS 直接记录的是目标辐射的干涉图，并非科学需要的光谱图，即“所见非所得”，需对所获得的干涉图进行傅里叶变换来得到所需光谱图。太阳观测用面阵 FTSS 通常是以迈克尔逊干涉仪为核心的时间调制型傅里叶变换光谱仪 (吕乃光, 2016; Tuthill 等, 2000; 邹曜璞, 2016)，本课题基于此类仪器对其关键技术展开研究和攻关。

### 2.1 面阵 FTSS 原理

面阵 FTSS 基本原理如图 2.1 所示。系统由望远镜、分束器、定镜、动镜、面阵探测器、稳频激光器、激光探测器等单元组成，其中分束器、定镜、动镜构成了面阵 FTSS 的核心—迈克尔逊干涉仪。望远镜收集到的太阳辐射经准直镜准直后，进入干涉仪系统，在分束器处一分为二，分成振动方向、频率完全相同的 2 束光  $a_1$ 、 $a_2$ ，其中  $a_1$  经分束器反射后到达干涉仪定镜， $a_2$  经分束器透射后到达干涉仪动镜，然后分别经定镜、动静反射后再次回到分束器，经分束器透射、反射后，产生相互干涉，形成 2 束相干光，其中一束相干光返回光源，另一束相干光经成像镜后在第二像面成像。而在干涉系统中，动镜的运动导致  $a_1$ 、 $a_2$  的光程差发生变化，使得面阵探测器将记录一系列随光程差变化的干涉图。同时，在 FTSS 中引入稳频激光信号，将稳频激光经过相同干涉系统调制后，产生一系列激光余弦干涉信号，FTSS 将该激光余弦干涉信号作为高精度等光程差间隔采样参考，来获得高质量目标辐射干涉信号。

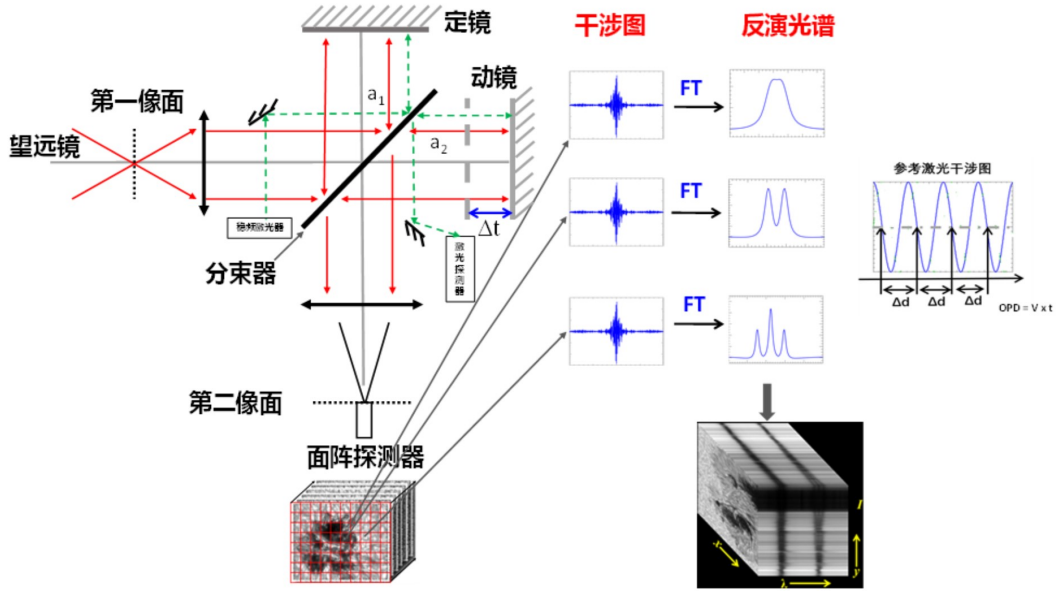


图 2.1 面阵 FTSS 基本原理

假设入射准直光束为振幅为  $a$ ，波数为  $\sigma$  的理想单色光束。干涉系统中，分束器的反射率和透射率分别为  $r$ 、 $t$ ，则经定镜反射后的光  $a_1$  到达第二像面上的振幅：

$$A_1 = rtae^{i(2\pi\sigma x_1 - \phi_1)} \quad (2.1)$$

经动镜反射后的光  $a_2$  到达第二像面上的振幅：

$$A_2 = trae^{i(2\pi\sigma x_2 - \phi_2)} \quad (2.2)$$

其中  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  分别为 2 束光的相位， $x_1$ 、 $x_2$  分别为 2 束光的光程。由于 2 束光为同一光源发出，因此有  $\phi_1 = \phi_2 = \phi$ ，即 2 束光初相位相等。则 2 束光相干后的振幅：

$$A = A_1 + A_2 = tra(e^{i(2\pi\sigma x_1 - \phi)} + e^{i(2\pi\sigma x_2 - \phi)}) \quad (2.3)$$

干涉强度：

$$\begin{aligned} I &= A * A^* = t^2 r^2 a * a^* (2 + e^{i2\pi\sigma(x_1 - x_2)} + e^{i2\pi\sigma(x_2 - x_1)}) \\ &= 2RT B_0(\sigma) [1 + \cos(2\pi\sigma x)] \\ &= 2RT B_0(\sigma) + 2RT B_0(\sigma) \cos(2\pi\sigma x) \end{aligned} \quad (2.4)$$

其中， $x = x_1 - x_2$ ，为 2 束光  $a_1$ 、 $a_2$  的光程差， $R$ 、 $T$  分别为分束器的光强反射率和透射率， $B_0(\sigma) = a \times a^*$  为入射光强度。由式 (2.4) 可知，探测器获得的干涉信

号强度由直流分量  $2RTB_0(\sigma)$  及交流分量  $RTB_0(\sigma)\cos(2\pi\sigma x)$  共同构成。在光谱实际测量中，直流分量仅决定背景亮度，交流分量则反映了观测目标的光谱特征。因此滤除直流分量，式 (2.4) 可改写为：

$$I(x, \sigma) = 2RTB_0(\sigma)\cos(2\pi\sigma x) \quad (2.5)$$

式 (2.5) 即为理想条件下获得的单色光干涉图数学表达式。而在实际光谱测量过程中，FTSS 往往会受到包括前置光学系统、分束器材料、探测器光谱响应范围、电子学相关系统等的影响，仪器特性与理想状态存在一定偏差，所以在实测过程中，往往会在干涉图增加一个  $< 1$  的修正因子  $C(\sigma)$ 。那么 (2.5) 可改写为：

$$\begin{aligned} I(x, \sigma) &= 2RTB_0(\sigma)C(\sigma)\cos(2\pi\sigma x) \\ &= 2B(\sigma)\cos(2\pi\sigma x) \end{aligned} \quad (2.6)$$

其中  $B(\sigma) = RTB_0(\sigma)C(\sigma)$  表示修正后的光源强度。式 (2.6) 即为单色光干涉图的数学表达式，它是一个随光程差变化的余弦函数。

当目标辐射为复色光时，其干涉强度为所有波数干涉强度的叠加，设单色光束线宽为  $d\sigma$ ，那么式 (2.6) 可改写为：

$$dI(x, \sigma) = 2B(\sigma)\cos(2\pi\sigma x)d\sigma \quad (2.7)$$

复色光束干涉强度为式 (2.7) 在所有波数范围的积分，即：

$$I(x) = \int_0^{\infty} 2B(\sigma)\cos(2\pi\sigma x)d\sigma \quad (2.8)$$

由式 (2.8) 可知，当  $x=0$  时，即在零光程差处，干涉光强最强，随着光程差越大，干涉光强将变得越来越弱。假设光谱信号为偶函数，即  $B(\sigma) = B(-\sigma)$ ，将波数范围扩展到  $(-\infty \sim \infty)$ ，则式 (2.8) 可改写为：

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma)\cos(2\pi\sigma L)d\sigma \quad (2.9)$$

可以看到，干涉图  $I(x)$  与光谱图  $B(\sigma)$  互为傅里叶余弦变换。根据傅里叶变换原理，对干涉信号  $I(x)$  进行傅里叶变换，反演得到入射光束的光谱分布为：

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x)\cos(2\pi\sigma x)dx \quad (2.10)$$

式 (2.9) 和 (2.10) 即为面阵傅里叶变换太阳光谱仪理论的基本表达式。它表示：通过对获得的目标辐射干涉信号进行余弦傅里叶变换，即可重构目标辐射的光谱

分布。如图 2.2-b 为实际测量获得的目标辐射干涉图，经傅里叶变换，即可反演得到的该目标辐射光谱分布，如图 2.2-a 所示。

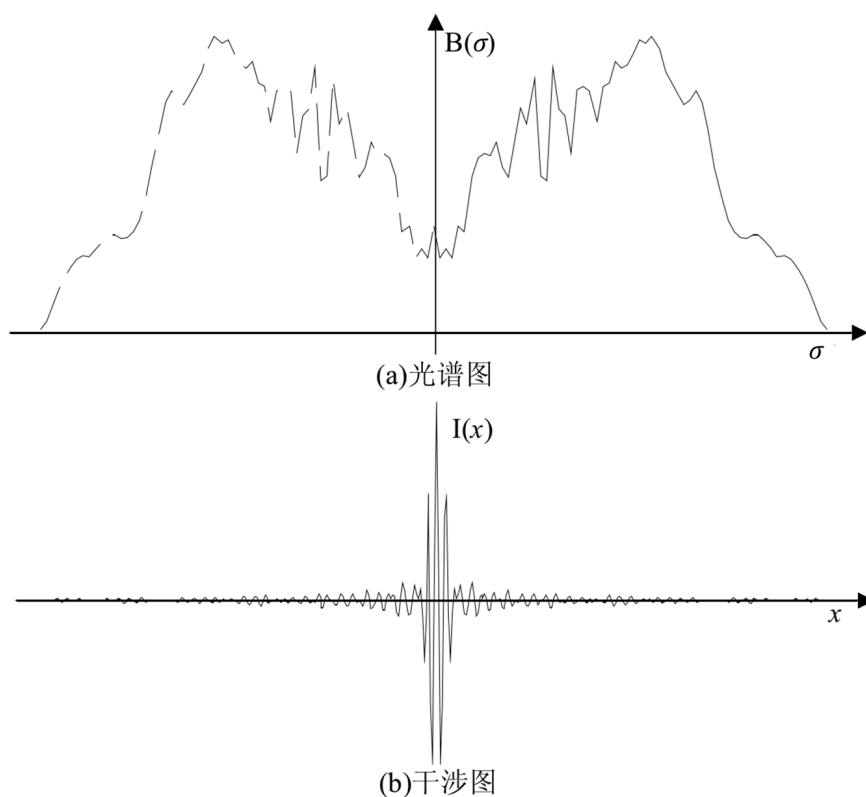


图 2.2 干涉图与光谱图 (黄旻, 2009)

## 2.2 面阵 FTSS 技术基础

### 2.2.1 光谱分辨率

#### 2.2.1.1 线性函数

根据 FTSS 原理，由 (2.9) 可知，在理论上，要反演获得波数范围  $(-\infty \sim +\infty)$  内完整光谱，需要干涉图在空域上具有可以延伸至无穷远处的光程差，即干涉仪动镜能够在无穷长距离进行运动扫描。但在实际工程实现及光谱测量过程中，受干涉仪光学系统、探测器尺寸、动镜扫描距离等条件制约，干涉仪不能运动到无限远处，仅能获得有限光程差范围  $x \in [-L, L]$  内的干涉图，即干涉图被有限光程差所截断，如图 2.3 所示。假设有矩形截断函数

$$T(x) = \text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & x < -L, x > L \\ 0 & -L < x < L \end{cases} \quad \dots (2.11)$$

其中  $L$  为干涉仪最大光程差。则在被矩形截断函数截断的情况下，面阵 FTSS 实际测量得到的干涉信号强度为：

$$I'(x) = I(x) \cdot \text{rect}(x) \quad (2.12)$$

其中  $I(x)$  为完整干涉信号强度。

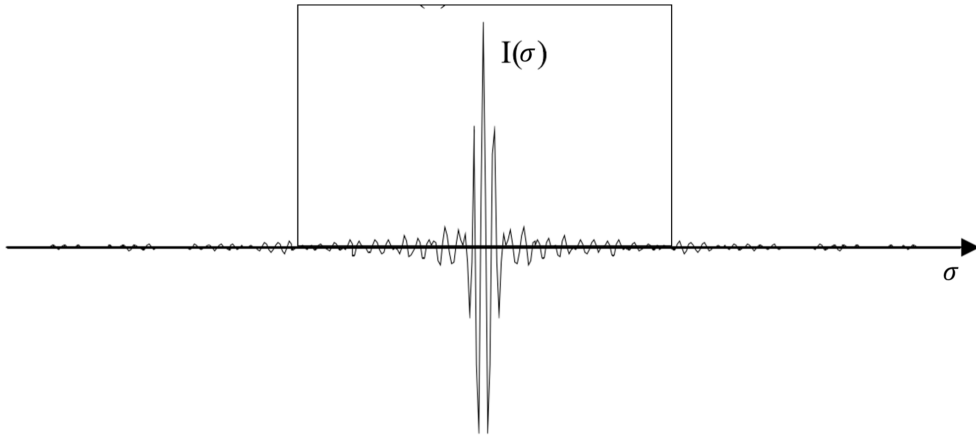


图 2.3 干涉图截断示意图

由于矩形窗函数对干涉图的截断作用，由公式 (2.10)、(2.12) 可得，实际测量获得的复原光谱图为：

$$\begin{aligned} B'(\sigma) &= \int_{-\infty}^{\infty} I'(x) \cos(2\pi\sigma x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} I(x) T(x) \cos(2\pi\sigma x) dx \end{aligned} \quad (2.13)$$

根据卷积定理，式 (2.13) 反演得到的光谱图不再是原来的完整光谱，而相当于完整光谱  $B(\sigma)$  与矩形窗函数的傅里叶变换的卷积，则公式 (2.13) 可改写为：

$$\begin{aligned} B'(\sigma) &= B(\sigma) \otimes FT[T(x)] \\ &= B(\sigma) \otimes A(\sigma) \end{aligned} \quad (2.14)$$

式 (2.14) 中， $B(\sigma)$  为反演得到的完整光谱图，“ $\otimes$ ”表示卷积运算， $A(\sigma)$  为矩形窗函数傅里叶变换，且

$$\begin{aligned} A(\sigma) &= FT[T(x)] = FT\{\text{rect}(x)\} \\ &= 2L \frac{\sin(2\pi\sigma L)}{2\pi\sigma L} \\ &= 2L \text{sinc}(2\pi\sigma L) \end{aligned} \quad (2.15)$$

式 (2.15) 称之为 FTSS 仪器线性函数 (Instrumental Line Shape, ILS), 它是一个 sinc 函数, 其示意图如图 2.4-a 所示。

假设光谱为线宽无限窄, 且光谱强度分布为  $B(\sigma) = \delta(\sigma - \sigma_0)$  的理想单色光入射光源, 则经矩形窗函数截断后, 其实际测量反演得到的光谱分布为:

$$\begin{aligned} B'(\sigma) &= \delta(\sigma - \sigma_0) \otimes A(\sigma) \\ &= 2L \text{sinc}(\sigma - \sigma_0) \end{aligned} \quad (2.16)$$

由上式可知, 反演得到的光谱分布为以  $\sigma_0$  为中心的振荡收敛函数, 其光谱图如图 2.4-b 所示。由公式 (2.15) (2.16) 可知, 在 FTSS 中, 仪器线性函数可以看成光谱强度分布为  $B(\sigma) = \delta(\sigma - \sigma_0)$  的单色光反演获得的光谱图。

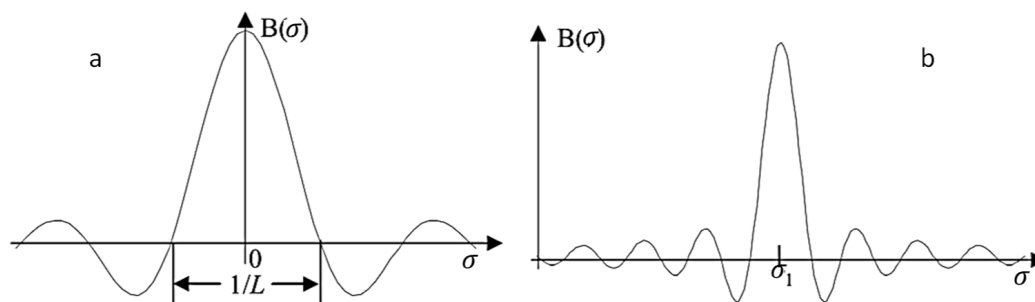


图 2.4 仪器线性函数及与矩形窗函数卷积后的单色光光谱示意图 (黄旻, 2009)

### 2.2.1.2 分辨率

在 FTSS 中, 光谱分辨率指仪器分辨两条相邻谱线的能力, 它是衡量 FTSS 性能最关键指标之一。当仪器获得的两条谱线靠得非常近时, 可能会产生相互叠加, 导致两条谱线无法分辨。仪器线性函数可以看成单色光反演光谱图, 因此 FTSS 光谱分辨率可以用仪器线性函数 (ILS) 来表征。根据瑞利判据 (张以谟, 1982): 两条强度相等的谱线, 若一条谱线的主瓣峰值位置与另一条谱线的主瓣零点位置正好重合, 那么就认为这两条谱线刚好能被分开, 两条谱线的间隔即为仪器的极限分辨率。

假设有相邻两束单色光, 波数分别为  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ , 经矩形窗函数截断后, 根据式 (2.16), 其光谱分布图如图 2-5, 其中 a 为波数  $\sigma_1$  光谱, 为 b 波数  $\sigma_2$  谱线。依据瑞利判据, 要分辨两条谱线, 则谱线 a 的最大波峰位置与谱线 b 的过零点重

合，即两条谱线相位间隔为  $\pi$ ，则有：

$$2\pi\sigma_2L - 2\pi\sigma_1L = \pi \Rightarrow \Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 = \frac{1}{2L} \quad (2.17)$$

$\Delta\sigma$  即为该 FTSS 的极限分辨率。采用不同截断函数，其分辨率表达式会有所不同，如采用三角截断函数，则其分辨率表达式为： $\Delta\sigma = \frac{1}{L}$ 。但无论采用何种截断函数，FTSS 分辨率都与两束相干光束最大光程差成反比，最大光程差越大，仪器光谱分辨率越高。

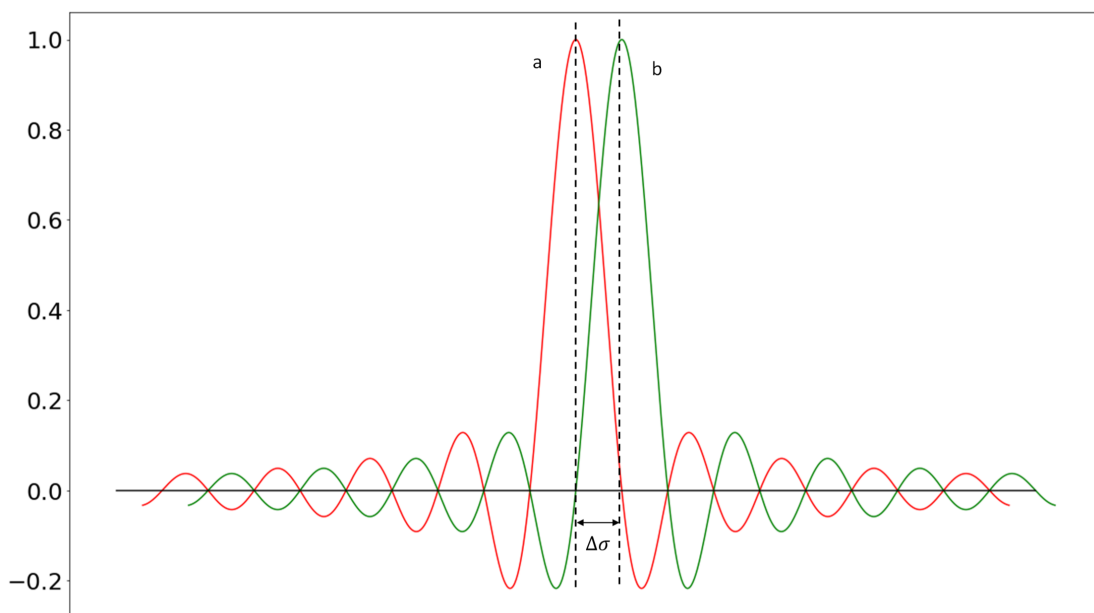


图 2.5 仪器极限分辨率原理

## 2.2.2 干涉图采样

### 2.2.2.1 离散采样

FTSS 动镜从  $-L$  运动到  $+L$  的过程中，FTSS 采集系统以有限大小的光程差间隔  $x$  进行数字化离散采样，获得在  $(-L,+L)$  间变化的干涉图，通过对离散采样获得的干涉图进行傅里叶变换，得到一定频谱范围内的光谱图。常见的等光程差间隔采用方式有：等时间采样和参考激光采样 (李妍, 2017)。等时间采样通过控制动镜以速度  $v$  进行匀速运动，每隔相等时间间隔  $\Delta t$  采集一次干涉图，以此实现 FTSS 进行等光程差间隔  $x = v \cdot \Delta t$  采样。但动镜在运动过程中，要保持运动速度的精确平稳非常困难，且随着运动行程的增加，保持平稳运行的难度将增大，动镜扫描精度将降低，这会使反演得到的光谱图产生严重误差。因此，20 世纪 60 年代，法国科学家 Connes 首先提出将稳频参考激光引入迈克尔逊干涉

仪中 (Connes 等, 1966), 利用干涉仪调制获得的参考激光干涉条纹对动镜运动产生的光程差进行精确测量, 以得到更准确的光谱图。

假设 FTSS 采集系统对目标辐射干涉信号  $B(\sigma)$  (如图 2.6-a) 以相等光程差间隔  $x_s$  进行离散化采样, 在数学上, 这相当于一个梳状函数作用于干涉图上, 即目标辐射通过干涉仪后的干涉强度 (如图 2.6-b):

$$I_s(x) = I(x) \cdot \text{comb}(x - nx_s) \quad (2.18)$$

式中  $x_s$  为采样间隔,  $I(x)$  为目标辐射连续干涉图,  $\text{comb}(x - nx_s)$  为梳状函数, 梳状函数定义为 (如图 2.6-c):

$$\text{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n) \quad (2.19)$$

则梳状函数的傅里叶变换为 (如图 2.6-d):

$$FT\{\text{comb}(x)\} = \text{comb}\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right) \quad (2.20)$$

其中  $\sigma_s = \frac{1}{x_s}$  为采样波数。则根据卷积定理, 等光程差间隔采样获得的干涉图反演得到的光谱图为 (如图 2.6-e):

$$\begin{aligned} B_s(\sigma) &= B(\sigma) \otimes \text{comb}\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} I(nx_s) \cos(2\pi\sigma x_s) \end{aligned} \quad (2.21)$$

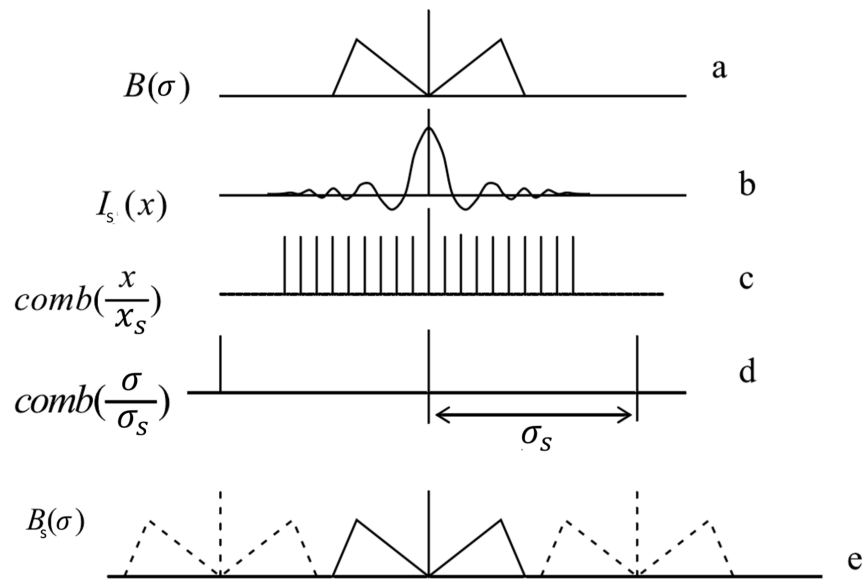


图 2.6 干涉图离散采样及傅里叶变换过程 (邹曜璞, 2016)



### 2.2.2.2 采样间隔

由式 (2.21)可知, 离散采样获得的干涉图反演得到的光谱图以  $\sigma_s = \frac{1}{x_s}$  为周期扩展, 为避免光谱反演过程中, 产生频谱混叠, 损失光谱信息, 造成反演光谱失真, 选取合适采样间隔  $x_s$  十分重要。

