

**Research on Spatially modulated snapshot computed
tomographic polarization imaging spectrometer**

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Optical Engineering**

By

Bo Jian

Supervisor: Professor Kuang Haipeng

Professor Yan Changxiang

**Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences**

June 2022

中国科学院大学
研究生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： 海建

日期： 20220601

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： 海建

日期： 20220601

导师签名： 魏思翔 王明

日期： 20220601

摘要

随着对光学遥感信息获取需求的增加,众多科研人员深入研究偏振光谱成像技术。利用该技术获得目标的二维空间信息、偏振信息和光谱信息可以丰富目标特性,增加目标重建的准确度。因此,该技术被广泛应用到自然资源探测、环境变化探测、军事目标探测等领域。

空间调制偏振成像技术(Spatially Modulated Imaging Polarimeter, SMIP)属于偏振光谱成像技术的一种,SMIP 在传统的成像系统中插入一个空间调制模块就可以实现目标全斯托克斯(Stokes)偏振信息测量,频繁更换结构中的滤波片和半波片就可以获得目标的光谱信息。SMIP 具有无运动部件、对于动态目标可以实时获取的优点。SMIP 最早由日本学者 OKA 提出,在其基础上,国内外学者在对它的结构和数据解调算法等方面进行优化改进。虽然 SMIP 技术经过这么多年的发展,但是,SMIP 技术还存在一些不足:①由于 SMIP 系统内部有半波片,在装调过程中会存在装调角度误差,使系统引入额外的相位延迟,导致偏振信息解调精度下降;②由于 SMIP 系统内存在半波片和滤波片,为获得目标不同波段的偏振信息,需要频繁更换这两个波片,大大降低了探测效率;③SMIP 系统偏振信息解调大多数采用傅里叶频域滤波解调方法,在解调过程中会带来通道串扰、高频损失和引入解调噪声的问题,降低偏振信息解调精度。目前 SIMP 的这些不足,大大限制了 SIMP 系统工程化应用。因此,针对 SMIP 系统存在的上述不足,本论文完成了以下的主要研究:

针对空间调制偏振成像系统结构进行深入研究。由于目前的空间调制偏振成像系统结构内存在半波片,在装调过程中会存在装调角度误差,使系统引入额外的相位延迟,降低偏振探测精度。因此,对空间调制偏振成像系统结构进行优化改进,提出基于两块 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统结构。新的系统结构移除 SMIP 系统内的半波片,并用一个改变光轴方向的 Savart 偏光镜和一个常规 Savart 偏光镜作为新系统的空间调制模块。分析了新系统结构中改进 Savart 偏光镜的相关特性并对新系统结构理论建模。对新系统结构偏振信息解调过程中,不同斯托克斯(Stokes)通道采用不同的滤波函数,进一步提高新系统结构偏振信

息解调精度。运用本文提出的基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统，避免了半波片装调角度误差，有效降低装调难度，节约仪器研制成本，且偏振数据解调峰值信噪比提高 2 倍。

针对空间调制偏振成像系统获得光谱探测能力研究。首先，介绍了计算层析成像光谱技术相关的知识，其中，重点介绍了它的结构、原理和光谱图像数据复原算法。其次，在计算层析系统中插入基于两块 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的空间调制模块得到新的系统，新的系统具备偏振空间调制与计算层析系统的功能，将其称为“空间调制型计算层析偏振光谱成像系统”。之后，对空间调制型计算层析偏振光谱成像系统进行理论建模。最后，计算系统内关键器件的参数，重点介绍了该系统数据重建的原理算法。本文提出的空间调制型计算层析偏振光谱成像系统通过一次测量两次解调就可以得到目标的偏振、光谱、强度和二维空间信息，弥补了空间调制偏振成像系统无法快速获得目标光谱信息的不足，对空间调制偏振成像系统工程化应用具有重要意义。

针对空间调制偏振成像系统空域解调算法进行深入研究。为避免 SMIP 系统采用傅里叶频域滤波解调偏振信息时带来的通道串扰的问题，对 SMIP 系统重新进行理论建模，将偏振信息解调的问题转化为解欠定方程组寻最优解的问题。为提高欠定方程组求解的精度，抑制求解算法在迭代过程中噪声的影响，将 TV 正则化算法与 TwIST 算法相结合得到 TwIST-TV 算法。TwIST-TV 算法求解 SMIP 系统的偏振信息具有求解精度高、收敛速度快等优点。本文提出的解欠定方程组空域解调方法弥补了傅里叶频域滤波存在通道串扰和高频损失的缺点，同时空域解调算法的复杂度不高，空域解调空间调制偏振成像系统的偏振信息解调的峰值信噪比平均提高 3dB，对空间调制偏振成像系统偏振数据的高精度获取具有重要意义。

本论文提出了基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统、空间调制型计算层析偏振光谱成像系统和空域解调空间调制偏振成像系统的方法，均对其进行了仿真分析和实验验证，对推进空间调制偏振成像系统工程化应用具有重大意义。

关键词：偏振光谱成像系统，空间调制，计算层析，处理算法

Abstract

With the increasing demand of optical remote sensing information acquisition, many researchers are deeply studying polarization spectral imaging technology. This technique can enrich the target characteristics and increase the accuracy of target reconstruction by obtaining two-dimensional spatial information, polarization information and spectral information of the target. Therefore, the technology is widely used in natural resources detection, environmental change detection, military target detection and other fields.

Spatially Modulated Imaging Polarimeter (SMIP) is a kind of polarization spectral Imaging technology. By inserting a spatial modulation module into a conventional imaging system, SMIP can measure the target's all-Stokes polarization information, and obtain the target's spectral information by frequently changing the filter and half-wave plate in the structure. SMIP has the advantages of no moving parts and real-time acquisition of dynamic targets. SMIP was first proposed by Japanese scholar OKA, and then the structure and data demodulation algorithm were optimized and improved by domestic and foreign scholars on its basis. Although SMIP technology has been developed for so many years, there are still some shortcomings in SMIP technology: (1) Due to the half-wave plate inside the SMIP system, there will be installation Angle error in the process of installation and adjustment, which leads to the introduction of additional phase delay in the system, resulting in the decrease of the accuracy of polarization information demodulation; (2) Because there are half wave plates and filter plates in the SMIP system, in order to obtain the polarization information of different target bands, the two wave plates need to be replaced frequently, which greatly reduces the detection efficiency; (3) Most of the polarization information demodulation of SMIP systems adopts Fourier frequency domain filtering demodulation method, which will bring the problems of channel cross talk, high frequency loss and demodulation noise in the demodulation process, and reduce the accuracy of polarization information

demodulation. At present, these deficiencies of SIMP greatly limit the application of SIMP system engineering. Therefore, in view of the above shortcomings of SMIP system, the following main studies are completed in this paper:

The structural optimization of spatial modulation polarization imaging system is studied. Due to the existence of half-wave plate in the structure of the current space-modulated polarization imaging system, the installation Angle error exists in the installation process, which leads to the introduction of additional phase delay and the reduction of polarization detection accuracy. Therefore, the structure of spatially modulated polarization imaging system is optimized and improved, and the structure of spatially modulated polarization imaging system based on two Savart polarizers is proposed. The new system structure removes the half-wave plate in the SMIP system and uses a Savart polarizer that changes the optical axis and a conventional Savart polarizer as the spatial modulation module of the new system. The characteristics of the improved Savart polarizer in the new system structure are analyzed and the theoretical modeling of the new system structure is given. During the demodulation of polarization information of the new system structure, different filtering functions are used for different Stokes channels to improve the demodulation accuracy of the new system structure. Using the proposed polarization imaging system based on two Savart polarizers, the Angle error of half wave plate installation is avoided, the difficulty of installation is effectively reduced, the cost of instrument development is saved, and the peak signal-to-noise ratio of polarization data demodulation is increased by 2 times.

The spectral detection ability of spatial modulation polarization imaging system is studied systematically. Firstly, we learn the structure, the principle and the algorithm for restoring spectral image data of computational tomography spectroscopy. Secondly, SMSIPTSP and computed tomography spectroscopy system are combined to obtain a Spatially modulated snapshot computed tomographic polarization imaging spectrometer system. On this basis, theoretical modeling of the new system structure and calculation of the parameters of key components in the system are carried out, and the data demodulation method is introduced in detail. Spatially modulated snapshot computed tomographic polarization imaging spectrometer system can obtain the

polarization, spectrum, intensity and two-dimensional spatial information of the target through one measurement, which makes up for the inability of the spatial modulation polarization imaging system to quickly obtain the target spectrum information. It is of great significance to the engineering application of spatial modulation polarization imaging system.

The spatial demodulation algorithm of spatial modulated polarization imaging system is studied. the theoretical modeling of SMIP system is re-established, and the demodulation problem of the polarization information is transformed into the problem of solving the underdetermined equations to find the optimal solution. In order to improve the accuracy of solving the underdetermined equations and suppress the influence of the solving algorithm on the noise in the iterative process, twist-TV algorithm was obtained by combining TV regularization algorithm with TwIST algorithm. Twist-tv algorithm has the advantages of high precision and fast convergence to solve the polarization information of SMIP system. This paper puts forward the solution of underdetermined equations of the airspace demodulation method to make up for the Fourier pressure impulses domain filtering channel crosstalk and high frequency losses flawed, at the same time, the complexity of the airspace demodulation algorithm is not high, the airspace demodulation polarization information of the spatial modulation of polarization imaging system demodulating peak signal-to-noise ratio was improved 3 db, polarization data of spatial modulation of polarization imaging system of high precision is of great significance.

This paper is proposed based on two Savart polariscope spatial modulation of polarization imaging system, a spatial modulation type calculation tomographic polarization spectral imaging system and the airspace demodulation method, the spatial modulation of polarization imaging system in the simulation analysis and experimental verification, and push the spatial modulation of polarization imaging system is of great significance to engineering application.

Key words: Imaging spectropolarimeter, Spatial modulation, CTIS and Processing algorithm.

目 录

摘 要.....	I
Abstract	III
目 录.....	VII
图目录.....	XI
表目录.....	XV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 偏振光谱成像技术与快照式偏振光谱成像技术国内外研究现状.....	2
1.2.1 偏振光谱成像技术国内外研究现状.....	2
1.2.2 快照式偏振光谱成像技术国内外研究现状.....	6
1.3 空间调制型偏振成像技术的研究进展分析及课题研究意义.....	11
1.3.1 空间调制型偏振成像技术研究进展.....	12
1.3.2 空间调制偏振成像技术的研究现状总结.....	14
1.3.3 课题研究意义.....	15
1.4 本文研究内容和章节安排.....	15
第 2 章 空间调制型偏振成像基本理论及技术研究	17
2.1 光波的偏振态分析方法.....	17
2.1.1 光波的偏振态.....	17
2.1.2 偏振光的描述.....	18
2.1.3 穆勒矩阵.....	21
2.2 典型的偏振信息探测技术.....	22
2.2.1 时间调制型偏振探测技术.....	22
2.2.2 光谱调制型偏振信息探测技术.....	23
2.2.3 分振幅型偏振信息探测技术.....	25

2.3 空间调制型偏振成像技术研究.....	26
2.3.1 空间调制型偏振成像方法.....	26
2.3.2 基于 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统调制原理	27
2.3.3 空间调制偏振成像系统解调算法.....	40
2.4 本章小结.....	41
第 3 章 基于两块 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统研究	43
3.1 空间调制型偏振成像系统半波片装调角度误差分析.....	43
3.1.1 旋转半波片装调角度误差.....	43
3.1.2 旋转半波片相位延迟误差.....	44
3.2 基于两块 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统理论建模	45
3.2.1 基于两个 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统光路结构	46
3.2.2 理论模型.....	49
3.3 数据重建.....	51
3.3.1 二维滤波函数.....	52
3.3.2 傅里叶变换频域解调.....	55
3.4 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的分析和验证	57
3.4.1 仿真分析.....	57
3.4.2 实验验证.....	65
3.5 本章小结.....	70
第 4 章 快照式空间调制型计算层析偏振光谱成像系统结构研究	71
4.1 计算层析成像光谱技术基本理论.....	71
4.1.1 CTIS 系统结构.....	72
4.1.2 CTIS 基本原理.....	73
4.1.3 CTIS 数据重建算法.....	74
4.2 快照式空间调制计算层析偏振成像光谱系统原理.....	78
4.2.1 SMSCTPIS 光路结构.....	78
4.2.2 SMSCTPIS 理论模型.....	79
4.2.3 SMSCTPIS 元件参数.....	80
4.3 SMSCTPIS 数据重建.....	83
4.3.1 EM 迭代算法步骤.....	83
4.3.2 系统矩阵 H 的构建.....	84

4.3.3 数据重建.....	84
4.4 SMSCTPIS 系统的分析与验证.....	85
4.4.1 仿真分析.....	85
4.4.2 实验分析.....	89
4.5 本章小结.....	94
第 5 章 空间调制偏振成像系统空域解调研究	95
5.1 空域解调理论模型研究.....	95
5.1.1 传统空间调制偏振成像系统空域解调模型.....	95
5.1.2 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调模型	97
5.2 欠定方程组求解方法.....	99
5.2.1 基于 l_0 范数算法求解欠定方程组.....	99
5.2.2 基于 l_1 范数算法求解欠定方程组.....	100
5.3 TwIST-TV 算法	100
5.3.1 TV 约束	101
5.3.2 TwIST 算法.....	101
5.3.3 TwIST-TV 算法	101
5.4 仿真分析和实验验证.....	103
5.4.1 仿真分析.....	103
5.4.2 实验验证.....	109
5.5 本章小结.....	112
第 6 章 总结和展望	115
6.1 论文工作总结.....	115
6.2 论文创新点.....	116
6.3 研究展望.....	117
参考文献.....	119
致 谢.....	129
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	130

图目录

图 1.1 偏振光谱强度数据立方体.....	1
图 1.2 POLDER 光学结构布局图.....	2
图 1.3 基于 AOTF 和 LCVR 的偏振光谱成像系统结构简图.....	3
图 1.4 APS 结构示意图 (a) 外部光学图; (b) 光学器件示意图.....	3
图 1.5 基于 MPA 的干涉偏振光谱成像系统.....	4
图 1.6 静态傅里叶变换偏振光谱仪光学布局示意图.....	5
图 1.7 基于 Sagnac 干涉仪的强度调制型偏振光谱探测系统结构示意图.....	5
图 1.8 DPC 外部光学结构整体图.....	6
图 1.9 CAPI 两个波段单机外壳图 (a) 可见近红外单机外壳; (b) 短波红外单机外壳.....	6
图 1.10 基于微透镜阵列的光谱成像光学系统图.....	7
图 1.11 基于压缩感知理论成像光学系统图.....	7
图 1.12 计算层析光谱成像系统结构图.....	8
图 1.13 计算层析通道光谱成像仪系统结构图.....	9
图 1.14 孔径编码快照式偏振光谱成像仪系统结构图.....	9
图 1.15 快照线性偏振光谱成像仪系统结构图.....	10
图 1.16 压缩通道偏振成像光谱仪系统结构图.....	11
图 1.17 通道压缩偏振成像光谱仪结构图.....	11
图 1.18 基于楔形棱形的空间调制偏振成像系统示意图.....	12
图 1.19 基于 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统示意图.....	13
图 1.20 基于改进 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像示意图.....	14
图 1.21 总体研究路线.....	16
图 2.1 邦加球示意图.....	21
图 2.2 时间调制型偏振成像系统整体原理图.....	23
图 2.3 偏振光谱强度调制探测技术原理简图.....	25
图 2.4 分振幅偏振成像系统示意图.....	25

图 2.5 双折射现象.....	27
图 2.6 e 光光线传播方向.....	28
图 2.7 Savart 偏光镜各个单板内光线变化.....	32
图 2.8 空间调制型偏振成像系统原理图.....	34
图 2.9 透镜聚焦成像示意图.....	36
图 2.10 空间调制偏振成像系统 4f 模型示意图.....	38
图 2.11 调制图像频谱示意图.....	41
图 3.1 半波片装调角度误差.....	44
图 3.2 基于两个 Savart 偏光镜空间调制型偏振成像系统光学结构.....	46
图 3.3 (a)改进的 Savart 偏光镜光学结构图; (b)光线振动示意图.....	47
图 3.4 方解石和石英晶体 Savart 偏光镜产生的横向剪切量特性.....	49
图 3.5 出射的光线分离情况.....	49
图 3.6 改进空间调制模块出射光线成像示意图.....	50
图 3.7 不同滤波函数二维示意图(a)高斯函数; (b)矩形函数; (c)圆域函数; (d)FWHM=1.2; (e)FWHM=1.4; (f)FWHM=1.6; (g)FWHM=2.0.....	54
图 3.8 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统调制图像频谱示意图.....	56
图 3.9 输入 Stokes 图片.....	59
图 3.10 仿真模拟干涉图.....	60
图 3.11 傅里叶频谱图.....	60
图 3.12 重建 Stokes 图像.....	63
图 3.13 不同半波片装调角度误差反演 Stokes 图片; (a)1°装调角度误差; (b)3°装 调角度误差; (c)5°装调角度误差.....	63
图 3.14 验证实验实物图.....	66
图 3.15 (a)实验获得的干涉图; (b)放大干涉图.....	67
图 3.16 重建的 Stokes 矢量; (a) S ₀ , (b) S ₁ , (c) S ₂	68
图 3.17 归一化 S ₁ 和 S ₂ ; (a) S ₁ /S ₀ , (b) S ₂ /S ₀	68
图 3.18 S ₁ /S 条形图.....	69
图 3.19 S ₂ /S ₀ 条形图.....	69
图 4.1 计算层析成像光谱技术投影原理图.....	72

图 4.2 CTIS 系统结构示意图.....	72
图 4.3 计算层析仿真输入图片.....	76
图 4.4 仿真衍射图.....	77
图 4.5 各算法重建目标图像; (a)ART 算法; (b)MART 算法; (c)SART 算法; (d)EM 算法.....	77
图 4.6 SMSCTPIS 系统光路结构.....	78
图 4.7 衍射效率和波长关系曲线.....	82
图 4.8 波长与再成像镜焦距关系曲线.....	83
图 4.9 仿真光谱强度图.....	86
图 4.10 仿真 Stokes 偏振图片.....	86
图 4.11 不同波段 Stokes 偏振图片.....	87
图 4.12 仿真获得的衍射图.....	87
图 4.13 仿真解调的不同波段干涉图.....	87
图 4.14 解调的不同波段 Stokes 偏振图片.....	88
图 4.15 仿真反演光谱点与输入光谱.....	88
图 4.16 系统矩阵构建简易图.....	89
图 4.17 实验光谱强度图.....	90
图 4.18 实验装置示意图.....	90
图 4.19 探测器获得的衍射图.....	91
图 4.20 解调的不同波段干涉图.....	92
图 4.21 不同波段的 S_0	92
图 4.22 不同波段的 S_1	92
图 4.23 不同波段的 S_2	93
图 4.24 反演光谱点与输入光谱.....	93
图 5.1 TwIST-TV 算法流程图.....	102
图 5.2 仿真输入多空间频率变化 Stokes 图片.....	104
图 5.3 传统空间调制偏振成像系统空间频率变化少的干涉图.....	104
图 5.4 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调输出 Stokes....	105
图 5.5 空间调制偏振成像系统空域解调输出 Stokes.....	105

图 5.6 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统多空间频率变化多 Stokes 图片干涉图..... 107

图 5.7 空间调制偏振成像系统多空间频率变化多 Stokes 图片干涉图..... 107

图 5.8 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调输出 Stokes 矢量 108

图 5.9 传统空间调制偏振成像系统空域解调输出 Stokes 矢量..... 108

图 5.10 重建的 Stokes 矢量; (a) S0, (b) S1, (c) S2..... 110

图 5.11 归一化 $S1/S0$ 111

图 5.12 归一化 $S2/S0$ 111

图 5.13 $S1/S0$ 条形图 112

图 5.14 $S2/S0$ 条形图 112

表目录

表 2.1 典型偏振状态的琼斯矢量.....	19
表 2.2 典型偏振状态的斯托克斯矢量.....	20
表 2.3 偏振信息探测技术优缺点对比.....	26
表 2.4 剪切光束状态变化.....	35
表 2.5 剪切光复振幅变化.....	35
表 3.1 不同半高宽度函数系数.....	53
表 3.2 仿真系统参数.....	58
表 3.3 不同滤波函数反演 Stokes 的 PSNR 和 SSIM 值比较.....	61
表 3.4 各 Stokes 矢量滤波函数.....	62
表 3.5 SMSIPTS 和 SMSIP 的 PSNR 和 SSIM 值比较	64
表 4.1 计算层析仿真输入参数.....	76
表 5.1 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调和傅里叶频域滤波解调空间频率变化少 Stokes 的 SSIM 和 PSNR 值.....	106
表 5.2 空间调制偏振成像系统空域解调和傅里叶频域滤波解调空间频率变化少 Stokes 的 SSIM 和 PSNR 值.....	106
表 5.3 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调和傅里叶频域滤波解调 Stokes 矢量图片的 SSIM 和 PSNR 值.....	109
表 5.4 空间调制偏振成像系统空域解调和傅里叶频域滤波解调 Stokes 矢量图片的 SSIM	109

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景

光在传播过程中，它的光学特性会受到待测目标的物理、化学等性质的影响而发生改变。通过探测改变的光学特性，可以获得待测目标的组成成分的化学属性、表面折射率、粗糙度等物理属性^[1-3]。

目标特性光学探测技术飞速发展，同时获得探测目标的光谱、偏振、强度和二维空间位置信息的仪器成为当下研究的热点。因此，偏振光谱成像技术逐渐发展起来。该技术可以同时获取目标的偏振、光谱、强度和二维空间的四维数据的超立方体，如图 1.1 所示。与传统遥感技术相比，其获取的信息量更加丰富，这可以使人们对目标特性有更深入的认识，促进光学探测的进一步发展。因此，偏振光谱成像技术广泛应用于天文观测、云与大气气溶胶探测、地球环境监测、农作物估产、地质勘探以及军事目标探测与识别等领域^[4-25]。

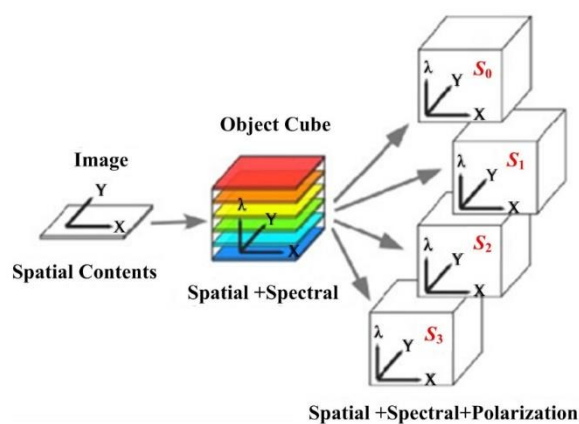


图 1.1 偏振光谱强度数据立方体

Figure 1.1 Hypercube of the polarization spectral intensity data

为了满足遥感对于目标偏振、光谱、强度和二维空间探测的需求，科研人员研究出多种偏振光谱成像探测技术。在各式各样的偏振光谱探测技术中，根据其成像方式的不同，分为两种：偏振光谱成像技术、快照式偏振光谱成像技术^[102,103]，二者的区别在于获得目标的偏振、光谱、强度和二维空间信息速度的快慢。下面简单介绍国内外关于偏振光谱成像技术和快照式偏振光谱成像技术的研究现状。

1.2 偏振光谱成像技术与快照式偏振光谱成像技术国内外研究现状

1.2.1 偏振光谱成像技术国内外研究现状

偏振光谱成像技术是在传统的光谱成像技术中插入偏振探测模块, 这样, 它就可以探测目标的偏振光谱信息。目前, 国内外已经有很多偏振光谱成像的仪器, 下面简要介绍几款典型的偏振光谱遥感仪器。

最早的偏振光谱遥感仪器是法兰西共和国研制的 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth Reflectance), 其结构布局图如图 1.2 所示^[5-7]。POLDER 诞生于 1996 年, 它具有多个波段的光谱成像功能, 波段范围从可见到红外。其中三个波段通道具有偏振测量功能: 443nm、670nm 和 865nm 通道。法兰西共和国科研人员在 POLDER 研制的基础上, 于 1999 年和 2012 年分别研制 PARASOL (Polarization and Anisotropy of Reflectances for Atmosphere Sciences Coupled with Observations from a Lidar) 与新一代仪器 3MI (Multi-Viewing Multi-Channel Multi-Polarization Imaging)^[8-9]。相比于 POLDER, PARASOL 偏振通道波段有所改变; 3MI 覆盖的光谱范围更广 (可见至短波红外), 光谱通道更多 (9 个), 因此, 3MI 获得的偏振光谱信息相对于 POLDER 更加丰富。

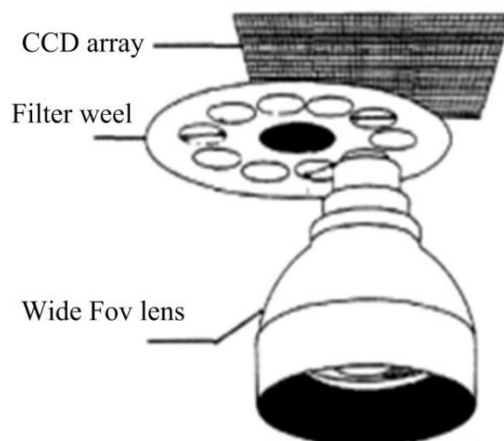


图 1.2 POLDER 光学结构布局图

Figure 1.2 Optical structure layout of POLDER

上述的系统结构都是基于窄带滤光片选通作为光谱分光方式, 通过旋转转轮得到不同波段光谱信息。美国、日本等科研机构 and Homma 等学者分别研制基于可调谐滤光片^[26-28] (Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF) 与基于液晶可调谐滤光片 (Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF) 的偏振探测仪器^[29]。前者以 AOTF 为基

础，利用它实现进行谱段选择和偏振分离，CCD 相机同时获取横向和纵向的偏振光谱图像；后者以步进电机的转动为根基，通过对它的控制达到对光束偏振态控制的目的，最后在探测器上获得目标偏振光谱图像。经过科研人员的不断努力，出现了将可调谐滤光片(AOTF)与液晶可调谐相位延迟器(Liquid-Crystal Variable Retardation, LCVR)相结合的系统^[30]，如图 1.3 所示，该仪器具有体积小、稳定性好、波段范围宽，并且可编程操控等优点。

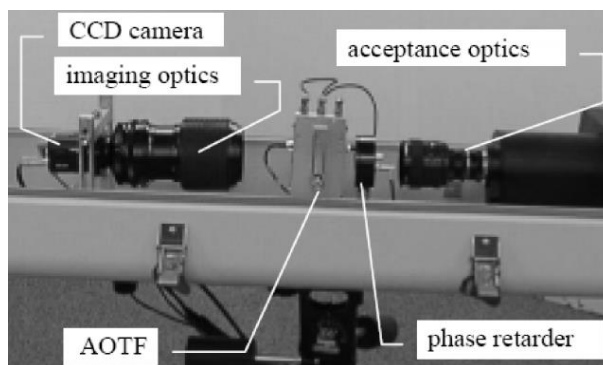


图 1.3 基于 AOTF 和 LCVR 的偏振光谱成像系统结构简图

Figure 1.3 Structure diagram of polarization spectroscopy imaging system based on AOTF and LCVR

由于分时测量实时性差，又出现了同时测量偏振光谱技术。美利坚合众国的航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）研制的星载气溶胶偏振探测仪（The Aerosol Polarimetry Sensor, APS）采用沃拉斯顿棱镜进行偏振分光，36 个独立探测单元同时采集数据，其结构示意简图如图 1.4 所示。APS 两面扫描镜正交放置，通过沿轨扫描方式工作^[32-34]。

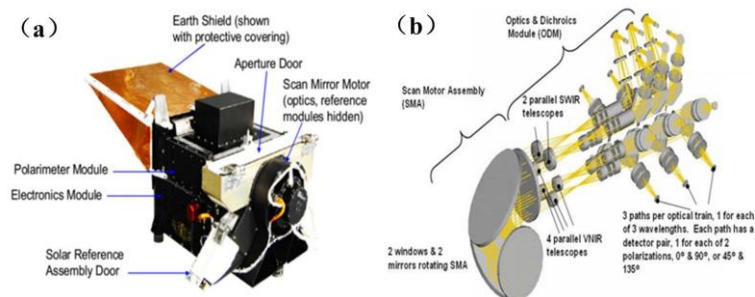


图 1.4 APS 结构示意图 (a) 外部光学图; (b) 光学器件示意图

Figure 1.4 Schematic diagram of APS structure (a) external optical diagram; (b) schematic

diagram of optical devices

Diner 等学者提出由两个光弹调制器 (Photoelastic Modulator, PEM) 和三面反射镜构成的多角度偏振光谱成像结构 (Multiangle SpectroPolarimetric Imager, MSPI), 基于同一原理该团队研制了机载多角度偏振光谱成像仪 AirMSPI, 具有 470nm、660nm 和 865nm 三个偏振光谱通道^[104-106]。

国内对于偏振光谱成像技术的研究主要集中于西安交通大学、南京理工大学和一些中科院旗下的研究所。

西安交通大学提出一种由起偏器、Savart 偏光镜和检偏器构成的干涉偏振光谱成像仪 (Novel Polarization Interference), 其通过伺服电机带动, 对三个不同角度的光强值分别记录, 最后实现对目标的偏振光谱信息探测, 科研人员采用计算机仿真实验的方式验证^[37]该仪器有效性。

南京理工大学等科研人员将微偏振阵列 (Micro-Polarization Array, MPA) 和干涉偏振光谱成像系统相结合, 如图 1.5 所示。系统数据收集方式为凝视的工作方式, 通过转动 Sagnac 棱镜就能够测取一系列干涉图, 对这些干涉图进行傅里叶解调实现目标光偏振谱信息探测。

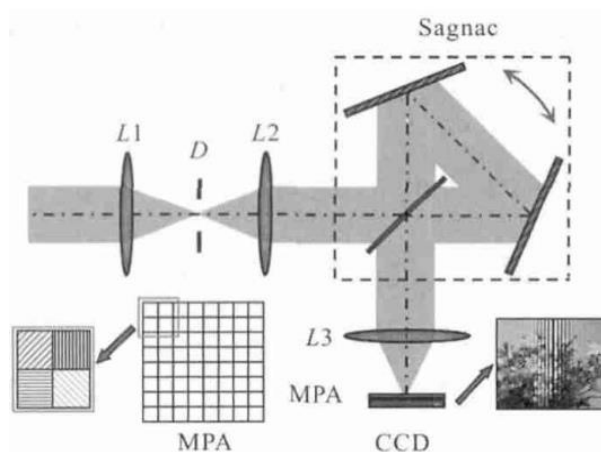


图 1.5 基于 MPA 的干涉偏振光谱成像系统

Figure 1.5 The interference imaging spectropolarimetric system based on MPA

李杰等人应用偏振探测器件中的偏振光谱强度调制模块, 通过在静态傅里叶变换光谱仪中插入该偏振探测器件得到静态傅里叶变换型偏振光谱仪, 其光学结构整体示意图如图 1.6 所示^[36-37]。西安光机所的王新全等人进一步发掘光谱强度

调制模块的应用，将其插入到 Sagnac 干涉仪系统中得到通道型偏振光谱测量仪器系统，其结构示意图如图 1.7 所示^[38-39]。

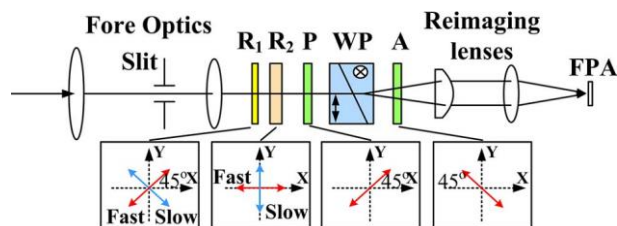


图 1.6 静态傅里叶变换偏振光谱仪光学布局示意图

Figure 1.6 Schematic of optics layout of the static Fourier-transform spectropolarimeter

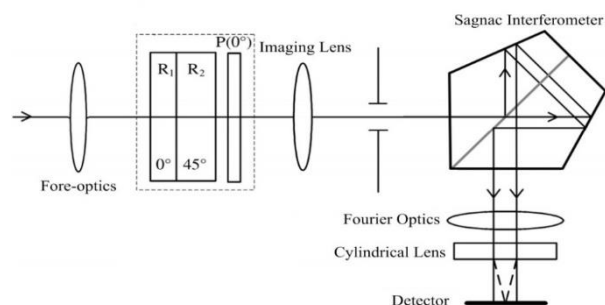


图 1.7 基于 Sagnac 干涉仪的强度调制型偏振光谱探测系统结构示意图

Figure 1.7 Schematic diagram of the structure of the intensity-modulated polarization spectroscopy detection system based on the Sagnac interferometer

DPC (Directional Polarimetric Camera, DPC) 和 CAPI (Cloud and Aerosol Polarimetric Imager, CAPI) 分别是中科院安徽光机所和中科院长春光机所研制的。这两个仪器成功的研制填补了我国在遥感探测领域的两处空白：DPC 填补了我国在大气遥感领域自主获取偏振光谱数据的空白；CAPI 填补了我国星载 CO₂ 遥感探测能力的空白。DPC 的光学结构图图 1.8 所示^[40]，CAPI 不同单机结构图如图 1.9 所示^[10]。

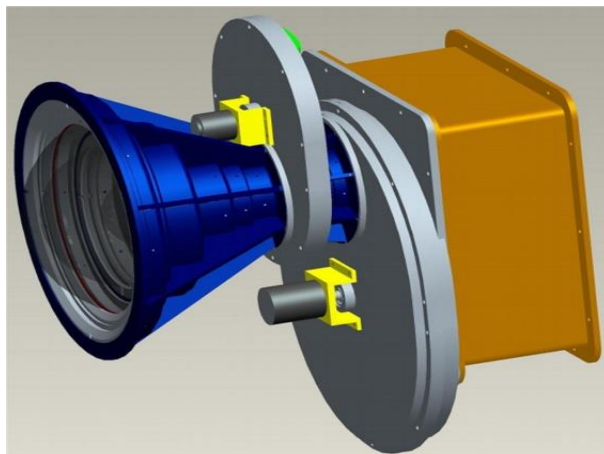


图 1.8 DPC 外部光学结构整体图

Figure 1.8 Overall diagram of the external optical structure of the DPC

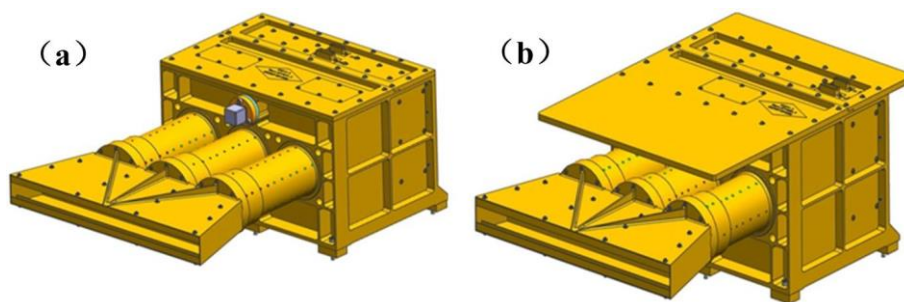


图 1.9 CAPI 两个波段单机外壳图 (a) 可见近红外单机外壳; (b) 短波红外单机外壳

Figure 1.9 CAPI two-band stand-alone shell diagram (a) the VNIR module; (b) the SWIR module