根据奈奎斯特采样定理 (吴瑾光, 1994): 只有当采样信号频率大于被采样信号频率 2 倍时, 采样获得的干涉图才能完整准确的对光谱信号进行重构。即采样间隔  $x_s$  应满足:

$$x_s \leq \frac{1}{2\sigma_{max}} \quad (2.22)$$

其中  $\sigma_{max}$  为被测光谱范围最大波数。而对于被测波数范围在  $\sigma_{min} \sim \sigma_{max}$  之间光谱时, 采样间隔则应满足更一般条件:

$$x_s \leq \frac{1}{2(\sigma_{max} - \sigma_{min})} \quad (2.23)$$

即只有采样间隔满足奈奎斯特采样定理时, 才能得到准确的复原光谱 (如图 2.7-a)。当然在实际测量过程中, 采样间隔也不必远小于 (2.22)或 (2.23), 否则会导致干涉图过采样, 这将对 FTSS 数据采集系统及后续光谱反演增加不必要的负担。但若不能满足奈奎斯特采样定理, 将导致 FTSS 干涉图欠采样, 得到的复原光谱将在不同周期性区间上相互叠加 (如图 2.7-b), 引起复原光谱失真, 关键光谱信息丢失。

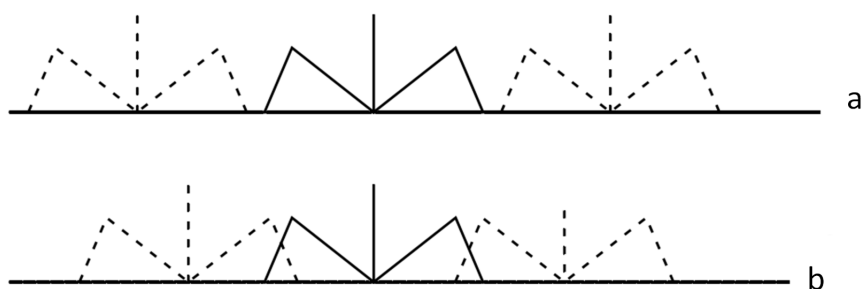


图 2.7 采样间隔对光谱反演影响

### 2.2.2.3 单边采样与双边采样

对 FTSS 而言, 干涉图数据采样方式主要由两种: 单边干涉图采样和双边干涉图采样, 可根据不同采样需求来选择合适的采样方式。

单边干涉图采样是对在零光程差一侧的干涉图进行采样 (如图 2.8所示), 该方式主要用于高分辨率需求场合。根据 FTSS 原理, 干涉图数据关于零光程差位

置对称，因此只需对零光程差一侧干涉图数据进行反演，即可得到相应光谱图。单边干涉图采样意味着可以有更长的动镜扫描行程，得到更高分辨率光谱图。当然单边干涉图采样也会在零光程差另一侧采集少量干涉图数据，但这些干涉图数据并不参与傅里叶变换来获得光谱图，而主要用于校正因光学系统偏差、电子元件延迟、采集位置误差引起的相位偏差。

双边干涉图采样则是对零光程差两侧的干涉图数据都进行采集，与单边干涉图采样相比，采集数据量更大，采集时间更长（如图 2.9）。理想条件下，双边干涉图采集方式获得的干涉图关于零光程差位置对称，但实际采样过程中，受各种因素影响，采集获得的干涉图实际并不完全关于零光程差位置对称。通过对双边干涉图采样数据进行傅里叶变换后，再进行加和平均，在不增加扫描时间的情况下，可得到更高信噪比光谱。

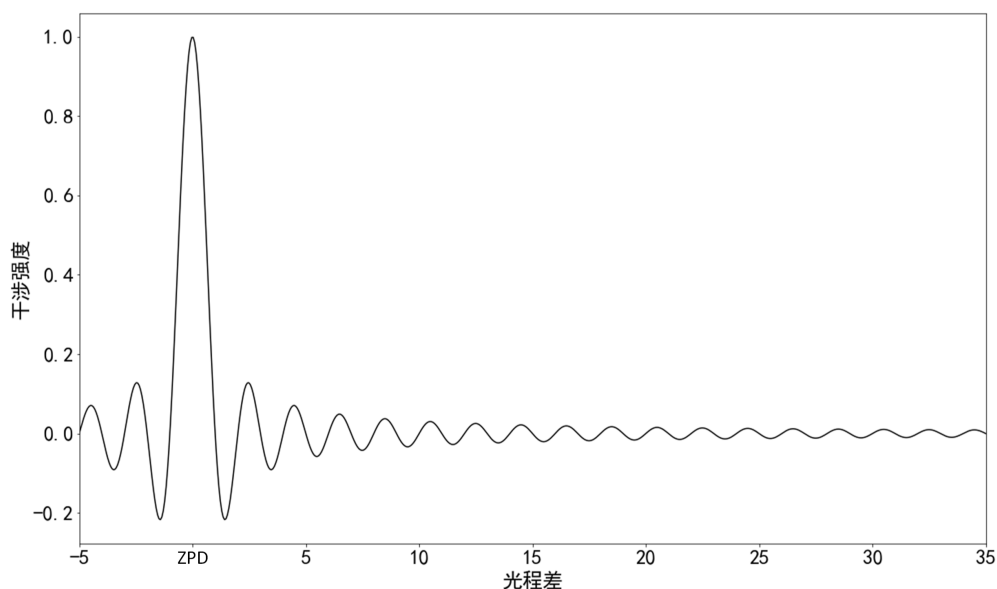


图 2.8 单边干涉采样

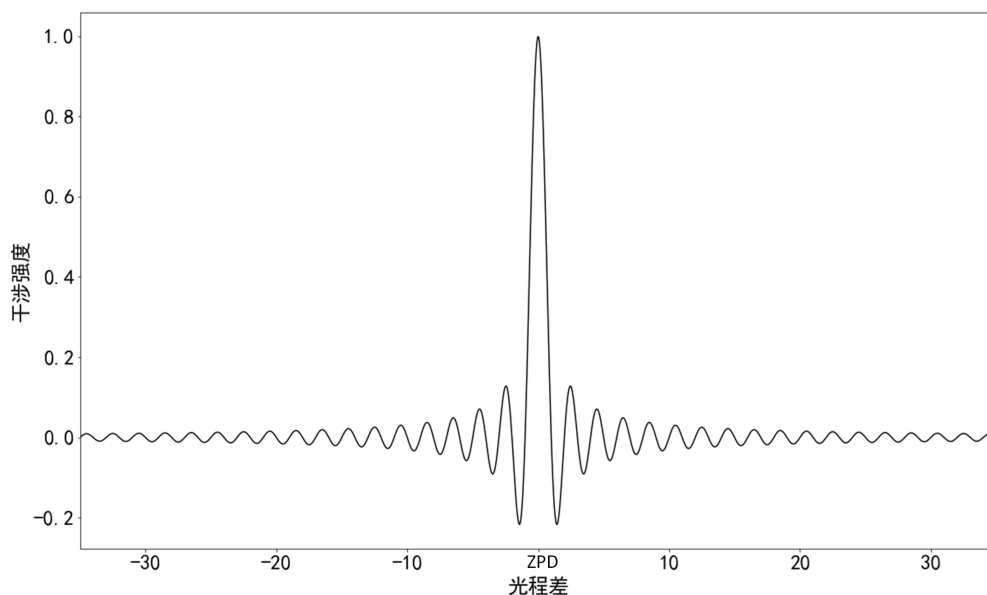


图 2.9 双边干涉采样

### 2.2.3 干涉图数据处理

#### 2.2.3.1 切趾

根据 2.2.1.1 节，有限光程差导致实测光谱分布为：目标辐射完整光谱分布与仪器函数的卷积，其中仪器函数是一个 *sinc* 函数。而当目标辐射完整光谱与仪器函数卷积时，与目标辐射完整光谱相比，得到的实测光谱不仅谱带变宽，同时主瓣两侧出现一系列正负旁瓣振荡。谱带变宽将导致光谱分辨率降低，正值旁瓣的存在则可能会导致虚假峰值信号的产生，而负值旁瓣的存在则会削弱或淹没主瓣两侧弱的光谱信号，降低光谱测量精度。因此，要得到准确的光谱信息，就需要采取必要措施对旁瓣进行有效抑制。因这些旁瓣振荡形状上类似与人类脚趾，抑制旁瓣的过程也叫形象的称之为“切趾”。

切趾就是通过渐变的权重函数对干涉图进行加权处理，以减少干涉图在最大光程差附近被截断带来的不连续性。常用的切趾函数有 (Griffiths 等, 2007; 杨露, 2007): Triangular 函数、Hamming 函数、Blackman 函数、余弦函数、Hann 函数等，详见表 2.1。。

表 2.1 常用切趾函数

类型	切趾函数	仪器函数	半宽高
Blackman	$0.42 + 0.5 \cos(\frac{\pi x}{L}) + 0.08 \cos(\frac{2\pi x}{L})$	$\frac{L(0.84-0.36L^2\sigma^4-2.17\times 10^{-9}L^2\sigma^4)\text{sinc}(2\pi L\sigma)}{(1-L^2\sigma^2)(1-4L^2\sigma^2)}$	$\frac{2.29}{2L}$
Cosine	$\cos(\frac{\pi x}{2L})$	$\frac{4L \cos(2\pi\sigma L)}{\pi(1-16L^2\sigma^2)}$	$\frac{1.63}{2L}$
Hamming	$0.54 + 0.46 \cos(\frac{2\pi x}{L})$	$\frac{L(1.08-0.64L^2\sigma^2)\text{sinc}(2\pi L\sigma)}{1-4L^2\sigma^2}$	$\frac{1.81}{2L}$
Hann	$\cos^2(\frac{\pi x}{2L})$	$\frac{L\text{sinc}(2\pi L\sigma)}{1-4L^2\sigma^2}$	$\frac{2}{2L}$
Triangular	$1 - \frac{ x }{L}$	$L\text{sinc}^2(\pi L\sigma)$	$\frac{1.77}{2L}$

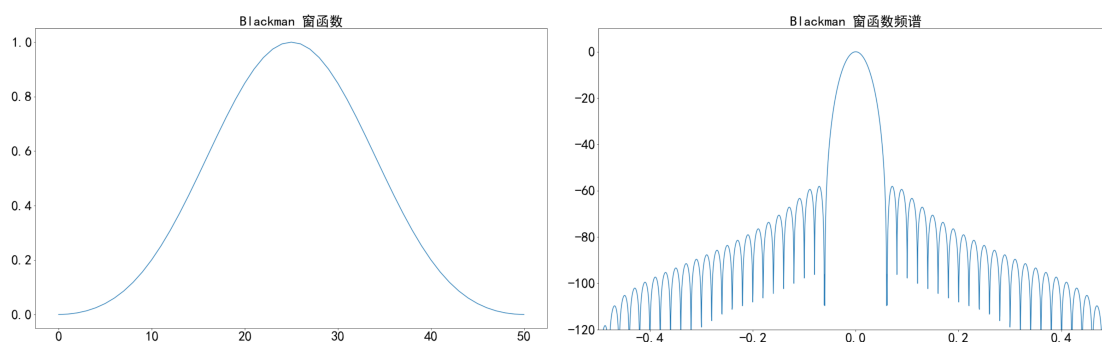


图 2.10 Blackman 窗函数及频谱

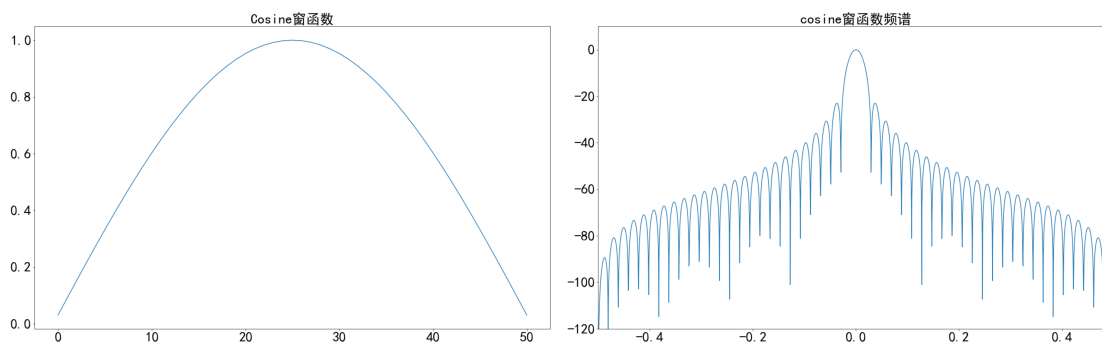


图 2.11 Cosine 窗函数及频谱

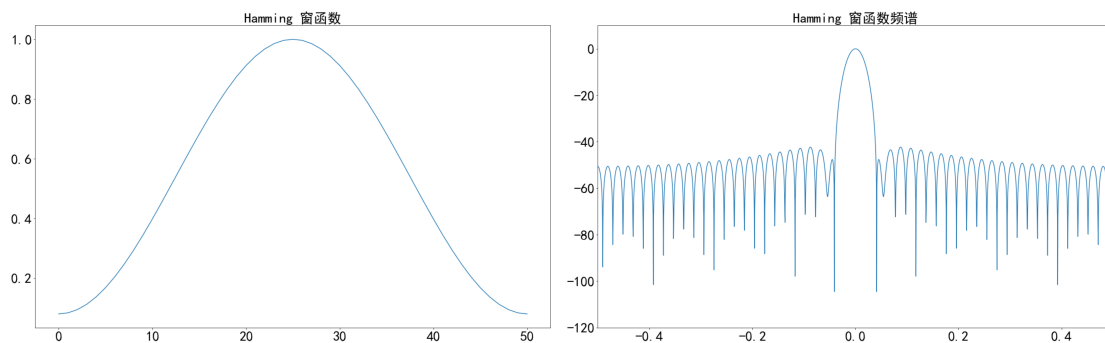


图 2.12 Hamming 窗函数及频谱

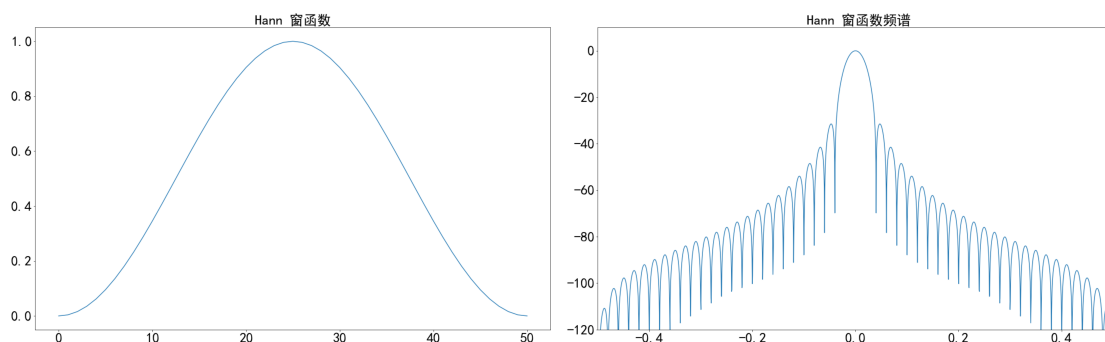


图 2.13 Hann 窗函数及频谱

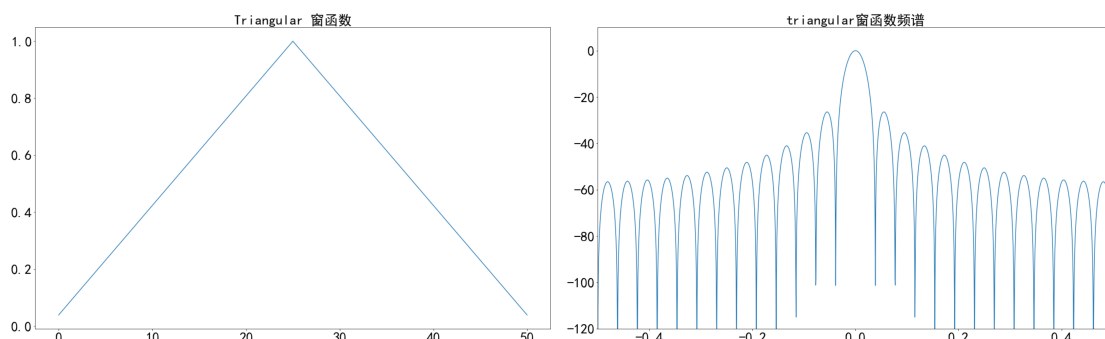


图 2.14 Triangular 窗函数及频谱

在光谱复原过程中，切趾函数需要满足的条件是：在零光程差处为最大值，随着光程差的增大，函数值减小，直到在最大光程差处减小为零。

不同切趾函数的选择，对谱线展宽、分辨率，幅值都有着不同的影响，可以根据实际应用需求，选择合适的切趾函数。

### 2.2.3.2 相位校正

根据 FTSS 原理，理想情况下，目标辐射干涉图和其反演光谱图应满足公式 (2.9)、(2.10) 的变换关系。但在实际应用时，仪器光路、电路元器件、以及不

均匀采样等因素的影响，都会导致干涉图产生相位偏差。相位误差影响了光谱反演的精度，导致反演光谱与真实光谱间的幅度误差，需要对其进行相位校正。目前，常用的相位校正方法有 (Lerner 等, 1995; Rahmelow 等, 1997; Michaelian, 1987, 1989): 绝对值法、Mertz 乘积法、Forman 卷积法。

### (1) 绝对值法

根据 FTSS 原理，存在相位误差的干涉信号：

$$\begin{aligned}\tilde{I}(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) \cos [2\pi\sigma(x - \varepsilon)] d\sigma \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) e^{i2\pi\sigma x} e^{-j2\pi\sigma\varepsilon} d\sigma\end{aligned}\quad (2.24)$$

式中  $\tilde{I}(x)$  表示干涉图强度， $B(\sigma)$  为不存在相位误差的真实光谱， $\varepsilon$  为偏离等距光程差的距离， $2\pi\sigma\varepsilon$  为引起的相位误差。则有：

$$\begin{aligned}B(\sigma)e^{i\Phi(\sigma)} &= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(x)e^{-j2\pi\sigma x} dx \\ &= B_r(\sigma) + iB_i(\sigma)\end{aligned}\quad (2.25)$$

其中  $B_r(\sigma), B_i(\sigma)$  分别为干涉图  $\tilde{I}(x)$  反演光谱的实部和虚部。对式 2.26 式取绝对值，即可得到相位校正后的复原光谱图：

$$|B(\sigma)| = \sqrt{B_r^2(\sigma) + B_i^2(\sigma)}\quad (2.26)$$

该方法主要用于双边干涉采样过程中的相位校正，简单有效，但数据量较大，校正过程中平方和开方运算使得所有噪声都变为正值，在一定程度上，反演光谱精度会有所降低。

### (2) Mertz 法

Mertz 方法是在频域内实现频谱的相位校正，主要用于单边干涉采样中。单边采样过程中，主要在零光程差一侧采集干涉图，但在另一侧也会采样少量干涉图数据，形成一个小的双边干涉图。根据式 (2.25) 有：

$$\begin{aligned}B_l(\sigma)e^{i\Phi_l(\sigma)} &= \int_{-} \tilde{I}_l(x)e^{-j2\pi\sigma x} dx \\ &= B_{r,l}(\sigma) + iB_{i,l}(\sigma)\end{aligned}\quad (2.27)$$

其中  $B_l$  为小双边干涉数据反演得到的无相位误差的光谱图， $B_{r,l}(\sigma), B_{i,l}(\sigma)$  分别为小双边干涉图  $\tilde{I}_l(x)$  反演光谱的实部和虚部。则光谱的相位误差

$$\Phi_l(\sigma) = \arctan \frac{B_{r,l}(\sigma)}{B_{i,l}(\sigma)}\quad (2.28)$$

由于选取的干涉图数量较少，得到的主要是低分辨率的光谱的相位误差。而对于高分辨率相位误差，通过填零操作，扩充小双边干涉数据点数，使得小双边干涉图数据点数是单边采样点数的 2 倍，得到高分辨率相位误差，则反演得到的光谱图为：

$$B(\sigma) = B_r(\sigma) \cos(\Phi_l(\sigma)) + B_i(\sigma) \sin(\Phi_l(\sigma)) \quad (2.29)$$

### (3) Forman 法

Forman 法又称卷积法，主要用于单边干涉采样相位校正中，与 Mertz 法在频域内相位校正不同的是，Forman 法在时域内对干涉图进行相位校正，将式 (2.25) 改写为：

$$B(\sigma) = e^{j\Phi(\sigma)} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(x) e^{-j2\pi\sigma x} dx \quad (2.30)$$

傅里叶变换后得到校正后的干涉图：

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\Phi(\sigma)} e^{-j2\pi\sigma x} dx \otimes \tilde{I}(x) \quad (2.31)$$

有相位偏差的干涉图和偏差相位卷积，得到校正后的光谱图。其中  $\Phi(\sigma)$  可通过 Mertz 法 (2.27) 一样的方式获得。而且在相位误差严重不满足要求时，可以通过多次卷积提高相位精度，直至满足指标需求。

#### 2.2.3.3 离散傅里叶变换

连续傅里变换定义为：

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.32)$$

连续傅里叶逆变换定义为：

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.33)$$

计算机为离散系统，需要对连续目标信号  $x(t)$  进行离散采样，获得离散采样信号  $x_n$ ，则在离散系统中，式 (2.32) (2.33) 改写为：

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (k = 0, 1 \dots N-1) \quad (2.34)$$

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (n = 0, 1 \dots N-1) \quad (2.35)$$

无论针对傅里叶变换还是其逆变换，均可认为计算

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{kn} \quad (k = 0, 1 \dots N - 1) \quad (2.36)$$

其中  $\{x_n\}_0^{N-1}$  为已知输入数据， $\{X_k\}_0^{N-1}$  为输出数据， $W_N = e^{-\frac{2\pi}{N}} = \cos(\frac{2\pi}{N} - i \sin(\frac{2\pi}{N}))$  由式 (2.36) 可知，计算一次  $X_k$  需要  $N$  个虚数乘法及  $N$  个虚数加法，即其时间复杂度为  $O(N)$ ，则计算全部  $X_k$ ，时间复杂度为  $O(N^2)$ ，虽然离散傅里叶变换在频谱分析领域具有极其重要作用，但是由于计算量巨大，限制了离散傅里叶变换得应用。直到 1965 年，J.W. 库利和 T.W. 图基提出了快速傅里叶变换 (FFT) (Cooley 等, 1965)，FFT 算法将离散傅里叶变换时间复杂度从  $O(N^2)$  降到  $O \lg N$ ，才在各领域得到广泛应用。其具体方式利用  $|W_N^{kn}|$  对称性质，将 (2.36) 分成奇偶两部分，则有：

$$X_{2k} = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} [x_k + x_{N/2+k}] W_{N/2}^{kn} \quad (2.37)$$

$$X_{2k+1} = \sum_{k=0}^{N/2-1} [x_k - x_{N/2+k}] W_N^k W_{N/2}^{kn} \quad (2.38)$$

令

$$\begin{cases} y_k = x_k + x_{N/2+k} \\ y_{N/2+k} = (x_k - x_{N/2+k}) W_N^k \end{cases} \quad (2.39)$$

则  $N$  个点的离散傅里叶变换可归结为 2 个  $N/2$  个点的离散傅里叶变换，即：

$$\begin{cases} X_{2k} = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} y_k W_{N/2}^{kn} \\ X_{2k+1} = \sum_{k=0}^{N/2-1} y_{N/2+k} W_{N/2}^{kn} \end{cases} \quad (k = 0, 1 \dots N - 1) \quad (2.40)$$

通过反复的二分即可得到 FFT 算法。

### 2.3 面阵 FTSS 数据终端面临的技术挑战

根据面阵 FTSS 技术原理，在傅里叶变换太阳光谱仪内配置稳频窄线宽激光光源，傅里叶变换太阳光谱仪对激光信号进行调制，获得激光余弦干涉信号，对其进行实时过零点位置检测，同步触发 CMOS 探测器进行等光程差间隔采样，



获取目标辐射信号干涉图，经傅里叶变换，即可反演得到目标辐射光谱图。面阵傅里叶变换光谱仪可以通过一次观测同时获得二维空间信息和一维光谱信息，从而进一步提高观测时间分辨率，因此用于太阳观测的傅里叶变换光谱仪下一步的发展方向必将是从小扩展到面。然而，面阵傅里叶变换太阳光谱仪的实现需要面临诸多关键技术挑战，从数据终端的角度，如纳米级精度动镜扫描驱动和等光程差采样系统；高帧频（数千帧频）、高性能、大面阵的焦面探测器；高速同步触发、实时存储的数据采集系统；海量干涉图的光谱反演和检测定标技术等。

(1) 纳米级精度动镜扫描驱动和宽波段等光程差采样。宽波段太阳光谱观测可以对太阳大气从低层光球到高层色球进行精细的层析诊断，而等光程差间隔采样是获取高质量干涉信号及反演光谱的关键。因采样稳频参考激光波长限制，面阵傅里叶变换太阳光谱仪观测波段范围受到限制。上海技术物理研究所(盛灏等, 2014)通过对参考激光进行4倍频，可满足近红外-可见光波段光谱观测，但是却无法满足更宽波段（如从地基可观测最短波长近紫外300 nm，到光学望远镜可观测的25  $\mu\text{m}$  中远红外波段）光谱观测需求。而在等光程采样光程中，动镜的行程决定了仪器的光谱分辨率。动镜在运动过程中的平稳性直接影响着干涉图和反演光谱质量，需要对动镜进行纳米级、等距离、直线运动控制，使得动镜在运动过程中保持高姿态稳定度、高方向保持性和高速度均匀性，对动镜移动位置精度控制要求很高。

(2) 高帧频（数千帧频）、高性能、大面阵的焦面探测器。为保证面阵傅里叶变换太阳光谱仪观测时间分辨率，需要在极短的时间内采集足够多的干涉图（高达千帧每秒），探测器每次采样曝光时间在毫秒级以下，每次曝光获得的光子数非常有限，对探测器帧频、性能提出了很大的挑战。在太阳观测采用的焦面设备中，所使用的焦面探测器帧频并不高。如在可见光波段，怀柔太阳观测基地全日面磁场望远镜(林佳本等, 2013)（面阵大小1K x 1K，数据格式12bit）最大帧频48fps、目前国内正在研制的先进天基太阳天文台（ASO-S）载荷之一全日面矢量磁象仪（FMG）（面阵大小4Kx4K，14bit）帧率10fps；在红外波段，美国大熊太阳天文台（BBSO）1.6米古德太阳望远镜（GST）的CYRA(Yang等, 2020)（CrYogenic solar spectrograph）（面阵大小2Kx2K）帧频76fps，AMIS 8-10 $\mu\text{m}$  探测器(邓元勇等, 2020b)（面阵大小256x256），最大帧频约300fps。随着技术的进步，在可见光波段探测器帧频指标上，现在已有探测器初步满足了面阵傅里叶

变换太阳光谱仪观测条件，如德国 PCO 公司的 dimax HS1 高速相机（面阵大小 1Kx1K）帧频可达 7039fps, 但在红外波段暂还没有探测器可以满足，因此课题中所涉及的面阵傅里叶太阳光谱仪关键技术研究也更多的是在可见光波段先行验证。

(3) 高速同步触发、实时存储的数据采集系统。面阵傅里叶变换太阳光谱仪采用每秒数千帧的高速同步采集模式，依靠参考激光余弦干涉图的过零信号，同步触发焦面设备以每秒数千帧的频率采集干涉像，进而反演得到目标辐射光谱图。以采用面阵大小 1kx1k, 12bit, 参考激光采样频率 1KHz 为例，数据采集系统同步触发采集帧频需达  $10^4$ fps, 每秒将产生约 1.4G 数据需进行实时存储。而在怀柔太阳观测基地全日面磁场望远镜，采用高压同步采集模式 (Bai 等, 2022) (面阵大小 1kx1k, 数据格式 12bit) 同步触发采集频率 16fps, 每秒数据量约 32M, 与面阵 FTSS 相比，同步触发频率及数据量均相对较低。在太阳自适应光学应用中，用于稳像的波前传感器具有较高的采集频率。如美国国家天文台 DST 的高阶自适应光学系统采集频率 2.5KHz、德国 GREGOR 的高阶自适应光学系统采集频率 2KHz；国内的中国科学院光电技术研究所研制的，应用在云南天文台 1m 新真空太阳望远镜 (NVST) 的一代 37 单元低阶自适应光学系统，采用 MC1362 探测器，采集频率 2.1KHz。而其二代 151 单元高阶自适应光学系统采用 Phantom V311 探测器，采集帧频可达 3.5KHz(饶长辉 等, 2018)。但在太阳自适应光学系统中，只是进行连续采集，并不需要进行高速同步触发，且采集获得的数据主要用于校正，并不需要对全部进行实时存储。可见，面阵傅里叶变换太阳光谱仪数据采集系统具有同步触发频率高、采集速度快、数据量大、数据实时存储要求高等特点。目前为止，针对这一需求，国内外研究涉及较少，需要我们着力研究解决。

(4) 海量干涉图的光谱反演和检测定标技术。以面阵傅里叶变换太阳光谱仪焦面探测器采用面阵 512x512, 数据格式 12bit 为例，每天将产生约数十 TB 的数据。而傅里叶光谱仪记录的是干涉图，并非科学需要的光谱图，即“所见非所得”。面阵探测器记录的干涉图，先经过零光程差确定、仪器背景等干涉图的定标后，经傅里叶变换，反演得到光谱图。数据处理过程中涉及每个像元的傅里叶变换、磁场反演等，耗时巨大。总体而言，面阵傅里叶变换太阳光谱仪具备数据量大、数据处理计算量大、数据处理步骤多、链条长特点，对这些海量数据的处

理将是面阵傅里叶变换太阳光谱仪面临的巨大挑战之一。

## 2.4 本章小结

本章主要介绍了面阵 FTSS 技术基础理论。首先介绍了面阵 FTSS 分光原理，然后对面阵傅里叶变换太阳光谱仪所涉及的相关技术基础进行了介绍，如仪器线性函数、分辨率、数字化离散采样原理、方法及采集间隔、干涉图数据处理等，最后分析了面阵 FTSS 在数据终端方面面临的技术挑战。



## 第3章 宽波段等光程差间隔采样系统

FTSS 具有宽波段的优势, 通过更换分束器和探测器可以覆盖可见-近红外-中红外乃至远红外波段。根据 FTSS 原理, 其观测到的相邻两帧干涉图之间的等光程差间隔越大, 可反演光谱最短波长越大, 反之亦然。比如 AIMS 的 FTSS 采用近红外激光器作为参考信号, 相邻干涉图之间等光程差间隔固定, 为  $0.852\mu\text{m}$ , 可恢复的最短波长为  $1.704\mu\text{m}$ , 若想获得更短波长, 需要更小的等光程差间隔, 然而目前 AMIS 不具备此能力。换言之, 可调等光程差间隔的采样系统为可见光到红外宽波段太阳光谱观测核心技术之一。限于当前条件, 本文以国家天文台怀柔太阳观测基地现有的 IFS-125HR 傅里叶变换光谱仪为实验平台, 对面阵傅里叶变换太阳光谱仪宽波段等光程差间隔采样技术展开研究。

### 3.1 等光程差间隔采样方法

#### 3.1.1 参考激光干涉仪

根据 2.1 节面阵 FTSS 原理, 对目标辐射干涉信号进行等光程差间隔采样, 是面阵 FTSS 获取高质量干涉信号及高效光谱反演算法研究的基础。所谓等光程差间隔采样, 就是将迈克尔逊干涉仪中动镜运动位移产生的光程差间隔作为干涉信号采样的标尺, 对目标辐射进行干涉图采样, 从而反演获得未知宽带光源光谱信息分布。20 世纪 60 年代, 法国科学家 Connes 首先提出将稳频参考激光引入迈克尔逊干涉仪中, 利用调制获得的参考激光干涉条纹对动镜运动产生的光程差进行精确测量, 由于获得稳频激光干涉信号与入射光源干涉信号经同一干涉仪光学系统, 携带有相同的光程差信息, 因而可将稳频参考激光干涉信号作为面阵 FTSS 光谱测量的参考标尺, 对光程差位置进行精确定位, 从而实现傅里叶变换光谱仪的等光程差间隔采样, 来获得更高精度的干涉图, 也使得反演获得的目标辐射光谱分布更为准确。其原理过程如图 3.1 所示。

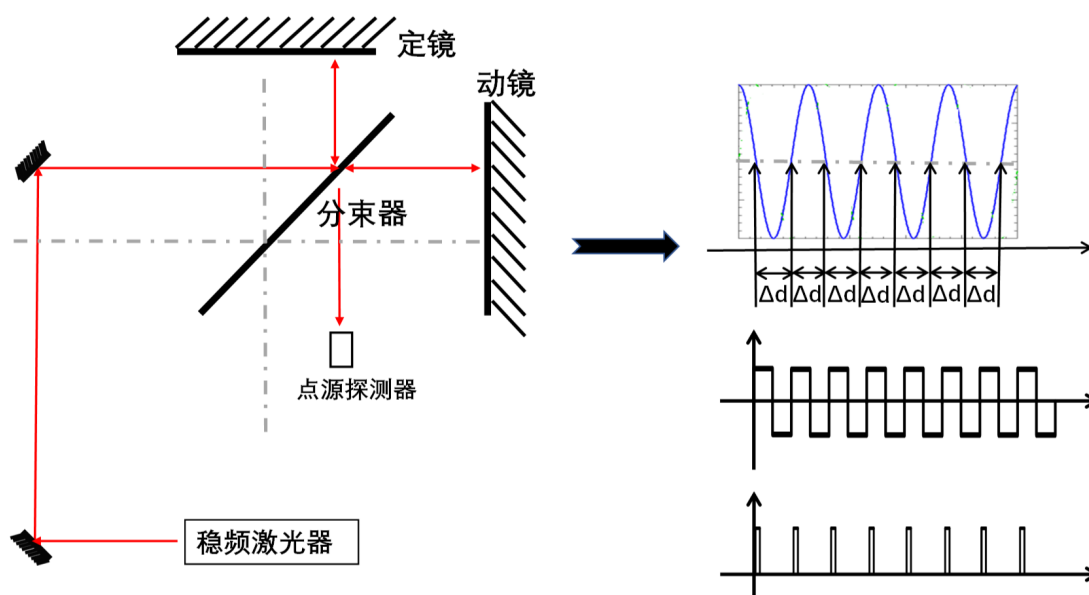


图 3.1 稳频参考激光触发采样示意图

在图 3.1 中，稳频激光信号经过面阵 FTSS 的调制（调制原理与 FTSS 原理类似，可参考 2.1 节），得到参考激光余弦干涉信号，余弦波的周期即为参考激光波长。通过配备过零检测模块对余弦参考激光干涉信号进行精确过零检测，整形产生过零方波信号，以方波信号跳变沿作为采样时钟，产生触发采样脉冲信号，触发 FTSS 数据采集系统对目标辐射干涉信号进行数字化采样。

在面阵 FTSS 参考激光的选取上，一般遵循以下四个方面的要求（李志刚, 2000; 陈友华, 2013）：

(1) 方向性强：所谓参考激光方向性强指的是其具有更小的发散角。参考激光的介质特性和其谐振腔结构往往决定了激光发散角大小。在实际测量过程中，参考激光的发散角越小，对测量结果的影响越小。

(2) 无杂散光谱线：等光程差间隔采样以参考余弦激光干涉信号零光程差点作为采样标尺，G.Guelachviii 认为参考激光中杂散光的存在，将引起零光程差位置偏移，对等光程差间隔采样标尺产生影响，导致不等间隔采样，使得获得的目标辐射干涉图非对称，产生相位误差，导致反演光谱图中“伴线”的产生，严重影响光谱测量的准确性。

(3) 窄光谱线宽：单色入射光源相干长度  $M$  可表示为：

$$M = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (3.1)$$

其中  $\lambda$  为入射光源波长， $\Delta\lambda$  为入射光源光谱宽度。公式表明相干长度与入射光

源光谱宽度成反比,参考激光光谱线宽越窄,相干长度越大。而在实际光谱测量中,为得到调制度较大的干涉信号,往往要求 FTSS 的最大调制光程差(即相干长度)必须充分大于最大光程差,即参考激光光谱线宽  $\Delta\lambda$  越窄越好。

(4) 高光强稳定性:在光谱测量过程中,光谱测量的相对误差与激光稳频相对值成近似线性关系,激光稳频相对值越大,光谱测量相对误差值越大,引起激光中心频率漂移越大,将造成采样间隔的不均匀变化,导致干涉图采样误差,从而影响光谱测量精度。

目前较为成熟点源的 FTSS 中,一般均采用 He-Ne 激光作为参考激光,He-Ne 激光波长 632.8nm,具有极窄线宽,通常情况下,其谱线展宽仅  $10^{-8}nm$ ,相干长度一般可达百米;加上 He-Ne 激光器中谐振腔结构的作用,使得 He-Ne 激光的发散角一般只有几个毫弧度,同时 He-Ne 输出光强稳定性高,因此在面阵 FTSS 原理样机中选用 He-Ne 激光作为稳频参考激光。

### 3.1.2 激光触发采样和 Brault 采样

目前利用参考激光进行等光程差间隔采样的方式主要有两种:参考激光余弦干涉信号过零点触发采样和 Brault 采样 (Brault, 1996; 李保生 等, 2007)。参考激光余弦干涉信号过零点触发采样精度较高,其主要通过硬件方法来实现等光程差间隔采样。He-Ne 参考激光引入 FTSS,经 FTSS 调制产生 He-Ne 激光干涉信号,将激光干涉信号过零点脉冲作为采样时钟信号,对目标辐射干涉信号进行采样,而后经傅里叶变换,最终反演得到目标辐射光谱图。Brault 采样方法则主要偏向于软件算法研究,该方法由 Brault.J.W 在 1996 年首次提出,并已经运用到一些傅里叶变换光谱仪中。Brault 方法利用双通道采样设备对参考激光干涉信号和目标辐射干涉信号进行同时过采样,使得激光和目标辐射采样时间间隔一致,之后利用激光干涉信号过零点信息,经自适应滤波算法,插值等操作,对目标辐射信号进行重采样,获得等光程差间隔采样干涉图数据,反演得到目标辐射光谱图。两种方法原理类似,采样过程中均不再依赖动镜的移动,而以参考激光干涉信号零光程差点作为采样标尺,与参考激光干涉条纹过零点触发采样相比,Brault 方法并不需要激光信号进行采样触发,而是对激光和干涉信号进行同步过采样,但对面阵 FTSS 来说,每秒需要采集千帧数据才能获得太阳三维数据(二维像,一维谱),显然 Brault 过采样方式会导致海量数据的产生,并不适合面阵 FTSS,因此在面阵 FTSS 原理样机中,主要采用参考激光干涉条纹过零点触发采

样方式。

## 3.2 可调等光程差间隔采样系统设计与实现

### 3.2.1 可调等光程差间隔采样系统设计

为减少动镜扫描过程中运动速度不均匀带来的光谱误差，面阵 FTSS 采用 He-Ne 稳频激光 ( $\lambda_{He-Ne} = 632.8nm$ ) 余弦干涉信号作为参考信号，来触发面阵 FTSS 数据采集系统对目标辐射进行干涉图采样。根据式 (2.22)，若采用 632.8nm 的稳频 He-Ne 激光器作为参考激光，直接利用参考激光余弦干涉信号过零检测最小光程差为 0.3164nm，此时通过离散傅里叶变换公式只能反演得到 632.8nm 以上的光谱范围。对于波长  $\lambda < 632.8nm$  的光谱测量，过零检测给出的等光程差间隔 0.3164nm 太大，导致面阵 FTSS 采集的干涉图欠采样，无法得到准确的光谱信息。若要得到 632.8nm 以下目标光谱，需要减小干涉图采样时的等光程差间隔，即需通过倍频来加大参考激光余弦干涉信号频率。而对于波长  $\lambda > 1265.6nm$  的光谱测量(如 AIMS 的 10-13  $\mu m$ )，特别是波长大于 2.5 $\mu m$  光谱辐射，如果仍然采用 0.3164nm 等光程差采样间隔，将导致面阵 FTSS 数据采集系统过采样。尽管基于过采样干涉图可以获得目标光谱辐射，但过采样并不会增加额外的光谱信息，且会导致干涉图数据量急剧增加，这势必加大数据采集系统压力，进而给干涉数据的实时采集、存储及后续光谱反演增加不必要的负担。此时，可以适度增加等光程差采样间隔，即通过分频来减小参考激光余弦信号频率。

表 3.1 列出了宽波段 FTSS 等光程差采样系统指标需求。观测目标光谱从地基可观测最短波长近紫外 300 nm，到光学望远镜可观测的 25 $\mu m$  中远红外波段。参考激光选择 632.8nm 氦氖稳频激光，激光余弦干涉信号频率跟动镜运动速度  $V$  相关(假设  $V = 0.6328mm/s$ ，参考激光余弦信号每周期对应 0.6328nm，信号频率 = 1KHz)，当光谱分辨率一定即最大光程差一定时，决定了获得一帧光谱图的时间分辨率。因 FTSS 每个等光程差位置均需要采集干涉图，所以参考激光余弦信号频率确定还与探测器帧频相关，对于红外波段 320x256 面阵探测器，帧频约在 100 帧/s；对于紫外-可见-红外点源探测器，帧频可高达千帧每秒。综上考虑，参考激光余弦信号频率设定为 200Hz-5KHz。若采集 300nm 波长，根据式 (2.22)，需要的最大等光程差间隔最小为 150nm，对应 1/5 参考激光波长，需要 1-5 倍频。采集 25  $\mu m$  目标波长，光程差间隔为 12.5 $\mu m$ ，对应约 20 个参考激光波长，即分



频需要满足 1-20 倍。

表 3.1 宽波段 FTSS 等光程差采样系统基本指标需求

参考激光波长	632 nm
参考激光余弦干涉信号频率	200 Hz-5 KHz
观测波长	300 nm-25 $\mu$ m
倍频数	1-10 倍
分频数	1-20 倍

因此我们提出了一套基于数字分倍频的宽波段 FTSS 等光程差间隔采样系统。用户可以根据实际光谱观测需求，对参考激光的触发采样间隔  $\Delta d$  进行动态调整，以实现目标辐射的干涉信号进行最优等光程差间隔采样，在获得目标波段光谱辐射同时获得最佳的时间分辨率。

图 3.2 为宽波段等光程差间隔采样系统设计框图，该系统由过零检测模块、数字分倍频模块以及控制模块组成。动镜运动过程中，He-Ne 稳频激光经干涉仪调制，获得的参考激光余弦干涉信号，过零检测模块首先对激光干涉信号进行滤波、去除直流信号、放大、过零点检测等处理，整形成分、倍频模块方波输入信号  $f_{in}$ ，数字分频、倍频模块根据实际光谱测量需求，选择对输入信号进行分频或倍频处理，获得相应采样触发信号  $f_{out}$ ，触发 FTSS 数据采集系统对目标辐射干涉数据进行采集。控制模块则根据目标波长对  $\Delta d$  需求，用于对分频或倍频功能进行选择和控制。

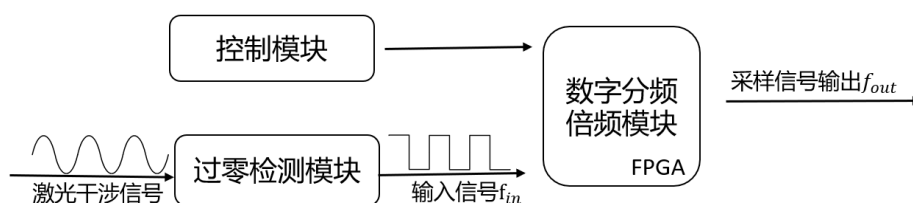


图 3.2 宽波段等光程差间隔采样系统设计框图

### 3.2.2 参考激光干涉信号检测

FTSS 以参考激光余弦干涉信号为标尺，以零光程差位置为间隔进行采样，即在激光干涉余弦信号过零点处进行触发采样。这意味着，要实现精确的零光差

位置采样，首先要实现精确的参考激光余弦干涉信号过零点检测。

在本课题的面阵 FTSS 太阳光谱观测系统设计中，以国家天文台怀柔基地 Bruker IFS-125HR 傅里叶变换光谱仪作为平台（IFS-125HR 为以迈克尔逊干涉仪为核心的时间调制型傅里叶变换光谱仪，采用点源探测器进行光谱观测，在 5.1.2 节对该平台有更详细介绍）。He-Ne 稳频激光经过 IFS-125HR 调制，产生激光余弦干涉信号，信号输出波形如图 3.3 黄色波形所示，通过对该余弦干涉信号精确过零点识别检测，来实现 FTSS 数据采集系统等光程差间隔采样。

从图 3.3 中可以看到，该余弦激光干涉信号波峰电压 3.6V，波谷电压 -5.76V，根据 FTSS 原理可知，经 IFS-125HR 调制后的参考激光余弦干涉信号中存在 1.38V 左右的直流信号。同时，可以看到，该信号还存在一个明显的高频干扰信号，在技术上粗略抵消直流信号影响后，得到图 3.3 中蓝色波形，发现该高频干扰信号恰好位于 0V 左右位置附近，为保证过零点识别的准确性和精度，需要我们首先对激光余弦信号进行滤波，滤除参考激光干涉信号中低频和高频干扰信号，再对信号进行过零点检测。而且，根据面阵 FTSS 数据采集系统原理样机中探测器对触发信号要求（探测器触发电路如图 3.4：触发信号应满足电压 4.5V-7.5V、电流 6-12mA、触发最小脉宽 200ns，参考 4.2.3 节数据采集系统探测器指标），因此还需要对检测到的过零信号进行整形，以满足探测器触发采集需求。

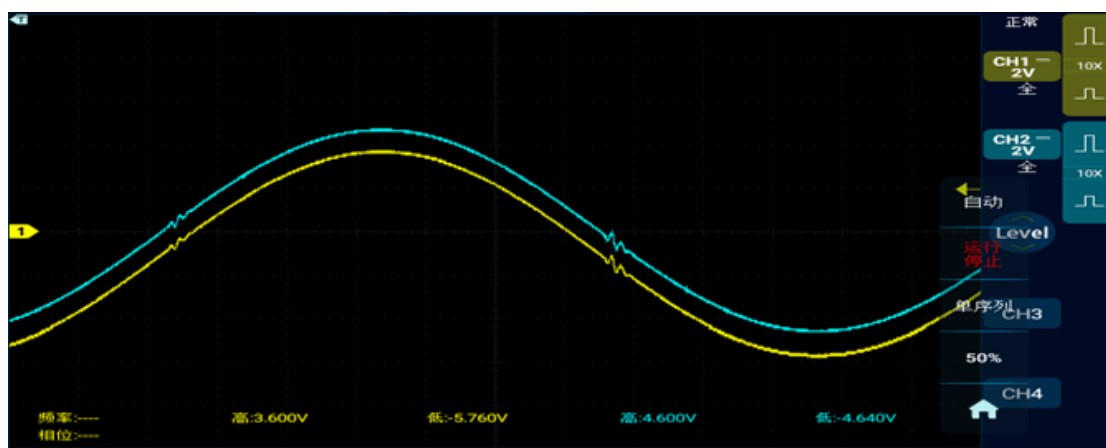


图 3.3 经 IFS-125HR 调制后的参考激光余弦干涉信号

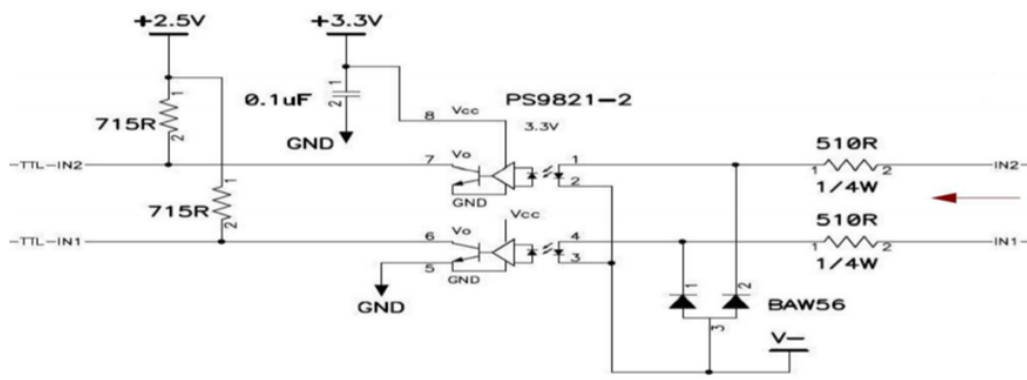


图 3.4 面阵 FTSS 数据采集系统探测器触发电路

图 3.5 显示了 He-Ne 激光过零触发模块的工作原理。He-Ne 激光经面阵 FTSS 调制，得到含有直流分量的激光余弦干涉信号；经前处理，滤除直流及高频干扰信号，得到 He-Ne 激光干涉信号的交流余弦信号；然后经电压比较器进行过零检测，产生同频方波信号；进一步将方波信号整形为过零脉冲触发信号，触发探测器对目标辐射干涉信号的进行采集。而过零脉冲信号的间隔对应于目标辐射干涉信号的等光程差间隔，从而实现目标辐射的等光程差间隔采样。

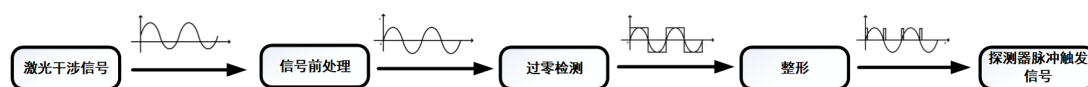


图 3.5 He-Ne 激光过零触发模块的工作原理

在过零模块设计过程中，为制定合理的检测方案，确定合适的电路设计，加快设计流程，节约时间和资源，我们首先采用 Multisim 软件进行了电路仿真设计。Multisim 是一款计算机辅助设计软件，借助 Multisim 虚拟软件平台，搭建过零检测核心仿真电路，对过零检测模块进行仿真设计。通过仿真设计，确定了以 LM311 为主检测芯片构造比较电路的主检测方案，LM311 是一种灵活的线性电压比较器，响应时间在 100ns 左右，仿真过程中发现，对 LM311，当输入信号幅值、频率越低时，越有可能会在输出端产生高频震荡，通过在 Multisim 中不断进行迭代仿真设计，选出合适器件，并在信号输出端上拉电阻两端，并联一组合适电容，可有效减弱或消除这种震荡效应。其仿真电路如图 3.6 所示，对该电路输入 10KHz,  $V_{pp} = 5V$  的模拟输入信号，得到 3.7 左图所示触发信号，可以看到，设计的过零检测仿真电路可对输入模拟激光余弦干涉信号中每个过零点实现有效检测，通过 3.7 右图触发信号位置放大图可以看到，仿真电路过零检测误