1.2.2 快照式偏振光谱成像技术国内外研究现状

随着光学遥感技术的进步,出现了新的成像光谱技术——快照式成像光谱技术,其能够一次遥感就可以得到目标的光谱和二维空间的三维数据立方体。该技术系统结构内部不存在运动部件和动态调节组件,抗干扰能力强、成像速度快,实时性好。其中,微透镜阵列,计算光谱成像和计算层析型光谱成像三大类^[41]成为快照式成像光谱技术主要研究对象。

基于微透镜阵列的快照式光谱成像技术构造遵照分光瞳的思维^[42],原理图如图 1.10 所示^[107-111]。微透镜阵列位于物镜的像面上,物体经过前置光学系统成像在微透镜阵列上,单个微透镜将其范围内的所有光进行会聚得到一个点,所有由

微透镜会聚的点经过不同器件成像在探测器上。该仪器结构简单,实现方法众多,缺点在于空间分辨率太低,装调困难。

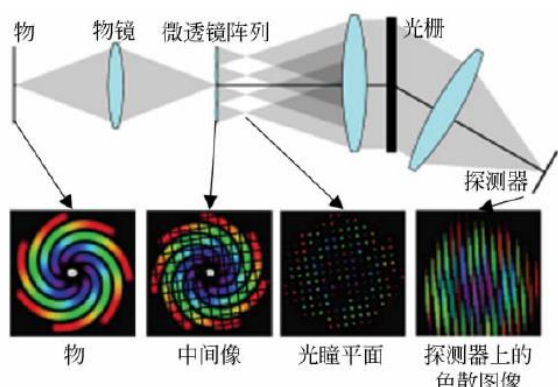


图 1.10 基于微透镜阵列的光谱成像光学系统图

Figure 1.10 Schematic of lenslet arrays imaging spectrometry

基于计算光谱成像技术结构原理如图 1.11 所示^[43-48], 该技术是将传统色散型高光谱成像结构中放入一个二维编码模板。物体经过前置成像系统成像在二维编码模板处, 物体横向与纵向的空间信息由编码模板调制, 调制后的信息经准直后通过色散元件成像在探测器上, 利用压缩感知相关算法重建物体的三维数据立方体。该技术具有高光通量、高光谱分辨率和信噪比, 但是其重构数据质量不可预测, 且其空间分辨率较低。

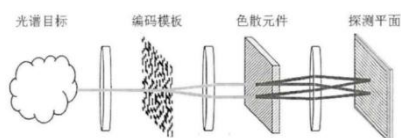


图 1.11 基于压缩感知理论成像光学系统图

Figure 1.11 Imaging Optical System Diagram Based on Compressed Sensing Theory

基于计算层析型成像光谱技术 (Computed Tomography Imaging Spectrometer, CTIS) 原理如图 1.12 所示, 该技术将计算机断层扫描技术应用于光谱成像技术中^[49-59]。目标物体经过整个系统衍射成像在探测器上, 利用计算层析相关算法, 对衍射图进行解调就可以重构出目标物体的三维数据立方体。CTIS 具有结构不存在运动器件, 性能稳定, 高光转换效率等优点, 但是数据重建需要若干个方向投影。

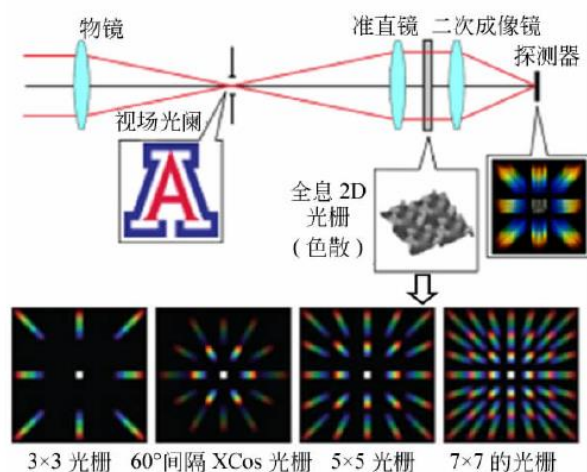


图 1.12 计算层析光谱成像系统结构图

Figure 1.12 Schematic of computed tomographic imaging spectrometry

快照成像不仅只有上述几种方法，还有光线阵列、全息光栅、多光谱成像 Sagnac 干涉仪等形式的快照方式，他们各自都有各自优缺点^[111-113]，这里就不详细叙述。

偏振光谱探测技术可以获得目标的偏振、光谱和二维空间信息，但是其探测速度相对较慢，快照式光谱成像技术可以快速获得目标的光谱和二维空间信息，无法获得偏振信息。因此，将二者结合在一起，既增加了偏振光谱探测技术获取数据的速度，又丰富了快照式偏振光谱成像技术信息探测能力。该技术可以通过一次测量在可以快速得到目标的横向与纵向的二维空间和光谱信息的同时，目标的偏振信息也可以得到记录。目前，国内外关于快照式偏振光谱成像技术大多都是实验室内的研究，下面简要介绍几款典型的快照式偏振光谱成像遥感仪器。

2007 年，Vandervlugt 等人提出计算层析通道光谱成像仪（Computed tomography imaging channeled spectropolarimeter, CTICS）。系统结构图如图 1.13 所示^[60]，该系统将计算层析技术和偏振强度调制模块相结合。该系统可以同时单个分辨率元素上获得目标图像的空间信息、光谱信息以及偏振 Stokes 矢量信息。

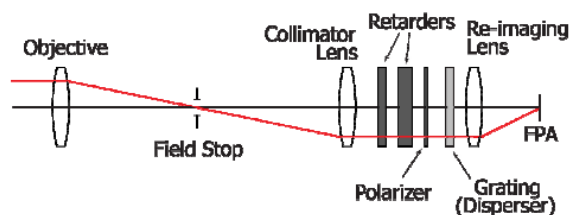


图 1.13 计算层析通道光谱成像仪系统结构图

Figure 1.13 Schematic of Computed tomography imaging channeled spectropolarimeter

2013 年, Tsung-Han 等人提出孔径编码快照式偏振光谱成像仪(coded aperture snapshot spectral polarization imager)。系统模型如图 1.14 所示^[61], 其将编码孔径压缩感知技术和双折射晶体相结合。经过编码孔径的光, 被双折射晶体分成 o 光和 e 光, 这两束光经过成像镜成像在 CCD 上, 通过相关算法解调目标空间、光谱和偏振信息。但是, 此系统只能解调 Stokes 矢量信息中的 S_0 和 S_1 两个矢量的偏振信息, 没法得到目标的全 Stokes 信息。

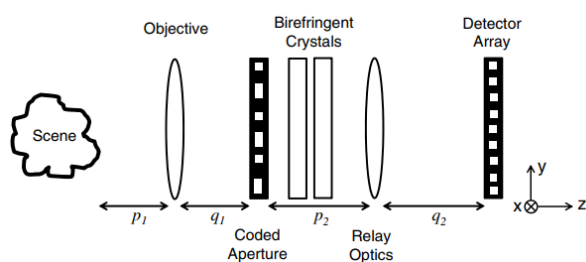


图 1.14 孔径编码快照式偏振光谱成像仪系统结构图

Figure 1.14 Schematic of coded aperture snapshot spectral polarization imager

2015 年, 付晨等人提出一种基于像素化的压缩光谱偏振成像仪^[62]。其采用一个由小孔偏振器组成的微偏振阵列, 每个微偏振器有四个角度, 分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° , 经过分光元件分的光投影到微偏振器阵列, 最后成像在探测器上。对探测数据经过后期相关数据处理, 可以得到目标的空间、偏振、光谱相关信息。

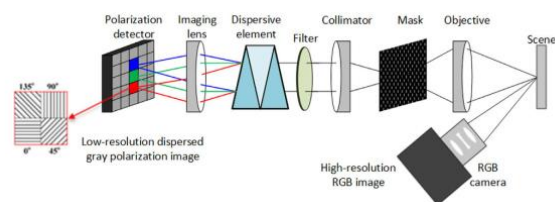


图 1.15 快照线性偏振光谱成像仪系统结构图

Figure 1.15 Schematic of Snapshot linear-Stokes imaging spectropolarimeter

2016 年, 穆廷魁等人提出快照线性偏振光谱成像仪(Snapshot linear-Stokes imaging spectropolarimeter), 如图 1.15 所示^[63]。其探测器每个像元被分成四个, 分别刻有 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个角度。不同波段的光通过色散棱镜被色散到不同的像元位置, 获得不同光的四个方向的偏振信息。后期对这些数据进行相关处理, 就可以得到目标的偏振光谱信息。其中, 为了得到目标的空间信息, 在系统外又加了一个 RGB 相机。该相机既可以获得目标空间位置, 也可以指导后期数据处理。该系统只可以得到目标的线偏振信息, 且损失了一定的空间分辨率。

2018 年, 任文艺等人提出一种压缩通道偏振成像光谱仪(compressed channeled imaging spectropolarimeter, CCISP), 原理图如图 1.16 所示^[64]。该系统将压缩感知编码孔径技术和强度调制模块结合, 一次测量就可以得到目标的光谱、空间和全 Stokes 偏振信息。相比于传统的偏振光谱成像系统, 其解决了频谱分辨率低和通道混合的问题。2019 年, 任文艺等人又提出一种通道压缩偏振成像光谱仪(Channeled compressive imaging spectropolarimeter, CCISP)。该仪器将压缩感知技术和强度调制模块相结合, 可以同时获得目标的全偏振、二维空间和光谱信息。在整个系统的前面, 放置了一个转轮, 这个转轮有五个位置, 第一个转轮不放置偏振片, 其他四个位置分别放置 0° 、 45° 、 90° 、 135° 的线偏振片。系统原理图如图 1.17 所示^[65]。其相关信息是通过相关重建算法, 不需要傅里叶变换和空间滤波, 从而克服了传统基于通道的成像偏振光谱仪存在通道串扰、高频损失的局限性。

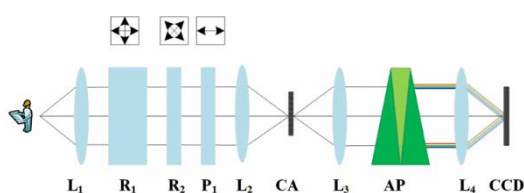


图 1.16 压缩通道偏振成像光谱仪系统结构图

Figure 1.16 Schematic of compressed channeled imaging spectropolarimeter

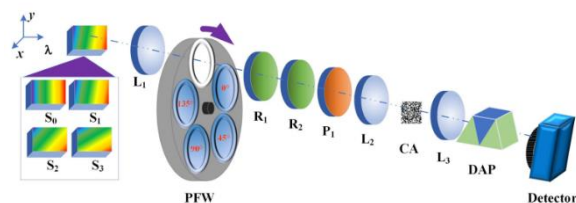


图 1.17 通道压缩偏振成像光谱仪结构图

Figure 1.17 Schematic of Channeled compressive imaging spectropolarimeter

哈尔滨工业大学张宇等人将微透镜阵列与沃拉斯顿棱镜结合,通过使沃拉斯顿旋转一定的角度使每一行子透镜携带的光程差信息相同,有效利用每一个子透镜。在微透镜前放置一个起偏器实现偏振测量,但是该仪器只可以测量部分斯托克斯矢量^[114]。

通过上述关于国内外快照式偏振光谱成像技术研究现状可知,目前快照式偏振光谱成像技术通过一次测量可以实现目标的偏振、光谱、二维空间的测量。但是,快照式偏振光谱成像遥感仪器采用的偏振探测模块存在只能单像素测量无法获得完整二维空间、只可以测得部分 Stokes 矢量信息、结构内部存在旋转部件等问题。针对上述的问题与不足,二十一世纪初 Oka 等人提出空间调制偏振成像技术,其可以对目标进行全静态、全 Stokes 矢量、全二维空间测量,这可以让科研人员对于快照式偏振光谱成像技术中的偏振探测模块有新的选择和新的仪器设计思路。

1.3 空间调制型偏振成像技术的研究进展分析及课题研究意义

空间调制型偏振成像技术使目标的空间信息干涉成像,将干涉图像处理,可以获得目标的二维空间以及偏振信息,通过频繁更换滤波片和半波片得到目标的光谱信息。该技术具有实时性好、无需运动部件、一次测量便可以获得目标的全 Stokes 矢量信息等优点备受国内外学者的关注。因此,本文对空间调制偏振成像系统进行研究,综述国内和国外关于空间调制偏振成像技术的研究进展情况,总结空间调制偏振成像技术的研究现状。

1.3.1 空间调制型偏振成像技术研究进展

空间调制偏振成像技术由 OKA 在 2003 年首次提出，最开始的空间调制型偏振成像系统由 4 块楔形棱镜组为调制模块的空间全偏振系统。其中，四块楔形棱镜的光轴两两正交，光轴的方向分别为 0° 、 90° 、 45° 和 135° 。其光学布局如图 1.18 所示^[66]，单块楔形棱镜的厚度由上至下变化，光束射入楔形棱镜后，不同出射光线会与入射光线产生一定相关的相位延迟变化。入射光束的相位被楔形棱镜组调制，最终在 CCD 面阵探测器上形成包含 4 个 Stokes 参数信息的干涉条纹。为了求解入射光的 4 个 Stokes 参数，需要对干涉条纹进行相关算法的解调。该系统具有体积小、结构紧凑、容易实现的优点。但是，由于楔形棱镜楔角的存在使得系统存在光束偏折和光束分离的现象，使只有部分光线经过楔形棱镜后成像在 CCD 上，从而影响成像质量。

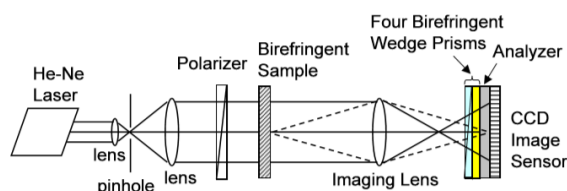


图 1.18 基于楔形棱形的空间调制偏振成像系统示意图

Figure 1.18 Schematic of spatially polarization imaging system based on wedge prism

2006 年，美国亚利桑那州大学提出一种以 Savart 偏光镜为调制模块的空间调制型偏振成像系统，该系统可以克服楔形棱镜存在的光束偏折和光束分离的现象，如图 1.19 所示^[67]。该系统由前置镜组、Savart 偏光镜 1、半波片、Savart 偏光镜 2、检偏器、成像镜和 CCD 探测器构成。其中，系统内的 Savart 偏光镜 1、半波片和 Savart 偏光镜 2 称为空间调制模块。一束光经过前置镜组变为平行光，这束平行光经过空间调制模块后被剪切成四束彼此之间存在固定横向偏移量的线偏振光，四束光经过检偏器后归一化振动方向，经成像透镜在 CCD 探测器上产生包含 4 个 Stokes 矢量信息的干涉图样。采用特定算法对干涉条纹进行解调，可以得到目标的 Stokes 矢量信息。

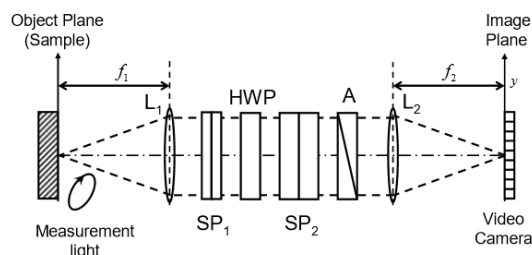


图 1.19 基于 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统示意图

Figure 1.19 Schematic of spatially polarization imaging system based on Savart

2008 年, Luo 等学者提出小型化空间调制型全偏振成像系统, 该系统同样以两块 Savart 偏光镜和半波片作为空间调制模块^[68]。该系统移除前置镜组, 使用高折射率的晶体作为 Savart 偏光镜的材料, 通过增加折射率减小 Savart 偏光镜的厚度使光线分离达到同样的横向剪切量, 整个系统的长度小于 25cm。该系统具有体型小、携带方便和视场角大等优点。OKA 又以仿真的形式在 Savart 偏光镜系统内添加了衍射透镜提高了仪器的带宽。Staio 在两块 Savart 偏光镜单板之间加入一块半波片得到改进 Savart 偏光镜, 扩增了原系统的视场。

国内的高校与研究所针对空间调制偏振成像技术的研究与应用也有很多。

2012 年, 西安交通大学的曹奇志等科研人员提出基于改进 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统, 如图 1.20 所示^[69]。改进的 Savart 偏光镜 1、半波片、改进的 Savart 偏光镜 2 构成该系统的空间调制模块。一束光经过调制模块分离四束光, 这四束光被归一化振动方向后经过成像镜在 CCD 上形成包含 Stokes 信息的干涉图, 对干涉图进行解调可以得到目标的 Stokes 矢量信息。曹奇志等人通过仿真分析对比, 验证了该系统与基于传统 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统相比存在以下优势: 各通道的滤波宽度提高了 2 倍; 频谱中 Stokes 各参量的数据面积提高了 4 倍, 减少了傅里叶变换方法频谱串扰的影响, 增加 Stokes 信息反演准确度。在改进 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像技术基础上, 该团队的张晶等人提出一种消除伪信息且获取全分辨率目标像的方法^[70]。该方法通过测量正交角度的线分析器获得的两幅正交的干涉图, 对着两幅干涉图进行处理, 当两幅干涉图像求和处理后得到的图像只有直流分量, 获得全分辨率的目标图像, 即目标 Stokes 矢量中的 S_0 ; 当两幅干涉图像作差处理后得到的图像背景图像消失, 获

得高信噪比的偏振分量干涉图。对高信噪比的偏振分量干涉图采用相关算法进一步处理,就能够获得目标剩余的 Stokes 矢量信息。曹奇志等人利用改进 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统,通过对系统重新理论建模,仅一次测量就能够获得目标的强度图像和全部的 16 个穆勒矩阵阵元图像^[115]。

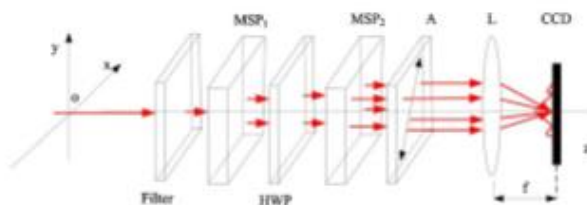


图 1.20 基于改进 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像示意图

Figure 1.20 Schematic of spatially polarization imaging system based on modified Savart

中国科学院合肥物质科学研究所的龚冠源等人对空间调制偏振成像系统解调算法深入研究。传统的频域解调算法存在各通道之间频域串扰的问题,该团队提出空域解调算法^[71],通过对系统重新理论建模,在相邻像素构成邻域模板,忽略各像素之间的偏振态差别,将空间调制偏振信息解调转化为超定方程组求解问题。但是,该方法复杂度高,不易于实现。基于空域解调算法,刘震等人分析了空间调制模块中半波片和线偏振片角度误差对 Stokes 矢量信息反演精度的影响^[72]。叶松等人为解决空间调制现有解调算法不适用宽波段光探测系统^[73],提出通过寻找中心频率位置获得实际载波频率的方式对频域解调算法进行修正。利用仿真验证宽波段空间调制型全偏振成像系统通过修正的图像解调算法能够得到中心波长的偏振信息,且偏振探测误差小于 5%。胡巧云等人对空间调制型全偏振成像系统原理进行了仿真验证了方案的可行性,为仪器设计或器件选型提供参考^[74]。

1.3.2 空间调制偏振成像技术的研究现状总结

由空间调制偏振成像系统的国内外研究进展可以看出:当前国内外针对空间调制偏振成像系统的研究主要集中于对空间调制模块和解调算法方面优化,这为空间调制偏振成像系统的研制提供了可供借鉴的宝贵经验。但是,对于当前关于空间调制偏振成像系统技术的研究中,还存在以下问题:

- (1) 由于空间调制偏振成像系统内部有半波片,在装调过程中会存在装调角度

误差,使系统引入额外的相位延迟,导致偏振信息解调精度下降;

(2) 由于空间调制偏振成像系统内存在半波片和滤波片,为获得目标不同波段的偏振信息,需要频繁更换这两个波片,大大降低了探测效率;

(3) 空间调制偏振成像系统偏振信息解调大多数采用傅里叶频域滤波解调方法,在解调过程中会带来通道串扰、高频损失和引入解调噪声的问题,降低偏振信息解调精度。

上述的问题大大限制了空间调制偏振成像技术的工程化应用,因此,为进一步完善空间调制偏振成像技术的理论,推动其工程化应用进程,空间调制偏振成像技术的快速光谱探测能力和偏振信息解调方式需要更深入的研究。

1.3.3 课题研究意义

通过上面的分析可以看出:目前对于空间调制型偏振成像系统的结构和解调算法方面仍存在一定的不足,因此,有必要进一步研究空间调制偏振成像系统。本课题将在当前研究现状的基础上,围绕空间调制偏振成像系统结构和偏振信息解调算法展开理论研究。对空间调制偏振成像系统结构优化改进,使空间调制偏振成像系统具备探测目标的偏振光谱信息能力,进一步完善空间调制偏振成像系统在遥感探测领域目标信息探测能力,对空间调制偏振成像系统工程化应用具有重要意义;对空间调制偏振成像系统偏振数据解调算法改进,提高偏振信息探测精度同时减少数据复原时间,进一步推动空间调制偏振成像系统遥感数据量化应用。

1.4 本文研究内容和章节安排

本文针对空间调制型偏振成像系统的结构改进与偏振解调算法开展研究,总体研究路线如图 1.21 所示。

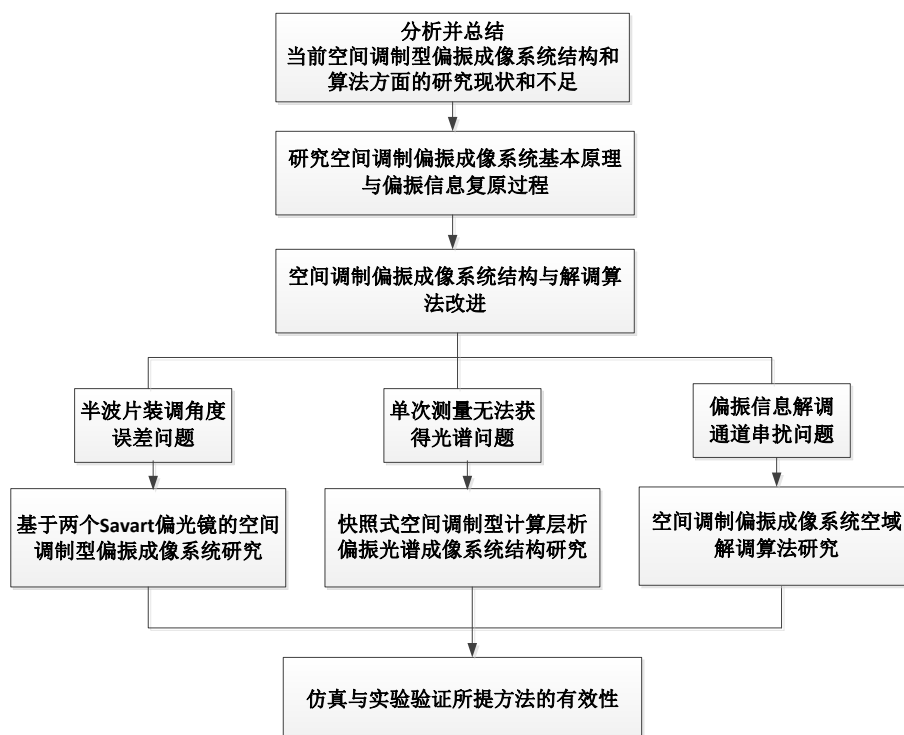


图 1.21 总体研究路线

Figure 1.21 Overall route of the research

围绕空间调制偏振成像系统自身的不足，本论文开展以下几个方面研究：

第 1 章综述了目前国内外对于偏振光谱成像系统和快照式偏振成像光谱技术的研究进展，总结当前空间调制型偏振成像系统结构和算法方面的研究现状并分析了其目前存在的不足，论述了本课题的必要性和重要性。

第 2 章介绍了光波的偏振态及其表示方法，利用波法线追迹的方法推导 Savart 偏光镜光轴方向与横向剪切量的关系，为后面结构优化改进提供依据；阐述了基于 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统偏振信息解调的原理，指出当前系统的不足之处。

第 3 章主要研究了基于两个 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统的构造与原理。首先，分析了传统结构中半波片装调角度和额外相位延迟带来偏振信息解调误差；其次，构建了基于两个 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统的结构，并对系统进行理论建模；之后，对傅里叶解调算法中频域滤波算法进行优化，找到适合该系统不同解调通道的滤波函数；最后，利用仿真分析与试验的方法验证了基于两个 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统原理和解调算法的

可行性。

第 4 章主要研究了快照式空间调制型计算层析偏振光谱成像系统结构和原理。首先,了解了计算层析成像光谱系统结构、原理和数据解调的相关算法。其次,在计算层析成像光谱系统前端插入基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统内的空间调制模块构建快照式空间调制型计算层析偏振成像光谱系统,推导了快照式空间调制型计算层析偏振成像光谱系统理论模型、计算了系统内各个器件的参数和介绍了数据解调算法。最后,为了证明本章所提出结构的有效性与可行性,对其进行了仿真分析与试验验证。

第 3 章和第 4 章的研究对象主要集中于空间调制偏振成像系统的结构优化方面,第 5 章从空间调制偏振成像系统数据解调出发,研究不同于龚冠源等人提出的空域解调算法。对空间调制偏振成像系统重新理论建模,将空间调制偏振信息解调转化为欠定方程组求解问题。为抑制欠定方程组迭代求解过程中噪声的干扰,将 TV 正则化算法和 TwIST 算法相结合得到 TwIST-TV 算法,利用 TwIST-TV 算法对空间调制偏振成像系统偏振信息数据解调。最后,为了证明空域解调算法的有效性,对其进行了仿真分析和试验验证。

第 6 章为总结和展望。

第 2 章 空间调制型偏振成像基本理论及技术研究

通过分析目标的偏振信息就可以获得目标折射率、粗糙度等相关属性信息^[1-3]，因此偏振信息被应用到很多领域。在遥感领域发展出两种典型的偏振信息探测方式，分别为获得目标物体的偏振图像信息以及偏振光谱信息。本论文研究的空间调制偏振成像技术得到的是目标物体偏振图像，为获得目标物体的偏振图像，空间调制型偏振成像技术利用两块 Savart 偏光镜来实现。本章将从偏振的基础知识基本原理出发，对比目前存在几种典型的偏振信息探测技术的优缺点。同时，对空间调制型偏振成像系统的结构、理论模型数据复原方法进行介绍，为空间调制型偏振成像系统的定量化研究奠定理论基础。

2.1 光波的偏振态分析方法

2.1.1 光波的偏振态

光学中经常讨论的偏振情况有三种：椭圆偏振、线偏振和圆偏振。对于一个在三维空间内传播的平面，其表达式可以表示为：

$$E = E_0 \cos(\tau + \delta_0) \quad (2.1)$$

上式中， $\tau = \omega t - kz$ ，光是沿着三维空间 z 轴传播的。将上式写成分量形式表示为：

$$\begin{aligned} E_x &= E_{0x} \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y &= E_{0y} \cos(\tau + \delta_2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$E_z = 0$$

为了求得电场矢量 E 的终点所描述的曲线，把变量 τ 消去，可得：

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x}{E_{0x}} \frac{E_y}{E_{0y}} \cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (2.3)$$

上式中， $\delta = \delta_2 - \delta_1$ ，从公式 2.3 可以看出电场矢量 E 的端点所描画的轨迹

是一个椭圆，将其称为椭圆偏振。当 $\delta = \delta_2 - \delta_1$ 的值变化，电场矢量 E 的端点描画的轨迹也发生变化，其偏振态也随着改变。当：

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = m\pi (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.4)$$

公式 2.3 变为：

$$\frac{E_y}{E_x} = (-1)^m \frac{E_{0y}}{E_{0x}} \quad (2.5)$$

从公式 2.5 可以看出，电场矢量 E 的终点所描画的轨迹是一条直线，称其为线偏振。当

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = m\pi / 2 (m = \pm 1, \pm 3, \dots) \quad (2.6)$$

并且如果 E_x ， E_y 两分量的振幅相等，即

$$E_{0x} = E_{0y} = E_0 \quad (2.7)$$

则公式 2.3 变为

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \quad (2.8)$$

从公式 2.8 可以看出，此时，电场矢量 E 的终点所描画的轨迹是一个圆，我们将其称为圆偏振。如果公式 2.3 中满足 $\sin(\delta) > 0$ ，则 $\delta = \delta_2 - \delta_1 = \pi / 2 + 2m\pi (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$ ，因此，有下列关系：

$$\begin{aligned} E_x &= E_{0x} \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y &= E_{0y} \cos(\tau + \delta_1 + \pi / 2) \end{aligned} \quad (2.9)$$

公式 2.9 说明 E_x 的相位比 E_y 的落后 $\pi / 2$ ，这时，我们称之为右旋圆偏振光。反之，当 $\sin(\delta) < 0$ ， $\delta = \delta_2 - \delta_1 = -\pi / 2 + 2m\pi (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$ ，有下列关系

$$\begin{aligned} E_x &= E_{0x} \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y &= E_{0y} \cos(\tau + \delta_1 - \pi / 2) \end{aligned} \quad (2.10)$$

说明 E_x 的相位比 E_y 的超前 $\pi / 2$ ，这时，我们称之为左旋圆偏振光

2.1.2 偏振光的描述

为了表征光的偏振态，国内外学者提出多种方法，下面对几种方法进行简要

的介绍。

2.1.2.1 琼斯矢量法

琼斯矢量法是通过一个列矩阵来表示电场矢量的分量^[75-76]：

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\delta_x} \\ E_{0y} e^{i\delta_y} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

上式中的矩阵被称为琼斯矢量，包含电场矢量的振幅信息和相位信息，可以描述某一特定平面波。将琼斯矢量进行归一化，公式 2.11 的表达式变为：

$$\bar{\mathbf{E}} = \frac{E_{0x}}{\sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha_{yx} e^{i\delta} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

上式中 $\alpha_{yx} = E_{0y} / E_{0x}$ 为沿 y 轴、 x 轴的振幅比。因为琼斯矢量表达式自身的限制，琼斯矢量只能对完全偏振光进行表达。几种典型偏振状态的琼斯矢量，如表 2.1 所示。

表 2.1 典型偏振状态的琼斯矢量

Table 2.1 The Jones vectors of the typical polarization states

偏振状态		$\bar{\mathbf{E}}$
线偏振光	电场矢量与 x 轴平行	$[1 \ 0]^T$
	电场矢量与 y 轴平行	$[0 \ 1]^T$
	电场矢量与 x 轴夹角为 θ ($\theta \neq \pm\pi/2$)	$\cos\theta \cdot [1 \ \tan\theta]^T$
圆偏振光	左旋	$[1 \ i]^T / \sqrt{2}$
	右旋	$[1 \ -i]^T / \sqrt{2}$

2.1.2.2 斯托克斯矢量法

斯托克斯 (Stokes) 矢量采用四个矢量信息去描绘光波的光强和偏振态，与琼斯矢量只能表达完全偏振光不同，斯托克斯矢量能够表示任意形态光的偏振态。根据表式形式的不同，斯托克斯矢量可以有多种表达形式，其中一种的斯托

克斯矢量参数复振幅表示法为^[75-76]:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x^2 + E_y^2 \\ E_x^2 - E_y^2 \\ E_x E_y^* + E_y E_x^* \\ i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

上式中 S_0 参量表示光场总强度, S_1 参量表示光场水平偏振分量与垂直偏振分量的光强差, S_2 参量表示光场 $+45^\circ$ 偏振分量与 -45° 偏振分量的光强差, S_3 参量表示光场左旋圆偏振分量与右旋圆偏振分量的光强差, E_x 和 E_y 代表偏振光水平和垂直复振幅分量, i 代表虚数。四个斯托克斯参量之间的关系满足关系式:

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (2.14)$$

当光束为完全偏振光时, 上式等号成立。本文给出了几种典型偏振状态的斯托克斯矢量, 如表 2.2 所示。

表 2.2 典型偏振状态的斯托克斯矢量

Table 2.2 The Stokes vectors of the typical polarization states

偏振状态		\mathbf{S}
线偏振光	电场矢量与 x 轴平行	$[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$
	电场矢量与 y 轴平行	$[1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$
	电场矢量与 x 轴夹角为 θ ($\theta \neq \pm\pi/2$)	$[1 \ \cos 2\theta \ \sin 2\theta \ 0]^T$
圆偏振光	左旋	$[1 \ 0 \ 0 \ -1]^T$
	右旋	$[1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$

光束中偏振部分的光强度和整个光强度的比值称其为偏振度, 利用斯托克斯矢量计算偏振度 P 表达式为:

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2.15)$$

如果是完全偏振光, 偏振度 $P=1$, 部分偏振光, 偏振度 $0 \leq P \leq 1$, 其余所有光的偏振度 $P=0$ 。

2.1.2.3 邦加球法

邦加球是描述任意偏振态的图示法，球面的两个方位角能够表示任意椭圆偏振光的偏振态，这两个角被称为球面上的经度和纬度。因此，球面上一个点就能代表一个偏振态，球上点的组合能够代表一切的偏振态，如图 2.1 所示。图中的 χ 为椭率角， ψ 为方位角。当知道偏振度 P ，无论是部分偏振光还是完全偏振光，Stokes 矢量和邦加球具有下列关系：

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = S_0 \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos(2\chi) \cos(2\psi) \\ P \cos(2\chi) \sin(2\psi) \\ P \sin(2\psi) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