差  $< 3\mu\text{s}$ ，符合过零检测模块要求。

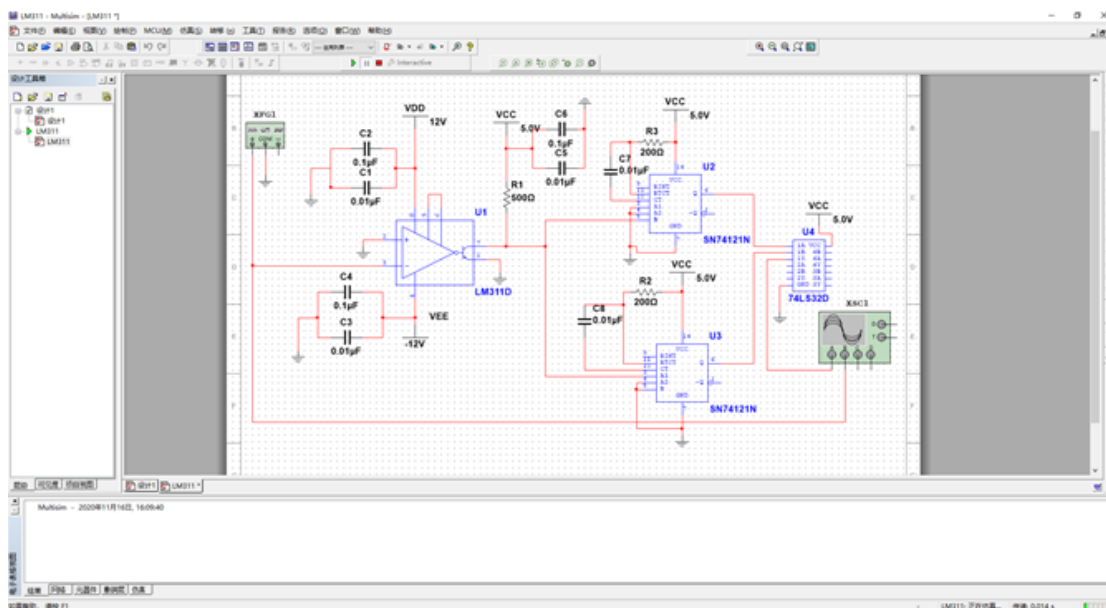


图 3.6 参考激光余弦干涉信号过零检测模块主检测电路 Multsim 仿真

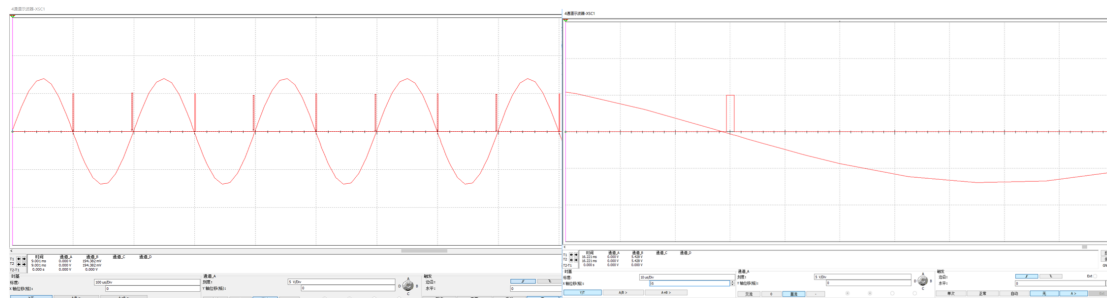


图 3.7 过零检测模块主检测电路仿真结果

通过对过零检测模块需求分析及主检测方案的仿真分析，采样 Cadence 电路设计软件，实现了激光干涉信号过零检测模块，图 3.8-a 为过零检测模块中，参考激光余弦干涉信号滤波电路，主要用于滤除激光余弦干涉信号中低频直流分量和高频干扰信号。滤波电路中，高通滤波器为一个二阶无源高通滤波器，低通滤波电路由两个二阶巴特沃思有源低通滤波器组成。通过高通滤波，参考激光余弦干涉信号中的直流分量被滤除；通过低通滤波，参考激光经 IFS-125HR 调制后，在过零点附近产生的高频干扰信号被滤除。经过滤波电路，参考激光余弦干涉信号变得更平滑，更有利于保证后续过零检测的精度。3.8-b 为过零检测模块核心电路。该部分电路以 LM311 为主检测芯片，对激光干涉交流信号中的过零点信号进行检测，获得同频方波信号；而为满足面阵 FTSS 数采系统原理样机

中，2M360MCL 型号 CMOS 相机触发采集需求。74LS121、74LS32 对方波信号进一步整形，产生 5.2V、9mA，频率  $f=10\text{KHz}$ ，脉宽  $2.7\mu\text{s}$  的精确过零脉冲触发信号，用于数据采集系统对目标辐射干涉信号进行采集。图 3.8-c 为完成的过零检测模块实物图。利用 IFS-125HR 对稳频激光进行调制，产生的激光余弦干涉信号接入过零检测模块，通过示波器对模块各阶段输出信号进行检测，得到图 3.9所示结果，其中图 3.9-a 为黄线为低频滤波后信号，绿线为高通滤波后信号，可以看到经 IFS-125HR 调制后产生的激光余弦干涉信号中，直流及高频干扰信号均被有效滤除；图 3.9-b 黄线为滤波后的信号，绿线为过零检测得到的方波信号；图 3.9-c 绿线为滤波后的信号，黄线为对方波信号整形后得到的触发信号，用于触发数据采集系统对目标辐射干涉图进行采样。可以看到，在每个参考激光余弦干涉信号过零点位置，均能准确产生有效触发信号，整体触发脉冲频率达  $10\text{KHz}$ ，满足数据采集系统触发需求，图 3.9-d 则为触发信号放大示意图。

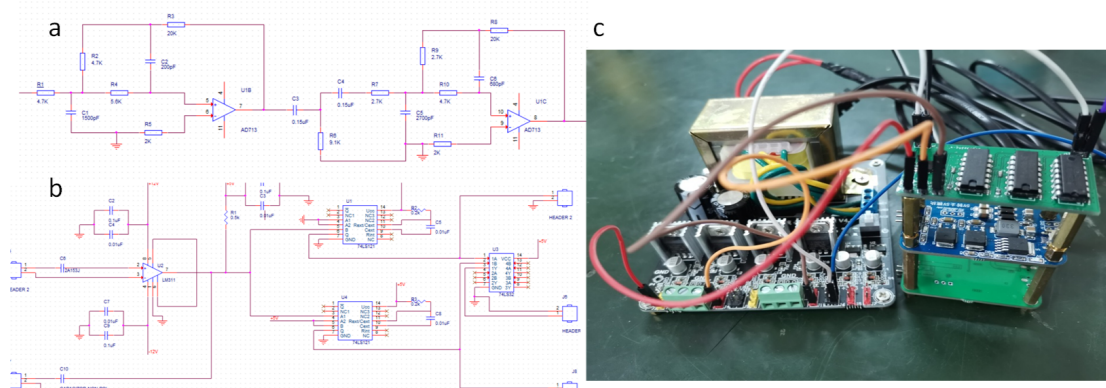


图 3.8 a 滤波电路、b 主检测电路、c 过零检测模块实物图

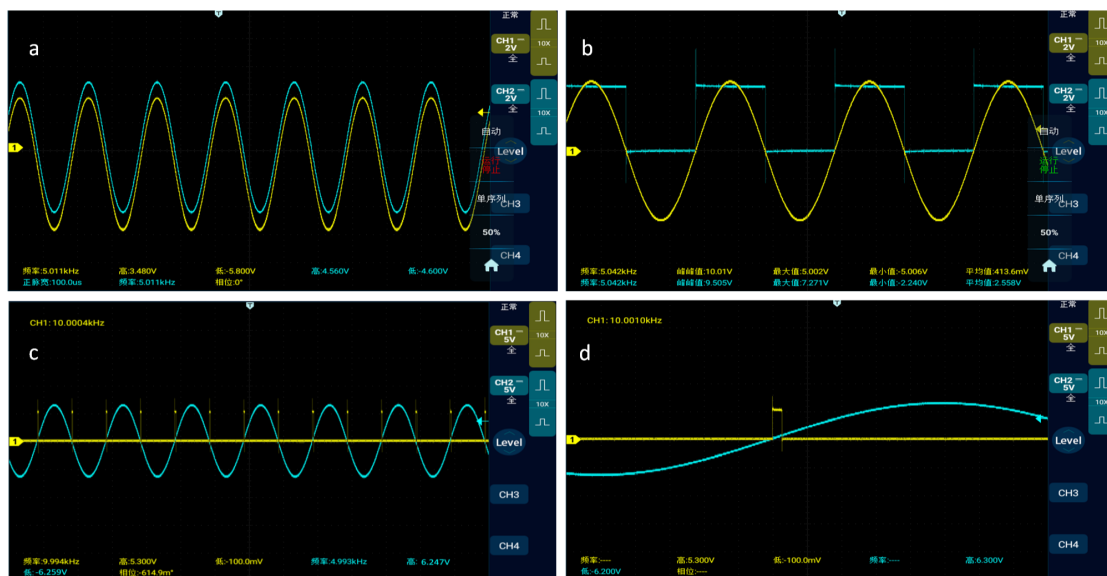


图 3.9 a 参考激光余弦干涉信号滤波后信号、b 过零检测后输出波形、c 整形后触发电路、d 触发信号放大示意图

### 3.2.3 数字分、倍频器

根据表 3.1 中宽波段 FTSS 等光程差采样系统指标需求，采样系统观测波长从 300nm 至 25 $\mu$ m，需对参考激光余弦干涉条纹过零检测信号倍频 1-10 倍，分频 1-20 倍，传统硬件分频、倍频方式，对频率变化较快的信号跟踪速度慢，不能快速锁定输入信号，且精度易受环境温度，元器件性能影响，输出信号可靠性易受影响，因此，我们基于 FPGA 技术，采用全数字分频、倍频方案，来实现采样系统对宽波段光谱观测的需求。

#### 3.2.3.1 数字分、倍频基本原理

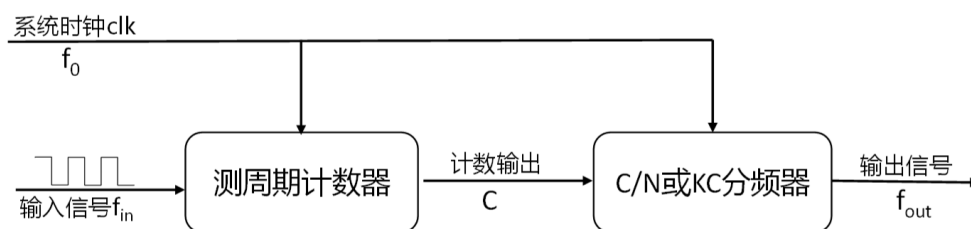


图 3.10 数字分、倍频原理

图 3.10 为数字分频、倍频原理框图。参考激光经 FTSS 调制，产生余弦干涉信号，经过零检测模块，整形为同频参考激光输入信号  $f_{in}$ ，测周期计数器利用系统标准时钟  $f_0$  对输入信号  $f_{in}$  进行频率测量，获得输入信号  $f_{in}$  周期计数值

C, 则有:

$$C = \frac{f_0}{f_{in}} \quad (3.2)$$

其中  $f_0$  为系统标准时钟频率,  $f_{in}$  为输入参考激光过零输入信号频率, C 为测周期计数器计数值。

若对输入信号  $f_{in}$  进行 K 分频, 则有:

$$C = \frac{f_{in}}{K} \quad (3.3)$$

其中  $f_{out}$  为输出采样信号频率。根据式 (3.2) (3.3) 有:

$$f_{out} = \frac{f_0}{KC} \quad (3.4)$$

通过对系统标准时钟 clk 进行 KC 分频, 即可实现输入信号  $f_{in}$  的 K 分频。

若对输入信号  $f_{in}$  进行 N 倍频, 则有:

$$f_{out} = N \cdot f_{in} \quad (3.5)$$

根据式 (3.2) (3.5) 有:

$$f_{out} = f_0 \cdot \frac{N}{C} \quad (3.6)$$

通过对系统标准时钟 clk 进行 C/N 分频, 即可实现对对输入信号  $f_{in}$  的 N 倍频。由式 (3.3) (3.6) 可知, 对输入参考激光干涉信号  $f_{in}$  的分频、倍频问题最终均归结为对系统标准时钟的分频问题 (王宇等, 2013)。

### 3.2.3.2 误差分析

#### (1) 测周期计数器及截断误差

由式 (3.3) 可知, 在宽波段 FTSS 等光程差间隔的采样系统中, 数字分频误差主要来源于测周期计数器计数值 C 的误差; 根据式 (3.6) 可知, 在数字倍频中, 误差一方面来源于测周期计数器计数值 C 的误差, 另一方面由于 FPGA 实现电路中, 系统标准时钟 CLK 的分频系数只取 C/N 的整数商, 舍弃了 C/N 整除后的余数部分, 这导致数字倍频过程中截断误差的产生。这种截断误差使得每个输出采样信号都存在一个误差  $\delta t$ , 设 C/N 的整数商为 R, 余数为 S, 与理想输出采样信号相比, 每个输出采样信号周期都存在误差:

$$\Delta t = \frac{C}{f_0 N} - \frac{RN}{N f_0} = \frac{S}{N} T_0 \quad (0 \leq S \leq N) \quad (3.7)$$

其中  $T_0 = \frac{1}{f_0}$  为系统时钟周期。则在单输入信号周期内，随着时间的推移，输出采样信号触发位置误差将不断累积，即输出采样信号的触发位置存在误差累积效应，当  $S=N-1$  时，第  $N$  个输出采样信号将出现最大触发位置误差：

$$\Delta t_{max} = (N - 1)T_0 \quad (3.8)$$

这导致实际采样时刻与等光程差间隔采样时刻存在误差，且这种误差存在累积效应，在最后一个输出采样信号时误差达到最大，如图 3.11 所示。采样时刻误差带来非等光程差采样，这无疑会影响 FTSS 反演光谱的波长位置精度，需要采用合适方法规避数字倍频引入的误差累积效应。

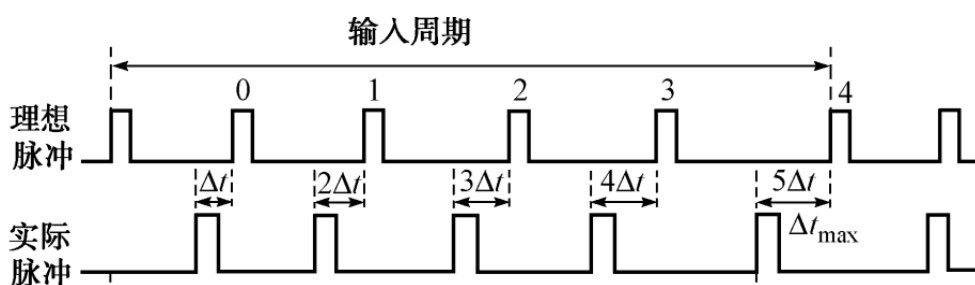


图 3.11 触发脉冲位置误差

## (2) 触发位置误差对光谱反演的影响

FTSS 在理想情况下，反演光谱分布：

$$B(\sigma) = \int_{-L}^L I(x) \cos(2\pi\sigma x) dx \quad (3.9)$$

假设 FTSS 在采样过程中，采样时刻位置误差为  $\Delta t$ ，造成的相位误差  $\Delta\theta$  为：

$$\Delta\theta = 2\pi \cdot \Delta t \cdot \lambda \quad (3.10)$$

其中  $\lambda$  为参考激光波长。则实际测量反演得到的光谱分布：

$$B'(\sigma) = \int_{-L}^L I(x) \cos(2\pi\sigma x + \Delta\theta) dx \quad (3.11)$$

根据离散采样原理，(3.9)、(3.11)改写为：

$$B(\sigma) = \sum_{n=0}^N I(n\lambda) \cos(2\pi\sigma n\lambda) \quad (3.12)$$

$$B'(\sigma) = \sum_{n=0}^N I(n\lambda) \cos(2\pi\sigma n\lambda + \Delta\theta) \quad (3.13)$$



其中  $N$  为采样离散采样次数  $N = \frac{2L}{\lambda}$ 。根据误差理论，触发位置误差对光谱反演造成的相对误差：

$$\begin{aligned} e_r(\sigma) &= \frac{B'(\sigma) - B(\sigma)}{B'(\sigma)} \\ &= 1 - \frac{B(\sigma)}{B'(\sigma)} \end{aligned} \quad (3.14)$$

结合 (3.12)、(3.13)、(3.14) 有：

$$\begin{aligned} e_r(\sigma) &= \frac{\sum_{n=0}^N I(n\lambda) \cos(2\pi\sigma n\lambda + \Delta\theta) - \sum_{n=0}^N I(n\lambda) \cos(2\pi\sigma n\lambda)}{\sum_{n=0}^N I(n\lambda) \cos(2\pi\sigma n\lambda + \Delta\theta)} \\ &= \frac{\sum_{n=0}^N \cos(2\pi\sigma n\lambda + \Delta\theta) - \sum_{n=0}^N \cos(2\pi\sigma n\lambda)}{\sum_{n=0}^N \cos(2\pi\sigma n\lambda + \Delta\theta)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

FTSS 在实际光谱测量过程中，由于参考氦氖激光波长及采样时刻位置误差较小，由此引起的相位误差  $\Delta\theta$  值趋近于 0，因此， $\cos \Delta\theta \approx 1$ ，那么 (3.15) 可改写为：

$$e_r(\sigma) = \frac{\sum_{n=0}^N \sin(2\pi\sigma n\lambda) \sin(2\pi\Delta t\lambda)}{\sum_{n=0}^N \cos(2\pi\sigma n\lambda) - \sum_{n=0}^N \sin(2\pi\sigma n\lambda) \sin(2\pi\Delta t\lambda)} \quad (3.16)$$

式 (3.16) 即为采样时刻位置偏差引起的反演光谱相对误差，它是关于采样时刻位置偏差  $\Delta t$  目标辐射波数  $\sigma$ 、参考激光波长  $\lambda$ 、总采样次数  $N$  的函数。

假设参考激光为  $\lambda_{HeNe} = 632.8nm$ ，观测波长  $\lambda_{H\alpha} = 656.3nm$ ，则波数  $\sigma_{H\alpha} = 1/\lambda_{H\alpha} = 15236.9cm^{-1}$ ，在采样时刻位置偏差在 0-3us 范围内，根据公式 (3.16) 得到如图 3.12 仿真图形。

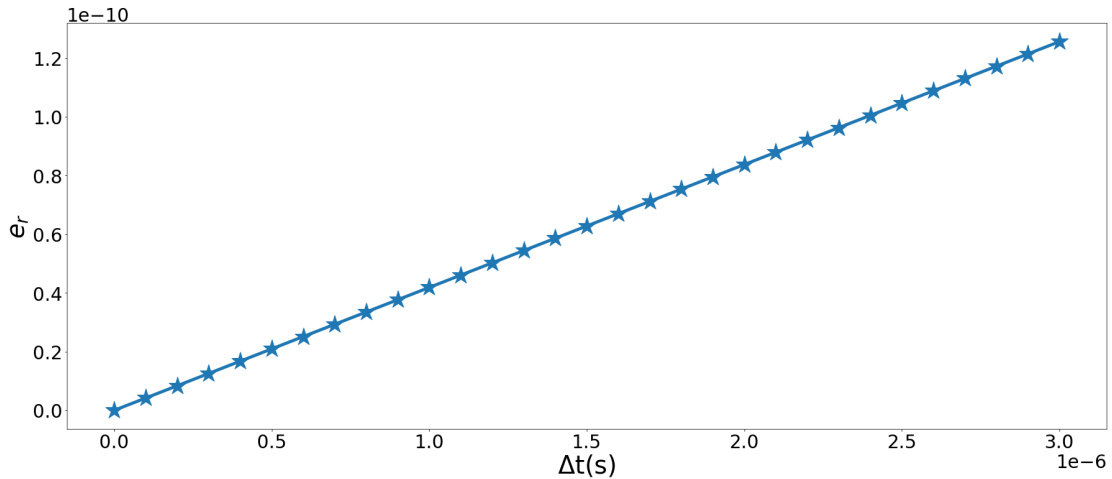


图 3.12 触发位置误差引起的反演光谱相对误差

在图中，横坐标表示采样时刻偏差值，纵坐标表示引起的反演光谱相对误差。可以看到，随着采样时刻偏差值变大，反演光谱相对误差变大，两者近似于线性关系，

### 3.2.3.3 数字分、倍频器模块设计

根据数字分倍频原理，基于 FPGA 技术，在 Quartus II 软件环境下，我们利用 Verilog HDL 硬件描述语言进行编程，设计了宽波段 FTSS 等光程差采样系统分频、倍频模块。图 3.13 为数字分、倍频器模块。图中分频模块由测周期计数器、乘法电路、分频电路组成，倍频模块由测周期计数器、累加计数电路、除法电路、补偿控制电路、分频电路组成。

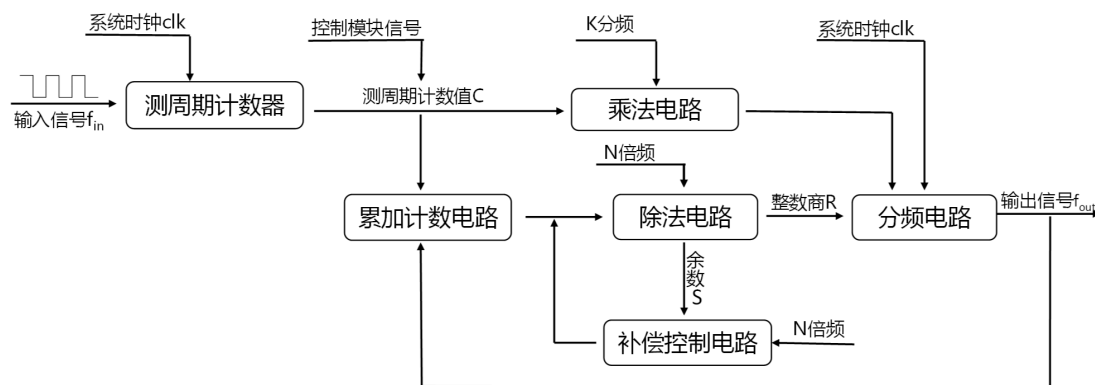


图 3.13 数字分、倍频器模块

FTSS 对稳频参考激光进行调制，产生的激光干涉信号经过零检测模块，整形成同频方波输入信号  $f_{in}$ ；测周期计数器利用系统标准时钟对输入信号进行同步频率测量，获得输入信号  $f_{in}$  相对于系统时钟  $clk$  的周期的计数值  $C$ 。由公式 (3.2) 可知，系统标准时钟频率  $f_0$  决定了测周期计数器测量值  $C$  的精度，通过提高系统标准时钟频率可有效提高测周期计数器计数值精度，同时进一步提高了分频系数的精度。

### 3.2.3.4 同步测周期模块

同步测周期模块用于对输入信号频率进行测量。测周期计数器利用系统标准时钟对输入信号进行同步频率测量，获得输入信号  $f_{in}$  相对于系统时钟  $clk$  的周期的计数值  $C$ ，进行换算就可得到输入信号频率。同步测周期模块首先通过一个 D 触发器对输入信号进行同步，然后经过二分频，产生的信号用作计数器门控信号，在计数结束时，将获得的周期计数值锁存，并开始新的计数周期。其 RTL 描述如图 3.14 所示。

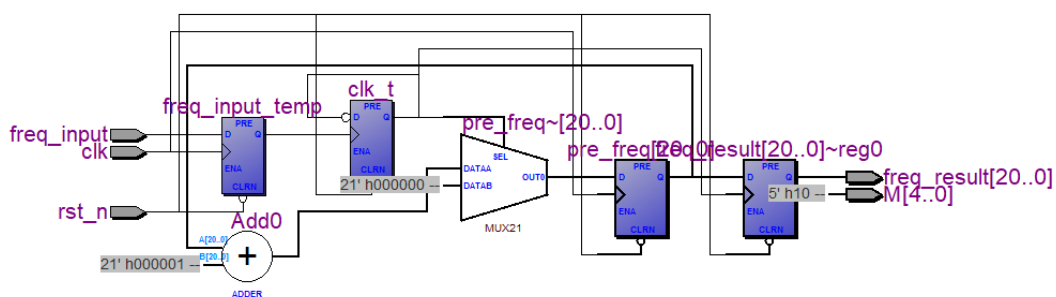


图 3.14 同步测周期模块 RTL 图

图 3.15为同步测周期模块仿真波形，clk 为仿真系统标准时钟，假设 clk 为 125MHz, freq\_input 为输入待测仿真信号，假设其频率 100KHz, freq\_result 为输出仿真信号频率计数值 C，可以看到，同步测周期计数器获得周期计数器值结果正确，结果符合设计要求

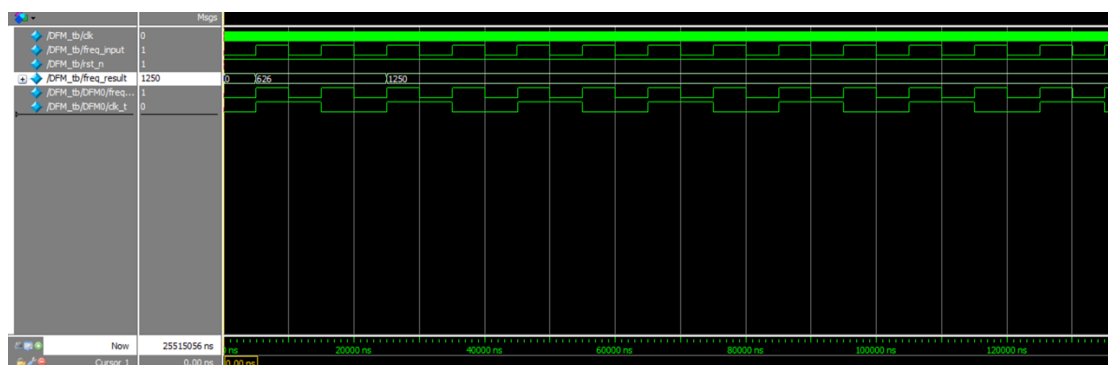


图 3.15 同步测周期模块仿真结果

### 3.2.3.5 分频器实现

分频模块利用乘法器获得系统标准时钟 clk 的分频系数 KC，通过分频电路对系统标准时钟 clk 进行 KC 分频，获得所需采样信号频率  $f_{out}$  输出。分频器主要包括测周期计数模块、乘法器模块、分频器模块构成。其分频模块 RTL 如图 3.16所示：

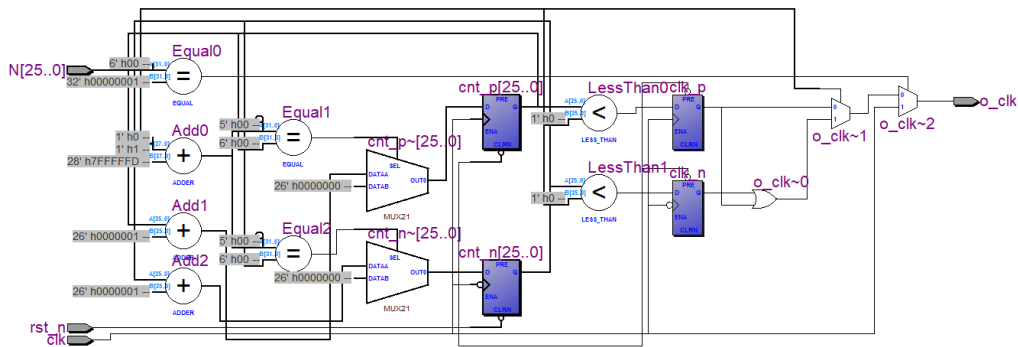


图 3.16 分频器 RTL 图

分别选取 5 分频和 10 分频对分频器进行仿真分析，仿真结果如图 3.17，其中 clk 为系统标准时钟，频率为 125MHZ，div 为分频倍数，o\_clk 为仿真输出频率信号。3.17上图为 5 分频，下图为 10 分频，可以看到，仿真结果均符合功能设计要求。

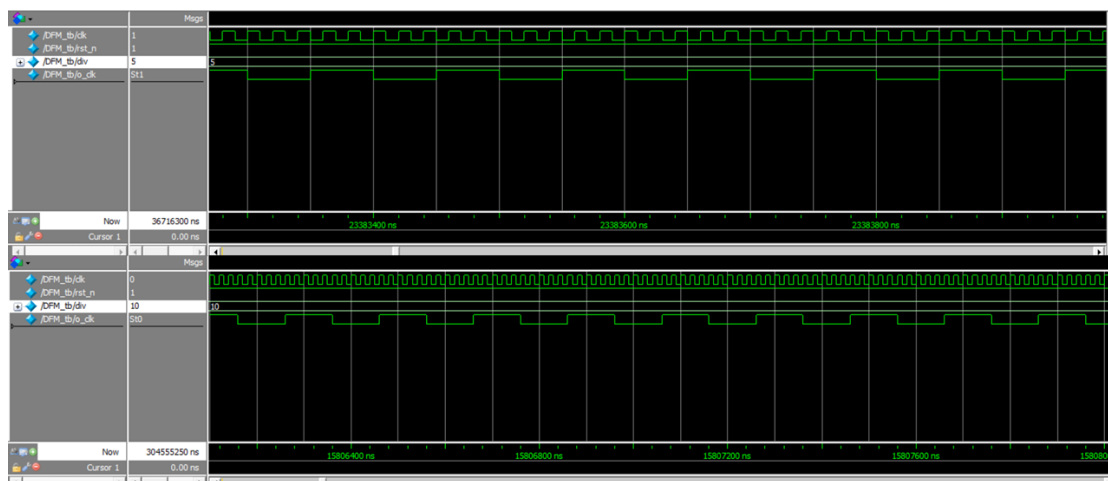


图 3.17 分频器仿真结果

### 3.2.3.6 倍频器实现

由于倍频过程中截断误差的存在，为保证 FTSS 等光程差间隔采样精度，我们提出一种分布式余数补偿方案来实现对输入激光干涉信号的倍频，基本思想是：将当前一参考激光干涉信号周期中，分频系数  $C/N$  的余数  $S$  通过均匀交叉，分布式补偿到下一输入信号周期中，从而补偿因  $C/N$  余数截断而引起的输出采样信号累积误差并改善其非均匀性。累加计数器对输出信号  $f_{out}$  进行计数，当计数器满  $N$  时，累加计数器重新载入测周期计数值  $C$ ，以此来解决输出采样信号

在输入信号周期内的误差累积效应问题；除法电路用于获得系统时钟分频系数，除法电路计算得到整数商  $R$  及余数  $S$ ，分频电路将整数商  $R$  作为系统标准时钟  $clk$  的分频系数，通过对系统标准时钟进行分频，获得所需倍频后采样输出采样信号  $f_{out}$ ；补偿控制电路，则将余数  $S$  分成  $S$  个 1，补偿到下一输入信号周期中，即  $N$  个输出采样信号将分成两部分： $S$  个含补偿且周期为  $\frac{R+1}{f_0}$  为采样信号， $N-S$  个周期为  $\frac{R}{f_0}$  采样信号。同时为改善输出信号的均匀性，在补偿控制电路中，采用分布式方法，将含补偿的  $S$  个输出采样信号交叉均匀的分布到  $N$  个输出采样信号中，即每第  $n = INT(\frac{N}{S})$  个输出采样信号，输出一个含补偿的周期为  $\frac{R+1}{f_0}$  的采样信号（其中  $INT()$  表示取整），其余输出采样信号周期为  $\frac{R}{f_0}$ 。若第一个输出采用信号周期为  $\frac{R}{f_0}$ ，输出的  $N$  个采样信号交叉均匀分布序列如表 3.2 所示：

表 3.2 分布式余数补偿采样信号序列

序号	1	2	.....	n	n+1	.....	2n	2n+1	.....
采样信号周期	$\frac{R}{f_0}$	$\frac{R}{f_0}$	.....	$\frac{R+1}{f_0}$	$\frac{R}{f_0}$	.....	$\frac{R+1}{f_0}$	$\frac{R}{f_0}$	.....

根据表 3.2，在单输入信号周期内，倍频模块中输出  $N$  个采样信号总周期：

$$T = S \frac{R+1}{f_0} + (N - S) \frac{R}{f_0} = \frac{RN + S}{f_0} = \frac{C}{f_0} = \frac{C}{f_{in}} = T_{in} \quad (3.17)$$

由式 (3.17) 可知，经过余数补偿后，输出的  $N$  个采样信号总的时间周期等于输入参考激光干涉信号时间周期，即：余数补偿方案以一个输入信号为周期消除了输出采样信号误差，解决了输出采样信号在输入信号周期内的误差累积效应。同时采样信号采用交叉均匀分布方式输出，使得每  $n$  个输出信号 ( $n = INT(\frac{N}{S})$ ， $INT()$  表示取整) 位置误差限定在一个系统标准时钟周期  $T_0$  内，与式 (3.8) 相比，输出采样信号在输入信号周期内，最大触发采样位置误差得到了显著改善。

### 3.2.3.7 仿真分析与实验验证

我们首先利用 Modelsim SE 仿真软件对数字分、倍频模块进行功能仿真验证。FPGA 系统标准时钟  $clk$  频率为  $f_0 = 50MHz$ ，分别选取 4 倍频、16 分频进行功能仿真验证，图 3.18、图 3.19 分别为 4 倍频、16 分频的仿真结果，图中  $clk$  为 FPGA 标准时钟， $restart$  为系统重启信号， $SignalInput$  为模拟的方波输入信号  $f_i n$ ， $SignalOutput$  为输出的目标采样信号。从图 3.18 红线标记周期范围内的仿真波形可以得到，在一个输入信号周期内，产生了 4 个周期输出信号，满足 4 倍频

功能需求；从图 3.19 的红线标记周期范围内仿真波形可以得到，在 16 个输入信号周期内，产生了 1 个周期输出信号，满足 16 分频功能需求。因此宽波段 FTSS 等光程差采样系统功能仿真满足需求，设计可行。

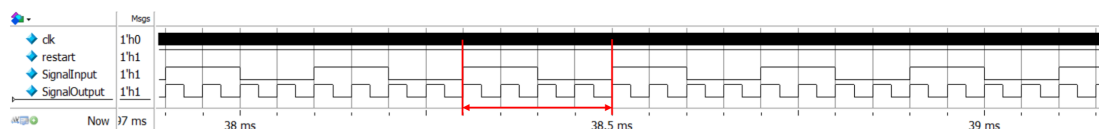


图 3.18 4 倍频仿真结果

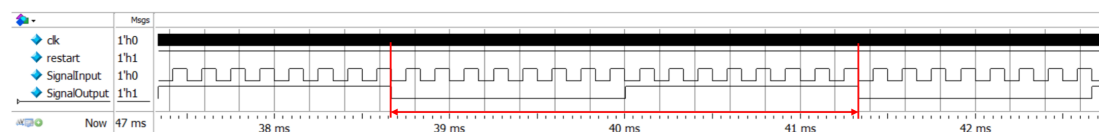


图 3.19 16 分频仿真结果

经 Modelsim SE 软件仿真论证后，我们采用 ALtera 公司的 Cyclone 系列现场可编程门阵列 (FPGA) EP4CE30F23C8L，FPGA 系统标准时钟频率为  $f_0 = 50\text{MHz}$ ，分别选取 4 倍频、16 分频对宽波段 FTSS 等光程差采样系统进行实验验证。将宽波段 FTSS 等光程差采样系统软件程序下载固化到 FPGA 中，信号发生器模拟方波输入信号  $f_i n$ ，频率为 5KHz，示波器对输出采样信号进行实时监测。图 3.20、图 3.21 分别为示波器监测到的 4 倍频、16 分频后的输出信号。从图 3.20 红线标记周期范围内实测结果可以得到，在一个输入信号周期内 (蓝色方波)，产生了 4 个周期输出信号 (黄色方波)，满足 4 倍频功能需求；从图 3.21 红线标记周期范围内实测结果可以得到，在 16 个输入信号周期内 (蓝色方波)，产生了 1 个周期输出信号 (黄色方波)，满足 16 分频功能需求。从倍频、分频输出信号监测结果可以看出，宽波段 FTSS 等光程差采样系统满足设计功能需求。

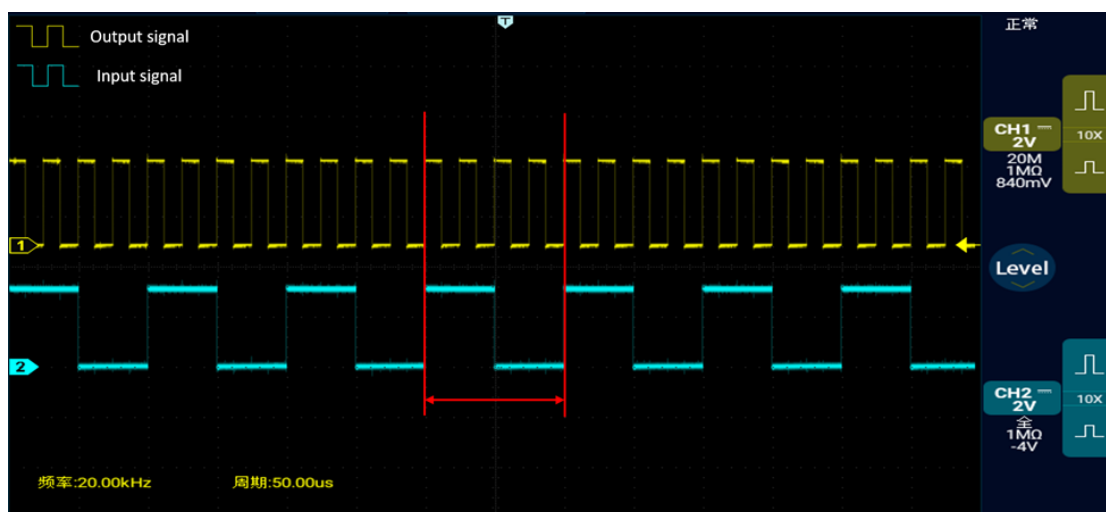


图 3.20 4 倍频测试结果

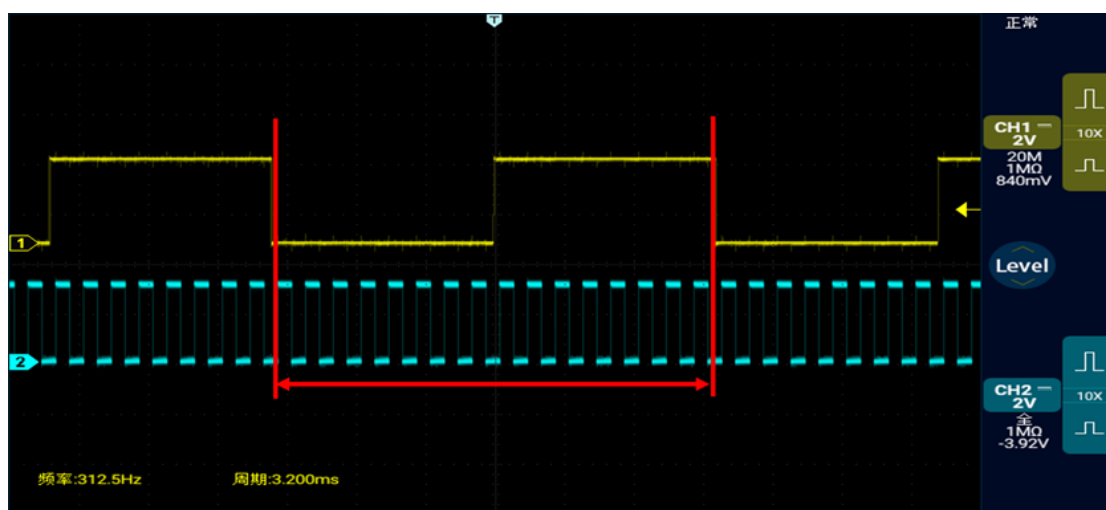


图 3.21 16 分频测试结果

### 3.3 系统测试与结果

针对不同输入信号频率,不同分频、倍频条件下的采样需求,对宽波段 FTSS 等光程差采样系统性能进行了整体验证测试。表 3 为宽波段 FTSS 等光程差采样系统在不同频率、分倍频数情况下示波器获得的输出采样信号频率实测值:

从表 3 实验结果可以得到,宽波段 FTSS 等光程差采样系统在  $\lambda > 1266nm$  光谱测量时,即系统采用分频时,获得输出采样信号频率精度较高,与理想输出信号频率相比,系统最大频率误差为  $\delta \leq 0.005\%$ ;在  $\lambda < 632nm$  光谱测量时,即系统采用倍频时,获得的输出采样信号与理想输出采样信号相比,系统测试最大频率误差  $\delta < 0.04\%$ 。

表 3.3 不同输入信号频率及分频、倍频条件下输出采样信号频率值

		输入信号频率 (KHz)						
		1	5	20	50	80	100	
分频数 K	2	0.500002	2.50001	10	25.0001	40.00002	50.0003	输出信号频率测量值 (KHz)
	3	0.333335	1.66667	6.6667	16.6667	26.6668	33.3335	
	4	0.250001	1.25	5.00003	12.5	20.0001	25.0001	
	5	0.20001	1	4.00002	10	16	20.0001	
	10	0.1	0.5	2.00001	5.00002	8.00004	10	
	15	0.066667	0.333335	1.33334	3.33334	5.33336	6.66668	
	20	0.05	0.250001	1	2.50001	4.00002	5.00002	
倍频数 N	2	2.00001	10	40.003	100	160	200.001	
	3	3.00001	15	60.0003	150	240.001	300.001	
	4	4.00002	20.001	80.0004	200.0121	320.004	400.002	
	5	4.99993	25.9971	99.9032	249.587	399.998	497.532	
	7	7.00026	35.0152	140.394	350.006	560.214	701.742	
	10	10	50.003	200.1	500.004	793.637	1000	

### 3.4 本章小结

本章主要介绍了面阵傅里叶变换太阳光谱仪宽波段等光程差间隔采样系统的研制。宽波段等光程差间隔采样系统采用参考激光余弦干涉条纹过零点信号作为触发采样标尺，以国家天文台怀柔太阳观测基地现有的 IFS-125HR 傅里叶变换光谱仪为实验平台，结合后续面阵 FTSS 太阳光谱指标需求，对该采样系统进行了分析设计。系统由过零检测模块、FPGA 数字分倍频模块、控制模块共同组成，过零检测模块以 LM311 电压比较芯片为核心，实现参考激光余弦干涉信号过零快速精确检测。通过 FPGA 数字分倍频设计，利用分布式余数补偿方法，解决了在参考激光干涉信号倍频过程中，输出采样信号在输入信号周期内误差累计效应问题，并降低了输出采样信号误差及非均匀性，经测试系统最大频率误差  $\delta < 0.04\%$ ，初步实现并满足面阵 FTSS 对 300 nm–25  $\mu\text{m}$  宽波段光谱观测数据采集需求。



## 第4章 高速数据采集系统

### 4.1 采集系统技术参数与结构

#### (1) 数据采集系统的特点

表 4.1 列出了在太阳光谱实验中，面阵 FTSS 采集系统的科学指标需求。限于当前条件，太阳光谱实验方案以国家天文台怀柔太阳观测基地的布鲁克 IFS-125HR 傅里叶变换光谱仪为平台设计，观测目标谱线为 H $\alpha$  宽色球线，波长  $\lambda_{H\alpha} = 656.3nm$ ，参考激光采用 He-Ne 激光，波长  $\lambda_{He-Ne} = 632nm$ 。因 IFS-125HR 动镜最小扫描速度为 5kHz（余弦信号周期），根据式 (2.22)，观测系统采样间隔应为激光参考余弦信号 1/2 周期，对应探测器帧频应  $\geq 10kHz$ 。意味着面阵傅里叶变换太阳光谱仪在 1s 时间内需采集万余帧干涉像，进而才能反演获得光谱图。可见，其数据采集系统具有触发频率高、采集速度快、数据量大的特点。

表 4.1 面阵 FTSS 采集系统基本指标需求

科学指标		目标波长	$\lambda_{H\alpha} = 656.3nm$
		时间分辨率	$< 40s$
		光谱分辨率	$< 0.1nm$
		面阵大小	$> 20 \times 20$
数采系统指标	过零触发模块指标	光程差	$\leq 328nm$
		每周期触发次数	2
		触发频率	10KHz
		触发方式	脉冲触发
	探测器指标	探测器数据格式	8bit
		探测器最小像素	80 x 20
		探测器采集帧率	$> 10KHz$
		数据量	$> 400M/s$

#### (2) 数据采集系统方案

由于面阵 FTSS 高帧率、大数据量的显著特点。因此，如何实现面阵傅里叶变换太阳光谱仪大量干涉数据的高速、连续、实时采集存储成为其能否研制成功

的关键技术之一。在上面对数据采集系统关键指标科学分析的基础上，我们开展了面阵傅里叶变换太阳光谱仪数据采集系统设计。图 4.1 显示了面阵傅里叶变换太阳光谱仪数据采集系统设计方案框架。数据采集系统由过零触发模块、CMOS 相机、数据采集卡、高速存储介质等硬件及数据采集控制软件组成。首先，过零触发模块对经傅里叶变换光谱仪调制后的参考激光干涉信号进行精确的过零点检测，进而产生脉冲触发信号，触发 CMOS 相机进行等光程差间隔采样，数据采集卡则将采集到的干涉图数据，传输至数据存储介质进行实时存储，而数据采集控制软件则对整个采集流程进行控制。

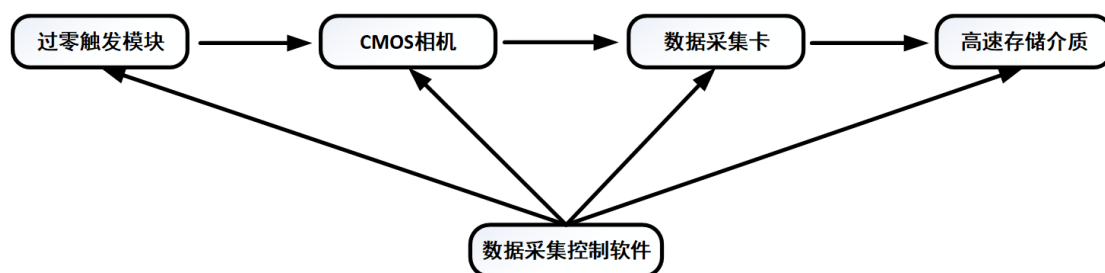


图 4.1 数据采集系统方案框架

## 4.2 探测器

### 4.2.1 CCD 与 CMOS

自 1960s，美国科学家威拉德·波伊尔和乔治·史密斯发明 CCD 以来，CCD 广泛用于天文观测研究中。在太阳光谱成像观测中，电荷耦合器件（CCD）、互补金属氧化物半导体（CMOS）是最主要的两种终端器件，两种器件的图像生成机理和工作流程基本一致，均以光电效应为基础，将光信号转换成电信号，以电压形式输出，其工作过程如图 4.2，光照射到 CCD 或 CMOS 上，产生光电子，光电子聚集形成电荷包，电荷包在像素点之间转移，到达输出节点，电压测量电路通过对电荷进行测量，获得电荷电压值输出。两者所不同的是在电荷转移方式上，CCD 是以“逐行扫描”形式将电荷信号转移到输出放大器，转换成电压信号输出，而 CMOS 相机每个像素点都集成了一个模拟电路，在像素内电信号就转换成了电压信号，每个像素直接输出电压信号。如图 4.3 显示了 CCD、CMOS 像素输出过程。相比 CCD，CMOS 具有读出效率更高，动态范围更大的优势，更能满足太阳光谱成像中对高帧率需求，在太阳观测领域逐步得到使用。美国大熊湖天文台的 NST 红外成像磁谱仪 (Cao 等, 2005)，云南天文台 NVST 上的 705.8nm

的 TiO 和 340.5nm 的 G-band 观测 (向水源, 2016), 均已使用 CMOS 器件作为终端成像设备。

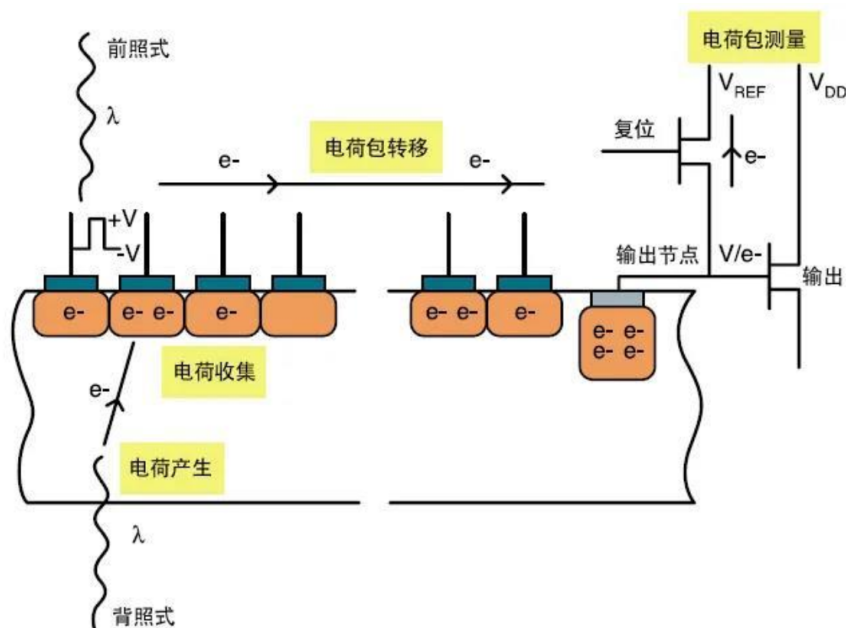


图 4.2 CCD、CMOS 相机工作原理 (Janesick, 2002)