根据公式 2.16，可以得到邦加球具有如下性质^[75]：

- 邦加球球心处， $P=0$ ，代表完全非偏振光；
- 邦加球球面任意一点， $P=1$ ，代表完全偏振光；
- 邦加球内任意一点， $0 \leq P \leq 1$ ，代表部分偏振光；
- 邦加球外任意一点， $P > 1$ 没有实际的物理意义。

邦加球可以快速、简单的给出任意偏振态的定性描述，其优点是在复杂的方程式中，可以用最重要的物理量描述偏振状态的基本属性。

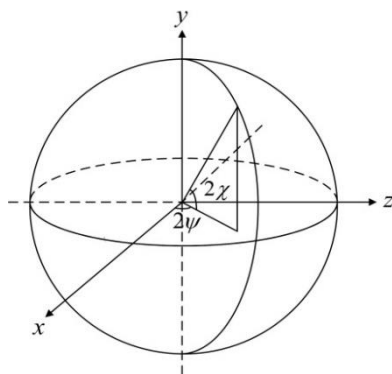


图 2.1 邦加球示意图

Figure 2.1 Schematic of Poincare sphere

2.1.3 穆勒矩阵

光波的偏振态会在与物质相互作用时发生变化，为了定量化描述这种，通常采用穆勒矩阵（Muller）来表示。穆勒矩阵是一个 4×4 的实矩阵，其表达式为：

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

穆勒矩阵可以定量对偏振器件进行描述,下面介绍几种典型偏振器件的穆勒矩阵。

(1) 线偏振片的穆勒矩阵

线偏振片是一种二向衰减元件,可以把自然光变成线偏振光,用来做光学系统中的起偏器或者检偏器。对于理想线偏振片,平行和垂直于通光轴方向的透过率分别为 1 和 0。通光轴方位角为 θ 的理想线偏振片的穆勒矩阵表示为:

$$\mathbf{M}_{LP}(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

(2) 波片的穆勒矩阵

不同厚度的波片会让入射光的正交分量之间产生不同的相位变化,达到改变入射光的偏振态的目的。波片的内部材料以石英、方解石等双折射晶体居多。对于快轴方位角为 θ 、相位延迟量为 φ 的波片穆勒矩阵表示为:

$$\mathbf{M}_{LR}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) + \cos(\varphi)\sin^2(2\theta) & [1-\cos(\varphi)]\cos(2\theta)\sin(2\theta) & -\sin(\varphi)\sin(2\theta) \\ 0 & [1-\cos(\varphi)]\cos(2\theta)\sin(2\theta) & \sin^2(2\theta) + \cos(\varphi)\cos^2(2\theta) & \cos(2\theta)\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi)\sin(2\theta) & -\cos(2\theta)\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

2.2 典型的偏振信息探测技术

目前,存在许多中偏振信息探测技术,这里我们简单的介绍几种。

2.2.1 时间调制型偏振探测技术

时间调制型偏振探测技术是最早提出的偏振探测技术,其结构相对简单,结构原理图如图 2.2 所示。从图 2.2 可以看出,该系统最前面放置了一个偏振片,探测器获得的偏振信息与偏振片透光轴的方向旋转的角度有关,当偏振片透光轴方向与系统水平面夹角为 ε 时,探测器收集到的信息与 Stokes 矢量之间存在如下关系^[116]:

$$I(\varepsilon) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos 2\varepsilon + S_2 \sin 2\varepsilon] \quad (2.20)$$

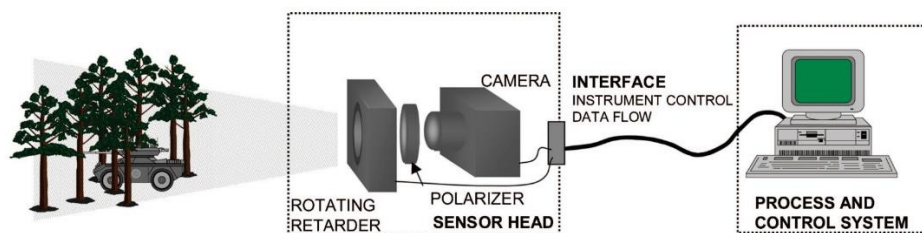


图 2.2 时间调制型偏振成像系统整体原理图

Figure 2.2 The overall schematic diagram of the time-modulated polarization imaging system

旋转偏振片到 0° 、 60° 和 120° 三个角度，探测器上获得三个偏振信息的调制态，将探测上获得的三个偏振信息采用特定的算法处理，完成目标的 Stokes 矢量中的部分矢量重建，如下面公式所示：

$$S_0 = \frac{2}{3}(I_{0^\circ} + I_{60^\circ} + I_{120^\circ}) \quad (2.21a)$$

$$S_1 = \frac{2}{3}(2I_{0^\circ} - I_{60^\circ} - I_{120^\circ}) \quad (2.21b)$$

$$S_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}(I_{60^\circ} - I_{120^\circ}) \quad (2.21c)$$

对于目标偏振信息的复原，旋转偏振片 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个角度也可以完成，这里就不详细赘述了。

由于系统中存在偏振片，所以该方法只可以测量线偏振分量。通过研究学者的努力，分时偏振成像系统中加入相位延迟量为 $\lambda/4$ 的可编程铁电液晶延迟器就能够获得目标全斯托克斯参量的测量^[117]。在测量目标 Stokes 矢量偏振信息，该方法需要不断旋转偏振片，无法同时得到 Stokes 矢量中所有矢量偏振信息。

2.2.2 光谱调制型偏振信息探测技术

光谱调制型偏振信息探测技术的核心是相位延迟器，相位延迟其是由晶体构成。两块不同厚度的相位延迟器与偏振片结合就构成光谱调制型偏振信息探测系统的偏振探测模块，结构原理如图 2.3 所示。探测上获得的是经过相位延迟器调制过的斯托克斯矢量，偏振信息的调制表达式为^[118,119]：

$$\begin{aligned}
B(\sigma) = & \frac{1}{2} S_0(\sigma) \\
& + \frac{1}{4} S_1(\sigma) \{ \exp[-i\delta_2(\sigma)] + \exp[i\delta_2(\sigma)] \} \\
& + \frac{1}{8} S_{23}(\sigma) \exp\{-i[\delta_1(\sigma) - \delta_2(\sigma)]\} \\
& + \frac{1}{8} S_{23}^*(\sigma) \exp\{i[\delta_1(\sigma) - \delta_2(\sigma)]\} \\
& - \frac{1}{8} S_{23}(\sigma) \exp\{-i[\delta_1(\sigma) + \delta_2(\sigma)]\} \\
& - \frac{1}{8} S_{23}^*(\sigma) \exp\{i[\delta_1(\sigma) + \delta_2(\sigma)]\}
\end{aligned} \tag{2.22}$$

其中, $S_{23}(\sigma) = S_2(\sigma) + iS_3(\sigma)$, *表示取复共轭, $\delta_1(\sigma)$ 、 $\delta_2(\sigma)$ 为相位延迟器的相位延迟量。光谱调制型偏振信息探测技术中, 波数与光程差是一对傅里叶变换对, 为复原目标的偏振信息, 对上式进行傅里叶变换, 使其转化为频域。在频域上, 目标的偏振信息被搬移到不同的频率处, 对不同频率处的通道信息进行滤波及傅里叶逆变换, 能够得到入射光的斯托克斯矢量偏振信息。公式 2.22 进行傅里叶变换, 有:

$$\begin{aligned}
D(L) = & D_0(L) + D_1[L - (L_1 - L_2)] + D_{-1}[-L - (L_1 - L_2)] \\
& + D_2(L - L_2) + D_{-2}(-L - L_2) \\
& + D_3(L - L_1) + D_{-3}(-L - L_1)
\end{aligned} \tag{2.23}$$

式中, D_0 、 D_1 、 D_2 和 D_3 代表不同频率位置, $L_j = \Delta n(\sigma)d_j$, ($j=1, 2$), d 代表两个相位延迟的厚度, $\Delta n(\sigma)$ 为相位延迟器不同波长的双折射率的差值。对公式 2.23 各个通道采用滤波和傅里叶逆变换得到入射的斯托克斯矢量偏振信息, 有:

$$S_0(\sigma) = 2\mathcal{F}^{-1}\{D_0\} \tag{2.24a}$$

$$S_1(\sigma) = \frac{4\mathcal{F}^{-1}\{D_2\}}{\exp[-i\delta_2(\sigma)]} \tag{2.24b}$$

$$S_2(\sigma) = \text{Re} \left[\frac{-8\mathcal{F}^{-1}\{D_3\}}{\exp\{-i[\delta_1(\sigma) + \delta_2(\sigma)]\}} \right] \tag{2.24c}$$

$$S_3(\sigma) = \text{Im} \left[\frac{-8\mathcal{F}^{-1}\{D_3\}}{\exp\{-i[\delta_1(\sigma) + \delta_2(\sigma)]\}} \right] \tag{2.24d}$$

光谱调制型偏振信息探测技术具有如下优点: 能够实时获得目标全斯托克斯矢量偏振信息, 内部不存在运动器件等; 缺点是会损失一定的偏振光谱分辨率。

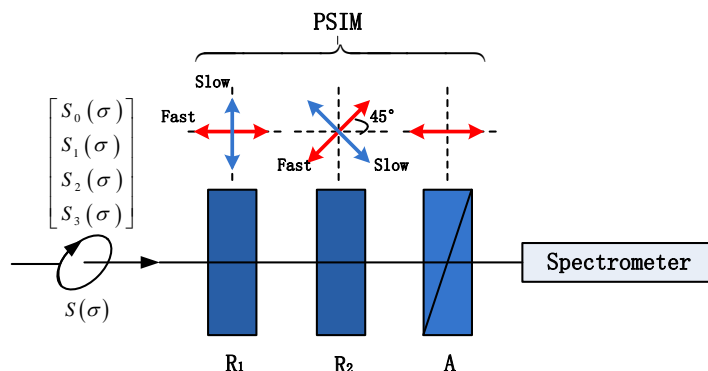


图 2.3 偏振光谱强度调制探测技术原理简图

Figure 2.3 Schematic diagram of the principle of polarization spectral intensity modulation detection technology

2.2.3 分振幅型偏振信息探测技术

为了克服分时型偏振信息探测技术没法实时得到目标偏振信息的缺点,采用多个不同角度的线偏振片同时对目标进行测量,分振幅型偏振信息探测技术发展起来,其结构原理如图 2.4 所示^[116]。从图 2.4 可以看出,结构内完成分振幅测量的关键式系统内的多个分束器(也可以用棱镜代替),这些器件将入射的光束分为三束,每束光经过相应的偏振片成像在探测器上。分振幅型偏振信息探测技术是在分时型偏振信息探测技术的基础上变化而来,所以它的偏振信息解调原理与分时型偏振信息解调技术相同。

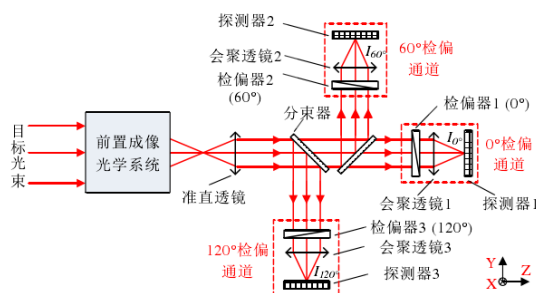


图 2.4 分振幅偏振成像系统示意图

Figure 2.4 The diagrammatic drawing of amplitude divided polarimetric imaging system

该探测方式具有实时性好、高能量利用率、高空间利用率等优势,但是其结构复杂、装调困难、通道间定标的要求高等不足。

本文研究的是空间调制型偏振信息探测技术，其最终得到的是目标的 Stokes 矢量的偏振图片，因此也被称为空间调制型偏振成像技术。该技术能够实时性获取目标、结构紧凑等优点；由于系统结构内存在半波片，采用该方式对不同波段偏振信息探测时，需要频繁更换半波片，导致过程繁琐，但是可以对系统结构进行优化设计解决此问题。空间调制型偏振成像技术的核心空间调制模块，利用空间调制模块完成对目标偏振信息的探测。上述几种偏振信息探测方式的优点与缺点如表 2.3 所示。

表 2.3 偏振信息探测技术优缺点对比

Figure 2.3 Advantages and disadvantages of the polarization detection techniques

偏振探测技术	优点	缺点
分时型	技术成熟 结构简单 成本低	实时性差 对动态目标测量精度低 存在活动部件
光谱调制型	实时性好 无运动部件	损失偏振光谱分辨率
分振幅型	实时性好 高能量利用率 高空间分辨率	结构复杂 装配困难 通道间定标精度要求高
空间调制型	实时性好 无运动部件	光谱探测过程繁琐

2.3 空间调制型偏振成像技术研究

2.3.1 空间调制型偏振成像方法

空间调制型偏振成像系统最早由 OKA 提出，其只需要一次探测就可以解调出目标的全部斯托克斯矢量信息。相比于分时、分振幅、光谱调制型等偏振成像

系统，其具有体积小，结构简单，容易实现等优势。在空间调制型偏振成像系统中，空间调制模块至关重要，它是最终获得偏振图像信息的关键器件。最开始的空间调制模块由 4 块楔形棱镜组构成，但是，由于楔形棱镜存在倾斜面，使得器件加工和系统装调变得困难；此外，单块楔形棱镜的倾斜面会造成不必要的光束分离和光束偏移的现象，导致图像分辨率下降，并造成图像发生相位混叠从而降低 Stokes 矢量解调的精度。因此，OKA 等人又将两块 Savart 偏光镜作为调制模块，相比于楔形棱镜，以 Savart 偏光镜为空间调制模块的系统加工与装调难度相对简单，且理想情况下不受相位混叠。因此，本文只介绍以 Savart 偏光镜为空间调制模块的成像系统。

2.3.2 基于 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统调制原理

2.3.2.1 Savart 偏光镜

当一束单色光进入各向同性介质中，会产生一束反射光与一束折射光，并且这两束光符合反射定律和折射定律。但是，当一束单色平行光从空气正入射到各向异性介质中，会产生两束同频率的折射光，这两束折射光束都是线偏振光，沿原方向前进的光束被称为 o 光 (ordinary beam)，光束传播方向改变的称之为 e 光 (extraordinary beam)，这种现象称为双折射现象^[80-81]，如图 2.5 所示。由各向异性介质材料填充的物体我们称之为晶体，如果晶体内只存在一个方向的光轴，将其称为单轴晶体。

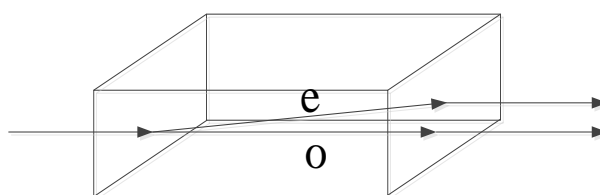


图 2.5 双折射现象

Figure 2.5 Double refraction phenomenon

光线进入晶体后，会沿着某一界面前进。光线前进界面的法线与晶体光轴组成的平面称为主截面，晶体中某条光线与晶体光轴构成的平面称为主平面^[77]。对于单轴晶体，当入射面与主截面重合时，o 光和 e 光均在入射面内，否则 e 光会在入射面外。单轴晶体中，对于 o 光，它的光线变化规律满足 Snell 折射定律，

电场矢量振动方向与主平面垂直；对于 e 光，它的光线变化规律不满足 Snell 定律，电场矢量振动方向在主平面内。

(1) Savart 偏光镜单板横向剪切量计算

本文所研究的空间调制型偏振成像系统的核心是 Savart 偏光镜，Savart 偏光镜是由两块各向异性介质的晶体单板构成。一束光入射到 Savart 单板，在内部将被剪切成两束线偏振光——o 光和 e 光。当两束光从 Savart 内出射后，他们之间会存在一个横向剪切量 Δ ，横向剪切量的大小与入射角的大小、Savart 偏光镜光轴方向有关。单板内 o 光的变化规律符合 Snell 折射定律，光线传播方向和光波法线重合。e 光的变化规律不符合 Snell 折射定律，其波法线方向和光线传播方向是分开的，且 e 光波法线方向、传播方向与晶体光轴方向三者共线。因此，计算出单板内 e 光光线的传播方向就可以计算出横向剪切量的大小。

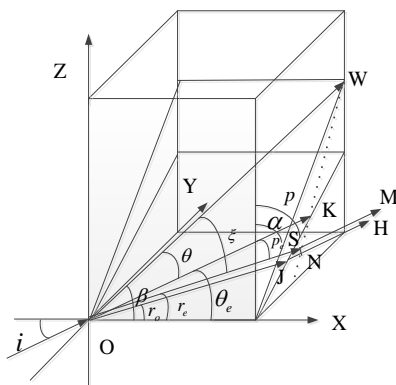


图 2.6 e 光光线传播方向

Figure 2.6 The propagation direction of e-ray

光轴方向为 β 的 Savart 单板，当入射角为 i 的一束光入射到单板，采用波法线追踪方法得到 e 光光线传播方向如图 2.6 所示，图中 \vec{OW} 为晶体光轴方向， \vec{OK} 为 e 光波法线方向， \vec{OS} 为 e 光光线前进方向。由于 e 光不满足 Snell 折射定律，所以 e 光折射公式为：

$$n \sin(i) = n'_e \sin(\theta_e) \tag{2.25}$$

上式中 n 为外界折射率， θ_e 为 e 光波法线方向的折射角， i 为入射角。 n'_e 的值与晶体材料的双折射率有关，其表达式为：

$$n'_e(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2(\theta) + n_o^2 \sin^2(\theta)}} \quad (2.26)$$

其中, n_o 为所选晶体材料的 o 光的折射率, n_e 为所选晶体材料的 e 光的折射率, θ 是晶体内 e 光波法线方向与单板光轴的夹角。将公式 2.25 代入到公式 2.26 化简后, 新的表达式为:

$$\frac{1}{n^2 \sin^2(i)} = \frac{1}{n_e^2 \sin^2(\theta_e)} + \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2}\right) \frac{\cos^2(\theta)}{\sin^2(\theta_e)} \quad (2.27)$$

从图 2.6 中, 我们可以把 Savart 单板内的光轴矢量和 e 光波法线矢量分别表示为:

$$\vec{OW} = \cos(\beta)ex + \sin(\beta)\sin(\alpha)ey + \sin(\beta)\cos(\alpha)ez \quad (2.28)$$

$$\vec{OK} = \cos(\theta_e)ex + \sin(\theta_e)\sin(p)ey + \sin(\theta_e)\cos(p)ez \quad (2.29)$$

其中, α 是光轴平面与 xoz 平面的夹角, p 为 e 光光波矢量平面与 xoz 平面的夹角。根据矢量之间角度关系, e 光波法线矢量和光轴矢量的夹角可以表示为:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) &= \vec{OK} \cdot \vec{OW} \\ &= \cos(\beta)\cos(\theta_e) + \\ &\quad \sin(\beta)\sin(\alpha)\sin(\theta_e)\sin(p) + \\ &\quad \sin(\beta)\cos(\alpha)\sin(\theta_e)\cos(p) \\ &= \cos(\beta)\cos(\theta_e) + \sin(\beta)\sin(\theta_e)\cos(p-\alpha) \end{aligned} \quad (2.30)$$

为了简化公式, 我们对上式两边都进行除 $\sin(\theta_e)$ 处理, 处理之后, 可以得到:

$$\cos(\theta) / \sin(\theta_e) = \cos(\beta) / \tan(\theta_e) + \sin(\beta)\cos(p-\alpha) \quad (2.31)$$

比较公式 2.27 和公式 2.31, 可以发现二者存在相同的系数, 因此, 将公式 2.31 代入公式 2.27, 经过化简, 公式 2.27 变为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n^2 \sin^2(i)} &= \frac{1}{n_e^2 \sin^2(\theta_e)} + \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2}\right) (\cos(\beta) / \tan(\theta_e) + \sin(\beta)\cos(p-\alpha))^2 \\ &= \frac{1}{n_e^2} \left(\frac{1}{\tan^2(\theta_e)} + 1\right) + \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2}\right) \left(\frac{\cos^2(\beta)}{\tan^2(\theta_e)}\right. \\ &\quad \left. + \sin^2(\beta)\cos^2(p-\alpha) + 2\frac{\cos(\beta)}{\tan(\theta_e)}\sin(\beta)\cos(p-\alpha)\right) \end{aligned} \quad (2.32)$$

为了简化公式, 我们做一些简单处理, 将公式 2.32 中的一些系数用一些简

单的符号代替，令：

$$A = \frac{1}{\tan(\theta_e)} \quad (2.33a)$$

$$P = n_e^2 \cos^2(\beta) - n_o^2 \sin^2(\beta) \quad (2.33b)$$

$$B = \frac{1}{n^2 \sin^2(i)} - \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2}\right) \sin^2(\beta) \cos^2(p-\alpha) - \frac{1}{n_e^2} \quad (2.33c)$$

$$C = \frac{1}{n_e^2} + \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2}\right) \cos^2(\beta) \quad (2.33d)$$

$$D = \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2}\right) \cos(\beta) \sin(\beta) \cos(p-\alpha) \quad (2.33e)$$

将公式 2.33 中的相关系数代入公式 2.32，则公式 2.32 变化为：

$$A^2 C + 2AD - B = 0 \quad (2.34)$$

公式 2.29 是一个二元一次方程组，我们要求解的是方程组中 A 的值，其他的值都是已知的，通过对公式 2.29 求解，最后我们得到：

$$\begin{aligned} \cot(\theta_e) = & \frac{(n_o^2 - n_e^2) \sin(\beta) \cos(\beta) \cos(p-\alpha)}{n_o^2 \sin^2(\beta) + n_e^2 \cos^2(\beta)} + \\ & \{n_o \{n_e^2 (n_o^2 \sin^2(\beta) + n_e^2 \cos^2(\beta)) - \\ & [(n_e^2 - n_o^2) \sin^2(\beta) \cos^2(p-\alpha) + \\ & \frac{(n_o^2 \sin^2(\beta) + n_e^2 \cos^2(\beta)) [n^2 \sin^2(i)]^{1/2}}{(n_o^2 \sin^2(\beta) + n_e^2 \cos^2(\beta)) n \sin(i)}\} \} \end{aligned} \quad (2.35)$$

上式中的所有参数都是已知的，在计算出 e 光波法线折射角之后，利用 e 光波法线折射角的值计算 e 光光线的传播矢量大小。在晶体中，e 光光线矢量，光波矢量和晶体内光轴三者共线，因此，有如下关系：

$$\vec{OS} = \eta \vec{OK} + \lambda \vec{OW} \quad (2.36a)$$

$$\vec{OS} \cdot \vec{OW} = \cos \xi \quad (2.36b)$$

$$|\vec{OS}|^2 = 1 \quad (2.36c)$$

其中， ξ 为 e 光光线矢量方向与光轴的夹角，在晶体中 ξ 和 θ 存在如下关系：

$$\frac{\tan(\xi)}{\tan(\theta)} = \frac{n_o^2}{n_e^2} \quad (2.37)$$

将公式 2.25 和公式 2.26 代入公式 2.34, 最后, 解的:

$$\begin{aligned} \cos(\xi) &= 1 / \sqrt{\left(\frac{n_o^2}{n_e^2} \tan(\theta)\right)^2 + 1} \\ &= 1 / \sqrt{\left(\frac{n_o^2}{n_e^2}\right)^2 (1 / (\cos(\theta))^2 - 1) + 1} \end{aligned} \quad (2.38a)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{n_o^2 \cos(\xi)}{n_e^2 \cos(\theta)} \\ &= \frac{n_o^2}{n_e^2 \cos(\theta)} 1 / \sqrt{\left(\frac{n_o^2}{n_e^2}\right)^2 (1 / (\cos(\theta))^2 - 1) + 1} \end{aligned} \quad (2.38b)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \cos(\xi) \left(1 - \frac{n_o^2}{n_e^2}\right) \\ &= \left(1 - \frac{n_o^2}{n_e^2}\right) 1 / \sqrt{\left(\frac{n_o^2}{n_e^2}\right)^2 (1 / (\cos(\theta))^2 - 1) + 1} \end{aligned} \quad (2.38c)$$

通过上述的公式推导, 最后, e 光光线矢量表示为:

$$\begin{aligned} \vec{OS} &= S_{ex} + S_{ey} + S_{ez} = (\eta \cos(\theta_e) + \lambda \cos(\beta))ex + \\ &(\eta \sin(\theta_e) \sin(p) + \lambda \sin(\beta) \sin(\alpha))ey + \\ &(\eta \sin(\theta_e) \cos(p) + \lambda \sin(\beta) \cos(\alpha))ez \end{aligned} \quad (2.39)$$

在推导了 e 光的光线矢量之后, 下面只要推导出 o 光光线矢量, 就可以得到晶体内单位横向剪切量大小。在晶体内, o 光光线变化规律符合 Snell 折射定律, 且在晶体中, o 光光线矢量与 e 光光波矢量共面, 因此 o 光光线矢量表示为:

$$\begin{aligned} \vec{OJ} &= S_{ox} + S_{oy} + S_{oz} \\ &= \cos(r_o)ex + \sin(r_o) \sin(p)ey + \sin(r_o) \cos(p)ez \end{aligned} \quad (2.40)$$

其中, r_o 为 o 光的折射角, 满足 $n \sin(i) = n_o \sin(r_o)$, 从图 2.6 可以看出, 单位横向剪切量可以表示为:

$$\Delta = \left| \vec{OS} - \vec{OJ} \right| \quad (2.41)$$

将公式 2.39 与公式 2.40 代入公式 2.41, 舍去 $\sin(i)$ 高次项, 得到厚度为 t 的单板横向剪切量为:

$$\Delta = \frac{(n_o^2 - n_e^2) \cos(\alpha) \sin(\alpha)}{n_e^2 \cos^2(\alpha) + n_o^2 \sin^2(\alpha)} t \cos(i) \quad (2.42)$$

$$\pm \left[\frac{n_o n_e}{(n_e^2 \cos^2(\alpha) + n_o^2 \sin^2(\alpha))^{3/2}} - \frac{1}{n_o} \right] t \cos(i) \sin(i)$$

当入射角 i 很小时，上式的横向剪切量近似为：

$$\Delta = \frac{(n_o^2 - n_e^2) \cos(\alpha) \sin(\alpha)}{n_e^2 \cos^2(\alpha) + n_o^2 \sin^2(\alpha)} t \quad (2.43)$$

其中， n_o 是晶体中 o 光的折射率， n_e 为晶体中 e 光的折射率， t 为单板厚度， α 是光轴平面与 xoz 平面的夹角。对于常规的 Savart 偏光镜， $\alpha = \frac{\pi}{4}$ ，因此，

上式可以继续化简，最后的横向剪切量表示为： $\Delta = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_e^2 + n_o^2} t$ 。

(2) Savart 偏光镜光程差

常规的 Savart 偏光镜构造简单，其主要由两块厚度相同的 Savart 单板胶合而成，第二块 Savart 单板的光轴方位相对于第一块 Savart 单板光轴方向正交。当一束光入射时，其在第一块单板内被剪切成 o 光和 e 光两束光，这两束光的电场矢量振动方向不同，他们分别垂直于主平面和平行于主平面，两束光产生一定的横向剪切量 Δ ；由于第二块 Savart 单板的光轴与第一块单板光轴正交，二者的主平面也正交，因此，在第二块 Savart 板内不发生光束剪切，只是原 o 光变为 e 光，原 e 光变为 o 光，一束光经过常规的 Savart 偏光镜的光束变化如图 2.7 所示。

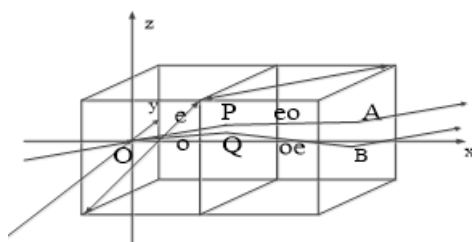


图 2.7 Savart 偏光镜各个单板内光线变化

Figure 2.7 Change of light in each single plate of Savart polarizer

晶体的光程差是由晶体内部光线的光程和晶体外部光线的额外光程两部分的差值构成，通常是利用晶体内部光线折射率或能流折射率计算，在这里我们选用光线的折射率计算光程差，光线折射率表示为：

$$n'_{te}(\theta) = n'_e(\theta) \cos(\theta) \quad (2.44)$$

从图 2.6 可以看出, Savart 单板 o 光和 e 光产生的总光程差表示为:

$$d = n'_{te}(\theta) \cdot \overline{OS} - (n_o \cdot \overline{OJ} + n_i \overline{JN}) \quad (2.45)$$

其中, $n_i \overline{JN}$ 为系统产生的附加光程差, \overline{JN} 是 \overline{JS} 代表如图 2.6 所示一样。因为从 Savart 单板出射的两条光线与入射光线平行, 所以, 单位 \overline{JH} 矢量可以表示为:

$$\frac{\overline{JH}}{|\overline{JH}|} = \cos(i)ex + \sin(i) \sin(p)ey + \sin(i) \cos(p)ez \quad (2.46)$$

对于厚度为 t 的 Savart 单板, 在出射面, \overline{JS} 矢量可以表示为:

$$\begin{aligned} \overline{JS} &= \overline{OS} - \overline{OJ} \\ &= t(\tan(r_e) \sin(p_e) - \tan(r_o) \sin(p))ey \\ &\quad + t(\tan(r_e) \cos(p_e) - \tan(r_o) \cos(p))ez \end{aligned} \quad (2.47)$$

同样的, \overline{JN} 矢量可以表示为:

$$\overline{JN} = \frac{\overline{JS} \cdot \overline{JH}}{|\overline{JH}|} = t \sin(i)(\tan(r_e) \cos(w_e - w) - \tan(r_o)) \quad (2.48)$$

通过上面的推导, 知道了公式 2.45 中相关参数的表示方式, 因此, 将公式 2.46、2.47、2.48 代入式 2.45, 最后, 我们得到光程差表示为:

$$d = t \cdot n_i \sin(i)(\cot(\theta_e) - \cot(r_o)) \quad (2.49)$$

因为 Savart 偏光镜构造是两块厚度相同, 光轴方向互相正交的 Savart 单板, 所以, Savart 偏光镜总的光程差可以表示为两个 Savart 单板光程差和, 即:

$$d = d_1 + d_2 = t \cdot n_i \sin(i)(\cot(\theta_{e1}) - \cot(\theta_{e2})) \quad (2.50)$$

其中, d_1 是 Savart 偏光镜中第一块 Savart 单板内的 e 光和第二块 Savart 单板内 eo 光的总光程, d_2 是 Savart 偏光镜中第一块 Savart 单板内 o 光和第二块 Savart 单板内 oe 光的总光程, θ_{e1} 是 Savart 偏光镜中第一块 Savart 单板内 e 光波法线的折射角, θ_{e2} 是 Savart 偏光镜中第二块 Savart 单板内 oe 光波法线的折射角。

一束光经过 Savart 偏光镜的变为两束光, 这两束光出射的方向与入射光的方向相同, 二者之间会产生一定的横向剪切量, 表示为 $\sqrt{\Delta^2 + \Delta^2} = \sqrt{2}\Delta$ 。构成 Savart 偏光镜的两块 Savart 单板厚度相同时, 且在小角度入射时, $\sin(i)$ 和 $(\cot(\theta_{e1}) - \cot(\theta_{e2}))$ 可以近似为 0, 所以, 一束光经过 Savart 偏光镜出射的两束光可以近似没有光程差^[77], 即总的光程差为 0。

2.3.2.2 空间调制型偏振成像系统数学模型构建

空间调制偏振成像系统的核心部件分为楔形棱镜和 Savart 两种, 由于楔形棱镜的结构会存在光线溢出, 导致在探测器上获得的像不完整。因此, 本文主要研究的是基于 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统, 该系统构造简图如图 2.8 所示。

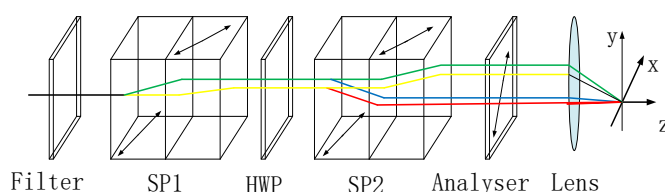


图 2.8 空间调制型偏振成像系统原理图

Figure 2.8 Schematic diagram of spatially modulated imaging polarimeter

基于 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统构造分别为滤光片(Filter)、Savart 偏光镜 1(SP1)、半波片(HWP)、Savart 偏光镜 2(SP2)、检偏器(Analyser)、成像镜(Lens)和探测器。其中, 滤光片只可以通过单色光, SP1 和 SP2 由两块厚度相等的 Savart 单板构成, 二者光轴方向如图中 SP1 和 SP2 内黑色箭头所示。半波片的快光轴方向和检偏器的透光轴方向如图 2.8 所示一样, 他们分别与 x 轴正向夹角为 22.5° , 和 45° 。系统中的 SP1、HWP、SP2 和检偏器称为空间调制模块。

空间调制偏振成像系统的数学模型构建有基于平面波电矢量和成的和基于傅里叶变换光学的两种方式, 下面根据这两种方式我们对空间调制偏振成像系统进行数学建模。

(1) 基于平面波电矢量的数学模型构建

空间调制偏振成像系统采用平面波电矢量的数学模型构建时,省略了前置光学系统的成像模型。为方便描述模型构建,对光波在传播过程中其产生的变化做了以下的约定:用 E_x 和 E_y 分别代表光束的电场矢量振动方向垂直于纸平面和平行于纸平面,即 E_x 平行于图 2.8 中的 x 轴和 E_y 平行于图 2.8 中的 y 轴;用带有颜色的线表示系统内光线分离的情况,各个颜色代表光线变化如表 2.4 所示。

表 2.4 剪切光束状态变化

Table 2.4 The state changes of shear beam

线的颜色	绿色线	黄色线	蓝色线	红色线
状态变化	e-o-o-e	o-e-o-e	e-o-e-o	o-e-e-o

如图 2.8 所示,一束黑色的平行光经过滤光片变为单色光,单色光经过 SP1 被剪切成两束线偏振光,分别为绿色 E_y 和 E_x ,二者产生横向位移量 Δ 。这两束光经过半波片,以图 2.8 坐标轴的 xoy 作为参考坐标系, E_x 振动方向被逆时针旋转了 45° , E_y 振动方向被顺时针旋转了 45° 。这两束光经过 SP2 被剪切成四束光,这四束光中两束电场矢量振动方向垂直于纸平面,两束电场矢量振动方向平行于纸平面;四束光经过检偏器归一化振动方向,最后经成像镜会聚在探测器上干涉成像。光束经过空间调制偏振成像系统整个传播过程的复振幅变化如表 2.5 所示。