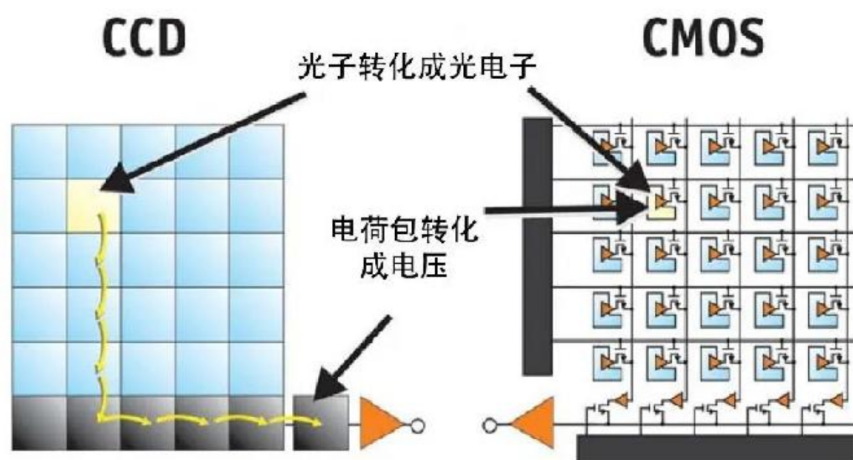


图 4.3 CCD、CMOS 像素值输出过程 (Litwiller, 2005)

#### 4.2.2 探测器重要技术参数

在多光谱太阳成像观测中, 探测器是 FTSS 最重要的组成部分之一, 与消费级相机不同, 科学级天文探测器往往具有更高的指标需求, 而且探测器帧率、像素单元尺寸、噪声、暗电流不均匀性、量子效应等关键指标都将直接影响 FTSS 干涉系统设计及获取的干涉数据质量。一般来说, CMOS 探测器主要性能指标有 (罗志远, 2019; 蔡云芳 等, 2014):

1. 缺陷像元：缺陷像元一般指探测器像元中响应表现过小、过大或没有响应、噪声过大等的像元，在生产制造过程中和使用过程中，都会产生。探测器中缺陷像元将会导致获取干涉图数据缺陷，影响光谱反演质量，在反演数据处理过程中，需要利用相关图像处理技术对其进行替代或处理。这些像元性能指标明显偏离平均值。在天文观测中规定：如果像元输出信号与所有像元输出信号平均值相差 10%，则判定为缺陷像元。

2. 系统增益和读出噪声：CMOS 探测器将光子信号转换成模拟电信号，通过量化成数字信号输出。增益表示 CMOS 探测器信号模数转换过程中的换算比值。多光谱太阳成像系统中，探测器噪声对 FTSS 对采集系统至关重要，探测器噪声过大，将湮没目标辐射信号，探测器将无法反映目标辐射信号的真实情况。探测器噪声主要包括：散粒噪声、读出噪声、固定模式噪声。考虑单个像元噪声，一般不包括固定模式噪声，散粒噪声与电荷信号的波动有关，读出噪声不随信号大小波动而改变，主要由传感器及其电子系统决定，因此 CMOS 相机噪声采用读出噪声来评估。

3. 响应不均匀性：在实际探测器制造过程中，因制造材料及工艺限制，探测器各像元间性能不可避免存在差异，导致各像元对目标辐射响应度存在差异，影响 FTSS 系统光谱准确度及分辨率。虽然这种非均匀性不能完全消除，但需要尽可能的减少。

4. 信噪比：探测器信噪比定义为：探测器输出测量电压信号与探测器全部噪声的比值，即  $SNR = S/D$ ，式中，S 为探测器测量信号值，D 为探测器测量总噪声。探测器信噪比是用于表征图像质量的重要指标之一。

5. 量子效应：量子效应指探测器光电转换的效率，反映了探测器对不同波长目标辐射响应的灵敏度。量子效应 QE 可表示为： $QE = QE_i \times n$  其中  $QE_i$  为光子吸收率，n 为光电转换效率。探测器传感器对不同波长有着不同的光子吸收率，对应不同的量子效率。

6. 暗电流：暗电流指探测器在完全无辐射入射的情况下，随机热电子在单位时间内产生的暗信号。暗电流大小还受到环境温度的影响，一般暗电流与温度成近似线性关系。

7. 线性度：线性度即探测器非线性误差，反映探测器输入与输出信号校准曲线与理想关系曲线之间的误差情况。在理想状态下，CMOS 探测器输出电压

与输入辐射成正比，探测器非线性会导致干涉数据的非线性，对光谱测量产生影响。

8. 帧率：帧率是指探测器每秒连续记录数据的帧数，是面阵 FTSS 用探测器最关键指标之一。面阵 FTSS 具有高帧率的特点，若帧率过慢，将使得采集过程中，部分数据丢失，造成采集数据不完整，导致反演光谱畸变，损失光谱信息。在面阵 FTSS 太阳光谱观测实验中，探测器最小帧率达 10Kfps，

### 4.2.3 探测器选择

在以 IFS-125HR 为实验平台的面阵 FTSS 太阳光谱观测实验中，根据表 4.1 高速数据采集系统对探测器指标的需求，选用 2M360MCL 型 CMOS 相机作为探测器。该探测器采用 CMOSIS CMV2000 传感器芯片，像素大小  $5.5 \times 5.5 \mu\text{m}^2$ ，最大分辨率 2048 x 1088，可根据实际应用需求自由选择窗口位置及大小，采用 Camera Link 传输接口，支持 Base、Medium、Full 传输模式。探测器帧率是数据采集系统最核心指标之一，该探测器在最大分辨率条件下，采用 8bit 数据格式，最大帧率为 340fps，随着开窗尺寸的减小，2M360MCL 帧率也将增大。理论计算，2M360MCL 探测器在采用 Full 传输模式、8bit 数据格式、20x80 窗口尺寸的条件下，探测器帧率可达 11kfps。同时，面阵 FTSS 原理样机以 Ha 宽色球线为目标波长，2M360MCL 探测器在该波段附近，量子效应为 50% 左右，如图 4.4 右图所示，该探测器整体性能符合面阵 FTSS 太阳光谱观测实验指标需求，可用于 Ha 宽色球光谱观测。如图 4.4 为 2M360MCL 探测器实物图及量子效应曲线。

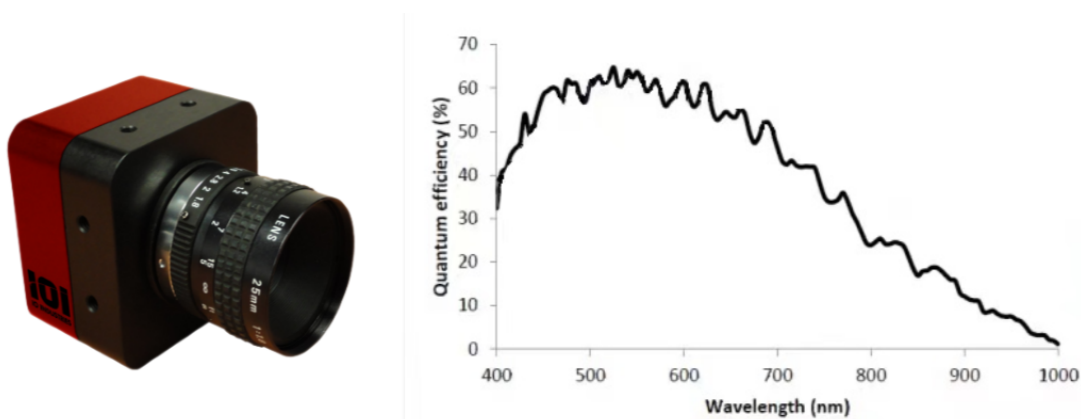


图 4.4 2M360MCL 探测器及量子效应

## 4.3 高速采集与存储

### 4.3.1 高速图像采集卡

图像采集卡是图像采集设备和图像处理设备的接口，对面阵 FTSS 高速数据采集系统来说，图像采集卡就是 CMOS 相机与采集计算机之间的接口。目标辐射经 FTSS，产生干涉信号，到达 CMOS 相机。由于光电效应，CMOS 相机将干涉光信号转换成模拟电信号，模拟电压信号经采集卡量化，转换成数字信号，存入计算机内存。传输接口采用探测器对应的 Camera Link 接口，Camera Link 采用低压差分信号 LVDS 传输，具有很高的数据采集速率，在 Full 模式下，最大传输速率可达 7.1Gb/s，并可通过中继的方式进行远距离传输。

太阳光谱观测实验，面阵 FTSS 高速数据采集系统采用 Teledyne Dalsa 公司的 X64 Xcelera-CL PX4 采集卡，该采集卡配备 128M 板载缓存，使用双通道 Camera Link 进行数据传输，最大采集速度可达 680 MB/s，可有效兼容 2M360MCL 探测器进行数据的采集传输。采集卡实物如图 4.5 所示

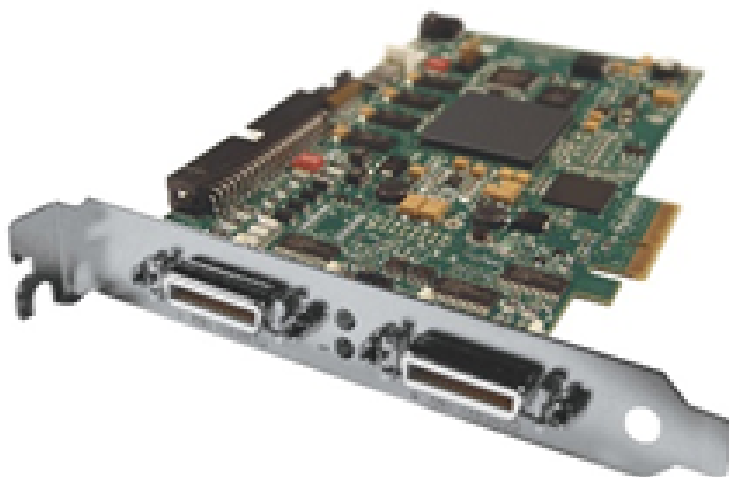


图 4.5 X64 Xcelera-CL PX4 采集卡

### 4.3.2 高速存储

根据太阳光谱观测实验中高速采集系统指标需求，探测器采集帧率  $\geq 10$  kHz，每秒将采集万余张干涉图，意味着系统需对高达  $>400$  MB/s 的数据进行连续、实时存储。基于采集系统对存储速度、容量的需求，结合经济成本考虑，采用磁盘

阵列 (RAID) 技术, 将 2 块 500 GB 固态硬盘 (SSD) 组成磁盘阵列, 作为数据采集系统高速存储介质。

磁盘阵列 (RAID) 技术可将多个 SSD 组成高速、大容量的外部存储组件。RAID 有着不同的等级方案, 不同等级 RAID 有着不同优缺点。在具体 RAID 方案选择时, 往往根据不同使用需求, 在数据可靠性与读取性能间寻求平衡, 以获得最佳使用状态。表 4.2 列出了一些常见 RAID 方案区别和优缺点。在面阵 FTSS 采集系统中, 为充分发挥 SSD 高速存储性能, 在 RAID 级别上采用 RAID 0。利用 CrystalDiskMark 软件对该存储硬件方案进行连续读写速度测试, 连续写入速度可达 762 MB/s, 满足面阵 FTSS 太阳光谱实验中高速数据采集需求。

表 4.2 常见 RAID 方案

RAID 类型	最低磁盘数量	空间利用率	特点
RAID0	> 2	100%	读写速度快, 不容错
RAID1	2	50%	写速度一般, 容错
RAID5	> 3	$\frac{n-1}{n}$	读写速度快, 容错, 数据安全性较高
RAID6	> 4	$\frac{n-2}{n}$	读写速度快, 容错, 数据安全性高
RAID10	4	50%	读写速度快, 容错
RAID50	6	$\frac{n-2}{n}$	读写速度快, 容错

#### 4.4 采集系统软件设计

在高速数据采集系统软件程序架构设计上, 充分考虑系统的兼容及扩展性, 运用模块化设计思想, 使采集软件具有一定的通用性和扩展能力, 以满足后续在类似硬件条件下, 软件上可直接使用或进行快速再开发, 兼容更大面阵探测器。采集软件主要功能模块包括通讯模块、探测器控制模块、数据采集存储模块、图像处理模块、系统信息显示模块。通讯模块采样多串口通讯模式, 主要用于软件与采集卡、探测器间进行通讯; 探测器控制模块则对探测器进行采集参数控制, 如曝光时间、开窗大小、开窗位置、控制探测器触发模式、输出数据格式等。数据采集模块主要用于实现数据存储格式、缓冲区大小配置、干涉图采集等数据采集功能相关操作。图像处理模块用于显示二维图像, 并可在数据采集过程中对采集情况进行监控, 系统信息显示窗口则对系统相关操作信息、错误信息、数据采

集情况、系统健康状况等进行及时显示提醒，便于实时掌控系统运行状况。

### (1) 触发方式

数据采集系统在采集模式上，采用边缘触发可编程曝光模式。其具体触发控制时序见图 4.6，当输入触发信号上升沿或下降沿的到来时（触发信号脉冲宽度不得低于 200ns），曝光开始，曝光时间通过探测器控制模块进行配置，曝光时间范围与探测器所采用输出数据格式允许最大帧率有关，在曝光结束需等待一个 FOT 的时间开销后，才能开始读取帧数据，在开始读取当前帧数据后，才能开始下一帧的曝光，而且曝光时间不能在上一帧读取完之前结束。否则，将导致采集过程中丢帧事件的发生，造成干涉图数据不全，影响后续光谱反演。

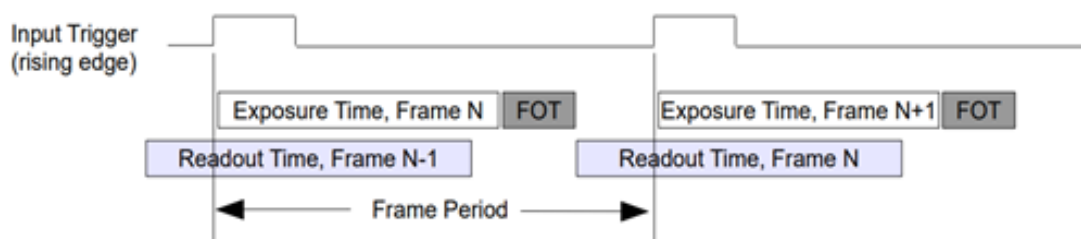


图 4.6 2M360MCL 探测器触发采集时序

### (2) 环形缓冲

高速数据采集系统探测器帧率较高，达到万帧/秒，当处理速度跟不上采集帧率时，采集干涉图数据将无法及时进行存储，将导致干涉图数据丢失，影响反演光谱质量。通过建立多缓冲区，组成环形缓冲区模式，用于临时存放接收到的干涉图数据，以解决采集帧率与处理速度不匹配的问题，同时在数据采集模块中，可根据实际数据采集需求，在不影响操作系统运行效率的情况下，对缓冲区大小、数量进行动态调整。如 4.7 显示了 4 个缓冲区组成的环形缓冲区，当数据处理速度跟不上采集帧率时，数据将依次进入 Buffer 1 至 Buffer 4 中进行缓存，在数据读取时，采用先进先出模式进行读取，数据读取完成后，缓冲区将清空，等待下一个缓存数据到来。



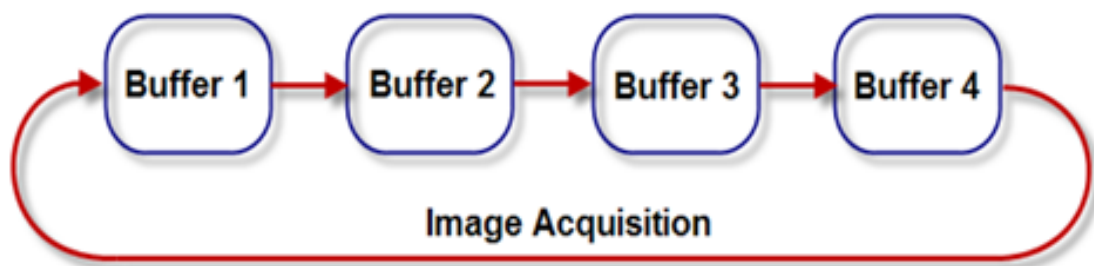


图 4.7 环形缓冲区

### (3) 采集流程

针对数据采集系统高速、连续、实时采集存储的特点，采用环形缓冲区、多线程等技术，实现了系统数据采集、存储、控制、监视等一系列功能。图 4.8 显示了干涉图数据采集的过程。首先，开启软件，系统对探测器、采集卡、存储器件等相关设备进行初始化；然后根据实际观测需求，对观测窗口进行相应配置，对采集卡和 CMOS 探测器参数配置进行不断优化调整，以达到最优观测状态；等待过零检测触发模块发送采集触发信号，开始采集目标辐射干涉图数据，同时利用多线程技术对系统采集状态进行实时监控，避免采集过程中数据丢失，通过环形缓冲区技术，对获得的干涉图进行高速、实时存储。

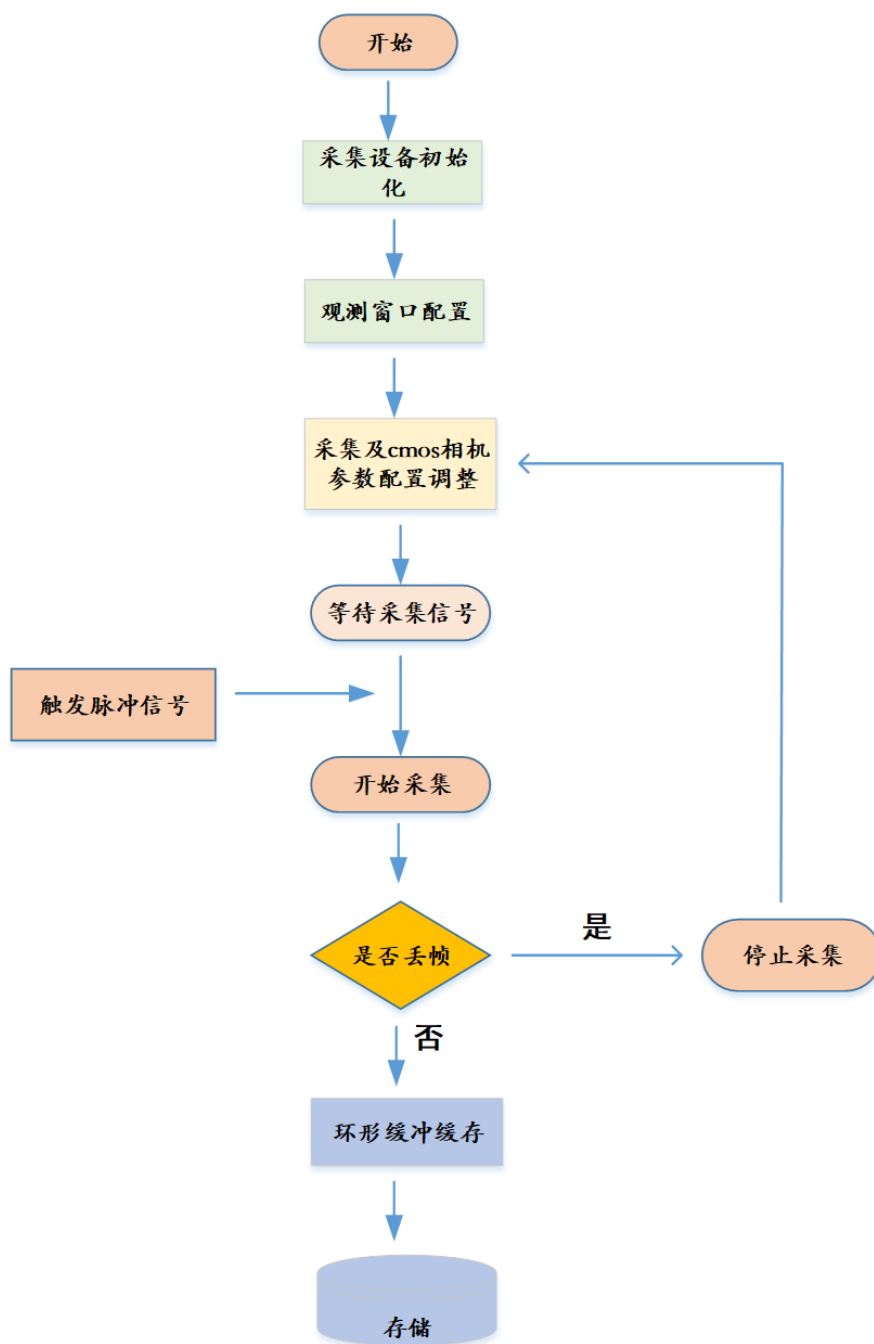


图 4.8 数据采集流程图

(4) 采集软件界面

图 4.9显示了设计实现的数据采集控制软件操作界面，软件包括图像显示区、相机控制区，采集设置区、采集控制区及信息显示区。可实现串口通讯、相机控制、缓冲区配置、图像显示、系统信息显示、采集控制，数据存储等各项功能

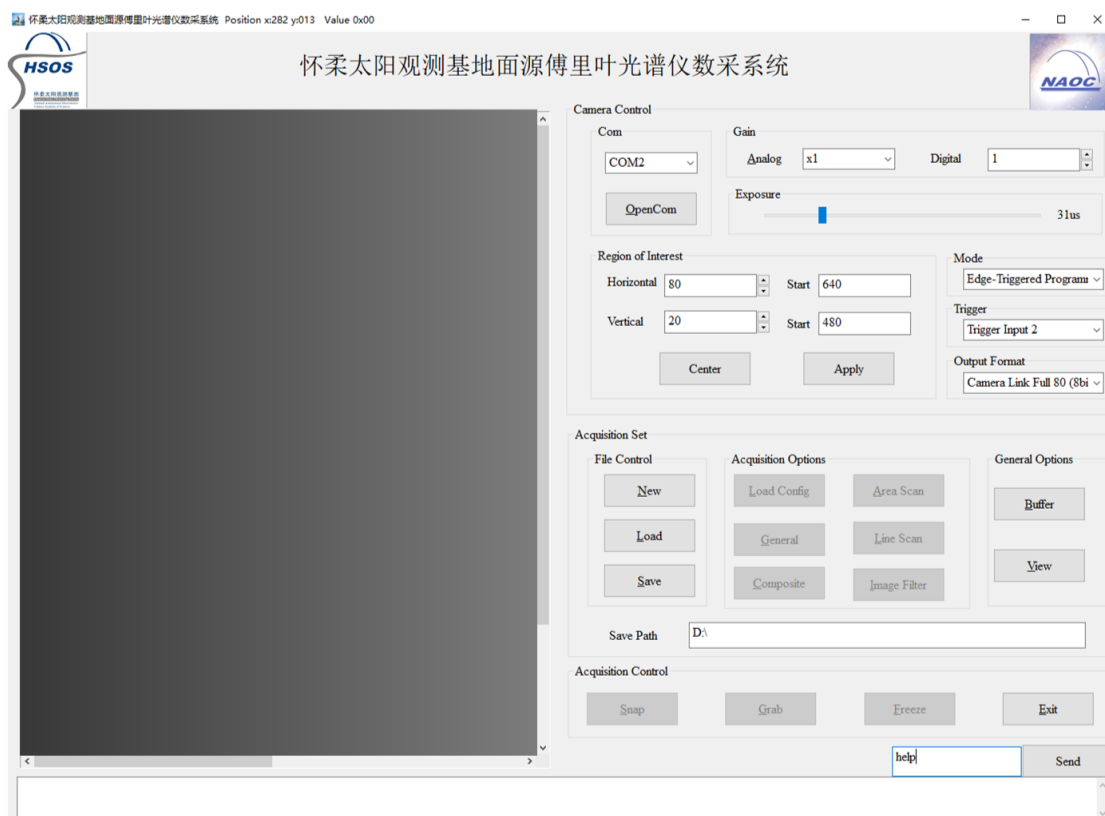


图 4.9 数据采集控制软件操作界面

#### 4.5 系统测试与结果

完成高速数据采集系统软硬件设计后，对系统进行了集成测试。在测试过程中，主要针对高速数据采集系统 2 个关键指标：1. 帧率  $\geq 10\text{kfps}$ ，2. 数据实时存储，不丢帧。测试方案为：搭建以过零检测触发模块、2M360MCL 探测器、X64 Xcelera-CL PX4 采集卡、SSD+RAID0、数据采集控制软件构建的高速数据采集系统，通过信号发生器产生余弦波信号，用于模拟参考激光余弦干涉信号。其中余弦干涉信号峰峰值  $V_{PP} = 10\text{V}$ ，偏移  $1\text{V}$ （模拟参考激光经 IFS-125HR 傅里叶变换光谱仪调制后，产生余弦干涉信号中含有的直流分量），频率  $5\text{KHz}$ ，CMOS 探测器开窗窗口  $20 \times 80$ ，数据格式  $8\text{bit}$ 。根据测试指标需求，编写相应测试软件，展开测试，测试结果如图 4.10，测试过程中共采集图像 923622 帧，耗时  $92365000\mu\text{s}$ ，丢帧数为 0，所有数据均能实时存储，计算得到帧率  $9999.6968\text{fps} \approx 10000\text{fps}$ ，小数点误差主要来源于测试软件计时器精度误差。经测试，高速数据采集系统满足设计需求。



图 4.10 数据采集系统测试

#### 4.6 本章小结

本章主要介绍高数数据采集系统的设计与实现，分析了在太阳光谱观测实验中，面阵 FTSS 对高速采集系统指标需求，并展开数据采集系统整体技术方案设计。分析了高速采集系统中探测器、高速采集卡、存储设备等关键设备选型标准、对采集过程的影响。最后基于可扩展、模块化设计思想，采用多线程技术及环形缓冲区技术，设计并实现高速数据采集系统软件，可实现探测器分辨率  $20 \times 80$ 、帧率  $10 \text{ KHz}$ 、数据格式  $8 \text{ bit}$  条件下，干涉图数据实时采集存储，满足系统指标需求。同时，该数据采集系统中，设计实现的参考激光过零检测模块、数据采集软硬件系统架构后续可扩展到更大面阵探测器（如  $10 \text{ kHz}$  帧频，面阵大小  $800 \times 600$ ）。

## 第 5 章 太阳光谱观测

### 5.1 太阳光谱观测方案设计

#### 5.1.1 方案设计

图 5.1 显示了面阵 FTSS 太阳光谱观测方案。国家天文台怀柔太阳观测基地是世界最好的太阳观测站址之一，主要从事太阳磁场观测研究。方案以国家天文台怀柔太阳观测基地布鲁克 IFS-125HR 傅里叶变换光谱仪为主实验平台，将 CMOS 相机置于 IFS-125HR 样品仓中；参考激光经 IFS-125HR 调制，产生激光干涉信号；过零触发模块对获得的激光干涉信号进行快速精确识别，并产生脉冲触发信号，触发 CMOS 相机对目标辐射干涉信号进行等光程差间隔采样，高速数据采集卡则将采集到的干涉图数据，同步传输至数据存储介质进行实时存储，数据采集控制软件则对整个采集流程进行控制。太阳光源则通过国家天文台怀柔基地 60cm 太阳望远镜引光系统引入。

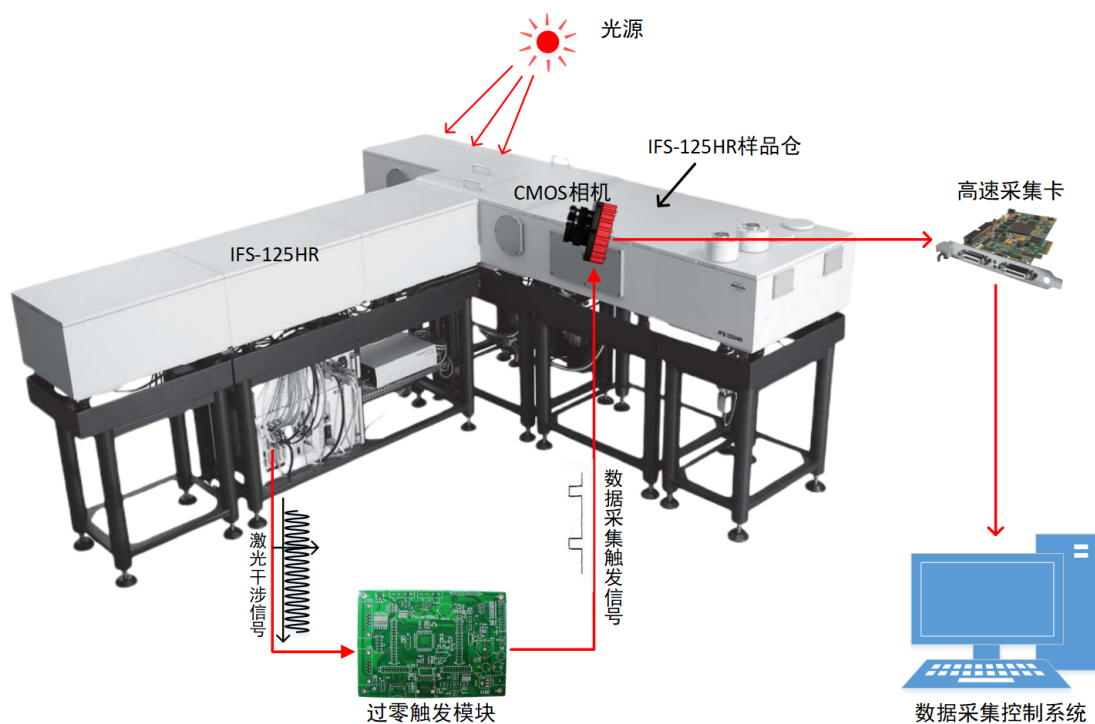


图 5.1 面阵 FTSS 太阳光谱观测方案

### 5.1.2 方案论证

布鲁克 IFS-125HR 傅里叶变换红外光谱仪可用于可见光到近红外波段太阳光谱观测，内置汞灯、钨丝灯、氙弧灯三个光源，也可引入部外光源，动镜速度 0.16-0.25cm/s。IFS-125HR 光路如图 5.2 所示，图中 D1、E、F、G、H 分别为折叠镜、输入孔径（视场光阑）、光源、球面镜，构成入射光路，用于将光源引入干涉仪；A、B、C 分别为动镜、分束镜、定镜，构成迈克尔逊干涉仪；D2、D3、I、H、J、K、L 分别为折叠镜、准直镜、焦面镜、环形镜、准直镜、焦面镜构成干涉信号输出光路。图中红线标记部分为 IFS-125 样品仓。IFS-125HR 采用点源探测器，大小为 1mmx1mm，视场光阑大小：0.5-12.5mm(其中在近中红外波段下，和探测器处像大小之比为 3:1；在可见光波段下，和探测器处像大小之比为 5:1)，H 离轴镜焦距为 418mm，离轴角 24 度，样品仓光斑大小与视场光阑大小一致，对于 2M360MCL 探测器分辨率 180x180，面阵大小符合面阵 FTSS 数据采集系统基本指标需求。因此将探测器放入样品仓，进行面阵 FTSS 太阳光谱观测实验。实验方案中探测器面阵大小、帧频（10kfps）、IFS-125HR 扫描速度均可匹配，实验方案可行。

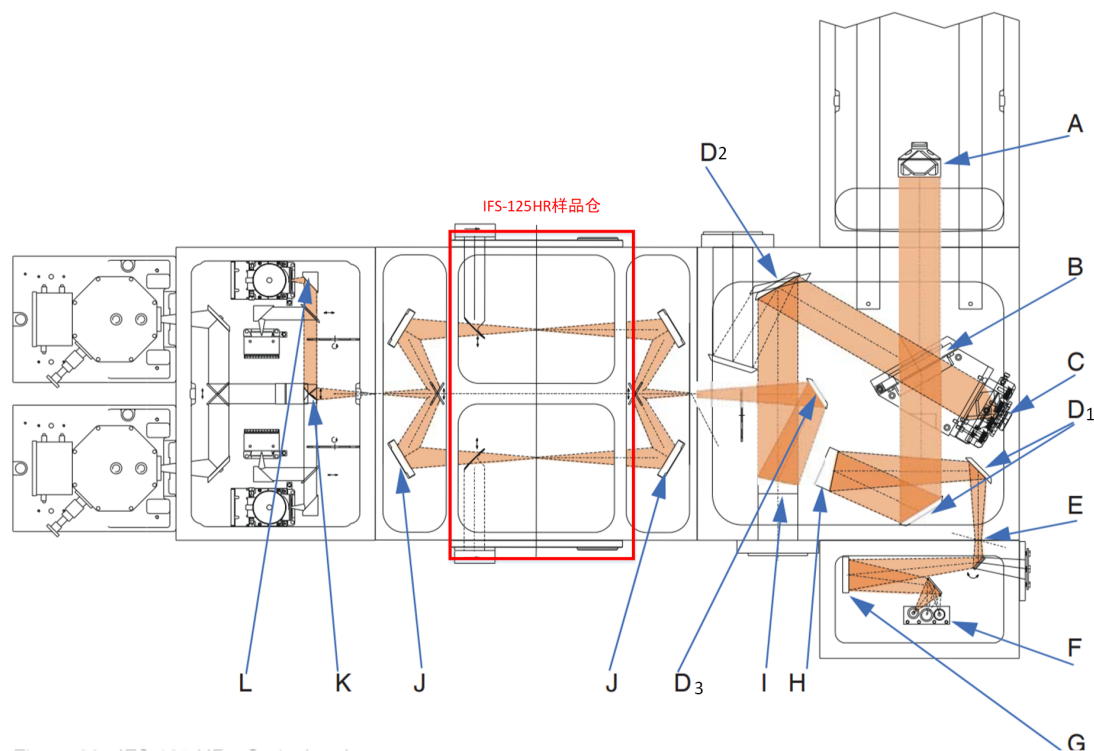


图 5.2 IFS-125HR 光路

## 5.2 太阳光谱观测实验

### 5.2.1 引光系统

国家天文台怀柔太阳观测基地现有一台 60cm 口径太阳望远镜，课题将利用这台望远镜作为引光平台，开展面阵 FTSS 太阳光谱观测实验。该望远镜始建于上世纪 50 年代，是新中国自主研发的第一台太阳望远镜，主要用于太阳光谱观测与研究。上世纪 90 年代，该望远镜及光谱仪运至怀柔观测基地，经过改造后做为定标检测设备，曾为双折射滤光器的研制作出了重要贡献。为开展 AIMS, ASO-S 等项目的试观测等研究，国家天文台怀柔太阳观测基地再次对该望远镜进行改造，将望远镜由原来的卡塞格林系统改造成格里高利系统。采用多级光阑控制，大大提升了系统的消杂光抑制能力，同时也降低了系统的热载，使得系统满足从可见光到中远红外波段的观测需求。而且也对望远镜的桁架结构进行了改造，使得系统的刚性大幅提高，在跟踪过程中镜筒的弯沉几乎可以忽略。新研制的赤道仪配备了高精度编码器，使其重复指向精度达到 1" 以内，经过精密极轴调整后，跟踪精度达到了 30 分钟 1 角秒。

1. 望远镜光学系统 60cm 口径太阳望远镜 3D 设计图如图 5.3。望远镜为有效口径 60cm 的格里高利系统，主次镜的等效焦距约为 10m。通过更换视场光阑可选，视场 6.4' 和 3.2'。由主、次镜及 M3 折轴镜组成的光学系统安装于开放式桁架结构中。

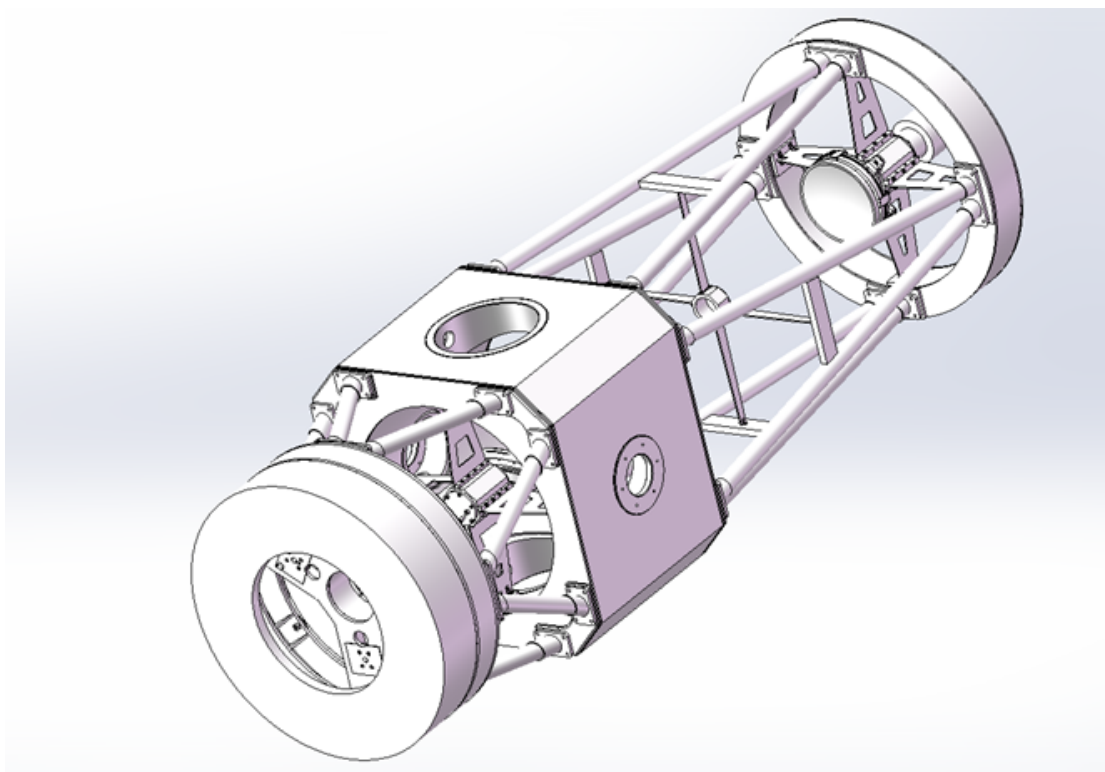


图 5.3 60cm 口径太阳望远镜 3D 设计图

2. 望远镜引光形式望远镜系统采用赤道仪跟踪形式，其中 M3 镜处于赤经轴与赤纬轴的交点，可将经由主次镜反射的光束向上反射至安装于天顶的平面反射镜 M4 上。经 M4 反射的光束向下传输，经过消旋系统后，由平面反射镜 M5、M8 以及离轴抛物面镜 M6、M7，共同构成中继系统将系统焦面引入观测室。在观测室内可以很方便接驳各种观测终端。由于整个光学系统为全反射式设计，因此可以从可见光波段到中远红外波段开展观测。



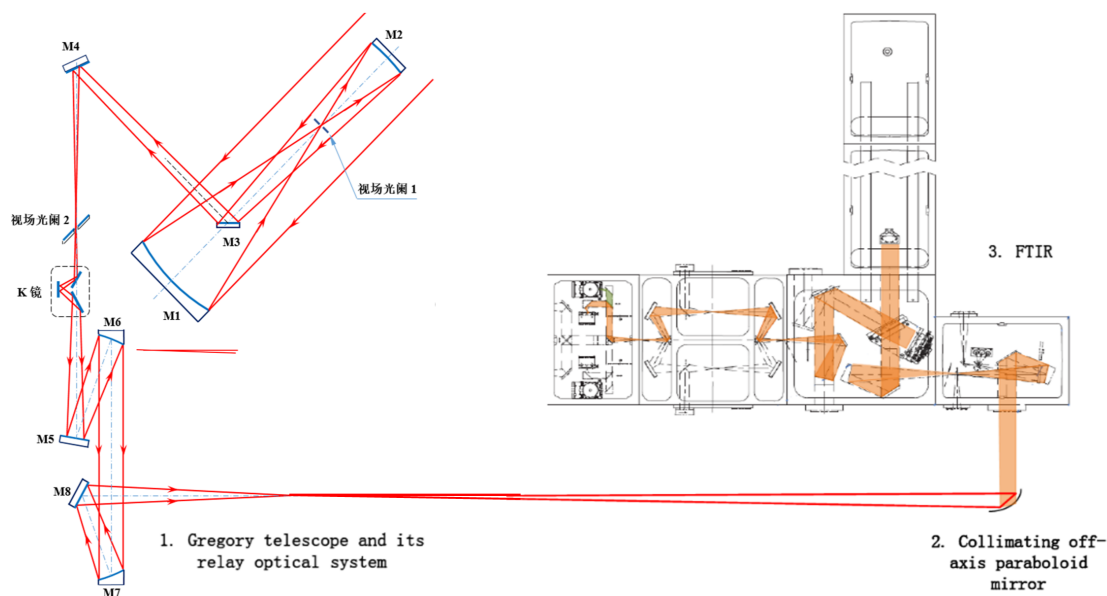


图 5.4 引光光路设计图

### 5.2.2 观测系统集成与测试

在完成面阵 FTSS 太阳光谱观测系统集成后，为验证系统各项功能有效性，我们首先在实验室环境下，对观测系统进行了功能测试。在实验室测试中，光源采用 IFS125-HR 内部卤钨灯光源。为进一步提高数据信噪比，同时选出科学需求的目标谱线，在 CMOS 相机前放置窄带滤光片（中心波长 656 nm，带宽 20 nm）。CMOS 相机触发模式采用外部脉冲上升沿高电平触发，探测器开窗 20x80 像素大小。在采集过程中模拟、数字增益分别设为 X1 及 1，因内部钨灯光源光强相对较强，而探测器采用数据位数较低（8bit），为避免采集过程中数据过饱和，经综合测试，将曝光时间设定为 31  $\mu\text{s}$ 。

H $\alpha$  谱线中心波长为 656.3 nm，对应波数单位为  $15236\text{ cm}^{-1}$ 。表 4.1 要求 Ha 光谱分辨率需优于 0.1nm，对应波数  $2.3\text{ cm}^{-1}$ 。按照三角切趾，需要的最大扫描光程差为  $0.9/2.3=0.39\text{ cm}$ 。观测时，傅里叶光谱仪最大光程差设为 0.9 cm，实际采集从 -0.9 cm 到 0.9cm，对应光谱分辨率 0.043 nm/656.3 nm。按照 326 nm 采集间隔，需要采集帧数为 55214 帧，探测器帧频 10 kHz，单次采集时间为 5.5s，优于科学指标 40 s 时间分辨率。为提高信噪比，我们采用多次测量叠加方式，共测量 284 次。

图 5.5-a 显示了钨灯光源下，在零光程差处，探测器获得的 20x80 大小二维图像。为避免因动镜正反方向运动带来的数据反向，对第偶数次扫描干涉数据进

行翻转，将翻转后的扫描干涉数据以零光程差处为基准进行对齐。图 5.5-b 显示了单次扫描过程中，单个像素在零光程差附近的干涉图；图 5.5-c、5.5-d、5.5-e、5.5-f 分别为位于 20x80 二维图像四角处的像素干涉图（像素坐标分别为 (0, 0)、(0, 79)、(19, 0)、(19, 79)，其中图像左上角像素为坐标 0 点）。

由于实际应用时仪器光路、电路元器件、以及不均匀采样等因素的影响，会导致干涉图产生相位偏差。根据 2.4.2 节相位校正原理，对反演得到的光谱进行了相位校正。图 5.5-c、5.5-d、5.5-e、5.5-f 分别显示了 5.6-a、5.6-b、5.6-c、5.6-d 干涉图经去除直流分量、傅里叶变换、相位校正后的光谱图。可以看到，试验系统成功采集到 656 nm 附近的连续谱。

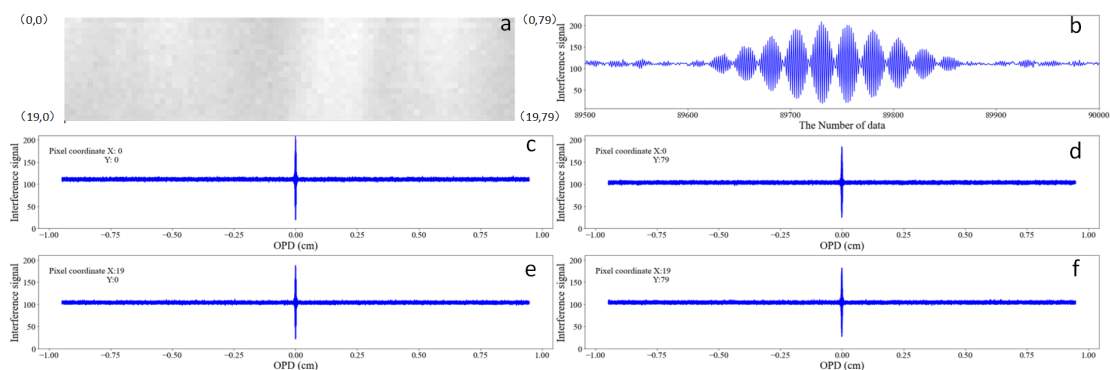


图 5.5 观测系统获得的钨灯光源二维图像和干涉图

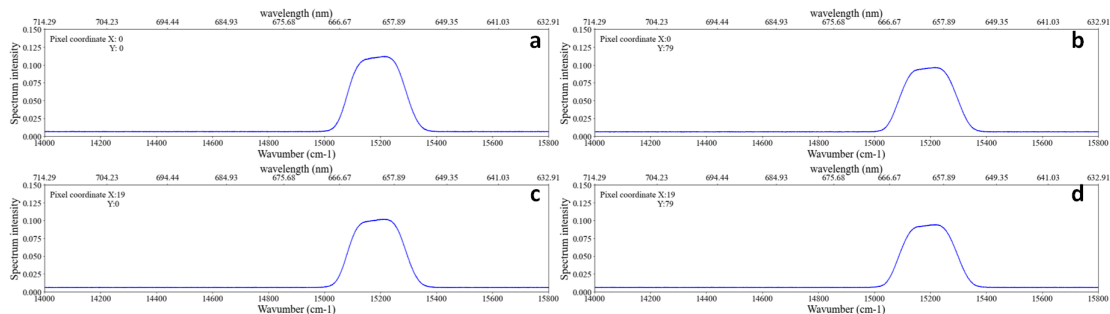


图 5.6 图 5.5(c)(d)(e)(f) 反演获得的 656nm 附近单像素连续光谱图

同时，为进一步确认观测系统功能状态，对 284 次采集中，同一像素点进行叠加显示，并进行了光谱反演（如图 5.7 左图）。可以看到，同一像素位置干涉强度变化较小；同时对一次采集过程中，所有像素点进行叠加显示，并进行了光谱反演（如图 5.7 右图，）。可以看到，不同像素点具有不同的干涉强度，符合面阵 FTSS 实际情况。因此，可以确定，面阵 FTSS 太阳光谱观测系统功能有效、可靠，符合观测设计需求。

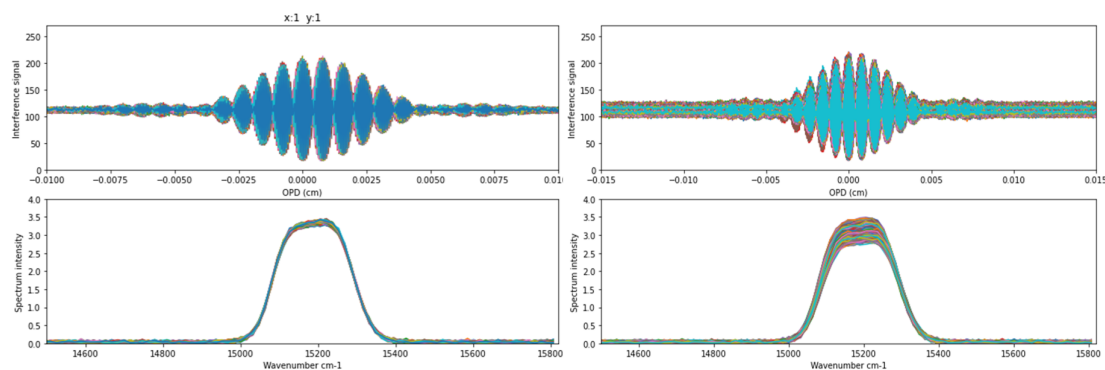


图 5.7 面阵 FTSS 不同叠加方式干涉图、光谱图显示

### 5.2.3 太阳光谱观测

在外场实验中，利用怀柔太阳观测基地 60cm 望远镜及为 FTIR 设计的专用引光光路，将太阳光引入 IFS-125HR。为提高信噪比及获得 656 nm 附近目标光谱，仍然选用窄带滤光片（中心波长 656nm，带宽 40 nm），经综合测试，曝光时间设为  $42\mu\text{s}$ 。数据采集过程与实验室钨灯光源测试条件基本一致。图 5.8-a 为获得的零光程差处  $20\times 80$  像素二维观测图像。图 5.8-b 显示了经翻转、对齐处理后，获得的单像素在零光程差附近的干涉图；图 5.8-c、5.8-d、5.8-e、5.8-f 分别为 5.8-a 四角处像元的干涉图（像元坐标分别为 (0 0)、(0 79)、(19 0)、(19 79)，其中左上角像元为坐标 0 点）。

为进一步提高成像光谱图信噪比，对经去除直流分量、傅里叶变换、相位校正后获得的光谱数据，分别在空间上（ $4\times 4$  像素）、时间上（271 次扫描）进行积分。图 5.9-a、5.9-b、5.9-c、5.9-d 分别显示了 5.8-a 四角处像元干涉图在空间、时间上积分，并进行归一化处理后获得的太阳光谱图。我们发现反演得到的 Ha 色球谱线波数位置与理论值 ( $15236\text{cm}^{-1}$ ) 存在一定偏差。

为评价采集太阳光谱效果，我们采用交叉定标方式，将得到的太阳光谱与美国国立太阳天文台 NSO 的 FTS（卷积为本文仪器分辨率）的标准光谱进行了比较。图 5.9-a 红线为归一化处理后的 NSO 太阳光谱，将 NSO 的太阳光谱与我们（图 5.9-a 绿线）观测到太阳光谱经对齐、归一化处理后，进行比较。图中可见，我们成功观测到面源 Ha 谱线及周围弱光球线（光谱信噪比稍低）。