表 2.5 剪切光复振幅变化

Table 2.5 The complex amplitude changes of shear beam

	绿色线	黄色线	蓝色线	红色线
SP1 左	E_x	E_y	E_y	E_x
SP1 右	E_x	E_y	E_y	E_x
SP2 左	$E_x\sqrt{2}/2$	$E_y\sqrt{2}/2$	$E_y\sqrt{2}/2$	$E_x\sqrt{2}/2$
SP2 右	$E_x\sqrt{2}/2$	$E_y\sqrt{2}/2$	$E_y\sqrt{2}/2$	$E_x\sqrt{2}/2$

检偏器	$E_x / 2$	$-E_y / 2$	$E_y / 2$	$E_x / 2$
-----	-----------	------------	-----------	-----------

从图 2.8 可以看出，当物方的一束光经过空间调制模块变为四束平行光，这四束光经过成像镜汇聚在像面上某一点，整个光束会聚过程的简图如图 2.9 所示。

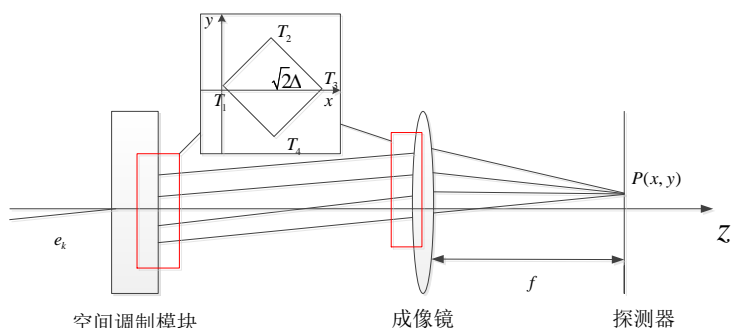


图 2.9 透镜聚焦成像示意图

Figure 2.9 Schematic diagram of lens focusing imaging

图 2.9 中的 $P(x, y)$ 是四束光在探测器上的会聚点，为了计算各个光线之间的光程差，以不发生位移的 T_1 点的出射光线为基准。 T_2 、 T_3 和 T_4 三个点出射光线与 T_1 点出射光线相当于杨氏双缝干涉。根据双缝干涉原理，像面上同一点 P 对应的四条光束光程差分别表示为：

$$OPD_{T_1T_1} = 0 \tag{2.51a}$$

$$OPD_{T_1T_2} = \frac{\Delta \cdot x}{f} + \frac{\Delta \cdot y}{f} \tag{2.51b}$$

$$OPD_{T_1T_3} = \frac{2\Delta \cdot x}{f} \tag{2.51c}$$

$$OPD_{T_1T_4} = \frac{\Delta \cdot x}{f} - \frac{\Delta \cdot y}{f} \tag{2.51d}$$

上式中 x 和 y 为像平面上任意一点 P 的坐标值， f 为成像透镜焦距， Δ 为 Savart 偏光镜的横向剪切量，上面四个光程差对应的相位差表示为：

$$\varphi_1 = 0 \tag{2.52a}$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\Delta \cdot x}{f} + \frac{\Delta \cdot y}{f} \right) \quad (2.52b)$$

$$\varphi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{2\Delta \cdot x}{f} \right) \quad (2.52c)$$

$$\varphi_4 = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\Delta \cdot x}{f} - \frac{\Delta \cdot y}{f} \right) \quad (2.52d)$$

上式中的 λ 为入射光的波长，出射的四束光复振幅可以表示为：

$$U(x, y) = \frac{1}{2} E_y(x, y) e^{i\varphi_1} - \frac{1}{2} E_y(x, y) e^{i\varphi_2} + \frac{1}{2} E_x(x, y) e^{i\varphi_3} + \frac{1}{2} E_x(x, y) e^{i\varphi_4} \quad (2.53)$$

像平面上的干涉光强分布表达式为：

$$I = U(x, y) \cdot U(x, y)^* \quad (2.54)$$

根据第2章的偏振基础知识，并带入相关参数，上式可以化简为：

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{4} S_1 \left[e^{i(\varphi_2 - \varphi_3)} + e^{-i(\varphi_2 - \varphi_3)} \right] + \frac{1}{8} \left[S_{23}^* \left[e^{i(\varphi_3 - \varphi_1)} - e^{i(\varphi_4 - \varphi_2)} \right] + S_{23} \left[e^{-i(\varphi_3 - \varphi_1)} - e^{-i(\varphi_4 - \varphi_2)} \right] \right] \\ &= \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{4} S_1 \left[e^{i2\pi\Omega(x-y)} + e^{-i2\pi\Omega(x-y)} \right] + \frac{1}{8} \left[S_{23}^* \left[e^{i4\pi\Omega x} - e^{i4\pi\Omega y} \right] + S_{23} \left[e^{-i4\pi\Omega x} - e^{-i4\pi\Omega y} \right] \right] \end{aligned} \quad (2.55)$$

其中， $S_{23} = S_2 + iS_3$ ， $S_{23}^* = S_2 - iS_3$ ， $\Omega = \frac{\Delta}{\lambda f}$ 。

(2) 基于傅里叶变换光学的数学模型构建

采用傅里叶变换光学的方法对空间调制系统进行数学建模时，整个系统可以看作成一个 $4f$ 系统，如图 2.10 所示，整个系统被分成三部分，分别为前置镜组、调制模块和成像镜组。根据傅里叶光学原理可知^[78]，透镜能够对物体的傅里叶变换位相调制。因此，在满足傍轴条件时，薄透镜的位相调制可以表示为：

$$t(x, y) = \exp \left[-j \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right] \quad (2.56)$$

其中， (x, y) 表示像面的坐标点， f 表示透镜的焦距， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 表示波矢量， λ 表示波长。

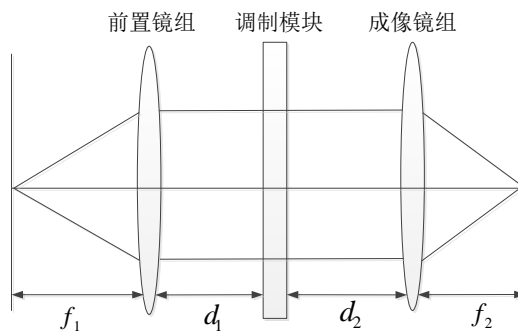


图 2.10 空间调制偏振成像系统 4f 模型示意图

Figure 2.10 Schematic of the 4f of the Spatially Modulated Imaging Polarimeter

空间调制偏振成像系统，探测器上的波前振幅 U_i 是由成像镜组后方的波前振幅 U_{i2} 传播得到的，根据菲涅尔衍射公式，有如下关系：

$$U_i(x_i, y_i) = \frac{e^{jkf_2} \cdot e^{\frac{j}{f_2}(x_i^2 + y_i^2)}}{j\lambda f_2} \iint U_{i2}(x_{i2}, y_{i2}) \cdot e^{\frac{j}{f_2}(x_{i2}^2 + y_{i2}^2)} \cdot e^{-j2\pi(\frac{x_i}{\lambda f_2}x_{i2} + \frac{y_i}{\lambda f_2}y_{i2})} dx_{i2} dy_{i2} \quad (2.57)$$

其中， (x_i, y_i) 表示探测器成像面上的坐标， (x_{i2}, y_{i2}) 表示成像镜组后的坐标。

根据薄透镜的位相调制公式，成像镜组前后波前振幅变化表示为：

$$U_{i2}(x_{i2}, y_{i2}) = U_{i2}(x_{i2}, y_{i2}) \cdot e^{-j\frac{k}{2f_2}(x_{i2}^2 + y_{i2}^2)} \quad (2.58)$$

其中， (x_{i2}, y_{i2}) 表示成像镜组后的坐标， U_{i2} 表示成像镜组前的波前振幅。把公式 2.57 代入公式 2.56，得到：

$$U_i(x_i, y_i) = \frac{e^{jkf_2} \cdot e^{\left[\frac{j}{f_2}(x_i^2 + y_i^2)\right]}}{j\lambda f_2} FT \{U_{i2}(x_{i2}, y_{i2})\} \quad (2.59)$$

经过空间调制模块时，波前振幅属于菲涅尔衍射，成像镜组前波前振幅与空间调制模块的波前振幅关系为：

$$U_{i2}(x_{i2}, y_{i2}) = \frac{e^{jkd_2} \cdot e^{\frac{j}{d_2}(x_{i2}^2 + y_{i2}^2)}}{j\lambda f_2} \iint U_s(x_s, y_s) \cdot e^{\frac{j}{d_2}(x_s^2 + y_s^2)} \cdot e^{-j2\pi(\frac{x_{i2}}{\lambda f_2}x_s + \frac{y_{i2}}{\lambda f_2}y_s)} dx_s dy_s \quad (2.60)$$

其中, U_s 是空间调制模块的波前振幅, (x_s, y_s) 表示空间调制模块的坐标。傅里叶光学认为整个光学成像系统可以看作成一个线性系统, 在理想成像成像系统终, 各个位置的坐标是一一对应的, 因此, 存在如下关系:

$$FT\{U_{l2}(x_{l2}, y_{l2})\}_{f_x=\frac{x_i}{\lambda f_2}, f_y=\frac{y_i}{\lambda f_2}} = FT\{U_s(x_s, y_s)\} \cdot e^{ikd_2} \cdot e^{-j\frac{\pi}{\lambda f_2^2}d_2(x_i^2+y_i^2)} \quad (2.61)$$

对于前置镜组的波前振幅与空间调制模块的波前振幅的关系与空间调制模块的振幅与成像镜组的波前振幅的关系相同, 存在如下关系:

$$FT\{U_s(x_s, y_s)\}_{f_x=\frac{x_i}{\lambda f_2}, f_y=\frac{y_i}{\lambda f_2}} = FT\{U_{t1}(x_{t1}, y_{t1})\} \cdot e^{ikd_1} \cdot e^{-j\frac{\pi}{\lambda f_2^2}d_1(x_i^2+y_i^2)} \quad (2.62)$$

其中, U_{t1} 是前置镜组后面的波前振幅, (x_{t1}, y_{t1}) 表示前置镜组后面的坐标。根据透镜位相调制原理, 前置镜组的前后波前振幅之间的关系为:

$$U_{t1}(x_{t1}, y_{t1}) = U_{l1}(x_{l1}, y_{l1}) \cdot e^{-j\frac{k}{f_1}(x_{t1}^2+y_{t1}^2)} \quad (2.63)$$

其中, U_{l1} 是前置镜组前面的波前振幅, (x_{l1}, y_{l1}) 表示前置镜组前成像面的坐标。根据菲涅尔衍射原理, 前置镜组前的波前与物面波前存在如下的关系:

$$U_{l1}(x_{l1}, y_{l1}) = FT\left\{U_0(x_0, y_0) \cdot e^{j\frac{k}{f_1}(x_0^2+y_0^2)}\right\} \cdot \frac{e^{jkf_1} \cdot e^{j\frac{\pi}{\lambda f_1}(x_{l1}^2+y_{l1}^2)}}{j\lambda f_1} \quad (2.64)$$

通过上面的推导, 我们已经知道各个部分之间波前的位相调制关系, 对上述各式进行整理和互相代入, 并根据傅里叶变换的相关知识, 省略已知的相关系数, 最后得到探测器上获得的波前表达式为:

$$U_i(x_i, y_i) = \frac{1}{2} E_x \cdot \left[e^{j2\pi\frac{x_i}{\lambda f_2} \cdot 2\Delta} + e^{j2\pi\left(\frac{x_i}{\lambda f_2} - \frac{y_i}{\lambda f_2}\right) \cdot \Delta} \right] + \frac{1}{2} E_y \cdot \left[1 - e^{j2\pi\left(\frac{x_i}{\lambda f_2} + \frac{y_i}{\lambda f_2}\right) \cdot \Delta} \right] \quad (2.65)$$

令 $\Omega = \frac{\Delta}{\lambda f}$, 并根据 Stokes 矢量公式表达式, 经过化简后在探测器上获得光强度表达式为:

$$I = \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{4} S_1 \cos(2\pi\Omega(x_i + y_i)) + \frac{1}{4} S_2 [\cos(4\pi\Omega x_i) - \cos(4\pi\Omega y_i)] - \frac{1}{4} S_3 [\sin(4\pi\Omega x_i) + \sin(4\pi\Omega y_i)] \quad (2.66)$$

公式 2.65 和代入相关参数后的公式 2.54 是相同的。

2.3.3 空间调制偏振成像系统解调算法

空间调制型偏振成像系统通过处理单幅干涉图来实现全偏振信息的获取，目前的偏振信息获取的解调算法有两种——傅里叶频域解调算法和基于超定方程组的空域解调算法。

第一种偏振信息解调算法是最简单方便偏振信息解调的算法。空间调制型偏振成像系统数学模型如公式 2.54 所示，从这个公式可以看到， S_0 被调制成直流分量； S_1 可以看成两部分，分别乘以一对共轭复数，并在空间上产生了相移； S_2 和 S_3 通过复数耦合在一起形成一对共轭复数 S_{23} 和 S_{23}^* ，并且也产生了相移。根据傅里叶变换光学中的位移定理^[78]，对公式 2.54 进行傅里叶变换^[78]，得到：

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(I) = & \frac{1}{2}F_0(u, v) + \frac{1}{4}[F_1(u - \alpha, v - \alpha) + F_1(u + \alpha, v + \alpha)] \\ & + \frac{1}{8}[F_{23}(u - 2\alpha, v) + F_{23}^*(u + 2\alpha, v)] + \frac{1}{8}[F_{23}(u, v - 2\alpha) + F_{23}^*(u, v + 2\alpha)] \end{aligned} \quad (2.67)$$

其中， F_0 、 F_1 、 F_{23} 、 F_{23}^* 分别表示 S_0 、 S_1 、 S_{23} 、 S_{23}^* 的频谱信息， $\alpha = \Omega \cdot D \cdot N$ 称为空间载波频率， D 为探测器的像元大小， N 为探测器的像元数。调制图像的频谱示意图如图 2.11 所示，调制图像频谱中共有 7 个谱峰，各偏振分量的频谱信息是彼此分开，空间载波频率 α 的大小决定了各个峰之间的离散程度。选取宽度为 α 的理想二维低通滤波器对频谱进行滤波，滤波后再进行二维傅里叶逆变换，得到各 Stokes 矢量表达式：

$$S_0(x, y) = 2 * F^{-1} \left\{ \frac{1}{2} f_0(u, v) \right\} \quad (2.68a)$$

$$S_1(x, y) = \frac{4 * F^{-1} \left\{ \frac{1}{4} f_1(u - \alpha, v - \alpha) \right\}}{e^{-i4\pi\alpha(x+y)}} \quad (2.68b)$$

$$S_{23}(x, y) = \frac{8 * F^{-1} \left\{ \frac{1}{8} f_{23}(u + 2\alpha, v) \right\}}{e^{-i4\pi\alpha x}} \quad (2.68c)$$

$$S_2(x, y) = \text{Re}[S_{23}(x, y)] \cdot S_3(x, y) = \text{Im}[S_{23}(x, y)] \quad (2.68d)$$

公式 2.67d 的 Re 表示取 S_{23} 实部，Im 表示取 S_{23} 虚部。傅里叶频域解调算法复杂度低，解调速度快，合理设置带宽还可以提高偏振信息解调精度，但是该方法存在通道串扰的问题，降低偏振信息反演的准确度。

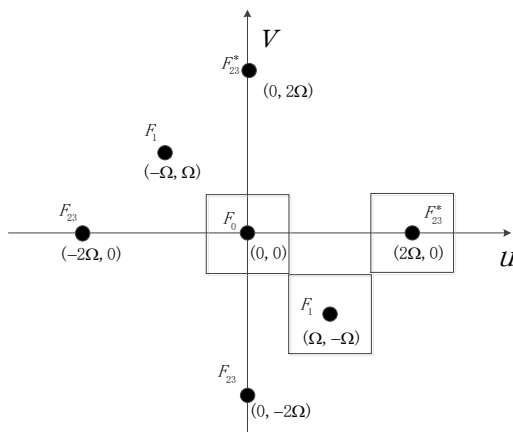


图 2.11 调制图像频谱示意图

Figure 2.11 Spectrum of modified image

空域解调算法对空间调制偏振成像系统偏振信息解调是龚冠源提出的^[71]，他将空间调制偏振成像系统探测器上获得的强度公式表示为：

$$I(x, y) = m_0(x, y) \cdot S_0(x, y) + m_1(x, y) \cdot S_1(x, y) + m_2(x, y) \cdot S_2(x, y) + m_3(x, y) \cdot S_3(x, y) \quad (2.69)$$

探测器上的光强度是离散采样的，选取一个邻域模板，在空域上对每一个像元滑动此邻域模板，利用邻域模板构建了一个超定方程组：

$$I = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n0} & m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = MS \quad (2.70)$$

对上式的超定方程组采用最小二乘的方法，解的 Stokes 矢量偏振信息。空域解调算法可以避免傅里叶频域解调带来的通道串扰问题，但是该算法运算复杂度很高，计算量大。

2.4 本章小结

本章首先介绍了光波偏振态及其分析方法，阐述了几种典型偏振光描述方法，给出了理想线偏振片和波片的穆勒矩阵。其次，介绍了几种典型的偏振信息探测

技术，并剖析了这几种偏振信息探测技术的优缺点。然后，结合波法线追踪的方法推导了 Savart 偏光镜中横向剪切量和入射角、晶体光轴方向的关系，分析了 Savart 偏光镜光程差。最后，阐明了基于 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统的结构、偏振信息调制过程、偏振信息解调方法。本章为后续空间调制型偏振成像系统结构优化的深入研究奠定了理论基础。

第3章 基于两块 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统研究

空间调制型偏振成像系统误差来源主要有三类：CCD 探测器噪声、调制器件非理想性误差、系统装调误差。这些误差使系统的成像质量和偏振测量的精度有所下降。现阶段，CCD 探测器噪声和调制器件非理想性误差通过仪器规格的改变可以很好的降低它们带来的影响。但是，装调角度误差很难通过仪器的改变降低其带来的影响，因为该误差是在装调过程中产生的^[72]。针对装调角度误差中的旋转半波片的装调角度误差问题，本章提出了基于两块 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统（spatially modulated snapshot imaging polarimeter using two Savart polariscopes, SMSISSP），对现有的空间调制型偏振成像系统（spatially modulated snapshot imaging polarimeter, SMSIP）结构进行优化改进，使用一块改变光轴方向的 Savart 偏光镜代替传统结构中的旋转半波片与第二块 Savart 偏光镜。并基于不同通道的频域特性，采用不同滤波算法进一步提高偏振探测精度。最后通过数值仿真和试验来验证本章所提出系统的有效性和可行性。

3.1 空间调制型偏振成像系统半波片装调角度误差分析

空间调制型偏振成像系统装调误差主要由半波片产生，其带来的误差主要有：旋转半波片装调角度误差和相位延迟误差，本节将阐述这两种误差对空间调制偏振成像系统带来的影响。

3.1.1 旋转半波片装调角度误差

根据第二章对空间调制偏振成像系统的结构、原理和解调算法描述可知，空间调制偏振成像系统中的旋转半波片能够使进入第二块 Savart 偏光镜的两束光线可以分别被剪切成两束振幅相同的线偏振光。当系统内装调角度误差的值设 θ 时，带有半波片装调角度误差的空间调制偏振成像系统的结构图如图 3.1 所示。一束光经过带有装调角度误差的空间调制模块，出射四束线偏振光，这 4 束线偏振光的复振幅变为：

$$\begin{aligned}
 U = & \frac{\sqrt{2}}{2} E_x(x, y)(\cos(45^\circ - \theta)e^{i\varphi_1} - \cos(45^\circ + \theta)e^{i\varphi_2}) + \\
 & \frac{\sqrt{2}}{2} E_y(x, y)(\cos(45^\circ + \theta)e^{i\varphi_3} + \cos(45^\circ - \theta)e^{i\varphi_4})
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

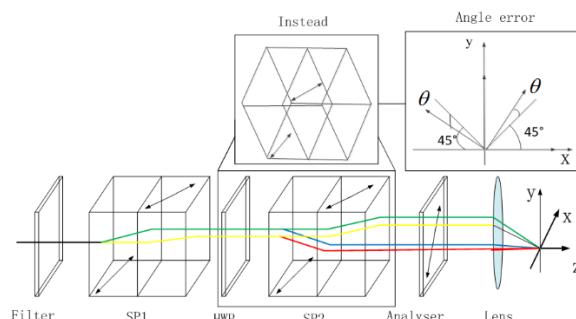


图 3.1 半波片装调角度误差

Figure 3.1 Alignment angle error of HWP

其中， θ 为旋转半波片装调角度误差， E_x 和 E_y 分别表示电场矢量沿水平方向振动和竖直方向振动的复振幅， φ_1 、 φ_2 、 φ_3 和 φ_4 和第二章中的表达式相同。因此，包含旋转半波片装调角度误差的调制干涉强度可以表示为：

$$\begin{aligned}
 I(x, y) = & U(x, y) * U^*(x, y) \\
 = & \frac{1}{2}(A^2 + B^2)S_0 - \frac{1}{2}ABS_1(e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)}) \\
 & + \frac{1}{4}AB(S_{23}e^{i(\varphi_1 - \varphi_3)} + S_{23}^*e^{-i(\varphi_1 - \varphi_3)}) - \frac{1}{4}AB(S_{23}e^{i(\varphi_4 - \varphi_2)} + S_{23}^*e^{-i(\varphi_4 - \varphi_2)}) \\
 & + \frac{1}{4}A^2(S_{23}e^{i(\varphi_4 - \varphi_1)} + S_{23}^*e^{-i(\varphi_4 - \varphi_1)}) + \frac{1}{4}B^2(S_{23}e^{i(\varphi_2 - \varphi_3)} + S_{23}^*e^{-i(\varphi_2 - \varphi_3)})
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

其中， $A = \cos(45^\circ - \theta)$ ， $B = \cos(45^\circ + \theta)$ 。将带有角度误差的干涉强度公式与没有装调角度误差的干涉公式进行对比，能够看出有角度误差的结构产生的干涉图，在同一个峰上的系数是未知的且相对于没有角度误差结构增加了额外的峰，这导致在反演图像时无法准确确定其系数且增加了通道之间的串扰，对于反演 Stokes 图像的精度有影响。

3.1.2 旋转半波片相位延迟误差

通过第二章对偏振基础知识的了解，对于带有相位延迟误差 ϕ 的旋转半波片，它的穆勒矩阵表示为：

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(1-\cos(\phi)) & \frac{1}{2}(1+\cos(\phi)) & \frac{\sqrt{2}}{2}\sin(\phi) \\ 0 & \frac{1}{2}(1+\cos(\phi)) & \frac{1}{2}(1-\cos(\phi)) & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin(\phi) \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin(\phi) & \frac{\sqrt{2}}{2}\sin(\phi) & -\cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

因为从第一块出射的两束线偏振光分别为 0° 和 90° 线偏振光, 根据第二章偏振的基础知识, 这两束线偏振光的归一化 Stokes 矢量能够表示为 $S^1 = [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 、 $S^2 = [1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$ 。从上式可以看出, 这两束线偏振光经过带有相位延迟误差的半波片之后, 出射的 Stokes 矢量变为:

$$S_{out}^1 = MS^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{2}(1-\cos(\phi)) \\ \frac{1}{2}(1+\cos(\phi)) \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.4a)$$

$$S_{out}^2 = MS^2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{2}(1-\cos(\phi)) \\ -\frac{1}{2}(1+\cos(\phi)) \\ \frac{\sqrt{2}}{2}\sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.4b)$$

从公式 3.4a 和式 3.4b 可以看出, 出射的两束光的偏振态由线偏振光变为椭圆偏振光。这两束椭圆偏振光在第二块 Savart 偏光镜内传播时, 其 E_x 和 E_y 两偏振分光之间会引入额外的相位, 导致最终在探测器上成像的光的复振幅和相位受到影响, 使获得的干涉图存在缺陷从而影响偏振信息解调的精度。

3.2 基于两块 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统理论建模

通过 3.1 小节分析可以知道: 空间调制偏振成像系统结构中半波片装调角度误差和相位延迟误差不可避免, 因此, 本文提出基于两个 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统, 该系统移除传统结构中的旋转半波片。本小节将介绍基于

两个 Savart 偏光镜空间调制型偏振成像系统的光路结构、理论模型和元件参数。

3.2.1 基于两个 Savart 偏光镜的空间调制型偏振成像系统光路结构

根据第二章关于 Savart 偏光镜的了解,最终确定了基于两个 Savart 偏光镜空间调制型偏振成像系统结构,如图 3.2 所示。从图 3.2 中可以看出,基于两个 Savart 偏光镜空间调制型偏振成像系统结构是由滤光片(filter)、SP1、SP2、线分析器(analyser)、成像镜(lens)和探测器(CCD)构成。一束平行光入射经过滤光片变为单色光,这束单色光经过 SP1 变为两束线偏振光,并产生横向位移,这两束线偏振光振动方向分别垂直 x 轴和平行 x 轴。两束线偏振光经过 SP2,变为四束线偏振光,四束线偏振光振动方向分别在 xoy 平面内与 x 轴成 $\pm 45^\circ$,出射的四束线偏振光彼此分离,四束光分离情况如图 3.2(a)所示。最后四束光经过线分析器归一化振动方向与 x 轴垂直,四束光经过成像镜在 CCD 上发生干涉形成干涉条纹。

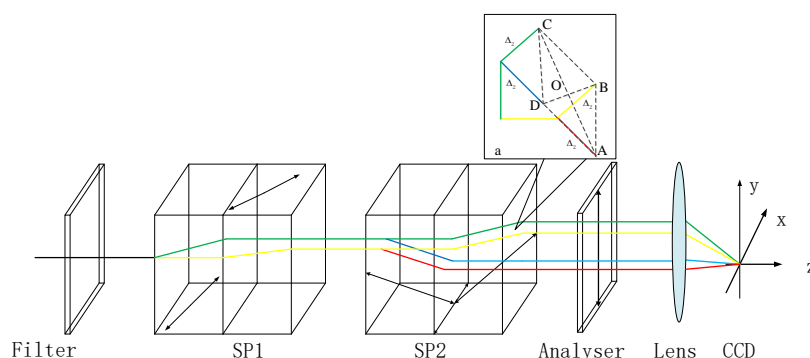


图 3.2 基于两个 Savart 偏光镜空间调制型偏振成像系统光学结构

Figure 3.2 Optical layout of Spatially modulated snapshot imaging polarimeter

using two Savart polariscopes

比较本章提出的系统结构和空间调制型偏振成像系统结构,能够看出本章提出的系统结构与空间调制型偏振成像系统结构的空问调制模块的结构存在差异。空间调制型偏振成像系统的空问调制模块是由常规的 Savart 偏光镜 1、半波片和常规的 Savart 偏光镜 2 构成;而本章提出系统的空问调制模块是由常规的 Savart 偏光镜 1 和改进的 Savart 偏光镜 2 构成。因为基于两个 Savart 偏光镜空问调制型偏振成像系统结构中的 SP2 是一个改进的 Savart 偏光镜^[79-80],所以下面我们重点分析一下基于两个 Savart 偏光镜的空问调制型偏振成像系统中有关 SP2 的

一些特性。

(1) 改进 Savart 偏光镜设计方案

Savart 偏光镜是空间调制模块的核心部件，常规 Savart 偏光镜结构如图 2.7 所示。在本节提出的基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统中，第二块改进的 Savart 偏光镜要使出射的四束线偏振光的振动方向在 xoy 平面内，这四束光振动方向与 x 轴成 $\pm 45^\circ$ 。基于此，我们确定改进 Savart 偏光镜的光学结构如图 3.3(a)中所示。改进 Savart 偏光镜的结构仍是两块光轴方向正交的 Savart 单板，但是，改进 Savart 偏光镜光轴方向有所改变。晶体光轴与晶体表面法线相交得到的平面称为晶体的主截面，如图 3.3(a)中 ABCD 所示。从图 3.3 可以看出，改进 Savart 偏光镜的两块 Savart 单板主截面与 x 轴分别成 $\pm 45^\circ$ ，光轴方向为图 3.3 中箭头方向。一束平行光进入改进 Savart 偏光镜终，产生两束线偏振光 o 光和 e 光。 o 光的电场矢量振动方向垂直于波法线与光轴所组成的平面，在这里，该平面与主截面重合，如图 3.3(b)中 FH 所示； e 光的电场矢量振动方向在波法线与光轴所组成的平面内且与 o 光电场矢量振动方向垂直，如图 3.3(b)中 EG 所示。因此，这两束线偏振光电场矢量振动方向在 xoy 平面内分别与 x 轴成 $\pm 45^\circ$ 。

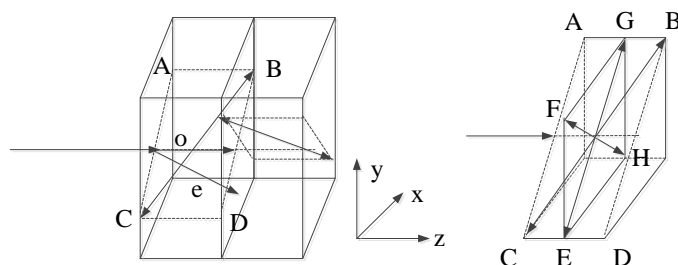


图 3.3 (a) 改进的 Savart 偏光镜光学结构图；(b) 光线振动示意图

Figure 3.3 (a) Improved Savart polarizer optical structure diagram; (b) Schematic diagram of light vibration

(2) 改进 Savart 偏光镜横向剪切量和光程差计算

根据第二章的分析，横向剪切量和晶体光轴、厚度关系有关，在小角度入射时，其表达式为公式 2.43。其中， n_o 是晶体中 o 光的折射率， n_e 为晶体内 e 光的折射率， t 为单板厚度， α 是光轴平面与 xoz 平面的夹角。改进的 Savart 偏光镜 n_o 、 n_e 由晶体材料决定， $\alpha = 45^\circ$ ，把 α 值代入公式 2.43，得到改进 Savart 偏光

镜的横向剪切量:

$$\Delta = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_e^2 + n_o^2} t \quad (3.5)$$

比较改进 Savart 偏光镜产生的横向剪切量与常规的 Savart 偏光镜产生的横向剪切量能够得到二者大小是相同的结论。根据第二章的分析, Savart 偏光镜的光程差与入射角度有关系, 当小角度入射时, Savart 偏光镜的光程差为 0。

(3) Savart 偏光镜晶体材料选择

Savart 偏光镜的材料是单轴晶体, 根据式 3.5 可知, 改进 Savart 偏光镜的横向剪切量与晶体材料的厚度、双折射率均有关系。在厚度相同的情况下, 双折射率大的晶体可以增加横向剪切量, 从而可以增加各频谱之间的距离, 减小通道之间的串扰, 提高偏振反演精度。因此, 晶体的选择对仪器的小型化起到关键作用。常见用于制作偏振器件的各向异性晶体包括方解石(Calcite)和石英(quartz)。方解石色散方程随波长变化表达式为:

$$n_o^2 = 2.6962 + \frac{0.0192}{(\lambda^2 - 0.0219)} - 0.0143 \cdot \lambda^2 \quad (3.6a)$$

$$n_e^2 = 2.1846 + \frac{0.0085}{(\lambda^2 - 0.0143)} - 0.0023 \cdot \lambda^2 \quad (3.6b)$$

石英晶体色散方程随波长变化表达式为:

$$n_o^2 = 2.36315 + \frac{0.00945}{(\lambda^2 - 0.01915)} - 0.0219 \cdot \lambda^2 \quad (3.7a)$$

$$n_e^2 = 2.37165 + \frac{0.0120}{(\lambda^2 - 0.01445)} + 1.875 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^2 \quad (3.7b)$$

公式 3.6 和公式 3.7 中的 n_o^2 和 n_e^2 是晶体内 o 光和 e 光的折射率平方, λ 是通过晶体的波长。在厚度相同的情况下, 波长范围为 400nm-800nm 的平行光正入射到方解石晶体和石英晶体, 产生的横向剪切量 $\Delta = \frac{n_o^2 - n_e^2}{n_e^2 + n_o^2} t$ 随波长变化如图 3.4

所示。从图 3.4 可以看出, 相同波长情况下, 方解石晶体产生的横向剪切量更大, 因此, 由方解石晶体构成的空间调制偏振成像系统的各频谱之间的间隔距离更大, 通道彼此之间的串扰更小, 反演偏振信息更好。综上, 采用方解石作为 Savart 偏

物方的一束光线经过改进的空间调制模块变为四束光，四束光束的复振幅变化和空间调制偏振成像系统振幅变化相同。这四束光经过成像镜会聚在像面上某一点 $Q(x, y)$ ，如图 3.6 所示。

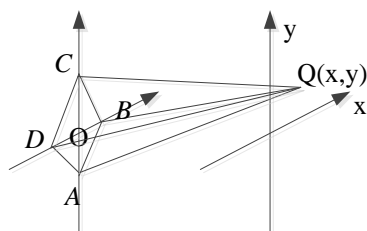


图 3.6 改进空间调制模块出射光线成像示意图

Figure 3.6 Schematic diagram of light imaging of improved spatial modulation module

在图 3.6 中，我们以出射点组成的菱形对角线交点 O 为基准， A 、 B 、 C 、 D 四点出射的光汇聚在像面上一点 Q ，出射的四个点 A 、 B 、 C 、 D 对应 O 点产生的光程差分别表示为：

$$OPD_{AO} = \frac{d_1^2 + 2d_1y}{2f} \quad (3.8a)$$

$$OPD_{BO} = \frac{d_2^2 - 2d_2x}{2f} \quad (3.8b)$$

$$OPD_{CO} = \frac{d_1^2 - 2d_1y}{2f} \quad (3.8c)$$

$$OPD_{DO} = \frac{d_2^2 + 2d_2x}{2f} \quad (3.8d)$$

其中， x 和 y 为像平面上任意一点 Q 的坐标值， f 为透镜焦距。 A 、 B 、 C 、 D 对应 O 点产生的相位差表示为：

$$\varphi_A = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_1^2 + 2d_1y}{2f} \quad (3.9a)$$

$$\varphi_B = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_2^2 - 2d_2x}{2f} \quad (3.9b)$$

$$\varphi_C = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_1^2 - 2d_1y}{2f} \quad (3.9c)$$

$$\varphi_D = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_2^2 + 2d_2x}{2f} \quad (3.9d)$$

其中, λ 为入射光的波长。因此, 出射的四束光复振幅可以表示为:

$$U(x, y) = \frac{1}{2} E_y(x, y) e^{i\varphi_1} - \frac{1}{2} E_y(x, y) e^{i\varphi_2} + \frac{1}{2} E_x(x, y) e^{i\varphi_3} + \frac{1}{2} E_x(x, y) e^{i\varphi_4} \quad (3.10)$$

四束光在像平面上发生干涉, 产生的干涉光强分布表达式为:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= U(x, y) * U^*(x, y) \\ &= \frac{1}{4} E_x(x, y) E_x^*(x, y) (2 - e^{i(\varphi_A - \varphi_B)} - e^{-i(\varphi_A - \varphi_B)}) \\ &\quad + \frac{1}{4} E_x(x, y) E_y^*(x, y) (e^{i(\varphi_A - \varphi_C)} + e^{i(\varphi_A - \varphi_D)} - e^{i(\varphi_B - \varphi_C)} - e^{i(\varphi_B - \varphi_D)}) \\ &\quad + \frac{1}{4} E_y(x, y) E_x^*(x, y) (e^{-i(\varphi_A - \varphi_C)} + e^{-i(\varphi_A - \varphi_D)} - e^{-i(\varphi_B - \varphi_C)} - e^{-i(\varphi_B - \varphi_D)}) \\ &\quad + \frac{1}{4} E_y(x, y) E_y^*(x, y) (2 + e^{i(\varphi_C - \varphi_D)} + e^{-i(\varphi_C - \varphi_D)}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

对上式进行化简, 上式变为:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} S_0 - \frac{1}{4} S_{10} e^{ib} - \frac{1}{4} S_{10} e^{-ib} \\ &\quad + \frac{1}{8} S_{23} e^{i2c} + \frac{1}{8} S_{23}^* e^{-i2c} - \frac{1}{8} S_{23} e^{-i2e} - \frac{1}{8} S_{23}^* e^{i2e} \\ &\quad + \left(\frac{1}{8} S_{23} e^{ia} - \frac{1}{8} S_{23} e^{-ia} \right) e^{ig} + \left(\frac{1}{8} S_{23}^* e^{-ia} - \frac{1}{8} S_{23}^* e^{ia} \right) e^{-ig} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\text{其中, } a = \frac{2\pi}{\lambda 2f} (d_1^2 - d_2^2), \quad b = \frac{2\pi}{\lambda 2f} (2d_1y + 2d_2x), \quad c = \frac{2\pi}{\lambda 2f} 2d_1y, \quad e = \frac{2\pi}{\lambda 2f} 2d_2x,$$

$$g = \frac{2\pi}{\lambda 2f} (2d_1y - 2d_2x), \quad S_{10} = \cos(a)S_1 + i \sin(a)S_0, \quad S_{23} = S_2 - iS_3.$$

通过上面的推导, 构建了基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的理论模型, 该模型相较于空间调制偏振成像系统模型, 数学表达式不同, 多了两个 S_{23} 的峰。

3.3 数据重建

空间调制偏振成像系统数据重建的方法目前有两种: 傅里叶频域滤波解调和

构建超定方程组空域解调。为了快速解调,本节对于基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统数据解调采用傅里叶频域解调的方法。傅里叶频域滤波的步骤分为:傅里叶变换——频域滤波——傅里叶逆变换三个步骤。傅里叶频域滤波三个步骤中,频域滤波至关重要,频域滤波中对滤波函数的选择是最重要的。滤波函数经过傅里叶变换之后的旁瓣越小,半宽高度越大,滤波之后包含的频谱信息越多,各频谱通道之间的串扰越小,反演的偏振信息越可靠。但是滤波函数傅里叶变换之后旁瓣越小,往往带来更小的半波宽度,因此,为了提高偏振解调精度,选择合理的滤波函数至关重要。

3.3.1 二维滤波函数

基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统重建的是目标物体横向与纵向构成的二维图像的偏振信息,在频域滤波时,需要采用二维滤波函数。二维滤波函数是一维滤波函数的推广,一维滤波函数具有良好的性质,因此通常使用一维滤波函数构造二维滤波函数。一般二维滤波函数的构造方法有两种:一种方法是将两个一维滤波函数直接相乘得到,显然,该方法得到的二维滤波函数具有方形或者矩形支持域;第二种方法是将一维滤波函数转动一圈得到圆形轴对称的二维滤波函数。常见的一维滤波函数有^[78]:高斯窗滤波函数、矩形窗函数等,在这里我们简单列举几个一维滤波函数的表达式。

高斯(Gaussin)窗滤波函数:

$$\text{Gaus}\left(\frac{x-b}{a}\right) = e^{\left[-\pi\left(\frac{x-b}{a}\right)^2\right]} \quad |x| \leq a \quad (3.13)$$

其中,以 $x=b$ 为中心,宽度为 a 。

矩形 (Rectangle) 窗滤波函数:

$$\text{rect}\left(\frac{x-b}{a}\right) = \begin{cases} 1, & |x-b| \leq \frac{a}{2} \\ 0, & |x-b| > \frac{a}{2} \end{cases} \quad (3.14)$$

其中,以 $x=b$ 为中心,宽度为 a 。

除了基本的一些一维窗函数,David 等人提出通过控制滤波窗函数的半高宽度^[80],从而限制旁瓣的大小,这些人提出一系列窗函数,这些窗函数的表示形式为:

$$NB\left(\frac{x}{L}\right) = 2 \sum_{i=0}^n C_i \left(1 - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right)^i, \sum_{i=0}^n C_i = 1, n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (3.15)$$

一维滤波函数中的海明窗滤波函数、汉宁窗滤波函数就是该系列滤波函数的变形得到的。我们选取半高宽(FWHM)分别为 1.2、1.4、1.6 和 2.0 的窗函数，这些窗函数的系数如表 3.1 所示。

表 3.1 不同半高宽度函数系数

Table 3.1 Coefficients of different FWHM

FWHM	C ₀	C ₁	C ₂	C ₄	C ₆	C ₈
1.2	0.396430	-0.150902	0.754472	0	0	0
1.4	0.153945	-0.141765	0.987820	0	0	0
1.6	0.039234	0	0.630268	0.234934	0.095563	0
2.0	0.002267	0	0.140412	0.187172	0.256200	0.113948

二维滤波函数除了由一维滤波函数拓展得到，还有本身就是二维滤波函数：圆域函数。因为圆本身就是二维的，合理的设置圆的参数，其本身就是一个滤波函数。圆域(Cicr)滤波函数表达式为：

$$Cicr\left(\frac{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}}{r_0}\right) = \begin{cases} 1, & (x-a)^2 + (y-b)^2 \leq r_0^2 \\ 0, & (x-a)^2 + (y-b)^2 > r_0^2 \end{cases} \quad (3.16)$$

其中， $x = a, y = b$ 是中心， r_0 为圆域函数的半径。对上述几种滤波函数采用旋转方法的到他们的二维滤波函数，如图 3.7 所示。

从图 3.7 可以看出，在设置相同的带宽，这些二维滤波函数的整体形状相差不多，比较这几种滤波函数效果的好坏，需要看他们对偏振信息解调的结果，通过 3.4 小节的仿真进行叙述。

(a)

(b)

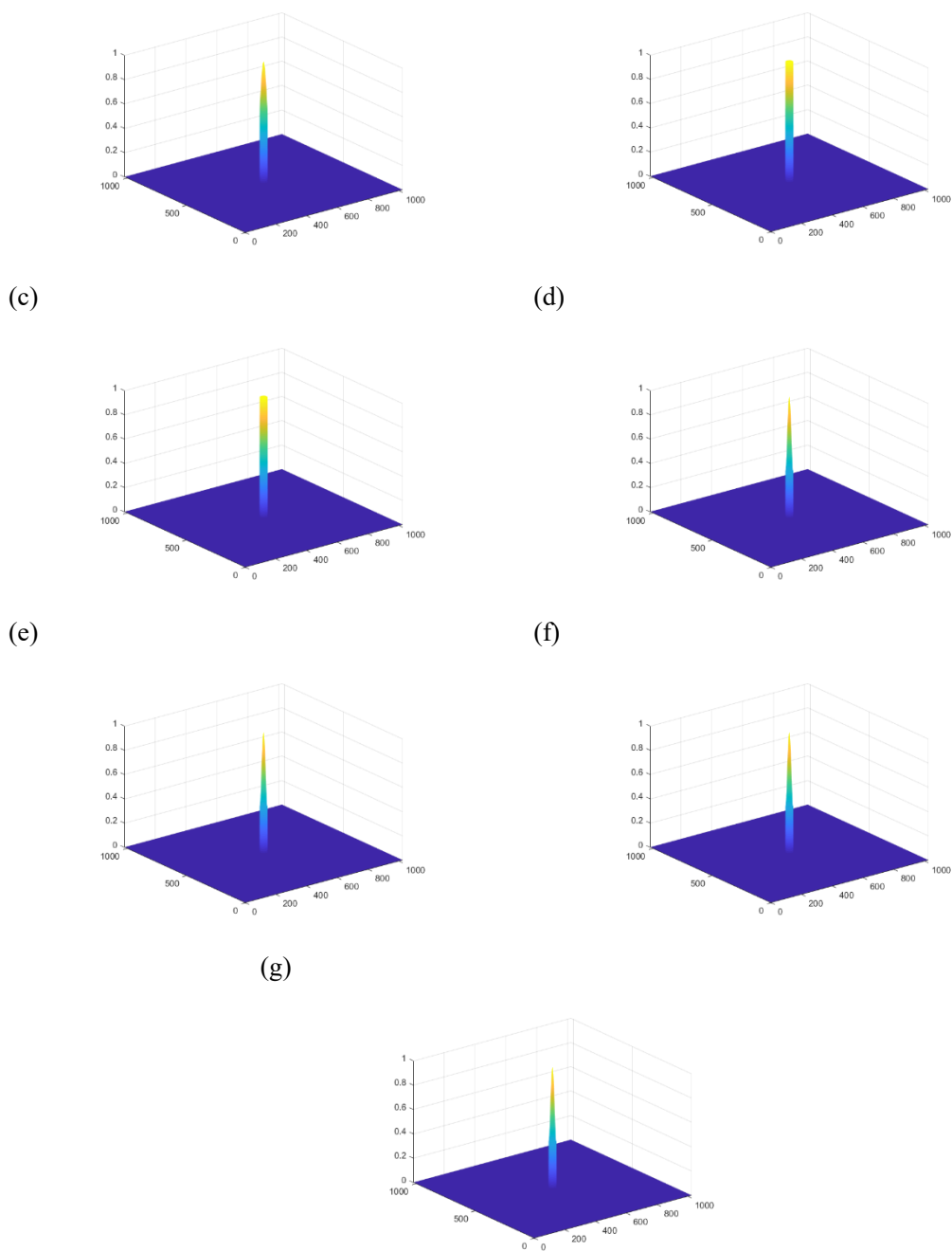


图 3.7 不同滤波函数二维示意图(a)高斯函数；(b)矩形函数；(c)圆域函数；
(d)FWHM=1.2；(e)FWHM=1.4；(f)FWHM=1.6；(g)FWHM=2.0

Figure 3.7 Schematic diagram of different two-dimensional filtering functions
(a)Gaussian; (b)Rectangle; (c)Circ; (d)FWHM=1.2; (e)FWHM=1.4; (f)FWHM=1.6;
(g)FWHM=2.0

3.3.2 傅里叶变换频域解调

基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统数据重建采用的是傅里叶频域滤波方法, 对公式 3.12 进行二维傅里叶变换, 表达式变为:

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}(I) = & \frac{1}{2} F_0(u, v) - \frac{1}{4} F_{10}(u - \alpha, v - \beta) - \frac{1}{4} F_{10}(u + \alpha, v + \beta) \\
& + \frac{1}{8} F_{23}(u, v - 2\beta) + \frac{1}{8} F_{23}^*(u, v + 2\beta) - \frac{1}{8} F_{23}(u - 2\alpha, v) - \frac{1}{8} F_{23}^*(u + 2\alpha, v) \\
& + \frac{1}{8} (F_{23}(u - \alpha, v + \beta)e^{ia} - F_{23}(u - \alpha, v + \beta)e^{-ia}) \\
& + \frac{1}{8} (F_{23}^*(u + \alpha, v - \beta)e^{ia} - F_{23}^*(u + \alpha, v - \beta)e^{-ia})
\end{aligned} \tag{3.17}$$

其中, $\alpha = \frac{d_2}{\lambda f} DN$, $\beta = \frac{d_1}{\lambda f} DN$, D 为探测器像元大小, N 是探测器一行或

者一列的像元数, F_0 、 F_{10} 、 F_{23} 、 F_{23}^* 分别表示 S_0 、 S_{10} 、 S_{23} 、 S_{23}^* 的频谱信息。

基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的调制图像的频谱示意图如图 3.8 所示, 从图 3.8 可以看出调制图像频谱中共有 9 个谱峰, 这 9 个峰代表的偏振频谱信息是彼此分开, 空间载波频率 α 和 β 的大小决定了各个峰之间的离散程度。

选取宽度为 α 和 β 的理想二维低通滤波器对频谱进行滤波, 对滤波后的频谱再进行二维傅里叶逆变换, 可以得到目标的 Stokes 矢量偏振信息:

$$S_0 = 2\mathcal{F}^{-1}(F_0) \tag{3.18a}$$

$$S_1 = \text{real}\left(\frac{4\mathcal{F}^{-1}(F_{10})}{e^{ib}}\right) / \cos(a) \tag{3.18b}$$

$$S_2 = \text{real}\left(\frac{8\mathcal{F}^{-1}(F_{23})}{e^{ic}}\right) \tag{3.18c}$$

$$S_3 = \text{imag}\left(\frac{8\mathcal{F}^{-1}(F_{23})}{e^{ic}}\right) \tag{3.18d}$$

公式 3.18b 和 3.18c 中的 real 表示取实部, 公式 3.18d 中的 imag 表示取虚部。经过上面推导可知, 设置合理的滤波器带宽和选取合适的二维滤波函数可以降低图像高频信息的损失和各频谱通道之间的串扰, 从而保证解调算法的精度。

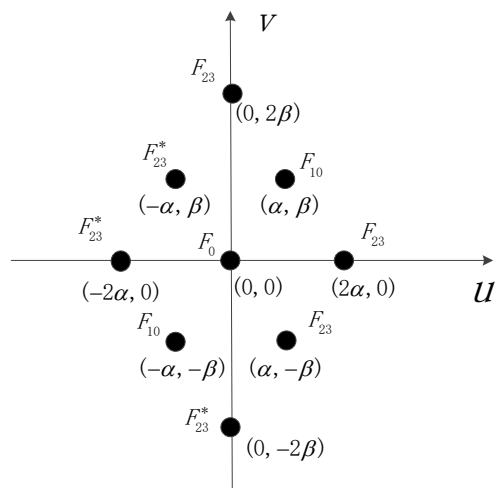


图 3.8 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统调制图像频谱示意图

Figure 3.8 Spectrum of Spatially modulated snapshot imaging polarimeter

using two Savart polariscopes

由公式 3.18 可知，当知道 $\cos(a)$ 、 e^{ib} 和 e^{ic} 就可以计算出所需要的 Stokes 图片，由于 $\cos(a)$ 、 e^{ib} 和 e^{ic} 只与系统本身相关，与被测目标的偏振态无关，因此需要预先标定这些参数的值。关于 $\cos(a)$ 、 e^{ib} 和 e^{ic} 值的测量，利用向系统输入确定的偏振角度的线偏振光，再由测量结果反推参考光束测量方法^[81]。

对于 45° 线偏振光，其 Stokes 矢量之间存在如下关系： $S_2 = S_0$ ， $S_1 = S_3 = 0$ ，因此，其调制频谱只有存在 F_0 和 F_2 分量，公式 3.13 变为：

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}(I) = & \frac{1}{2} F_0(u, v) \\
 & + \frac{1}{8} F_2(u, v - 2\beta) + \frac{1}{8} F_2(u, v + 2\beta) - \frac{1}{8} F_2(u - 2\alpha, v) - \frac{1}{8} F_2(u + 2\alpha, v) \\
 & + \frac{1}{4} (i \sin(a) F_2(u - \alpha, v + \beta)) \\
 & + \frac{1}{4} (i \sin(a) F_2(u + \alpha, v - \beta))
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

对公式 3.15 进行频域滤波，滤出 $F_0(u, v)$ 和 $F_2(u, v - 2\beta)$ 频谱，可得：

$$e^{ic} = \frac{4\mathcal{F}^{-1}(F_2(u, v))}{\mathcal{F}^{-1}(F_0(u, v))} \tag{3.20}$$

将公式 3.15 中的 $i\sin(a)F_2(u-\alpha, v+\beta)$ 频谱和 $F_2(u, v-2\beta)$ 频谱滤出, 可得:

$$\sin(a) = -\frac{2iF_2(u-\alpha, v+\beta)}{F_2(u, v-2\beta)} \quad (3.21a)$$

$$\cos(a) = \sqrt{1 - \sin^2(a)} \quad (3.21b)$$

对于 0° 线偏振光, 其 Stokes 矢量之间存在如下关系: $S_1 = S_0$, $S_2 = S_3 = 0$,

因此, 其调制频谱只有 F_0 和 F_1 分量, 公式 3.13 变为:

$$\mathcal{F}(I) = \frac{1}{2}F_0(u, v) - \frac{1}{4}F_{10}(u-\alpha, v-\beta) - \frac{1}{4}F_{10}(u+\alpha, v+\beta) \quad (3.22)$$

对公式 3.18 进行频域滤波, 滤出 $F_0(u, v)$ 和 $F_{10}(u-\alpha, v-\beta)$ 频谱, 可得

$$e^{ib} = \frac{2\mathcal{F}^{-1}(F_{10}(u-\alpha, v-\beta))}{\mathcal{F}^{-1}(F_0(u, v))(\cos(a) + i\sin(a))} \quad (3.23)$$

通过上述参考光束标定的方法, 得到了基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统解调偏振信息需要的参数的值, 为后面进行相关仿真和实验提供了方法和依据。

3.4 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的分析和验证

为了验证基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的有效性, 本章进行了仿真与试验研究。

3.4.1 仿真分析

本节的数值仿真分为三个部分: 首先, 对基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统数值仿真, 验证该系统的准确性; 其次, 对传统空间调制偏振成像系统不同装调角度误差进行数值仿真, 将结果与本章提出的系统结构进行对比, 证明本章提出的结构优越性; 最后, 对本章提出的结构采用不同二维滤波函数进行对比偏振信息反演结果, 不同通道选取合适的滤波函数。

在进行仿真实验之前, 我们需要进行对系统相关参数进行设定与计算。基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统前存在滤波片, 滤波片只可以通过单色光, 在可见光范围内, 选择波长为 550nm 的单色光; 确定波长之后, 根据本章 3.2 节可知, 基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统中的 Savart 偏光镜

晶体材料选取的是方解石晶体，根据方解石色散方程特性，其在 550nm 波长处的双折射率分别为： $n_o = 1.662$ ， $n_e = 1.488$ ；由公式 3.1 可知，Savart 偏光镜的横向剪切量的大小与晶体的双折射率和厚度都有关系，晶体厚度的增加导致横向剪切量也增加，同样，横向剪切量的变化与波长的变化成正比。这对系统中 Savart 偏光镜的设计提出考验，既要满足特定长度的横向剪切量，还要满足仪器小型化设计，在波长为 550nm 处，为了尽量满足上述需求，Savart 偏光镜单板厚度选择 $t=6\text{mm}$ ，将厚度和双折射率代入公式 3.1，得到横向剪切量的值为： $\Delta \approx 0.661$ ，相应的出射光线四个点构成的菱形边长为： $d \approx 0.935$ ；探测器的像元尺寸大小与像元数影响滤波函数截止频率的选取，而滤波函数的截止频率又对偏振反演精度有影响，所以，合理的选择探测器的规格很重要。在这里，我们决定采用的面阵探测器像元尺寸大小为 3.8mm，像元的行数和列数均为 1024 pixel；系统中的成像镜焦距影响频谱图内各频谱之间分离的距离，它既需要保证各个频谱之间距离足够大，有需要保证各频谱之间不发生混叠，还需要保证频谱在探测器内，没有溢出。为满足上面关于成像镜焦距的要求，得到成像镜焦距需满足如下关系：

$$\begin{aligned} 3\beta &\leq \frac{N}{2} \\ 3\alpha &\leq \frac{M}{2} \end{aligned} \quad (3.24)$$

其中， α 和 β 是频谱图内各个频谱分离距离， $\alpha = \frac{d_2}{\lambda f} DM$ ， $\beta = \frac{d_1}{\lambda f} DN$ ；N 是探测器像元的列数，M 是探测器像元的行数，D 是探测器像元大小。将波长、 d_1 、 d_2 、D、M 和 N 代入公式 3.24，为了满足整体仪器小型化设计需求，最后确定成像镜的焦距为： $f = 40\text{mm}$ 。综上，系统中所有器件的仿真参数如表 3.2 所示：

表 3.2 仿真系统参数

Table 3.2 Parameters of simulation system

滤波片波长	$\lambda = 550\text{nm}$	Savart 单板材料	方解石
Savart 单板厚度	$t = 6\text{mm}$	双折射率	$n_o = 1.662$,

			$n_e = 1.488$
横向剪切量大小	$\Delta \approx 0.661$	成像镜焦距	$f = 40mm$
探测器像元数	1024*1024pixel	探测器像元大小	3.8um

基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统的仿真输入图片如图 3.9 所示。图 3.9 中的图像是人为设定的，图像中间内部的空间频率高于图像边缘部分，图像的灰度值变化范畴为[0-1]。仿真输入图片中各 Stokes 矢量之间存在取下关系： $S_1 = 0.8 \cdot S_0, S_2 = 0.48 \cdot S_0, S_3 = 0.36 \cdot S_0$ ，偏振度 $P = 1$ 。

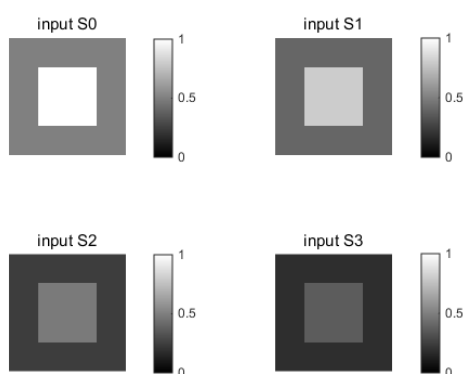


图 3.9 输入 Stokes 图片

Figure 3.9 The input Stokes objects pictures

将仿真的图片代入公式 3.12 得到数值仿真模拟的干涉图如图 3.10 所示，从图中可以看到目标图像和清晰的干涉条纹。对图 3.10 的干涉图进行二维傅里叶变换，得到频谱图，如图 3.11 所示。从图 3.11 中可以看到频谱图内存在 9 个分离的峰，这 9 个频谱峰分别代表 S_0 、 S_{10} 、 S_{23} 、 S_{23}^* 的频谱。

对图 3.11 的频谱图进行二维频域滤波，滤波函数采用 3.3 节中介绍的二维滤波函数，让这些滤波函数分别对频谱图进行滤波，对滤波后的频谱分别进行傅里叶逆变换得到目标的 Stokes 矢量偏振信息。为了方便比较各种滤波函数的重建效果，采用图像相似度(SSIM)和峰值性信噪比(PSNR)这两个函数作为各个滤波函数重建偏振图像的评价标准。

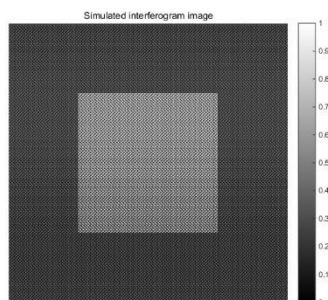


图 3.10 仿真模拟干涉图

Figure 3.10 Simulated image

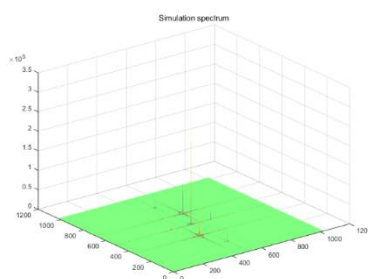


图 3.11 傅里叶频谱图

Figure 3.11 Fourier spectra

图像相似度是评估反演图像和输入目标图像的相似性，通过关系式得到两者的相关系数，相关系数值的变化范围是[0-1]，相似系数的值越接近 1 表明这两幅图像越相似，也就是反演图像与输入图像越相似，反演的越好。图像相似度相关系数的定义如下：

$$SSIM = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (R_{k,i,j} - \bar{R})(I_{k,i,j} - \bar{I})}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (R_{k,i,j} - \bar{R})^2 \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (I_{k,i,j} - \bar{I})^2}} \quad (3.25)$$

其中， $R_{k,i,j}$ 和 $I_{k,i,j}$ 分别代表反演图像与输入图像的第 k 个 Stokes 矢量图像坐标 (i,j) 的像素值， \bar{R} 和 \bar{I} 分别代表反演图像与输入图像相对应的 Stokes 图像的像素平均值， M 和 N 是仿真输入探测器的行数和列数。

峰值信噪比是指反演图像中最大值信号与图像差异间的比率,是用来评估图像失真的客观情况。反演图像和输入图像的峰值信噪比的值越大,两幅图像就越相似,反演的越好,峰值信噪比的表达式如下:

$$PSNR=10\lg\frac{L^2}{\frac{1}{MN}\sum_{x=1}^M\sum_{y=1}^N[I(x,y)-I'(x,y)]^2} \quad (3.26)$$

其中, M 和 N 代表仿真输入探测器的行数和列数, L 是图像中像素的最大灰度值, I 为输入图像的光强值, I' 为重构图像的光强值。

不同二维滤波函数反演的 Stokes 矢量偏振信息的图像相似度和峰值信噪比如表 3.3 所示。

表 3.3 不同滤波函数反演 Stokes 的 PSNR 和 SSIM 值比较

Table 3.3 The PSNR and SSIM values of comparison

Gaussian	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	36.237	33.482	31.373	38.570
SSIM	0.997	0.993	0.967	0.989
Rect	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	36.296	33.058	29.384	35.128
SSIM	0.997	0.992	0.950	0.976
Cicr	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	36.435	33.482	29.990	36.826
SSIM	0.997	0.993	0.956	0.983
FWHM=1.2	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	35.407	32.686	32.678	40
SSIM	0.997	0.992	0.975	0.991
FWHM=1.4	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	34.6127	31.937	33.373	40.826
SSIM	0.996	0.990	0.979	0.993
FWHM=1.6	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	33.899	31.234	33.796	40.860
SSIM	0.995	0.988	0.981	0.993
FWHM=2.0	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	32.808	30.145	34.232	40.376
SSIM	0.994	0.985	0.981	0.992

从表 3.3 中的 SSIM 和 PSNR 值可以看出:关于 S_0 的重建,圆域滤波函数的 PSNR 值和 SSIM 值都是最高的,表明基于两个 Savart 偏光镜的空间调制成像系

统中对于 Stokes 矢量中的 S_0 分量的重建, 选取圆域滤波函数最佳; 关于 S_1 的重建, 圆域滤波函数和二维高斯滤波函数重建的 PSNR 值和 SSIM 值是相同的, 表明基于两个 Savart 偏光镜的空间调制成像系统中对于 Stokes 矢量中的 S_1 分量的重建, 圆域滤波函数和二维高斯滤波函数都是最佳; 关于 S_2 的重建, FWHM=1.2 的滤波函数的 PSNR 值和 SSIM 值最高, 表明基于两个 Savart 偏光镜的空间调制成像系统中对于 Stokes 矢量中的 S_2 分量的重建, 选取 FWHM=1.2 滤波函数最佳; 关于 S_3 的重建, FWHM=1.6 滤波函数的 PSNR 值和 SSIM 值最高, 表明基于两个 Savart 偏光镜的空间调制成像系统中对于 Stokes 矢量中的 S_2 分量的重建, 选取 FWHM=1.6 滤波函数最佳。由于 S_{23} 频谱在一起, 但是二者最佳的滤波函数不同, 因此我们在对 Stokes 矢量的 S_2 和 S_3 分量重建时, 滤除两个 S_{23} 的频谱峰, 对二者单独重建。最后, 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的各个 Stokes 矢量通道选择的最优二维滤波函数如表 3.4 所示。

表 3.4 各 Stokes 矢量滤波函数

Table 3.4 The filter function of each Stokes

Stokes 矢量	S_0	S_1	S_2	S_3
二维滤波函数	圆域滤波函数	圆域/高斯滤波函数	FWHM=1.2	FWHM=1.6

对图 3.11 各个 Stokes 通道用选择好的滤波函数进行滤波处理得到不同 Stokes 通道的频谱, 对滤波后的频谱进行傅里叶逆变换得到反演的 Stokes 图像如图 3.12 所示。

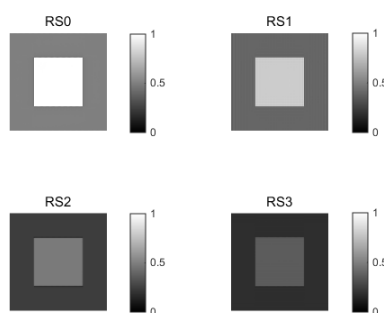


图 3.12 重建 Stokes 图像

Figure 3.12 The reconstruct Stokes objects pictures

为了验证本章提出的系统偏振信息解调精度比空间调制偏振成像系统偏振信息解调精度高，本章对带有 1° 、 3° 和 5° 半波片装调角度误差的空间调制偏振成像系统反演的 Stokes 图像进行了仿真试验，如图 3.13 所示。传统空间调制偏振成像系统反演的 Stokes 图像各个通道选择最优滤波函数。

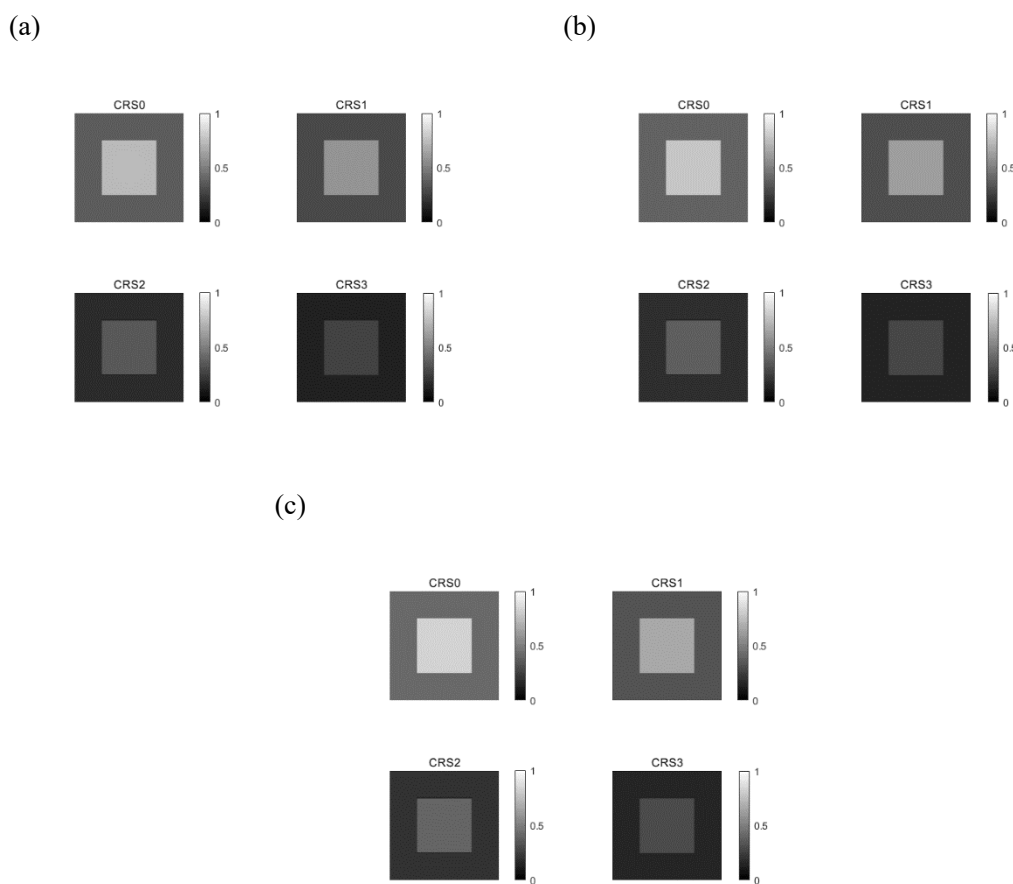


图 3.13 不同半波片装调角度误差反演 Stokes 图片；(a) 1° 装调角度误差；(b) 3° 装调角度误差；(c) 5° 装调角度误差

Figure 3.13 The reconstruct Stokes objects pictures of different half-wave plate adjustment angle error; (a) 1-degree angle error caused by the half-wave plate; (b) 3-degree angle error caused by the half-wave plate; (c) 5-degree angle error caused by the half-wave plate

比较图 3.13、图 3.12 和图 3.9，对于 S_0 的重建，带有角度误差的空间调制偏振成像系统在灰度变化处带有条纹，而基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统不存在且其重建的图片在灰度上更接近输入图片；对于 S_1 的重建，带有角度误差的空间调制型偏振成像系统以及基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统在灰度变换处都存在条纹，但是在灰度上，基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统反演的 S_1 更接近输入的；对于 S_2 和 S_3 的重建，从图 3.13、图 3.12 和图 3.9 可以清楚的看到基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统反演的灰度更接近输入的。因此，从直观观察可以看出基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统反演的 Stokes 矢量更好。

为了更近一步验证基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统反演的 Stokes 矢量更好，通过计算得到带有角度误差的空间调制偏振成像系统(SMSIP)反演的 Stokes 矢量的 PSNR 与 SSIM，并与基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统(SMSIPTS)反演的 Stokes 矢量的 PSNR 与 SSIM 比较，如表 3.5 所示。

表 3.5 SMSIPTS 和 SMSIP 的 PSNR 和 SSIM 值比较

Table 3.5 the comparison values of PSNR and SSIM between SMSIPTS and SMSIP

SMSIP(1-degree)	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	16.695	18.460	22.780	25.482
SSIM	0.996	0.990	0.985	0.991
SMSIP(3-degree)	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	14.959	16.777	21.131	23.776
SSIM	0.995	0.990	0.984	0.990
SMSIP(5-degree)	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	14.573	16.400	20.761	23.395
SSIM	0.994	0.990	0.983	0.990
SMSIPTS	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	36.435	33.482	34.232	40.860
SSIM	0.997	0.993	0.991	0.993