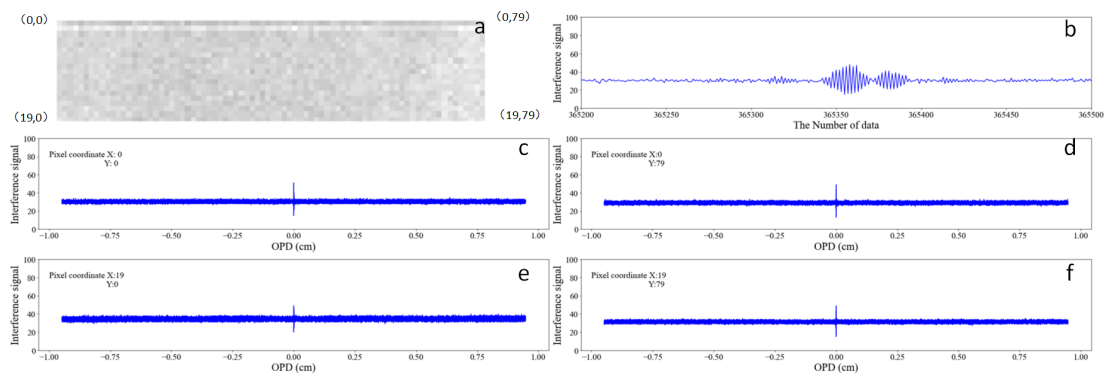


图 5.8 观测系统获得的太阳二维图像和干涉图

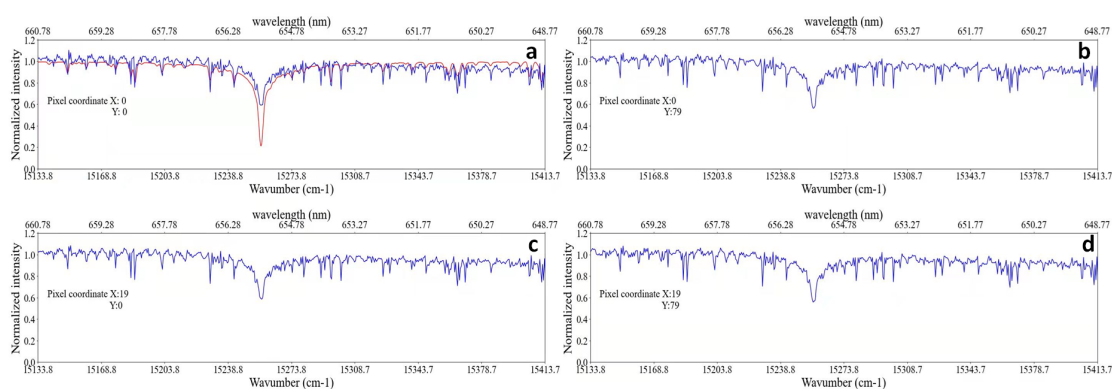


图 5.9 图 5.9(c)(d)(e)(f) 反演获得的 656nm 附近单像素连续光谱图及与 NSO 太阳光谱对比

### 5.3 观测结果与分析

通过搭建可见光实验系统，以钨灯和太阳为光源，开展等光程差间隔采样，成功获得了面阵干涉图，并首次获得面源实验室宽带光谱以及 656nm 附近太阳光谱图（包含 Ha 谱线及周围弱光球线），结果与相同分辨率国际标准光谱基本一致，这一结果也证明面阵傅里叶变换光谱仪在太阳观测中是可行性。

但由于目前探测器帧率，采集卡采集速度等实验条件限制，我们仅获得了 20x80 小面阵宽波段成像光谱图。因稳频激光器可以实现精确光程差控制，傅里叶光谱仪具备高波长定标精度优点。但在图 5.9 中，我们也发现直接反演 Ha 色球谱线波数位置与理论值 (15236cm-1) 存在偏差。对傅里叶变换光谱仪来说，光谱波数位置与参考激光频率成线性关系，即实际激光采样频率的偏差决定了波数位置的偏差，因此还需要对过零触发模块触发频率精度上进一步研究改进提高。同时因试验系统基于布鲁克 IFS-125HR 现有光机系统，光路并未针对面源观测进行优化，并且焦距也未跟望远镜衍射极限进行匹配，探测器像素空间分辨率偏

高 (0.045")。此外, IFS-125 动镜控制最小速度为 5KHz, 单帧干涉图采集过程中曝光时间较短 (仅 42us), 导致单次扫描数据信噪比较低, 这些方面未来仍需改进提升。

#### 5.4 本章小结

本章主要介绍了面阵 FTSS 太阳光谱观测实验过程和结果。首先对整体观测方案进行了设计论证; 然后对国家天文台怀柔太阳观测基地 60cm 太阳望远镜引光系统, 及 IFS-125HR 傅里叶变换光谱仪进行了简要介绍; 通过搭建太阳光谱观测系统, 经过实验室卤钨灯进行功能验证, 成功获得面源实验室宽带光谱, 观测系统满足设计需求。同时利用太阳光源进行太阳光谱观测实验, 成功获得了面阵干涉图, 并首次获得 656nm 附近太阳光谱图 (包含 Ha 谱线及周围弱光球线), 结果与相同分辨率国际标准光谱基本一致, 这一结果验证了面阵傅里叶变换光谱仪在太阳观测中的可行性。



## 第6章 总结与展望

### 6.1 总结

太阳成像光谱探测是诊断太阳大气磁场和热力学参数的主要手段。FTSS 具有宽波段、高灵敏度、高光谱分辨率的优势，是当前中红外高分辨率太阳光谱探测的最佳选择，FTSS 通过采集目标辐射等光程差干涉图，反演获得光谱图。当前，基于傅里叶变换光谱仪的太阳观测均采用单源探测器的点源观测。国家重大科研仪器研制项目——“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”(AIMS)，采用基于线阵探测器的傅里叶变换光谱仪，并通过视场扫描方式实现 10-13 $\mu\text{m}$  高分辨率太阳二维光谱观测。AIMS 完成了傅里叶变换太阳光谱仪从点到线的重大突破，遵循太阳观测设备“点  $\rightarrow$  线  $\rightarrow$  面  $\rightarrow$  体”辩证发展规律，我们认为 FTSS 下一步的发展方向将从线扩展到面。然而，面阵傅里叶变换太阳光谱仪的实现需要面临诸多关键技术挑战，从数据终端的角度，如纳米级精度动镜扫描驱动和等光程差采样系统；高帧频（数千帧频）、高性能、大面阵的焦面探测器；高速同步触发、实时存储的数据采集系统；海量干涉图的光谱反演和检测定标技术等。本课题针对面阵 FTSS 中一些主要关键技术进行探索、攻关，并取得了一定的成果：

1. 基于现场可编程门阵列（FieldProgrammableGateArray, FPGA）技术，采用全数字分频、倍频方案，设计了一套用于太阳观测的宽波段傅里叶变换光谱仪等光程差采样系统。采用分布式余数补偿方法，有效解决了在参考激光干涉信号倍频过程中，输出采样信号在输出信号周期间误差累积问题，并降低了输出采样信号误差及非均匀性；经功能仿真及实验测试，系统在 200 Hz–5 KHz 频率范围内，频率误差  $\delta < 0.04\%$ ，可有效满足面阵傅里叶变换光谱仪 300nm–25 $\mu\text{m}$  宽波段太阳光谱观测数据采集需求。

2. 以现有的 IFS-125HR 傅里叶变换光谱仪为实验平台，并以太阳色球谱线（H $\alpha$ 656.3nm）及其附近光球谱线为科学观测目标，基于高帧频面阵 CMOS 图像传感器，设计了一套高速数据采集软、硬件系统，实现了 10KHz 高速触发， $10^4$ fps 快速采集，0.5GB/s 数据量连续、实时存储等功能。同时设计实现的数据采集软、硬件系统架构后续可扩展到更大面阵探测器。

3. 开展了面源太阳光谱探测。分别以实验室钨灯和太阳为光源，进行等光程差间隔采样，成功获得了面阵干涉图，首次反演得到面源窄带连续谱以及 656.3nm 附近太阳色球和光球线。获得的太阳光谱与美国国立太阳天文台 (NSO) 傅里叶变换光谱仪标准光谱在同等分辨率下进行交叉定标，结果基本一致。验证了新研制的面阵傅里叶太阳光谱仪高速数据采集系统性能及面阵傅里叶变换太阳光谱仪在太阳观测中的可行性。

## 6.2 展望

限于当前实验条件，还存在些问题需要继续研究解决，如 1. 设计实现的宽波段 FTSS 等光程差采样系统，采用现有算法，在输入信号周期内，倍频模块的  $N$  个输出采样信号周期并不完全严格一致。2. 在输入信号周期稳定时，实现的宽波段 FTSS 等光程差采样系统输出采样信号频率精度较高；而在输入信号周期波动较大时，系统稳定性还有所欠缺。3. 在太阳光谱实验中，我们仅获得了  $20 \times 80$  小面阵宽波段成像光谱图，而且直接反演 Ha 色球谱线波数位置与理论值 ( $15236 \text{cm}^{-1}$ ) 存在偏差，同时因试验系统基于布鲁克 IFS-125HR 现有光机系统，光路并未针对面源观测进行优化，并且焦距也未跟望远镜衍射极限进行匹配，探测器像素空间分辨率偏高 ( $0.045''$ )。4. IFS-125 动镜控制最小速度为 5KHz，单帧干涉图采集过程中曝光时间较短，导致单次扫描数据信噪也比较低。这些都需要我们在今后进一步研究改进，实现已有的面阵 FTSS 数据终端技术从可用到好用。

另外，关于面阵 FTSS 数据终端的关键技术：如从纳米级精度动镜扫描驱动高帧频（数千帧频）、高性能、大面阵的焦面探测器等，因时间原因，暂未深入开展相应的研究。动镜是面阵 FTSS 中唯一的运动机构，动镜的行程决定了仪器的分辨率，动镜的扫描行程越长，仪器的分辨率越高；同时动镜在运动中的稳定度决定了触发位置，动镜运动过程中的不稳定将导致采样触发位置产生偏移，进而引起目标辐射干涉图畸变；而且动镜的晃动或横移会带来干涉图相位误差，直接影响光谱反演质量。同时，近些年来，CMOS 图像传感器技术也得到了迅猛发展，在可见光和近红外波段，探测器面阵大小和帧频相比传统 CCD 探测器有了质的提升，性能也越来越好，研究高帧率、高性能、大面阵焦面设备在太阳光谱成像观测中的使用和影响，也是未来面阵 FTSS 必须解决的问题。因此希望在



以后的工作中能够对这些问题继续进行深入研究解决。

最后希望经过后期不断的努力,在不久的将来,使得这些关键技术问题都能得到有效解决,最终实现(1) AIMS 傅里叶太阳光谱仪从线源到面源的观测扩展。(2) 可见光和近红外波段面阵傅里叶变换太阳光谱仪的成功研制。



## 参考文献

- 叶式辉. 二维太阳光谱观测方法和技术 [J]. 天文学进展, 1997, 1.
- 吉布森, 林元章. 宁静太阳 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- 向永源. 太阳高分辨高速重建算法的研究 [J]. 中国科学院研究生院 (云南天文台), 2016.
- 吕乃光. 傅里叶光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用 [M]. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用, 1994.
- 张以谟. 应用光学 [M]. 应用光学, 1982.
- 李保生, 刘勇, 王安, 等. 光纤傅里叶光谱仪干涉图均匀抽样方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 201-204.
- 李妍. 高性能 FTIR 光谱仪数据采集与处理方法研究 [D]. 中国科学技术大学, 2017.
- 李志刚. 紫外-真空紫外傅里叶变换光谱技术的研究 [D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000: 326-330.
- 李苏宁. 傅里叶变换干涉成像光谱技术研究及应用 [D]. 南京理工大学, 2011.
- 杨露. 干涉成像光谱技术中干涉图处理的研究 [D]. 南京理工大学, 2007.
- 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, 10(4): 5.
- 林元章. 太阳物理导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 汪景琇. 太阳物理研究进展 [J]. 物理, 1998, 27(11): 651-659.
- 王宇, 任晓红, 张超, 等. 基于 FPGA 的交流采样同步倍频算法及实现 [J]. 电测与仪表, 2013, 50(12): 4.
- 白先勇. 太阳活动区的矢量磁场测量定标研究 [D]. 中国科学院大学, 2014.
- 盛灏, 华建文, 夏翔, 等. 近红外可见光傅里叶变换光谱仪的参考激光数字倍频方法研究 [J]. 红外, 2014, 35(5): 6.
- 罗志远. 天文 CMOS 相机测试系统的建立与研究 [D]. 中国科学院大学, 2019.
- 艾国祥, 胡岳风. 太阳磁场望远镜的提出和工作原理 [J]. 天文学报, 1986.
- 艾国祥, 胡岳风. 多通道双折射滤光器——□. 原理和视频光谱仪 [J]. 中国科学, 1986, 29(8): 889-896.
- 艾国祥, 胡岳风. 多通道双折射滤光器——□. 全透射滤光器 [J]. 中国科学, 1986, 29(9): 987-991.
- 艾国祥, 胡岳风. 多通道双折射滤光器——□. 多通道头及多通道望远镜 [J]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 1987(4): 63-69.
- 蔡云芳. NVST 太阳光谱数据处理方法研究 [D]. 中国科学院大学, 2018.

- 蔡云芳, 李银柱, 许方宇, 等. 天文应用之红外器件性能与测试评估方法分析优先出版 [J]. 红外技术, 2014.
- 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): 20200278-1-20200278-7.
- 邓元勇, 等. 用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统 [J]. 中国科技成果, 2020(8): 19-20.
- 邹曜璞. 星载傅里叶光谱仪星上数据处理研究 [D]. 中国科学院大学, 2016.
- 陈丹. 太阳的光谱观测和色球观测 [J]. 太空探索, 2010(3): 62-64.
- 陈友华. 遥测用多次反射式弹光调制傅里叶变换光谱技术研究 [D]. 中北大学, 2013.
- 饶长辉, 朱磊, 张兰强, 等. 太阳自适应光学技术进展 [J]. 光电工程, 2018, 45(3): 11.
- 黄旻. 傅里叶变换光谱成像仪数据处理技术研究 [D]. 中国科学院研究生院 (西安光学精密机械研究所), 2009.
- Ahn K S, Chae J C, Park H M, et al. Capability of the fast imaging solar spectrograph on nst/bbso for observing filaments/prominences at the spectral lines  $h\alpha$ ,  $ca\ ii\ 8542$ , and  $ca\ ii\ k$  [J]. Journal of The Korean Astronomical Society, 2008, 41(2): 39-47.
- Ayres T R. Does the sun have a full-time comosphere? [J]. The Astrophysical Journal, 2002, 575 (2): 1104.
- Bai X Y, Zhang Z Y, Feng Z W, et al. Solar observation with the fourier transform spectrometer i: Preliminary results of the visible and near-infrared solar spectrum [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(10): 267.
- Bai y, Lin J B, Bai X, et al. A region selection method for real-time local correlation tracking of solar full-disk magnetographs [J]. RAA, 2022.
- Brault J W. New approach to high-precision fourier transform spectrometer design [J]. Applied Optics, 1996, 35(16): 2891-2896.
- Bruls J, Solanki S, Rutten R, et al. Infrared lines as probes of solar magnetic features. viii.  $mg\ i\ 12\ \mu\text{m}$  diagnostics of sunspots. [J]. Astronomy and astrophysics, 1995, 293: 225-239.
- Cao W, Xu Y, Denker C, et al.  $1024 \times 1024$  hgcdte cmos camera for infrared imaging magnetograph of big bear solar observatory [C]//Infrared and Photoelectronic Imagers and Detector Devices: volume 5881. SPIE, 2005: 245-252.
- Cauzzi.G. Two-dimensional solar spectroscopy with a narrow passband filter [C]. LEST Mini-Workshop on Software for Solar Image Processing, 1992: 19-28.
- Chae J, Park H M, Ahn K, et al. Fast imaging solar spectrograph of the 1.6 meter new solar telescope at big bear solar observatory [M]//Initial Results from the Fast Imaging Solar Spectrograph (FISS). Springer, 2012: 1-22.
- Chang E, Noyes R. Identification of the solar emission lines near 12 microns [J]. The Astrophysical Journal, 1983, 275: L11-L13.

- Connes J, Connes P. Near-infrared planetary spectra by fourier spectroscopy. i. instruments and results [J]. *JOSA*, 1966, 56(7): 896-910.
- Cooley J W, Tukey J W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series [J]. *Mathematics of computation*, 1965, 19(90): 297-301.
- Deming D, Hewagama T, Jennings D E, et al. Observations of the 12.3 micron mg i emission line during a major solar flare [J]. *The Astrophysical Journal*, 1990, 364: L49-L52.
- Deng Y, Wang J, Ai G. The detection of “magnetic element” –why we need a one-meter space solar telescope [J]. *Advances in space research*, 2009, 43(3): 365-368.
- Deng Y, Liu Z, Qu Z, et al. The chinese giant solar telescope [C]//Coimbra Solar Physics Meeting: Ground-based Solar Observations in the Space Instrumentation Era: volume 504. 2016: 293.
- Fang C, Chen P F, Jiang R L, et al. Synthetic analysis of a two-ribbon microflare [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2010, 10(1): 83.
- Farmer C B, Norton R H. A high-resolution atlas of the infrared spectrum of the sun and earth atmosphere from space: The sun: volume 1 [M]. National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical ..., 1989.
- Gingerich O, Noyes R, Kalkofen W, et al. The harvard-smithsonian reference atmosphere [J]. *Solar Physics*, 1971, 18(3): 347-365.
- Griffiths P R, De Haseth J A. Fourier transform infrared spectrometry [M]. John Wiley & Sons, 2007.
- Hase F, Wallace L, McLeod S D, et al. The ace-fits atlas of the infrared solar spectrum [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(4): 521-528.
- Hewagama T, Deming D, Jennings D E, et al. Solar magnetic field studies using the 12 micron emission lines. ii-stokes profiles and vector field samples in sunspots [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 1993, 86: 313-332.
- Hong J, Bai X, Li Y, et al. Non-lte calculations of the mg i 12.32  $\mu\text{m}$  line in a flaring atmosphere [J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 898(2): 134.
- Iglesias F A, Feller A J. Instrumentation for solar spectropolarimetry: state of the art and prospects [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(8): 082417.
- Janesick J. dueling detectors [J]. *Spienewsroom*, 2002.
- Learner R C, Thorne A P, Wynne-Jones I, et al. Phase correction of emission line fourier transform spectra [J]. *JOSA A*, 1995, 12(10): 2165-2171.
- Li C, Fang C, Li Z, et al. Chinese  $h\alpha$  solar explorer (chase)—a complementary space mission to the aso-s [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(11): 165.
- Li D, Yang X, Bai X, et al. Doppler shift oscillations of a sunspot detected by cyra and iris [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 642: A231.

- Litwiller D. Cmos vs. ccd: Maturing technologies, maturing markets [J]. *photonics spectra*, 2005.
- Liu R, Chen Y, Deng Y, et al. Recent research progress of solar physics in china [J/OL]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64: 2011-2024. DOI: [10.1360/N972019-00286](https://doi.org/10.1360/N972019-00286).
- Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(6): 705.
- Martínez Pillet V, Collados M, Sánchez Almeida J, et al. Lpsp & tip: full stokes polarimeters for the canary islands observatories [C]//*High Resolution Solar Physics: Theory, Observations, and Techniques: volume 183*. 1999: 264.
- Michaelian K. Signal averaging of photoacoustic ftir data: I. computation of spectra from double-sided low resolution interferograms [J]. *Infrared physics*, 1987, 27(5): 287-296.
- Michaelian K. Interferogram symmetrization and multiplicative phase correction of rapid-scan and step-scan photoacoustic ft-ir data [J]. *Infrared physics*, 1989, 29(1): 87-100.
- Penn M J. Infrared solar physics [J]. *Living Reviews in Solar Physics*, 2014, 11(1): 1-66.
- Porter W M, Enmark H T. A system overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (aviris) [C]//*Imaging Spectroscopy II: volume 834*. SPIE, 1987: 22-31.
- Puschmann K G, Balthasar H, Beck C, et al. GREGOR Fabry-Pérot interferometer: status report and prospects [C/OL]//*Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV: volume 8446*. SPIE, 2012: 2180 - 2197. <https://doi.org/10.1117/12.924834>.
- Rahmelow K, Hübner W. Phase correction in fourier transform spectroscopy: subsequent displacement correction and error limit [J]. *Applied optics*, 1997, 36(26): 6678-6686.
- Solanki S, Livingston W, Ayres T. New light on the heart of darkness of the solar chromosphere [J]. *Science*, 1994, 263(5143): 64-66.
- Stenflo J O. History of solar magnetic fields since george ellery hale [J]. *Space Science Reviews*, 2017, 210(1): 5-35.
- Stenflo J, Keller C. The second solar spectrum. a new window for diagnostics of the sun. [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1997, 321: 927-934.
- Tennyson J. *Astronomical spectroscopy: An introduction to the atomic and molecular physics of astronomical spectroscopy* [M]. World Scientific, 2019.
- Tomczyk S, Elmore D, Lites B, et al. The advanced stokes polarimeter: A new instrument for solar magnetic field research [C]//*American Astronomical Society Meeting Abstracts# 180: volume 180*. 1992: 51-08.
- Tritschler A, Rimmele T, Berukoff S, et al. Dkist: observing the sun at high resolution [C]//*18th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun: volume 18*. 2015: 933-944.
- Tuthill P, Monnier J, Danchi W, et al. Michelson interferometry with the keck i telescope [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2000, 112(770): 555.

- Wallace L, Hinkle K, Livingston W. An atlas of the spectrum of the solar photosphere from 13,500 to 28,000 cm<sup>-1</sup> (3570 to 7405 Å) [J]. An atlas of the spectrum of the solar photosphere from 13, 1998.
- Yang X, Cao W, Gorceix N, et al. Cyra: the cryogenic infrared spectrograph for the good solar telescope in big bear [J]. 2020.
- Zhang H Q, Wang D G, Deng Y Y, et al. Solar magnetism and the activity telescope at HSOS [J/OL]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 2007, 7(2): 281-288. <https://doi.org/10.1088/1009-9271/7/2/12>.
- Zirin H, Popp B. Observations of the 12 micron Mg I lines in various solar features [J]. The Astrophysical Journal, 1989, 340: 571-578.





## 致 谢

白驹过隙,时光荏苒。转眼间,博士即将毕业,在此毕业之际,谨向所有关心、支持和帮助过我的老师、同学、朋友和家人们表示诚挚的感谢以及美好的祝愿。

十分感谢我的导师邓元勇研究员。邓老师兢兢业业、治学严谨,是我学习和生活中的榜样;每次及时指出学习、工作中的不当之处,文章、报告中的不足之处;点亮了我人生路途中的那一盏盏明灯,指引着我扬帆起航,令我在困惑迷茫之际能冲破壁障,勇往直前。

感谢白先勇高级工程师对我博士科研课题的全程指导。他思维活跃,治学严谨,无论现在和将来都会是我工作中的良师益友。

感谢林佳本研究员在学业上给予的关怀与帮助,指引我一路向前。

感谢怀柔站各位老师:张洪起研究员、张枚研究员、苏江涛研究员、林刚华研究员、王慧站长、包兴明、杨尚斌、张志勇、王晓帆、徐海清、刘锁、陈洁、杨潇、孙英姿、宋永亮、李文显、侯俊峰、张洋、孙文君、闫璐、王丙祥、王建、张鼎波、汪国萍、荆帅、阮文东、王立东、杨桂莲等,在我博士期间的工作、学习中所给予的帮助。

也特别感谢一起度过研究生生涯的同学:王刚、佟立越、祝高飞、白阳、王全、吴玮、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、高碧源、郭思璠、喻子晗等,感谢能有你们一起在这段时间里的相互帮助、相互交流、一起成长。

回首过去的三年,经历了很多,也成长了许多。在这三年中,疫情占据了2年半,幸运的是,家人朋友在武汉、在湖北,一切安好;在这三年里,和我美丽的妻子姜腾飞牵手走进了婚姻的殿堂,共同开启了我们新的人生旅途,谢谢你三年的辛苦付出;在这三年里,迎来了我可爱的小袄朱悦然宝贝,希望你永远快乐的成长;遗憾的是,外婆的去世,最终没能见到我毕业的这一刻,但我相信,她见到她最疼爱的外孙,结婚生子,家庭幸福,她会感到由衷的高兴,博士其实也许并不重要。感谢老妈、老舅、老姐、姐夫、外甥侯宇泽、岳父、岳母、小舅子在这三年里对我的理解和全力支持!



## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

### 作者简历:

朱晓明, 湖北省石首人, 中国科学院大学国家天文台博士研究生。

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

1. 朱晓明, 白先勇, 林佳本等. 面阵傅里叶变换太阳光谱仪高速采集系统设计与实现 [J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 已录用。
2. 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 [J]. 天文学报, 2022, 已录用。
3. Bai yang, Lin Jia Ben, Bai Xianyong, Yang Xiao, Wang Dong Guang, Deng Yuanyong, Zhu Xiaoming, Hu Xing, Huang Wei, Tong Liyue. A region selection method for real-time local correlation tracking of solar full-disk Magnetographs[J]. RAA, 2022, 已录用.
4. 黄威, 林佳本, 侯俊峰, 张洋, 朱晓明, 邓元勇, 王东光. 空间用 LCVR 相位延迟测试系统的电子学设计 [J]. 液晶与显示, 2022, 已录用。

### 申请或已获得的专利:

1. 张志勇, 冯志伟, 白先勇, 邓元勇, 王雅琦, 徐刚, 朱晓明, 郭思璠. 一种红外宽波段可调谐泰曼-格林干涉仪及方法. 发明专利, 2022, 已受理。
2. 张志勇, 冯志伟, 白先勇, 邓元勇, 王雅琦, 徐刚, 朱晓明, 郭思璠. 一种红外宽波段可调谐泰曼-格林干涉仪. 实用新型专利, 2022, 已受理。

### 参加的研究项目及获奖情况:

1. 国家重大科研仪器研制项目”用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”