从表 3.5 可以看出，对于 SSIM 的值，基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统重建的 Stokes 矢量与带有角度误差的空间调制偏振成像系统重建的 Stokes 矢量相差不多。但是对于 PSNR 的值，二者相差很多，基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统重建的 Stokes 矢量的 PSNR 值是带有角度误差的

空间调制偏振成像系统重建的 Stokes 矢量 PSNR 值的一倍。这是因为基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统中不存在半波片装调角度误差,其获得的干涉图也不存在误差,解调出目标的偏振信息更准确。而由于空间调制偏振成像系统存在角度误差,它的干涉图也存在误差,导致其解调的偏振信息相对较差。因此,从表 3.5 证明了基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统反演的 Stokes 矢量效果更好。

综合上述的仿真结果,可以看出:本章所提出的基于两个 Savart 空间调制偏振成像系统反演不同 Stokes 矢量时选择不同的二维滤波函数,可以得到更好的反演 Stokes 矢量图片;且本章提出的基于两个 Savart 空间调制偏振成像系统克服了传统空间调制偏振成像系统中半波片装调角度误差导致偏振信息解调精度降低的问题,通过比较反演 Stokes 矢量图片的 PSNR 值与 SSIM 值都证实了基于两个 Savart 偏光镜偏振成像系统反演的 Stokes 矢量图片相对于带有半波片装调角度误差的空间调制偏振成像系统反演的 Stokes 矢量图片效果更好,且基于两个 Savart 偏光镜偏振成像系统反演的 Stokes 矢量图片的 PSNR 值是比带有半波片装调角度误差的空间调制偏振成像系统反演的 Stokes 矢量图片的 PSNR 值的 2 倍。

3.4.2 实验验证

为了进一步验证本章所提出的基于两块 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的有效性,本小节将对其进行试验,试验是在实验室内完成的,搭建的试验装置实物图如图 3.14 所示。实验器材从右到左依次为:

- (1) 高稳定性的卤钨灯作为光源(light source);
- (2) 产生平行光的平行光管(collimator);
- (3) 中心波长是 550nm 的滤光片(filter);
- (4) 光轴朝向与水平面成 30° 的起偏器(polarizer)用于产生实验所需要的线偏振光,由于地物遥感中目标的圆偏振分量很小,并且为了方便实验结果分析,因此本文实验验证中光源使用线偏振光;
- (5) 带有条纹的波罗板作为实验物体(object);
- (6) 焦距为 80mm 的薄透镜(L1) 作置镜头;
- (7) 材料为方解石晶体,尺寸为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的空间调制模块

SP1 和 SP2, 单板厚度为 6mm, 其中 SP2 采用 3.2.1 节的改进 Savart 偏光镜结构;

- (8) 光轴方向与水平方向成 90° 的偏振片当作线分析器(analysis);
- (9) 焦距为 40mm 的成像镜(L2);
- (10) 像元数为 1024×1024 , 像元大小为 $3.6 \text{ um} \times 3.6 \text{ um}$ 的探测器(CCD);
- (11) 用于记录实验结果的电脑(computer)。

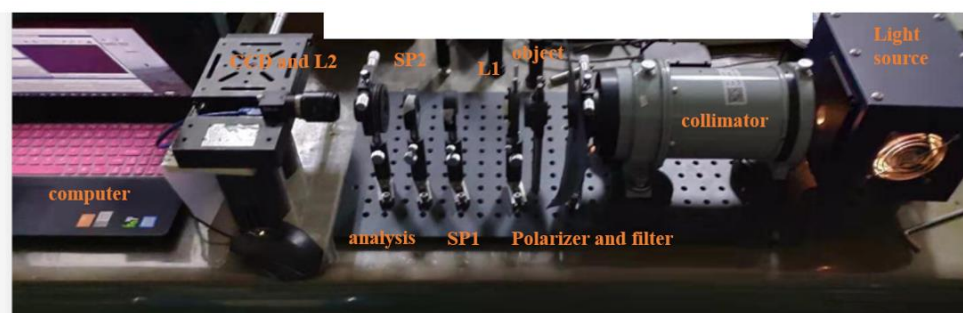


图 3.14 试验装置图

Figure 3.14 Setup diagram of experiment

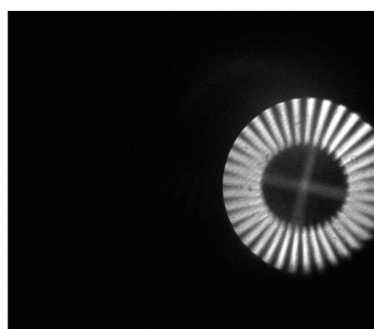
在开始试验之前, 需要作一些基础的准备工作。首先, 将起偏器和线分析器的光轴调到相对应的角度位置。以起偏器 0° 的方位角作为参考的角度标准且令其为整个系统的 X 轴, 分别调整剩下偏振片和线分析器到相应的角度。调整好偏振片和线分析器的角度后, 将所有器件摆放好, 利用激光器对各元件光轴的位置进行准直。撤掉光路中空间调制模块, 只保留起偏器和线分析器。利用两个偏振片透光方向相互垂直会使光束的亮度消失的原理, 对线分析器透光轴的方向多次旋转直到探测器上获得的光强最小。当探测器上获得的光强最小时, 两器件之间达到消光状态, 线分析器方位角为 90° 。标定的 0° 和 45° 线偏振光以目前的 X 轴为基准, 通过调节高精度的调整架将起偏器透光轴方向依次调到相应的位置并分别记录探测器成像结果, 根据 3.3.2 节方法得到需要标定参数。

调整起偏器透光轴方向 30° , 得到实验中接收到的干涉图如图 3.15(a)所示, 将带有图像部分放大, 如图 3.15(b)所示, 可以清晰看到干涉图像上的干涉条纹, 这表明目标的偏振信息编码到目标的像上。对图 3.15(a)进行傅里叶变换得到频谱图, 对 S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 频谱分别采用圆域滤波函数、高斯滤波函数、FWHM=1.2 的滤波函数和 FWHM=1.6 的滤波函数进行滤波处理。对滤波后的频谱进行傅里叶逆变换的相关处理得到目标的全部 Stokes 矢量偏振信息, 如图 3.16 所示。从

图 3.16 可以看出图像的噪声很大，尤其是反演的 S_2 ，这主要是由以下几个因素构成：我们目前的装置部件都是采用实验室现有元件组合的，系统内各部件不是处于最佳效果；实验室内的其他外在光源影响干涉成像过程；各器件自身对光线存在消减；探测器本身存在噪声。如果所有器件按照设计要求加工制作成一个完整的仪器，排除了所有外在环境的干扰，则反演图像质量会得到大幅度提升。

虽然目前试验只是实验室内的验证试验，没有进行完整器件的组装，但是依然可以利用实验结果验证基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的可行性。实验采用的 30° 线偏振光，各 Stokes 矢量之间存在如下关系： $S_1/S_0 = 0.5$ ， $S_2/S_0 = 0.866$ 。将图 3.16 中的 S_1 和 S_2 除以 S_0 ，得到 S_1/S_0 和 S_2/S_0 图像，如图 3.17(a)和(b)所示。从图 3.17 成像部分的灰度图可以看出图 3.17(a)的灰度值在 0.5 左右，图 3.17(b)的灰度值在 0.8 左右。这与输入的 30° 线偏振光中 Stokes 矢量的 S_1 和 S_2 与 S_0 的比值一致，证明了基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统的可行性。

(a)



(b)

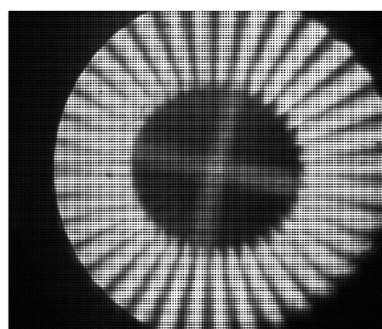


图 3.15 (a)实验获得的干涉图；(b)放大干涉图

Figure 3.15 (a) The interferogram obtained from the experimental. (b) Enlarging the interferogram

(a)

(b)

(c)

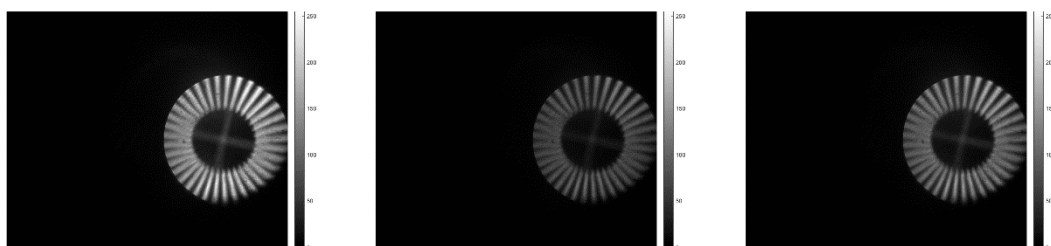


图 3.16 重建的 Stokes 矢量; (a) S_0 , (b) S_1 , (c) S_2

Figure 3.16. The Stokes of the reconstruction: (a) S_0 , (b) S_1 , (c) S_2 .

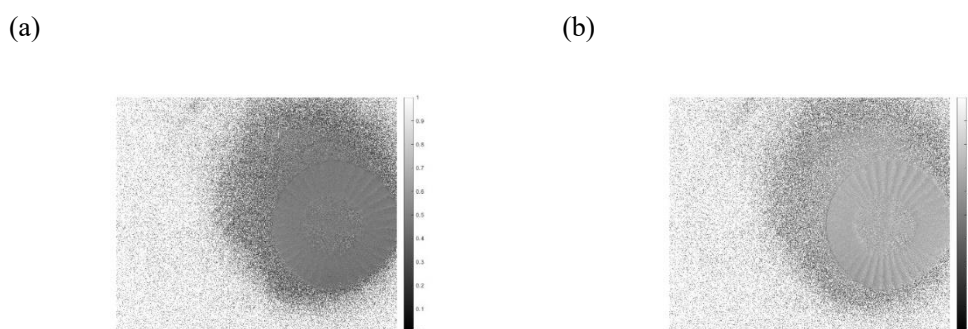


图 3.17 归一化 S_1 和 S_2 ; (a) S_1/S_0 , (b) S_2/S_0

Figure 3.17. The normalized S_1 and S_2 . (a) S_1/S_0 , (b) S_2/S_0

为了进一步验证基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统实验的正确性, 选取图 3.17(a)中有图像的部分一系列像素表示为如图 3.18 所示的条形图, 从图 3.18 条形图中可以看出, 该列像素的值在 0.5 上下波动, 计算其平均值为 0.4913, 基本符合 30° 线偏振光中 Stokes 矢量中 S_1 和 S_0 的比值。因此, 从 S_1 的反演可以看出基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统的可行性。同样的, 选择图 3.17(b)中存在图像部分的一系列像素表示为如图 3.19 所示的条形图, 从图 3.19 条形图可以看出, 该列像素的值在 0.7 上下波动, 计算其平均值为 0.69, 低于 300° 线偏振光中 Stokes 矢量 S_2 和 S_0 的值, 主要原因是在解调 S_2 时采用的傅里叶频域解调算法存在通道串扰的, 导致解调的 S_2 包含噪声, 从而影响 S_2 的解调精度, 后面的章节将采用空间解调算法代替频域解

调算法进一步提高 S_2 的解调精度。

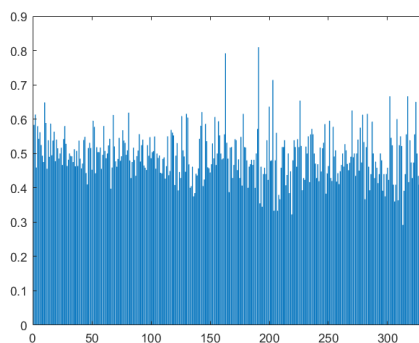


图 3.18 S_1/S_0 条形图

Figure 3.18 Bar graph of S_1/S_0

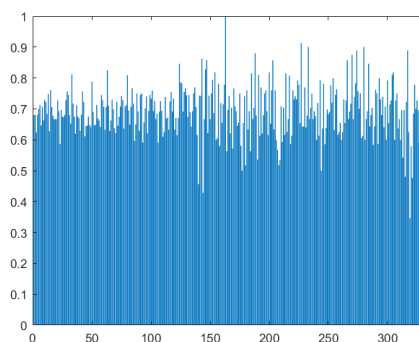


图 3.19 S_2/S_0 条形图

Figure 3.19 Bar graph of S_2/S_0

由数值仿真和实验得结果可知,本章所提出得基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统可以高精度重建目标得 Stokes 矢量偏振信息。应用本章提出的结构,避免了空间调制偏振成像系统半波片装调角度误差导致偏振信息解调精度降低的问题,重建的 Stokes 矢量偏振图片的峰值信噪比相对于空间调制偏振成像系统提高一倍。基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统为后续对于不同波段 Stokes 矢量偏振信息探测奠定了基础,同时降低了装调精度要求。

3.5 本章小结

本章主要对基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统结构和原理进行研究。

首先,推导了空间调制偏振成像系统半波片的装调角度误差以及额外相位延迟误差的理论模型,证实了半波片的误差会影响空间调制偏振成像系统的偏振探测精度。其次,提出基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统结构且该系统结构移除空间调制偏振成像系统中的半波片,并利用改进的 Savart 偏光镜与常规 Savart 偏光镜作为空间调制模块,推导了基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统理论模型。之后,构造了基于傅里叶变换二维频域滤波多种二维滤波函数,推导了基于两个 Savart 偏振镜的空间调制偏振成像系统频域解调理论模型。最后,通过数值仿真确定了基于两个 Savart 偏光镜频域滤波不同通道二位滤波函数,比较了本章提出的结构与传统带有半波片装调角度误差空间调制偏振成像系统偏振反演精度,采用仿真和试验的方法对本章所提出结构的有效性与可行性进行了验证。

根据本章所提出的空间调制偏振成像系统,避免了传统空间调制偏振成像系统中半波片带来的装调角度误差和额外相位延迟误差导致偏振信息解调精度降低的问题,降低了空间调制模块的装调难度,提高了偏振探测精度,有效推进了空间调制偏振成像技术的实际工程化应用。

第4章 快照式空间调制型计算层析偏振光谱成像系统结构研究

空间调制偏振成像系统结构存在滤光片和半波片,一次测量只可以得到单波段的偏振信息,为了获得不同波段目标的偏振信息需要频繁更换半波片和滤光片;虽然本文提出的基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统结构移除半波片,但是还是需要频繁更换滤波片去获得不同波段的偏振信息,这大大降低探测效率。因此,有必要对空间调制偏振成像系统偏振光谱信息探测效率进一步地深入研究。快照式偏振光谱成像技术通过在偏振光谱成像系统中加入分光瞳、编码模板、色散元件等器件,实现一次测量就能够得到目标的偏振、光谱、二维空间信息。因此,本章将空间调制偏振成像系统与快照式光谱成像技术中的计算层析技术结合构建快照式空间调制型计算层析偏振光谱成像系统(Spatially modulated snapshot computed tomographic polarization imaging spectrometer)。通过对目标一次探测并对探测结果进行两次解调就可以得到目标的不同波段的偏振图像,增加了空间调制偏振成像技术的探测效率。最后,通过仿真和试验验证了本章提出的快照式空间调制型计算层析偏振成像光谱系统的有效性和可行性。

4.1 计算层析成像光谱技术基本理论

计算层析型成像光谱(Computer Tomography Imaging Spectrometer, CTIS)技术最早由日本学者 Oka 提出,该技术的基础是计算机断层扫描技术。将物体的二维图像信息和一维光谱信息视作三维数据立方体,将数据立方体沿着一个或多个方向投影到探测器上,再利用三维数据立方体与探测器上的投影图像之间的关系,采用相关的图像重建算法重构出目标物体的二维图像和一维光谱信息,计算层析成像光谱技术投影原理如图 4.1 所示。CTIS 具有高光通量与光能利用率、快速获得目标二维空间信息和一维光谱信息优点,被广泛应用到各类检测环境。

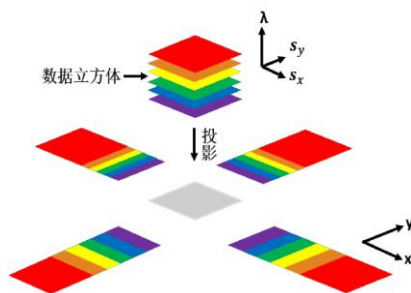


图 4.1 计算层析成像光谱技术投影原理图

Figure 4.1 Schematic diagram of the CTIS projection

4.1.1 CTIS 系统结构

CTIS 系统的布局如图 4.2 所示，系统结构由成像镜、视场光阑、准直镜、色散元件、再成像镜和探测器构成。CTIS 系统结构中目标物体与视场光阑成物像共轭关系，成像镜将包含目标的二维空间信息与一维光谱信息的三维数据立方体成像在视场光阑处。视场光阑处的像经过准直镜准直照射在色散元件，不同波长的像经色散元件色散到不同位置，最后这些像经过成像镜汇聚在探测器上。探测器上获得包含目标二维空间信息与一维光谱信息的三维数据立方体的投影图像。

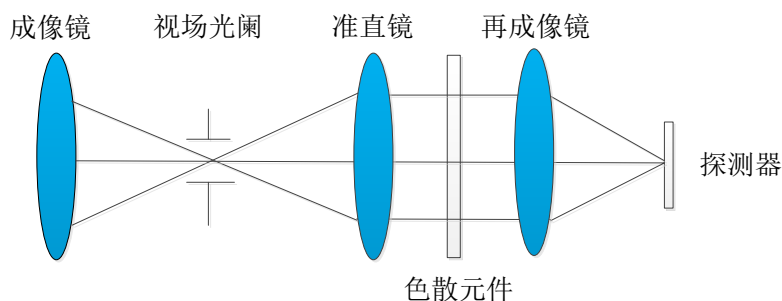


图 4.2 CTIS 系统结构示意图

Figure 4.2 Schematic diagram of CTIS

由于色散元件的不同，计算层析光谱成像技术分为两种类型：旋转棱镜型层析成像光谱技术和光栅型成像光谱技术。旋转棱镜型计算层析光谱成像系统的色散元件是棱镜，其每次凝视只能得到目标数据立方体一个投影方向的投影数据，为了得到多个方向的投影数据，需要频繁旋转系统中绕光轴的直视棱镜，对得到的多个投影进行数据处理，重建数据立方体。光栅型计算层析成像光谱系统的分

光元件是光栅, 根据需要色散的级次, 光栅分为一维和二维光栅。目标物体经过光栅型成像光谱系统得到的是具有多个衍射级次的图像, 这些衍射级次图像的中间包含目标图像的空间信息; 目标数据立方体在不同投影角度下投影构成衍射图像的其余部分; 对衍射图像进行数据处理获得目标物体完整的空间光谱信息。对于这两种色散元件构成的计算层析成像系统, 光栅型计算层析成像光谱系统具有不包含任何运动部件, 通过一次曝光就可以重建出目标的空间光谱数据立方体。因此, 本文采用光栅型计算层析光谱系统为基础。

4.1.2 CTIS 基本原理

CTIS 的理论基础是 Radon 变换以及中心切片定理, 下面具体介绍这两个理论。

(1) Radon 变换

Radon 变换的基本理论是积分几何中直线积分的投影变换^[83], 在 $f(x, y)$ 的二维 Radon 变换中, 将其沿着不同方向的直线 l 作积分得到一幅投影图像, 获得投影图像的过程称为 $f(x, y)$ 的二维 Radon 变换。假设投影直线的法线长度为 p , 法线与 x 轴夹角为 θ , 投影直线表达式可以表示为:

$$l: p = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (4.1)$$

$f(x, y)$ 沿着投影直线 l 不同投影角 α 作积分可以得到:

$$P_{\alpha}(p, \theta) = \int_l f(x, y) dl \quad (4.2)$$

其中, α 是投影直线 l 与 y 轴的夹角, l 表示投影直线方向。综上所述: 当高维目标函数经过 Radon 变换, 沿着不同角度做直线积分能够获得低维的投影数据, 对于这些低维投影数据经过 Radon 变换的逆过程能够重构出高维数据。

(2) 中心切片定理

中心切片定理是由傅里叶变换以及 Radon 变换共同推导而出, 因此中心切片定理也称呼其为 Fourier 切片定理^[82]。傅里叶变换和 Radon 变换具有如下关系:

$$F_n(f(X)) = F_1 \left\{ \hat{f}(p, \xi) \right\} \quad (4.3a)$$

$$F_n(f(X)) = \int f(X) e^{-i2\pi kX} dX \quad (4.3b)$$

$$F_1 \left\{ \hat{f}(p, \xi) \right\} = \int \hat{f}(p, \xi) e^{-i2\pi p} dp \quad (4.3c)$$

通过上面公式推导可知：目标函数经过 Radon 变换能够获得低维投影数据，低维投影数据的傅里叶变换相当于目标函数 n 傅里叶变换域中的一个切面或者是一条线。

基于 Radon 变换和中心切片定理，可以得到以下关于计算层析成像光谱技术的结论：（1）高维目标可以通过其低维投影图像得到重构；（2）在重构高维目标时，只需要有限数量方向的投影图像就可以完成。

4.1.3 CTIS 数据重建算法

解析算法和迭代算法是 CTIS 数据重建的主要算法^[49,83,84]。其中，解析算法主要是滤波反投影算法(Filter Back-Projection, FBP)，该算法拥有计算速度较快，模型避免繁琐等特点；但是，该算法易受到自身成像质量和噪声影响导致重建图像精度不高。然而，迭代算法可以很好的避免这些问题^[85]，因此，本文主要介绍迭代算法。迭代算法数学模型如下：

$$\mathbf{g} = H \mathbf{f} + \mathbf{e} \quad (4.4)$$

其中， $\mathbf{g} = [g_1, g_2, \dots, g_N]^T$ ，表示实验测得的投影数据； $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_M]^T$ ，表示目标的三维数据立方体； $\mathbf{e} = [e_1, e_2, \dots, e_M]$ ，表示噪声； H 表示系统矩阵，大小为 $N \times M$ 。CTIS 图像重建就是利用公式 4.4 迭代求 \mathbf{f} 的过程，下面简单介绍几种迭代图像重建方法。

（1）代数重建算法

代数重建算法(Algebraic Reconstruction Technique, ART)迭代数学表达式为：

$$f_j^{k+1} = f_j^k + \lambda \frac{g_i - H^i f^k}{\|H^i\|^2} h_{i,n} \quad (4.5)$$

其中， k 为迭代次数， j 为光谱图像序号， i 为射线序号， f_j^k 表示第 j 个像素经过 k 次迭代， g_i 表示第 i 个投影数据， H^i 表示 H 的第 i 行， $\|H^i\|^2$ 表示取 2 范数， λ 为松弛因子， $h_{i,n}$ 表示 H 的第 (i,n) 个数据。

ART 算法适用于不完全投影数据的图像重建，其能够很好的避免噪声干扰，

但是其计算量太过庞大，导致重建速度相对较慢。

(2) 乘型代数重建算法

为了避免 ART 算法存在的不足，研究人员对每个像素的校正通过乘上一个修正值从而获得修改过的 ART 算法，将其称为乘型代数重建算法(Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique, MART)。MART 算法迭代数学公式为：

$$f_j^{k+1} = \left(\frac{g_i}{H^i f_j^k} \right)^{h_{i,j}} f_j^k \quad (4.6)$$

上式中各字母含义与公式 4.5 相同。

(3) 联合代数重建算法

在 ART 算法基础上，利用同一投影角度下经过像素的一切射线的误差来确定对该个像素进行校正值从而获得联合代数重建算法(Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique, SART)。相较于 ART 算法，SART 算法具有更厉害的抗噪声能力，SART 算法迭代数学公式为：

$$f_j^{k+1} = f_j^k + \lambda \frac{\sum_{i=1}^N \frac{[g_i - H^i f^k]}{\sum_{n=1}^M h_{i,n}} h_{i,n}}{\sum_{n=1}^M h_{i,n}} \quad (4.7)$$

其中， $\sum_{n=1}^M h_{i,n}$ 代表求和，其他字母含义和公式 4.5 相同。

(4) 期望最大化算法

期望最大化算法(Expectation Maximization, EM)与上面几种算法不同，它属于统计迭代算法。EM 算法迭代数学公式为：

$$f_j^{k+1} = \frac{f_j^k}{\sum_{i=1}^N h_{i,n}} \sum_{i=1}^N (H^i)^T \frac{g_i}{H^i f^k} \quad (4.8)$$

公式中各字母含义与公式 4.5 相同。EM 算法相对于其他算法具有简单、稳定以及收敛速度快的优点。

为了比较几种算法重建图像的优劣，对上述四种算法分别实施仿真试验。为了减少重建的时间，二维探测器像素大小设置为 201×201 ，像元大小为 $8\mu\text{m}$ ；波长范围为 $600\text{nm}-740\text{nm}$ ，波长分辨率为 20nm ，一共有 8 个波段；采用的光栅型

计算层析结构,选取的衍射级次为 $(0,0)$ 、 $(0,\pm 1)$ 、 $(\pm 1,0)$ 和 $(\pm 1,\pm 1)$ 一共九个衍射级次,为了可以使九个衍射级次既可以都在探测器上成像,彼此之间又不存在重叠,仿真的孔径光阑大小设置成 25×25 像元;放大倍率设置为1。整个系统的仿真输入参数如表4.1所示。仿真的多个波段的目标图像如图4.3所示,各种形状大小的图像代表不同波段信息,仿真得到的衍射图如图4.4所示。从图4.4可以看到一共有九个衍射级次,中间的衍射级次是所有波长的图像直接叠加在一起,其他的衍射级次是多个波长图像交错开叠加在一起。

表 4.1 计算层析仿真输入参数

Table 4.1 The simulation input parameter of CTIS

CCD 像素数	201×201	像元大小	8 μm
波长范围	600-740nm	波长分辨率	20nm(8 波段)
孔径光阑像元大小	25×25	放大倍率	1

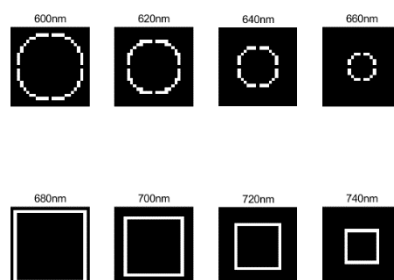


图 4.3 计算层析仿真输入图片

Figure 4.3 The simulation input picture of CTIS

对图4.4的仿真衍射图采用不同迭代算法重建目标图像如图4.5所示。从图4.5能够看出,EM算法相对于其他三个算法重建的目标图像效果最佳,重建的每个波段图像内部没有噪声干扰。因此,下面我们的计算层析图像光谱重建都采用EM算法。

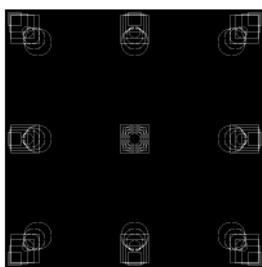


图 4.4 仿真衍射图

Figure 4.4 Simulated diffraction pattern

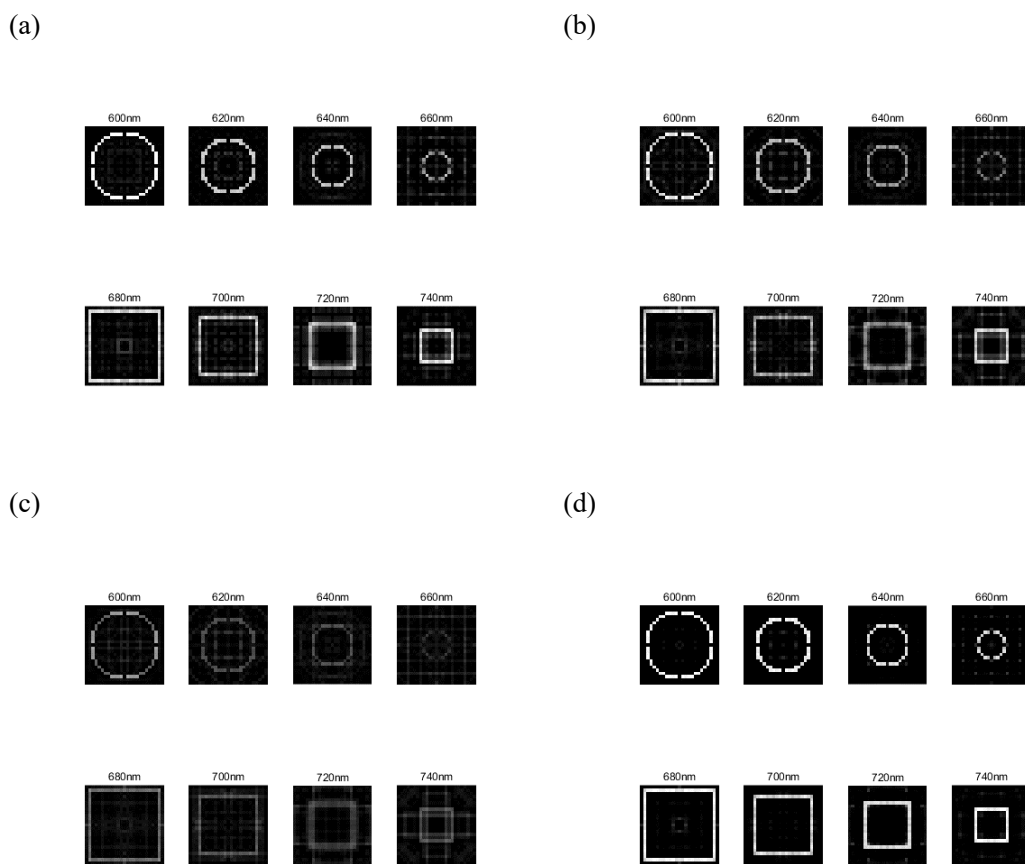


图 4.5 各算法重建目标图像; (a)ART 算法; (b)MART 算法; (c)SART 算法; (d)EM 算法

Figure 4.5 Reconstructed target images by algorithms; (a)ART; (b)MART;
(c)SART; (d)EM

4.2 快照式空间调制计算层析偏振成像光谱系统原理

本文第三章提出的空间调制型偏振成像光谱系统为了获得不同波段的偏振信息需要频繁更换滤波片，大大降低了探测效率。计算层析成像光谱技术可以通过一次测量就可以得到目标不同波段的二维图像，将第三章的空间调制偏振成像系统与计算层析成像光谱系统相结合快照式空间调制型计算层析偏振光谱成像系统 (Spatially modulated snapshot computed tomographic polarization imaging spectrometer, SMSCTPIS)。空间调制型计算层析偏振光谱成像系统能够通过一次测量两次解调从而获得目标的光谱、二维空间图像和偏振的四维数据立方体信息。SMSCTPIS 系统即提高了空间调制偏振成像系统的探测效率，也丰富了计算层析技术探测的维度。

4.2.1 SMSCTPIS 光路结构

SMSCTPIS 系统光路结构如图 4.6 所示，该结构由 SP1、改进的 SP2、线分析器(analysis)，成像镜(imaging lens)，视场光阑(field stop)，准直镜(collimators)，二维衍射光栅(grading)，再成像镜(re-imaging lens)和探测器(CCD)构成。系统图中省去了前置镜组，SP1、SP2 和线分析器(Analysis)是本文第 3 章提出的空间调制偏振成像系统中的改进空间调制模块，后面部分是计算层析成像光谱系统，整个系统相当于在计算层析系统前加入空间调制模块。

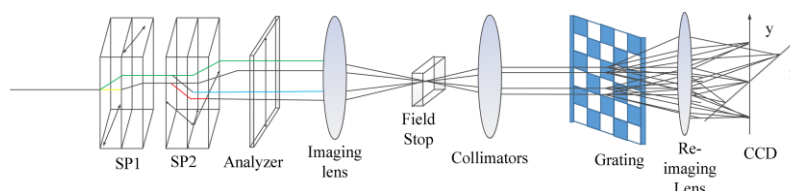


图 4.6 SMSCTPIS 系统光路结构

Figure 4.6 Structure of the SMCTPIS

在图 4.6 中的光路结构中，视场光阑是方孔形状，其限制进入后续光路的光束范围，控制目标物体的成像范围；为使后续光路尽可能多的收集到通过衍射光栅后衍射的光束，准直透镜与衍射光栅距离尽量小。

视场光阑位于成像镜与准直镜的焦平面处，包含不同波段的目标物经过空间调制模块和成像镜干涉成像在视场光阑处成缩小的像，视场光阑处包含的是不同波段的干涉图的叠加；这些叠加的干涉图经过准直镜照在衍射光栅上，衍射光栅

对不同波段的干涉图衍射到不同的方向；产生衍射和不产生衍射的图像经过再成像镜会聚到探测器上，得到目标干涉图不同角度的投影图像。

4.2.2 SMSCTPIS 理论模型

根据第 3 章分析的空间调制偏振成像系统理论模型，SMSCTPIS 视场光阑处不同波段的干涉图的叠加可以表示为：

$$\begin{aligned}
 I(x, y, \lambda) &= U(x, y, \lambda) * U^*(x, y, \lambda) \\
 &= \frac{1}{4} E_x(x, y, \lambda) E_x^*(x, y, \lambda) (2 - e^{i(\varphi_A - \varphi_B)} - e^{-i(\varphi_A - \varphi_B)}) \\
 &\quad + \frac{1}{4} E_x(x, y, \lambda) E_y^*(x, y, \lambda) (e^{i(\varphi_A - \varphi_C)} + e^{i(\varphi_A - \varphi_D)} - e^{i(\varphi_B - \varphi_C)} - e^{i(\varphi_B - \varphi_D)}) \\
 &\quad + \frac{1}{4} E_y(x, y, \lambda) E_x^*(x, y, \lambda) (e^{-i(\varphi_A - \varphi_C)} + e^{-i(\varphi_A - \varphi_D)} - e^{-i(\varphi_B - \varphi_C)} - e^{-i(\varphi_B - \varphi_D)}) \\
 &\quad + \frac{1}{4} E_y(x, y, \lambda) E_y^*(x, y, \lambda) (2 + e^{i(\varphi_C - \varphi_D)} + e^{-i(\varphi_C - \varphi_D)})
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

根据第二章关于 Stokes 公式的介绍，上式可以变为：

$$\begin{aligned}
 I(x, y, \lambda) &= \frac{1}{2} S_0(x, y, \lambda) - \frac{1}{4} S_{10}(x, y, \lambda) e^{ib} - \frac{1}{4} S_{10}(x, y, \lambda) e^{-ib} \\
 &\quad + \frac{1}{8} S_{23}(x, y, \lambda) e^{i2c} + \frac{1}{8} S_{23}^*(x, y, \lambda) e^{-i2c} \\
 &\quad - \frac{1}{8} S_{23}(x, y, \lambda) e^{-i2e} - \frac{1}{8} S_{23}^*(x, y, \lambda) e^{i2e} \\
 &\quad + \left(\frac{1}{8} S_{23}(x, y, \lambda) e^{ia} - \frac{1}{8} S_{23}(x, y, \lambda) e^{-ia} \right) e^{ig} \\
 &\quad + \left(\frac{1}{8} S_{23}^*(x, y, \lambda) e^{-ia} - \frac{1}{8} S_{23}^*(x, y, \lambda) e^{ia} \right) e^{-ig}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

公式 4.9 和公式 4.10 中 λ 代表波长，其他参数和第三章一样。不同波长的干涉图相当于计算层析成像光谱系统的数据立方体，探测器上获得的投影图像可以表示为：

$$g = HI \tag{4.11}$$

上式中的 g 代表投影图像， g 的大小和探测器大小相同； I 是数据立方体，其大小与视场光阑大小有关，数据立方体个数与所选波段数有关，若所选波段数为 n ，则 $I = [I(x, y, \lambda_1), I(x, y, \lambda_2), \dots, I(x, y, \lambda_n)]$ ； H 是投影矩阵，大小与投影图像和

数据立方体的大小都有关。

4.2.3 SMSCTPIS 元件参数

SMSCTPIS 系统由空间调制模块、成像镜头、视场光阑、准直镜、衍射光栅、再成像镜、探测器构成，下面对各个元件参数进行选择与计算。

(1) 空间调制模块

空间调制模块 SP1 和 SP2 的参数选择与第 3 章一样，材料为方解石晶体，尺寸为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ ，单板厚度为 6 mm 。

(2) 成像镜、视场光阑与探测器

因为视场光阑即相当于空间调制模块的像面，视场光阑又相当于探测器的物面，三者之间彼此相关，所以将三者放在一起共同确定参数。本系统对探测器无特殊要求，探测器的像素为 2048×2048 ，像元大小为 $3.45\mu\text{m}$ ；视场光阑大小为 $1.7 \times 1.7\text{ mm}$ ，当放大倍率为 1 时，视场光阑的相当于 490×490 像素大小；成像镜的焦距与视场光阑的大小、空间调制模块的横向剪切量、最小波长有关，在最小波长为 400 nm ，按照公式 3.20 能够计算出成像镜的焦距为 50 nm 。

(3) 准直镜

准直镜能够保证照在光栅上的光线相位差恒定，从而确保探测器上获得的各级衍射图像彼此之间错开，这里选择平行光管代替。

(4) 衍射光栅

为保证系统内不存在运动部件，本系统分光元件选择为透射型二维矩形位相光栅，其刻线数为 300 lines/mm ，即光栅常数 $d = 300\text{ lines/mm}$ 。光栅存在很多衍射级次，每个衍射级次的衍射效率存在差异，本文需要光栅的 $(0,0)$ 、 $(0,\pm 1)$ 、 $(\pm 1,0)$ 、 $(\pm 1,\pm 1)$ 这几个级次，因此需要计算光栅各个衍射级次的衍射效率。

透射型二维矩形位相光栅的透过率函数可以表示为^[86]：

$$\begin{aligned}
t(x, y) &= \left\{ \frac{1}{d} \left[\text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right) \right] + \frac{1}{d} \left[\text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) * \text{comb}\left(\frac{x+d/2}{d}\right) e^{i\varphi} \right] \right\} \\
&\quad \times \left\{ \frac{1}{d} \left[\text{rect}\left(\frac{y}{a}\right) * \text{comb}\left(\frac{y}{d}\right) \right] + \frac{1}{d} \left[\text{rect}\left(\frac{y}{b}\right) * \text{comb}\left(\frac{y+d/2}{d}\right) e^{i\varphi} \right] \right\} \\
&= \frac{1}{d^2} \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{a}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{d}\right) + \\
&\quad \frac{1}{d^2} \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{b}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right) \text{comb}\left(\frac{y+d/2}{d}\right) e^{i\varphi} + \\
&\quad \frac{1}{d^2} \text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{a}\right) * \text{comb}\left(\frac{x+d/2}{d}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{d}\right) e^{i\varphi} + \\
&\quad \frac{1}{d^2} \text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{b}\right) * \text{comb}\left(\frac{x+d/2}{d}\right) \text{comb}\left(\frac{y+d/2}{d}\right) e^{2i\varphi}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

其中, $d = a + b$, $a : b$ 称为光栅的占空比, $\varphi = \frac{2h}{\lambda} n_1 h$, n_1 为材料的折射率, λ 为波长, h 为光栅雕刻深度 $h = \frac{\lambda_0}{2(n_1 - 1)}$, λ_0 为光栅中心波长。根据夫琅和费衍射原理, 上式变为:

$$\begin{aligned}
F(f_x, f_y) &= \frac{a^2}{d^2} \sin c\left(a \frac{m}{d}\right) \sin c\left(a \frac{n}{d}\right) \times \sum_m \delta\left(f_x - \frac{m}{d}\right) \sum_n \delta\left(f_y - \frac{n}{d}\right) \\
&\quad + \frac{ab}{d^2} \sin c\left(a \frac{m}{d}\right) \sin c\left(b \frac{n}{d}\right) \times \sum_m \delta\left(f_x - \frac{m}{d}\right) \sum_n \delta\left(f_y - \frac{n}{d}\right) e^{i\varphi} e^{-i\pi n} \\
&\quad + \frac{ab}{d^2} \sin c\left(b \frac{m}{d}\right) \sin c\left(a \frac{n}{d}\right) \times \sum_m \delta\left(f_x - \frac{m}{d}\right) \sum_n \delta\left(f_y - \frac{n}{d}\right) e^{i\varphi} e^{-i\pi m} \\
&\quad + \frac{b^2}{d^2} \sin c\left(b \frac{m}{d}\right) \sin c\left(b \frac{n}{d}\right) \times \sum_m \delta\left(f_x - \frac{m}{d}\right) \sum_n \delta\left(f_y - \frac{n}{d}\right) e^{i2\varphi} e^{-i\pi(m+n)}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

式中的 n 和 m 代表衍射的级次。对于占空比为 $a : b = 7 : 13$, 材料折射率 $n_1 = 1.5$, 中心波长 $\lambda_0 = 632.8$, 的二维衍射光栅衍射效率和波长的关系曲线如图 4.7 所示。不同颜色代表不同的衍射效率, 红色代表 $(0, 0)$ 级的衍射效率, 蓝色代表 $(0, \pm 1)$ 和 $(\pm 1, 0)$ 级的衍射效率, 绿色代表 $(\pm 1, \pm 1)$ 级的衍射效率。从图 4.7 可以看出, 在波长为 500nm 之前, 各个级次的衍射效率变化很大, 在 500nm 之后, 各级次的衍射效率趋于平稳, 因此, 本文在后续实验选择波长从 500nm 开始。

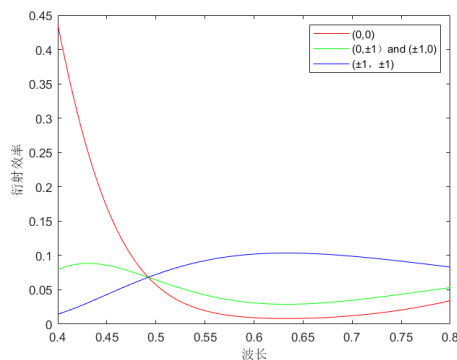


图 4.7 衍射效率和波长关系曲线

Figure 4.7 Curve of relation between diffraction efficiency and wavelength

(5) 再成像镜

再成像镜的焦距与视场光阑、光栅衍射级次和探测器都有关，光栅衍射公式为：

$$d \sin(\theta) = m\lambda \quad (4.14)$$

式中的 d 是光栅常数， θ 为光栅衍射角， m 为光栅衍射级次， λ 为波长。在小角度情况下，存在如下关系：

$$\sin(\theta) = \tan(\theta) = \frac{M \cdot u}{f} \quad (4.15)$$

其中， M 为探测像元数， u 为探测器像元大小， f 为再成像透镜焦距。把公式 4.13 代入 4.12 得到：

$$f = \frac{M \cdot u \cdot d}{m\lambda} \quad (4.16)$$

根据公式 4.16 能够得到，衍射级次为 1 级和 2 级的波长与再成像镜焦距的关系曲线如图 4.8 所示。图中的红线代表 2 级衍射，绿色的线代表 1 级衍射。选择合适的再成像焦距，保证探测器上即要包含完整的 1 级及 1 级以下的衍射图且各衍射级次之间不发生混叠，又要在探测器上没有 2 级和其他高级次的衍射图。从图 4.8 可以看出，在波长为 500-600nm 范围内，再成像镜焦距选择 15mm 可以很好的满足上面的需求。

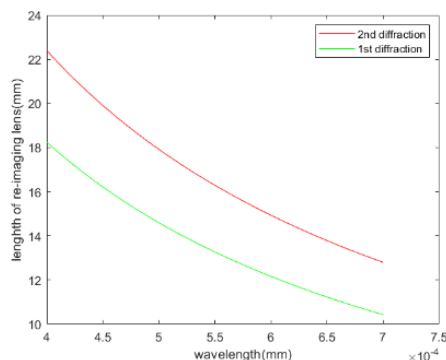


图 4.8 波长与再成像镜焦距关系曲线

Figure 4.8 Curve of relationship between wavelength and focal length

4.3 SMSCTPIS 数据重建

4.3.1 EM 迭代算法步骤

探测上得到的是包含多个波段偏振信息干涉图的投影图像,为求得目标的偏振、光谱和二维空间信息,需要先求得不同波段的干涉图。最简单的求解干涉图的方法是对公式 4.9 直接求逆,即:

$$I = H^T g \quad (4.17)$$

其中, H^T 是系统矩阵 H 的转置,理论上需要无穷多个投影图像 g 才能够得到完整的不同波段的干涉图 I ,但是实际上做不到。由于上式是一个非正定问题,针对此类问题,在空域或频域内,存在利用有限个数投影图像数据求解的多种算法。在本章 4.1.3 节对相关算法进行了简单介绍并作了相关仿真,最终将 EM 迭代算法作为本系统的核心算法,下面主要介绍一下该算法流程。

EM 算法是从包含隐含变量的概率参数模型中来预测观测数据的最大似然概率,求取参数极大似然的一种算法。在 4.1.3 节中已经知道了 EM 算法的基本原理,该算法具体步骤分为以下几步:

- (1) 确定整个算法需要迭代多少次,初始化 $I^0 = H^T g$;
- (2) 对当前估计值做投影运算: $g^* = HI^k$;
- (3) 将投影测量数据与投影估计值相比: $\Delta = \frac{g^*}{g}$;

(4) 将比值反投影到图像空间, 得到修正因子: $C = \frac{\sum_{i=1}^N (h_{i,j})^T \Delta}{\sum_{i=1}^N h_{i,j}}$;

(5) 对图像进行修正: $I^{k+1} = I^k C$;

(6) 将上次结果设为新的初值, 重复 2 到 5 进行新一轮迭代, 直到满足指定的迭代次数。

4.3.2 系统矩阵 H 的构建

从上面 EM 算法实现的过程可知, 投影矩阵 H 是实现该算法的关键因素, 是获取的投影数据与目标数据立方体联系的桥梁。只有精确的系统矩阵, 才能重建出精准的图像。

系统矩阵 H 可以通过实验确定和解析计算相结合的方法得到, 在确定系统矩阵时采用了平移不变性假设。实验确定系统矩阵时输入系统的是一个空间光谱增量函数, 输出是点扩散函数 (PSF) 特定空间波长下特定空间点的图像, 这个输出相当于一个系统矩阵的列。利用单色仪不同波长对系统视场光阑中的所有空间点重复此过程, 将得到的图像依次保存下来, 整个系统矩阵已经通过实验决定。

4.3.3 数据重建

为获得目标的偏振、光谱和二维空间信息, 对公式 4.9 采用 EM 迭代算法得到不同波段的干涉图 $I(x, y, \lambda_1)$, $I(x, y, \lambda_2)$ $I(x, y, \lambda_n)$ 。对不同波段的干涉图采用二维傅里叶变换获得各个波段的频谱图:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(I) = & \frac{1}{2} F_0(u, v) - \frac{1}{4} F_{10}(u - \alpha, v - \beta) - \frac{1}{4} F_{10}(u + \alpha, v + \beta) \\ & + \frac{1}{8} F_{23}(u, v - 2\beta) + \frac{1}{8} F_{23}^*(u, v + 2\beta) - \frac{1}{8} F_{23}(u - 2\alpha, v) - \frac{1}{8} F_{23}^*(u + 2\alpha, v) \\ & + \frac{1}{8} (F_{23}(u - \alpha, v + \beta) e^{i\alpha} - F_{23}(u - \alpha, v + \beta) e^{-i\alpha}) \\ & + \frac{1}{8} (F_{23}^*(u + \alpha, v - \beta) e^{i\alpha} - F_{23}^*(u + \alpha, v - \beta) e^{-i\alpha}) \end{aligned} \quad (4.18)$$

对上式进行第 3 章中各个通道确定的滤波函数进行频域滤波和傅里叶逆变换得到不同波段的 Stokes 偏振信息:

$$S_0(x, y, \lambda) = 2\mathcal{F}^{-1}(F_0) \quad (4.19a)$$

$$S_1(x, y, \lambda) = \text{real}\left(\frac{4\mathcal{F}^{-1}(F_0)}{e^{ib}}\right) / \cos(a) \quad (4.19b)$$

$$S_2(x, y, \lambda) = \text{real}\left(\frac{8\mathcal{F}^{-1}(F_{23})}{e^{ic}}\right) \quad (4.19c)$$

$$S_3(x, y, \lambda) = \text{imag}\left(\frac{8\mathcal{F}^{-1}(F_{23})}{e^{ic}}\right) \quad (4.19d)$$

4.4 SMSCTPIS 系统的分析与验证

为了验证 SMSCTPIS 系统的有效性，本节进行了仿真与实验研究。

4.4.1 仿真分析

本节将通过数值仿真的方式验证本章所提系统结构的正确性。在数值仿真中，计算层析系统结构部分的参数采用 4.1.3 节中的仿真参数；空间调制偏振成像系统结构部分参数和第三章仿真中的相同，空间调制模块后的成像镜焦距按照第三章的方法计算为 20mm；数值仿真的光谱采用高斯光谱，波段范围为 600nm-630nm，波长分辨率为 10nm，一共四个波段，仿真光谱图像如图 4.9 所示。从图 4.9 可以看出，一共有四个拐点，这四个拐点是仿真采用波长对应的强度。对解调得到的不同波段偏振图片 S_0 的强度与仿真输入的光谱强度进行对比，二者如果重合，证明了我们光谱反演的正确性。仿真的偏振图片如图 4.10 所示，该偏振图片与第三章仿真输入的偏振图片内容相同，但是尺寸不同，各 Stokes 矢量彼此之间关系也不变。将偏振图片与仿真光谱相乘得到不同波段的偏振信息，如图 4.11 所示。

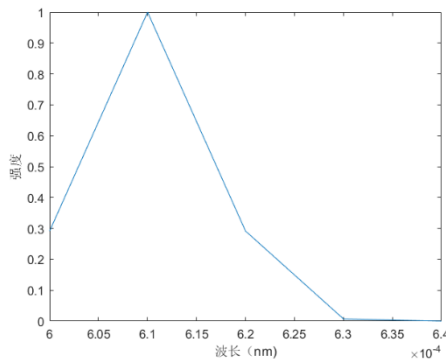


图 4.9 仿真光谱强度图

Figure 4.9 Simulated spectral intensity picture

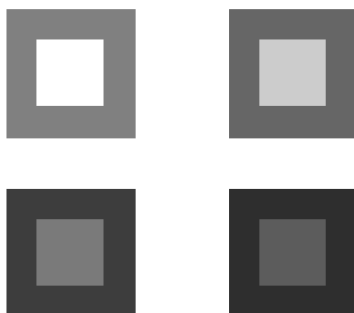
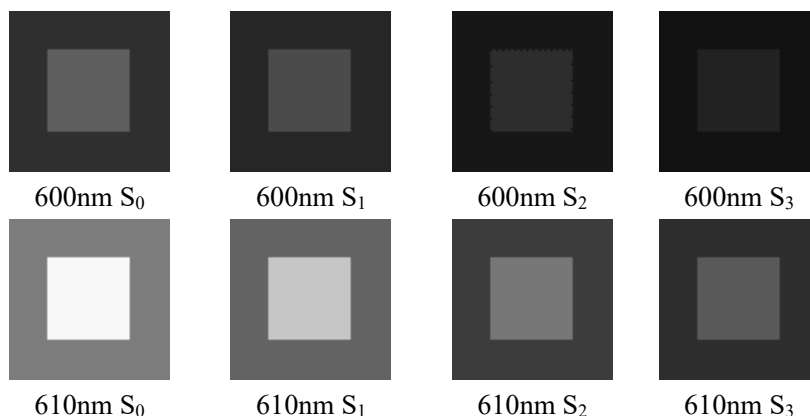


图 4.10 仿真 Stokes 偏振图片

Figure 4.10 The simulated Stokes objects pictures

从图 4.11 可以看出, 不同波长的 Stokes 偏振图片的亮度是不同的, 仿真输入光谱的值越大, 该谱段的 Stokes 图片越亮。将仿真输入图片代入程序, 得到仿真的衍射图如图 4.12 所示。图 4.12 一共有九个衍射级次, 其中, 中间代表 0 级衍射, 是所有波段干涉图的叠加, 从 0 级衍射中明显看到干涉条纹。衍射图的其他几个几次是不同波段的衍射, 因为仿真只选择了 4 个波段, 所以衍射效果不太明显, 但是还是可以看到干涉图彼此之间是错开叠加在一起的。图 4.12 中不同衍射级次的亮度是与光栅的衍射效率有关, 本节数值仿真中采用不同波长衍射效率与本章 4.2.3 节计算的相同。



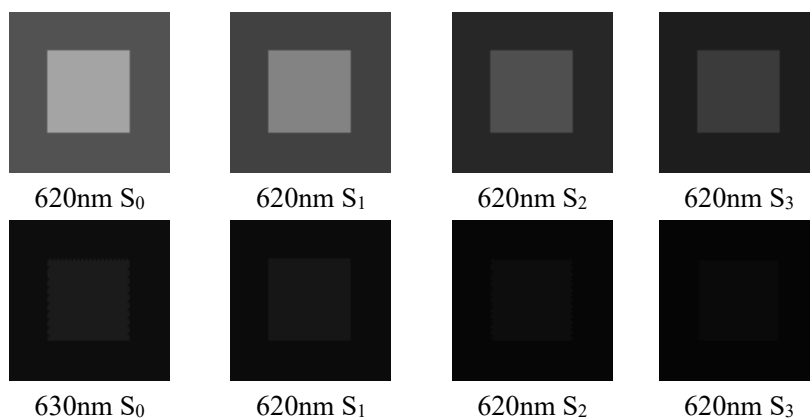


图 4.11 不同波段 Stokes 偏振图片

Figure 4.11 Stokes pictures at different wavelengths

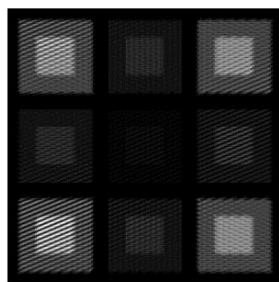


图 4.12 仿真获得的衍射图

Figure 4.12 The simulated diffraction pattern

对仿真获得的干涉图进行 EM 算法解调得到不同波段的干涉图，如图 4.13 所示，从解调的出来的干涉图可以明显的看到干涉条纹，并且获得的不同波段的干涉图亮度也是不同。对不同波段干涉图进行空间调制解调，得到不同波段的 Stokes 矢量偏振图片，如图 4.14 所示。选取图 4.14 中四个 S_0 分量的同一个位置的点，将其归一化与输入光谱对比，如图 4.15 所示。

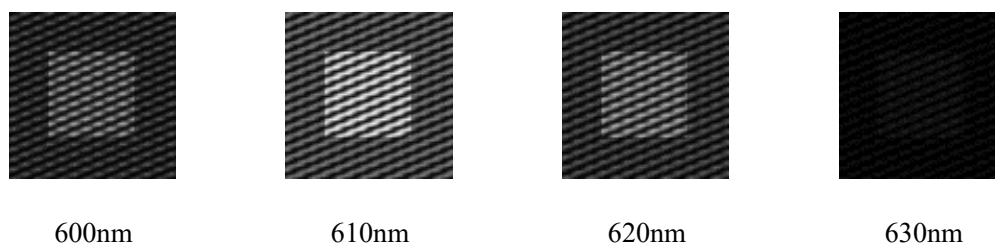


图 4.13 仿真解调的不同波段干涉图

Figure 4.13 Interferograms of different wavelengths

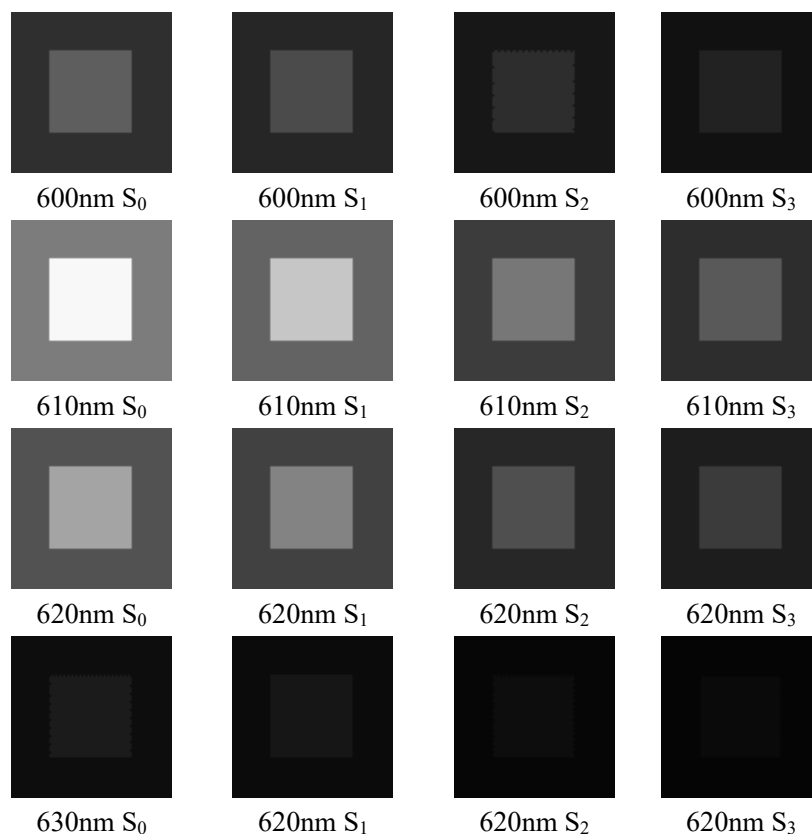


图 4.14 解调的不同波段 Stokes 偏振图片

Figure 4.14 The modulated Stokes pictures of different wavelengths

在图 4.15 中，红点代表仿真反演得到不同波段 S_0 的光谱点，蓝线代表仿真输入的光谱曲线。从图 4.15 可以看出，仿真反演的点与输入的光谱曲线很好的重合在一起，从仿真方面证实本章提出方法对于目标偏振光谱反演的有效性。

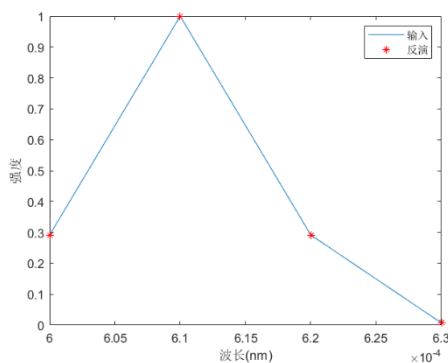


图 4.15 仿真反演光谱点与输入光谱

Figure 4.15 Simulated inverted spectrum points and input spectrum

4.4.2 实验分析

在实验之前需要对系统矩阵进行构建，根据 4.3.2 节构建系统矩阵的方法，系统矩阵构建简易器件图如图 4.16 所示。在 SMSCTIPS 系统的基础上，选用了单色仪和光纤来调整视场光阑处光线的位置，构建系统矩阵具体步骤如下：

- (1) 调整单色仪至实验所需的初始波长；
- (2) 调整光纤在前置镜组的位置，改变光线照在视场光阑的位置，记录视场光阑所有位置被探测器收到的衍射图；
- (3) 改变单色仪波长重复第二步，直到记录完成所有需要记录的波长。

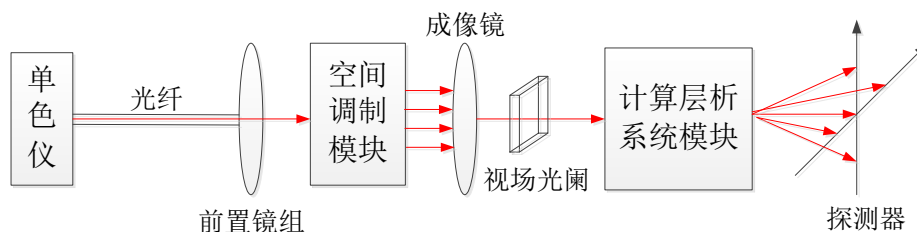


图 4 16 系统矩阵构建简易图

Figure 4.16 Simple diagram of system matrix

本文的实验所用的波长范围为 500-590nm，波长分辨率为 10nm，从 500nm 开始，一共有 10 个波段，对这 10 个波段按照上面的方法进行标定并记录系统矩阵。

为了验证经过 SMSCTIPS 系统反演的光谱是否正确，需要记录实验光源的光谱强度曲线，通过光谱仪 ASD 记录光源出射的光通过滤光片和偏振片的光谱曲线，对收集到的光谱曲线进行归一化处理获得实验的光谱曲线如图 4.17 所示。在 Stokes 矢量中， S_0 的强度和入射光谱的强度是相同的。将实验反演得到不同波段 S_0 光谱曲线，将反演的光谱曲线与实验的光谱曲线对比就可以验证实验反演的光谱的准确性。

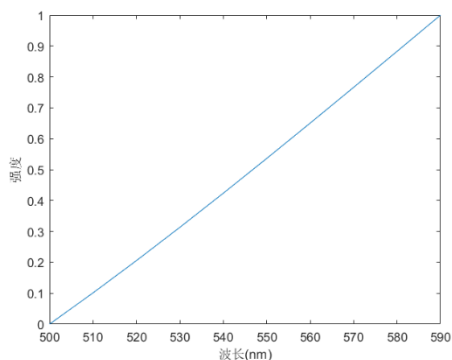


图 4.17 实验光谱强度图

Figure 4.17 Experimental spectral intensity picture

本章搭建的实验验证实验系统的实物图如图 4.18 所示。实验开始之前按照第三章的方法对系统各个部件进行准直,保证系统内所有器件的光路在同一条线上。实验中入射光采取的是和第三章实验部分相同的高稳定性的卤钨灯(light source);其后接偏振片(polarizer)和滤光片(filter),偏振片用于产生实验所需要的线偏振光,滤波片是带通滤波片,波长范围为 500-590nm;偏振片后面的装置与第三章中实验中偏振调制模块相同,唯一不同的是成像镜(image lens)焦距;空间调制模块后面的计算层析装置参数与 4.2.3 节中计算的元件参数相同。光源发出的光经过滤光片和偏振片,变为带通的线偏振光,带通的范围 500-590nm;带通光照在物体上(object)经过偏振调制模块在视场光阑(field stop)处不同波段的光发生干涉并叠加在一起;叠加在一起的干涉光经过光栅衍射在 CCD 上得到衍射图如图 4.19 所示。

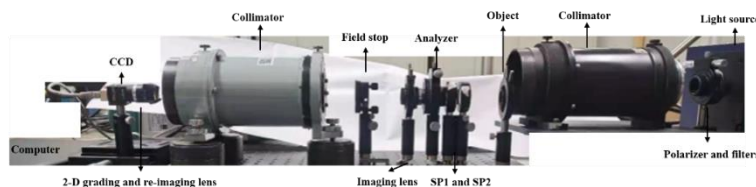


图 4.18 实验装置示意图

Figure 4.18 Diagram of the experimental device

从图 4.19 可以看出衍射图一共有九个部分构成,其中中间部分为不同波长干涉图的 0 级衍射,可以看到有干涉的条纹,证明图像发生了干涉,其余八个部

分分别为不同波长干涉图其他级次的衍射, 这些干涉图依次交错叠加在一起形成衍射图。对图 4.19 采用 EM 迭代算法解调, 得到不同波段的干涉图如图 4.20 所示。从图 4.20 可以看出, EM 解调出来的干涉图的灰度值随着波长的增加灰度值增加, 这是由于我们实验的光源强度在 500-590nm 波段, 此波段的亮度随着波长的增加而增加, 这就导致解调出的干涉图亮度会随着波长的增加亮度增加。

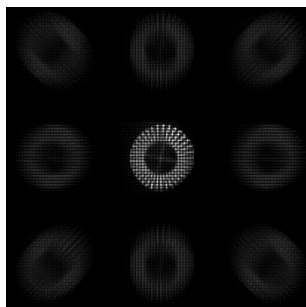
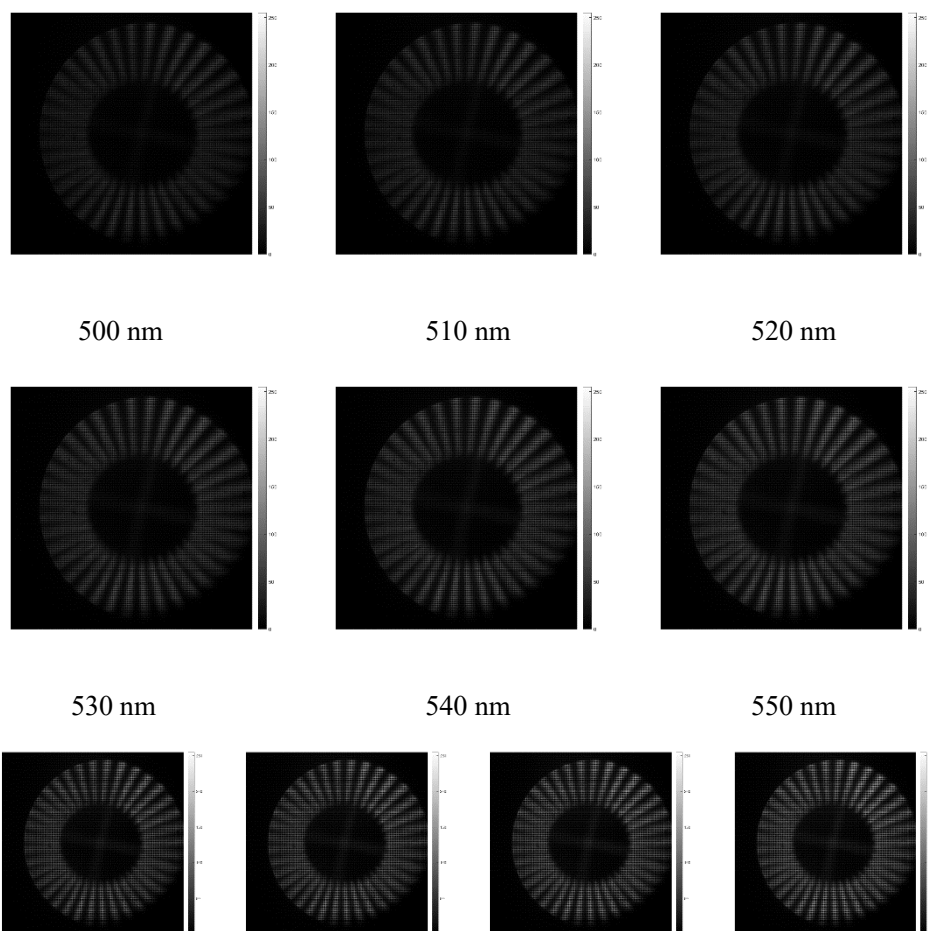


图 4.19 探测器获得的衍射图

Figure 4.19 Diffraction pattern on the CCD



560 nm 570 nm 580 nm 590 nm

图 4.20 解调的不同波段干涉图

Figure. 4.20 Interferograms of different wavelengths

对图 4.20 的干涉图分别采用傅里叶变换、滤波、傅里叶逆变换处理得到不同波段的 Stokes 矢量，图 4.21 是反演不同波段的 S_0 、图 4.22 和图 4.23 分别为反演的不同波段的 S_1 和 S_2 。

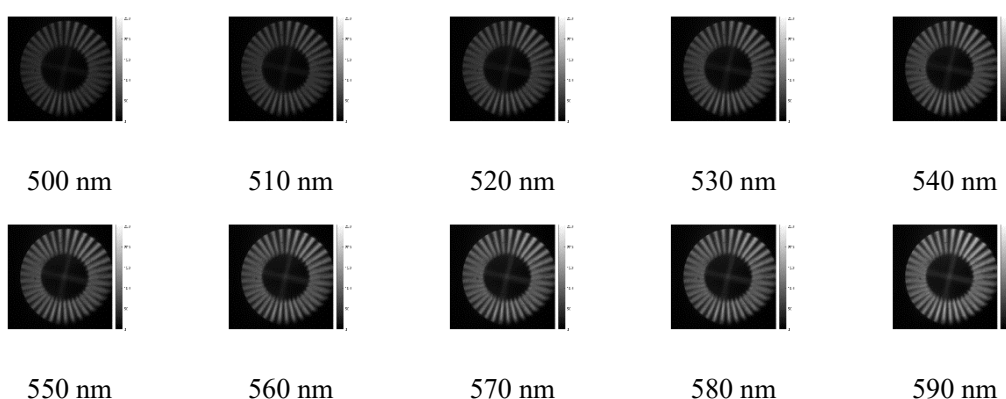


图 4.21 不同波段的 S_0

Figure 4.21 S_0 at different wavelengths

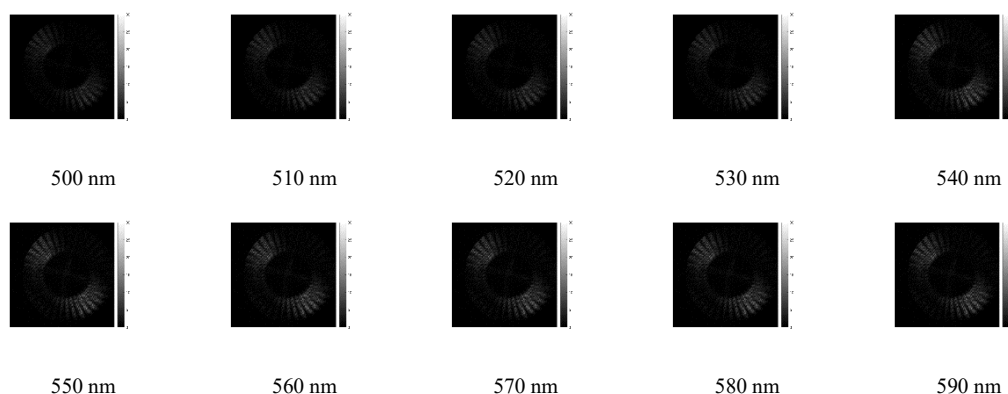
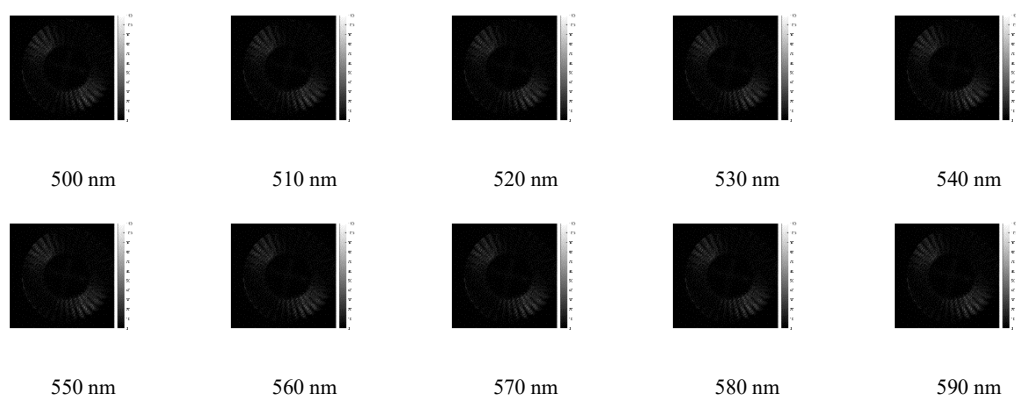


图 4.22 不同波段的 S_1

Figure 4.22 S_1 at different wavelengths

图 4.23 不同波段的 S_2 Figure 4.23 S_2 at different wavelengths

从图 4.21、图 4.22 和图 4.23 可以看出， S_0 反演的效果最好，而 S_1 和 S_2 的反演效果相对较差。这是因为光的亮度通过几个器件被大大降低，导致两个解调过程中亮度有所下降。并且，在空间调制频域解调过程中，存在通道串扰的问题，导致反演结果受到影响。

选取经过 SMSCTIPS 系统反演的 S_0 带有图像部分的中间像素点，将这些点与实验输入的光谱进行对比得到图 4.24。从图 4.24 可以看出，实验输入的光谱曲线是蓝色的直线，反演的各个波段的光谱是红色星点，反演的各个波段的光谱点是重合在输入的光谱曲线上，证实了 SMSCTIPS 系统的正确性。

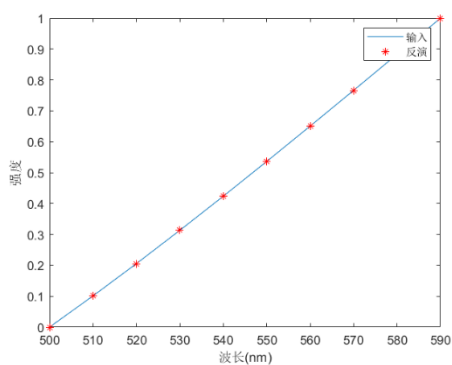


图 4.24 反演光谱点与输入光谱

Figure 4.17 Inverted spectrum points and input spectrum

由数值仿真和实验得结果可知，本章所提出得空间调制型计算层析偏振光谱

成像系统通过一次测量就可以获得目标的偏振、光谱和二维空间信息。空间调制型计算层析偏振光谱成像系统弥补了空间调制偏振成像系统单次测量无法获得目标光谱信息的不足,增加了计算层析技术探测目标偏振信息的能力,促进了空间调制偏振成像系统工程化应用。

4.5 本章小结

本章主要对 SMSCTPIS 系统结构和原理进行研究,将空间调制偏振成像系统与计算层析成像光谱系统相结合,解决了空间调制偏振成像系统通过一次测量无法获得目标光谱信息的问题,增加了计算层析成像光谱系统反演目标偏振信息的维度,该系统通过一次测量就可以获得目标不同波段的偏振、光谱和二维空间信息。

首先,了解了计算层析成像光谱系统结构和原理,对该系统解调算法进行仿真对比得到 EM 迭代算法是当前反演效果最好的算法。其次,提出快照式空间调制型计算层析偏振成像光谱系统结构,该系统将基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统与计算层析成像光谱技术相结合,在计算层析成像光谱系统前端插入空间调制偏振成像模块,推导了快照式空间调制型计算层析偏振成像光谱系统理论模型并计算了系统内各个器件的参数。最后,通过仿真和试验验证了本章所提出的结构的有效性与可行性。

根据本章所提出的快照式空间调制型计算层析偏振成像光谱系统,通过一次测量就可以得到目标不同波段的偏振、光谱和二维空间信息,是空间调制偏振成像系统具有光谱探测能力,计算层析系统具有偏振探测能力,有效推进了空间调制偏振成像技术和计算层析成像光谱技术的实际工程化应用。

第5章 空间调制偏振成像系统空域解调研究

空间调制偏振成像系统传统的偏振信息解调方式有傅里叶变换频域解调和龚冠源等人提出的建立超定方程组空域解调两种方法。但是,傅里叶频域解调会带来通道干扰、导致解调过程中存在噪声,从而降低偏振信息的解调精度;建立超定方程组空域解调存在运算复杂度高、计算量大的问题。为了避免目前空间调制偏振成像系统偏振信息解调方法存在的上述问题,本章提出空间调制偏振成像系统新的空域解调算法。本章提出的空域解调算法与龚冠源等人提出的空域解调方法不同,龚冠源等人通过邻域模板的滑动得到更多的方程,从而使空间调制偏振成像系统构建成超定方程组的模型,本章对空间调制偏振成像系统重新理论建模构建欠定方程组,通过相关解欠定方程组的算法对空间调制偏振成像系统的 Stokes 偏振信息进行空域解调。为证实本文提出的空域解调方法对所有的空间调制偏振成像系统都合适,对空间调制偏振成像系统和本文提出的基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统都进行了理论建模。算法解调过程中,为避免频域解调带来的通道串扰问题带来的解调过程中的噪声,采用相关算法进一步抑制空域解调过程中的噪声。

5.1 空域解调理论模型研究

基于 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统的空间调制模块是由 Savart 偏光镜、半波片和 Savart 偏光镜构成;在此基础上,本文提出基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统,空间调制模块是一个改进的 Savart 偏光镜和一个传统的 Savart 偏光镜。为证实本章提出的空域解调算法适合所有的空间调制偏振成像系统,本节将对这两个系统都重新进行理论建模,为后面数值仿真奠定基础。

5.1.1 传统空间调制偏振成像系统空域解调模型

空间调制偏振成像系统空间调制过程的数学模型在本文第二章已经推导过,公式 2.54 为其数学模型。在公式 2.54 中, S_2 和 S_3 是通过虚数的实部与虚部耦合在一起,不利于偏振信息的提取,为了便于进一步在空间域上对偏振干涉图进行分析,在空域上将 S_{23} 分开,对空间调制偏振成像系统重新理论建模,将公式

2.54 中的相关参数代入，并变形该式变为：

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{1}{2}S_0 + \frac{1}{2}S_1 \cos[2\pi\Omega(x+y)] \\
 &+ \frac{1}{4}S_2(\cos(4\pi\Omega x) - \cos(4\pi\Omega y)) \\
 &+ \frac{1}{4}S_3(\sin(4\pi\Omega x) + \sin(4\pi\Omega y))
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

上式中 Stokes 各矢量在通道调制过程中是彼此独立互补影响，通过上式，我们将空间调制偏振成像系统的调制过程可以看成是 4 个 Stokes 矢量各自被调制在不同频率的载波后的直接线性叠加。为了方便分析，令：

$$M_0 = \frac{1}{2} \tag{5.2a}$$

$$M_1 = \frac{1}{2}(\cos(2\pi\Omega(x+y))) \tag{5.2b}$$

$$M_2 = \frac{1}{4}(\cos(4\pi\Omega x) - \cos(4\pi\Omega y)) \tag{5.2c}$$

$$M_3 = \frac{1}{4}(\sin(4\pi\Omega x) + \sin(4\pi\Omega y)) \tag{5.2d}$$

因此，公式 5.1 变为：

$$I = M_0S_0 + M_1S_1 + M_2S_2 + M_3S_3 \tag{5.3}$$

公式 5.2 可以看成是一个矩阵： $M = [M_0 \ M_1 \ M_2 \ M_3]$ ，Stokes 矢量可以看成另一个矩阵： $S = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ ，因此，公式 5.1 可以变为：

$$I = MS \tag{5.4}$$

其中， I 代表探测器接受到的干涉图，对于像元数为 $N \times N$ 的探测器， I 内一共有 N^2 个数值，其可以改为：

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1N} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ I_{N1} & I_{N2} & \mathbf{L} & I_{NN} \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

其中， I_{ij} 代表探测器上获得的第 i 行和第 j 列的像素值。公式 5.4 中的 S 矩阵是需要求的 Stokes 矢量，由于 Stokes 每个矢量都是需要经过探测器反演得到的，所以每个反演的 Stokes 矢量大小与探测器的大小相同，因此，这些 Stokes 矢量公式能够表示为：

$$S_{i(i=0,1,2,3)} = \begin{bmatrix} S_{11}^i & S_{12}^i & L & S_{1N}^i \\ S_{21}^i & S_{22}^i & L & S_{2N}^i \\ M & M & M & M \\ S_{N1}^i & S_{N2}^i & L & S_{NN}^i \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

上式中的 S_{ab}^i 代表反演的第 i 个 Stokes 矢量的第 a 行与第 b 列的像素值，反演的每个 Stokes 矢量的像素数都有 N^2 个数值。对于 S 矩阵，一共有 $4 \times N^2$ 个数值，而这 $4 \times N^2$ 个数值就是要求的结果。对于矩阵 M ，其内部参量的数值都是已知的，数值个数也是 $4 \times N^2$ 个，因此，矩阵 M 可以表示为：

$$M_{i(i=0,1,2,3)} = \begin{bmatrix} M_{11}^i & M_{12}^i & L & M_{1N}^i \\ M_{21}^i & M_{22}^i & L & M_{2N}^i \\ M & M & M & M \\ M_{N1}^i & M_{N2}^i & L & M_{NN}^i \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

其中， M_{ab}^i 代表第 i 个 M 矩阵中的第 a 行和第 b 列的像素值，对于 $I = MS$ ，将其化为方程的形式，其可以表示为：

$$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{12} \\ M \\ I_{NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11}^0 S_{11}^0 + M_{12}^0 S_{21}^0 + L + M_{1N}^0 S_{N1}^0 + M_{11}^1 S_{11}^1 + M_{12}^1 S_{21}^1 + L + M_{1N}^1 S_{N1}^1 \\ + M_{11}^2 S_{11}^2 + M_{12}^2 S_{21}^2 + L + M_{1N}^2 S_{N1}^2 + M_{11}^3 S_{11}^3 + M_{12}^3 S_{21}^3 + L + M_{1N}^3 S_{N1}^3 \\ M_{21}^0 S_{12}^0 + M_{22}^0 S_{22}^0 + L + M_{2N}^0 S_{N2}^0 + M_{21}^1 S_{12}^1 + M_{22}^1 S_{22}^1 + L + M_{2N}^1 S_{N2}^1 \\ + M_{21}^2 S_{12}^2 + M_{22}^2 S_{22}^2 + L + M_{2N}^2 S_{N2}^2 + M_{21}^3 S_{12}^3 + M_{22}^3 S_{22}^3 + L + M_{2N}^3 S_{N2}^3 \\ M \\ M_{N1}^0 S_{1N}^0 + M_{N2}^0 S_{2N}^0 + L + M_{NN}^0 S_{NN}^0 + M_{N1}^1 S_{1N}^1 + M_{N2}^1 S_{2N}^1 + L + M_{NN}^1 S_{NN}^1 \\ + M_{N1}^2 S_{1N}^2 + M_{N2}^2 S_{2N}^2 + L + M_{NN}^2 S_{NN}^2 + M_{N1}^3 S_{1N}^3 + M_{N2}^3 S_{2N}^3 + L + M_{NN}^3 S_{NN}^3 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

从公式 5.8 可以看出，一共有 $4 \times N^2$ 个未知数需要求解，而在公式 5.8 中，只能够列出 N^2 个方程，因此，公式 5.8 的方程组是一个欠定方程组，通过对公式 5.8 的欠定方程组求解，就可以反演目标的 Stokes 偏振信息。

5.1.2 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调模型

本文在第三章提出的基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统的理论模型与空间调制偏振成像系统的理论模型存在差异，因此，其空域的理论建模也存在差异。根据第三章分析的基于两个 Savart 偏光镜的理论分析，其理论模型如公式 3.12 所示。从公式 3.12 所示的空间调制偏振成像系统空间调制过程的数学模型可以看出， S_0 和 S_1 是通过虚数 S_{10} 耦合在一起， S_2 和 S_3 是通过虚数 S_{23} 耦

合在一起,不利于偏振信息的获取,存在通道串扰的问题,为了便于进一步在空间域上对偏振干涉图进行分析,在空域上将 S_{10} 和 S_{23} 分开,对系统重新理论建模,将式 3.12 中的相关参数代入并变形该式变为:

$$I = \frac{1}{2}S_0(1 + \sin(a)\sin(b)) - \frac{1}{2}S_1\cos(a)\cos(b) + \frac{1}{2}S_2(\cos(2c) + \cos(a+b) - \cos(-a+g) - \cos(-2e)) + \frac{1}{2}S_3(\sin(2c) + \sin(a+b) - \sin(-a+g) - \sin(-2e)) \quad (5.9)$$

公式 5.9 中参数与第三章中的参数相同,上式中的各个 Stokes 参数彼此之间是分开的,令

$$M_0 = \frac{1}{2}(1 + \sin(a)\sin(b)) \quad (5.10a)$$

$$M_1 = \frac{1}{2}(\cos(a)\cos(b)) \quad (5.10b)$$

$$M_2 = \frac{1}{2}(\cos(c) + \cos(a+b) - \cos(a-g) - \cos(-2e)) \quad (5.10c)$$

$$M_3 = \frac{1}{2}(\sin(2c) + \sin(a+b) - \sin(-a+g) - \sin(-2e)) \quad (5.10d)$$

因此,公式 5.9 变为和公式 5.4 一样,系统形成干涉图样的理论模型可以变为: $I = M_0S_0 + M_1S_1 + M_2S_2 + M_3S_3$, 其中 $M = [M_0 \ M_1 \ M_2 \ M_3]$, $S = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 。该模型与空间调制偏振成像系统的模型形式相同,唯一不同的是构成矩阵 $M = [M_0 \ M_1 \ M_2 \ M_3]$ 的参数。相应的,对于像元数为 $N \times N$ 的探测器,将公式 $I = M_0S_0 + M_1S_1 + M_2S_2 + M_3S_3$ 写成方程的形式:

$$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{12} \\ \mathbf{M} \\ I_{NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11}^0S_{11}^0 + M_{12}^0S_{21}^0 + L + M_{1N}^0S_{N1}^0 + M_{11}^1S_{11}^1 + M_{12}^1S_{21}^1 + L + M_{1N}^1S_{N1}^1 \\ + M_{11}^2S_{11}^2 + M_{12}^2S_{21}^2 + L + M_{1N}^2S_{N1}^2 + M_{11}^3S_{11}^3 + M_{12}^3S_{21}^3 + L + M_{1N}^3S_{N1}^3 \\ M_{21}^0S_{12}^0 + M_{22}^0S_{22}^0 + L + M_{2N}^0S_{N2}^0 + M_{21}^1S_{12}^1 + M_{22}^1S_{22}^1 + L + M_{2N}^1S_{N2}^1 \\ + M_{21}^2S_{12}^2 + M_{22}^2S_{22}^2 + L + M_{2N}^2S_{N2}^2 + M_{21}^3S_{12}^3 + M_{22}^3S_{22}^3 + L + M_{2N}^3S_{N2}^3 \\ \mathbf{M} \\ M_{N1}^0S_{1N}^0 + M_{N2}^0S_{2N}^0 + L + M_{NN}^0S_{NN}^0 + M_{N1}^1S_{1N}^1 + M_{N2}^1S_{2N}^1 + L + M_{NN}^1S_{NN}^1 \\ + M_{N1}^2S_{1N}^2 + M_{N2}^2S_{2N}^2 + L + M_{NN}^2S_{NN}^2 + M_{N1}^3S_{1N}^3 + M_{N2}^3S_{2N}^3 + L + M_{NN}^3S_{NN}^3 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

从公式 5.11 能够看出未知数的个数多余方程的个数,因此,基于两个 Savart

偏光镜的空间调制偏振成像的理论模型变为欠定方程组了,对该欠定方程组求解就能够得到目标的偏振信息。

5.2 欠定方程组求解方法

对于欠定方程组,定义其线性系统模型为: $Ax=b$, 其中 $A \in R^{n \times m}$, $n < m$ 。该模型中方程个数少于未知数的个数,欠定方程组具有无解和无穷多解两种可能。假设矩阵 A 是行满秩的,它所有列张成的空间为 R^n ,因此该模型存在无穷多解。最常用的求解欠定方程组方法是将欠定方程组求解问题变为求解 l_0 范数最小优化问题,从而欠定方程组的解 x 可以由 b 高概率重建:

$$\arg \min_x \|x\|_0 \quad \text{subject to } b=Ax \quad (5.12)$$

但是 l_0 范数问题的求解是一个 NP-hard (Non-deterministic polynomial) 问题,要找到最优解需要遍历所有组合情况,在有限时间内很难完成。为解决此问题,许多通过求解次优解的算法被提出,本节将简单介绍几种求解欠定方程组的算法。

5.2.1 基于 l_0 范数算法求解欠定方程组

直接求解公式 5.12 存在困难,于是,出现了许多类似求解最小 l_0 范数问题的算法,在这些算法中,匹配追踪类(Matching Pursuit, MP)^[92]算法是处理最小 l_0 范数问题的基础。MP 算法在每一次迭代都从完备原子库中选择与信号最匹配的原子来逼近并求余量实现更新估计信号,经过多次迭代就可以重新估计出信号,但是该算法得到收敛需要经过多次迭代才可以达到;为减少迭代次数,在 MP 算法基础上,通过对选定的原子集合进行正交化处理,正交匹配追踪 (OMP) 算法^[93]就此诞生;为提高重建精度和重建速度,通过设定软阈值在每次迭代中选择一组符合条件的原子,研究者们提出分段正交匹配追踪 (StOMP) 算法;为保证信号重建精度,对 OMP 算法进行改进引入正则化处理,研究者们提出正则化正交匹配追踪算法 (ROMP)^[94,95];通过每次迭代过程中保证每个原子存在平等的机会被选择,在当前迭代过程中满足原子条件的才会被留下来,人们提出压缩采样匹

配追踪算法 (CoSaMP) [97]。MP 算法是求解最小 l_0 范数问题的根基, 在传统 MP 算法的基础上, 还衍生出梯度追踪法 (GP)、共轭梯度追踪法 (CGP) 等算法 [97,98]。

5.2.2 基于 l_1 范数算法求解欠定方程组

在线性规划算法中, l_1 范数优化和 l_0 范数具有一定的等价性, l_1 范数方程为:

$$\arg \min_x \|x\|_{l_1} \quad \text{subject to } b=Ax \quad (5.13)$$

这样将一个难于求解的 NP 问题转化为求解最小 l_1 范数的凸优化问题, 极大程度上简化了求解的过程, 基于 l_1 范数算法求解欠定方程组的算法有很多。基于追踪 (BP) 算法的内点法 (Interior-Point Method) [89] 通过每次迭代过程中寻找最佳的匹配原子 [87]; 梯度投影稀疏重建算法 (Gradient projection for sparse reconstruction, GPSR) 将无约束条件的 l_1 范数最小优化问题转换为有界限的二次问题, 利用梯度投影重构目标 [99]; 迭代分裂收缩算法通过不断设定新的阈值和步长对前一估计解进行阈值处理, 得到新的估计解, 为了解决此算法收敛速度慢的缺点, 两步迭代分裂收缩阈值法 (Two-step iterative shrinking algorithms, TwIST) 提出, 通过新的估计解取决于前两次的估计解的方式提高算法的收敛速度 [90,91]; 定点连续算法 (Fixed-Point Continuation, FPC) 将有条件约束优化问题转为无条件约束优化问题, 在此基础上, 引入线性 Bregman 迭代算法, 降低了计算复杂度、提高收敛速度和增加降噪能力 [100,101]。

虽然基于最小 l_1 范数的凸优化算法重建精度高、所需采样值少, 但是其算法很繁琐。下面对欠定方程组求解空间调制偏振成像系统偏振信息将以 TwIST 算法为基础, 对其进行改进。

5.3 TwIST-TV 算法

TwIST 算法的核心思想是利用前两个估计值来更新当前值, 通过多次迭代得到最佳的欠定方程组的解。本节将以 TwIST 算法为核心, 对其进行相关的变动, 具体变动如下: 在目标函数求解过程中引入全变分正则项求解这一步; 对上一次迭代得到的结果采用全变分处理, 达到去噪的目的, 这样可以大大减少后面迭代

的噪声。

5.3.1 TV 约束

总变分 (TV) 能够在不平滑目标边界的同时保持目标细节信息, 因此将目标的 TV 值作为目标函数中的正则项可以解决目标解调过程中存在的边缘平滑问题, 并且将目标 TV 值进行最优化约束处理可以抑制噪声, 在每次迭代中对当前估计的目标先加入基于 TV 值的优化去噪约束。若目标为二维图像, 大小为 $M \times N$, 分别设定水平梯度滤波算子 $h_x = [0, -1, 1]$ 和垂直梯度滤波算子 $h_y = [0, -1, 1]^T$, 对图像的水平方向和垂直方向进行梯度滤波处理, TV 正则化约束表达式为:

$$TV(p) = \sum_{i,j \in p} \sqrt{(p \otimes h_x)^2 + (p \otimes h_y)^2} \quad (5.14)$$

其中, p 代表二维图像, \otimes 代表卷积操作, i, j 代表图像 p 的 i 行和 j 列, 将图像的 TV 值作为 TwIST 算法目标函数中的正则项 $\varphi(x)$ 。

5.3.2 TwIST 算法

TwIST 算法具有迭代速度快, 求解精度高的优点, 因此本文采用 TwIST 算法求解欠定方程问题。TwIST 算法主要解决如下的最优化问题:

$$\arg \min_x \frac{1}{2} \|b - Ax\|_2^2 + \lambda \varphi(x) \quad (5.15)$$

其中, λ 为正则项参数, $\varphi(x)$ 为正则项。TwIST 算法主要迭代更新过程如下:

$$x_1 = E_\lambda(a_0) \quad (5.16a)$$

$$x_{t+1} = (1 - \alpha)x_{t-1} + (\alpha - \beta)x_t + \beta E_\lambda(a_0) \quad (5.16b)$$

$$E_\lambda(x) = \Psi_\lambda(x + A^T(b - Ax)) \quad (5.16c)$$

其中, a_0 为设定的初值, x_1 为由 a_0 计算出的迭代初值, $E_\lambda(g)$ 为对 a_0 处理得到 x_1 函数, t 表示迭代次数, α 和 β 是需要我们提前给出数值, x_t 为每次迭代得到的值, x_{t-1} 为上一步迭代得到的值, x_{t+1} 为当前迭代更新得到的值。

5.3.3 TwIST-TV 算法

本算法是以 TwIST 算法为核心, 对其进行相关的变动, 具体变动如下: 在目

标函数求解过程中引入全变分正则项求解这一步；对上一次迭代得到的结果采用全变分处理,达到去噪的目的,这样可以大大减少后面迭代的噪声。建立的 TwIST-TV 目标函数为:

$$f(x) = \frac{1}{2} \|b - Ax\|_2^2 + \lambda TV(x) \quad (5.17)$$

全变分去噪函数 Φ_{TV} 可以表示为:

$$\Phi_{TV}(x) = \sum_{i,j} \sqrt{(x_{m+1,n} - x_{m,n})^2 + (x_{m,n+1} - x_{m,n})^2} \quad (5.18)$$

定义迭代终止函数为 $\frac{|f(x_t) - f(x_{t-1})|}{f(x_t)}$, 当迭代终止阈值大于终止函数的值停止迭代, TwIST-TV 算法流程如图 5.1 所示。

步骤 1: 输入 b , A , 迭代终止阈值 P , α 和 β 等参数;

步骤 2: 利用反投影得到初始数据 x_1 , 把此 x 代入目标函数得到 $prev_f$;

步骤 3: 将 x_1 进行 Φ_{TV} 全变分正则化处理得到 x , 减少噪声;

步骤 4: 将正则化处理的 x 代入 TwIST 算法进行迭代得到新的 x_1 ;

步骤 5: 经过迭代得到的 x_1 代入目标函数得到 f , 比较 $\frac{|f - prev_f|}{prev_f} > P$,

若满足则更新 $prev_f=f$, 改变目标函数参数 λ 值, 重复步骤 3 和步骤 4, 不满足则跳出循环输出 x_1 。

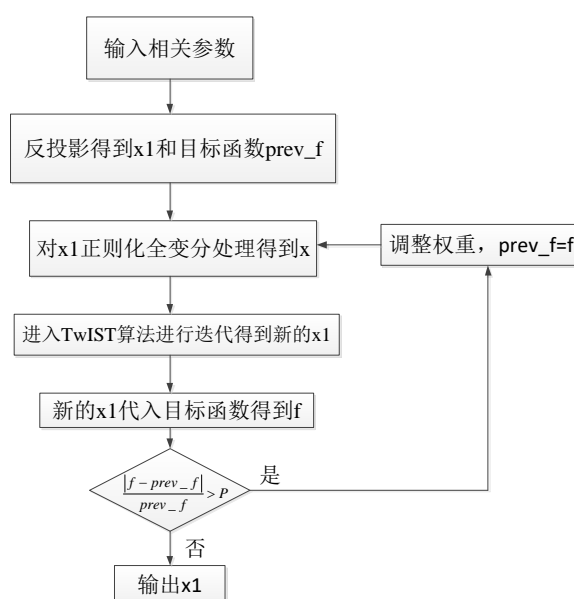


图 5.1 TwIST-TV 算法流程图】

Figure 5.1 Flow chart of TwIST-TV

TwIST-TV 算法不仅收敛速度快，还可以抑制迭代过程中存在的噪声影响，提高了欠定方程组解的精度，因此，下面对于空间调制偏振成像系统的欠定方程组的求解将都采用 TwIST-TV 算法进行求解。

5.4 仿真分析和实验验证

为了说明本章所提出的空间调制偏振成像系统空域解调方法的真实性与普遍性，本小节将采用相关的数值仿真和试验对其进行证明。

5.4.1 仿真分析

为了验证本章所提出的方法普适性，本小节仿真将分为两个部分：首先验证空域解调算法对任何结构的空域调制偏振成像系统都适用，对 5.1 节构建两个空域调制偏振成像系统的空域解调理论模型都进行仿真分析；其次，验证空域解调算法适用于所有图片，将包含空间频率变化多与包含空间频率变化少的两组图片分别进行仿真分析。

空间调制偏振成像系统的参数与基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振系统参数相同，因此，利用本文 3.4.1 节中所确定的系统数据。系统数据如下：波长选择为 550nm，Savart 偏光镜单板厚度为 6mm，探测器像元数为 1024×1024，探测器大小为 3.8um，成像焦距为 40mm。仿真输入的图片采用图 3.9 和图 5.1 所示的图片。图 3.9 仿真输入的 Stokes 图片只在中间边框处存在空间频率变化，其他位置空间频率都是平滑不变，包含的空间频率变化信息相对较少；而图 5.2 输入的仿真 Stokes 图片包含香蕉、苹果等物体，各个物体本身空间频率是不同的且各个物体与背景之间也存在空间频率的变化，所以图 5.2 相对于图 3.9 包含更多的空间频率变化信息，因此，图 5.2 在解调时会存在更多的噪声影响。图 3.9 和图 5.2 仿真输入的图片灰度范围都为[0-1]，仿真输入图片中各 Stokes 矢量之间存在取下关系： $S_1 = 0.8 \cdot S_0, S_2 = 0.48 \cdot S_0, S_3 = 0.36 \cdot S_0$ ，偏振度 $P = 1$ 。

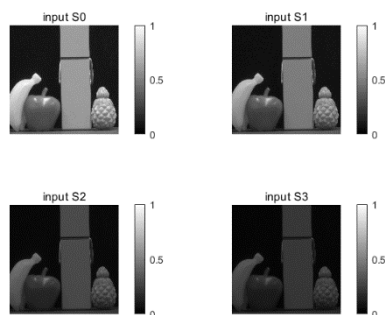


图 5.2 仿真输入多空间频率变化 Stokes 图片

Figure 5.2 The input Stokes objects pictures with more spatial frequency changes

空间调制偏振成像系统由图 3.9 得到的仿真干涉图如图 5.3 所示，基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统的由图 3.9 获得的仿真干涉图如图 3.10 所示。对图 3.10 和图 5.3 进行空域解调，将两幅干涉图代入 TwIST-TV 算法中进行迭代求解，得到由空域解调算法得到的空间频率变化少 Stokes 偏振信息如图 5.4 和 5.5 所示。

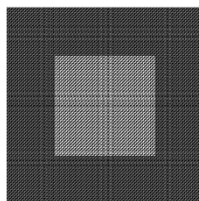


图 5.3 传统空间调制偏振成像系统空间频率变化少的干涉图

Figure 5.3 the interference pattern of Spatially modulated polarization imaging system with less spatial frequency changes

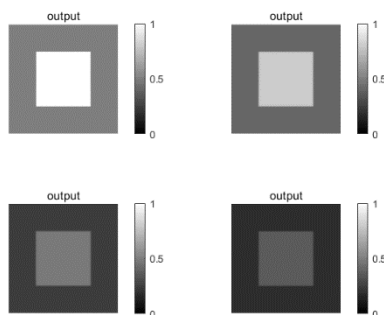


图 5.4 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调输出 Stokes

Figure 5.4 the output Stokes of spatially modulated snapshot imaging polarimeter using two Savart polariscopes by space demodulation

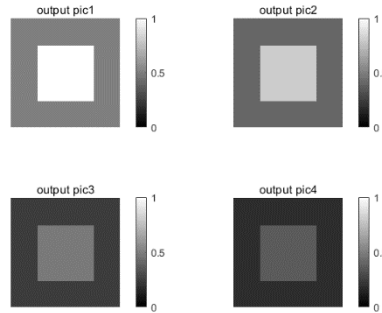


图 5.5 空间调制偏振成像系统空域解调输出 Stokes

Figure 5.5 the output Stokes of Spatially modulated polarization imaging system by space demodulation

为了验证本章提出的方法相对于传统傅里叶变换频域滤波方法解调的效果更好,计算基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统和空间调制偏振成像系统空域解调得到的 Stokes 图片的图像相似度 (SSIM) 与峰值信噪比 (PSNR) 和傅里叶频域解调得到的 Stokes 图片的图像相似度与峰值信噪比如表 5.1 和表 5.2 所示。从表 5.1 可以看出,对于基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统,其空域解调和傅里叶频域解调得到的偏振图片的 SSIM 值相同,但是对于 PSNR 值,空域解调的 S_0 、 S_1 、 S_2 比傅里叶频域解调的高出 5dB,空域解调的 S_3 比傅里叶频域解调的高出 1dB。这主要是因为基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统自身的滤波截止频率值大,频域解调时通道串扰的影响小。从表 5.2 可以看出,对于空间调制偏振成像系统,其空域解调的 Stokes 矢量的 PSNR 值是傅里叶频域解调的 Stokes 矢量的 PSNR 值的二倍,其空域解调的 Stokes 矢量的 SSIM 值和傅里叶频域解调的 Stokes 矢量的 SSIM 值相差不多。证实了本文算法对于噪声抑制方面是优于傅里叶解调的,保留了更多的高频信息,避免了傅里叶解调的通道串扰问题。并且,从表 5.1 和表 5.2 也可以看到基于两个 Savart 偏光镜空间

调制偏振成像系统无论是空域解调还是傅里叶解调得到的 Stokes 偏振信息的 SSIM 和 PSNR 值都是优于传统空间调制偏振成像系统的，证实了本文第三章提出系统的有效性。

表 5.1 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调和傅里叶频域滤波解调空间频率变化少 Stokes 的 SSIM 和 PSNR 值

Table 5.1 SSIM and PSNR values of spatially modulated snapshot imaging polarimeter using two Savart polariscopes by space modulation and Fourier modulation with less spatial frequency changes Stokes

空域解调	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	41.151	38.635	39.796	41.855
SSIM	0.997	0.993	0.991	0.993
傅里叶解调	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	36.435	33.482	34.232	40.860
SSIM	0.997	0.993	0.991	0.993

表 5.2 空间调制偏振成像系统空域解调和傅里叶频域滤波解调空间频率变化少 Stokes 的 SSIM 和 PSNR 值

Table 5.2 SSIM and PSNR values of Spatially modulated polarization imaging system by space modulation and Fourier modulation with less spatial frequency changes Stokes

空域解调	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	40.374	38.633	39.795	41.846
SSIM	0.997	0.993	0.991	0.992
傅里叶解调	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	14.965	16.782	21.232	23.781
SSIM	0.996	0.991	0.989	0.991

基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统和传统空间调制偏振成像系统空间频率变化多的 Stokes 图片得到的仿真干涉图如图 5.6 和图 5.7 所示，从图 5.6 和 5.7 可以明显的看到干涉条纹，说明理论模型对于任何图片都是正确的。对图 5.6 和图 5.7 采用空域解调，将两个干涉图代入 TwIST-TV 算法解调得到目标的 Stokes 矢量偏振信息，如图 5.8 和图 5.9 所示。

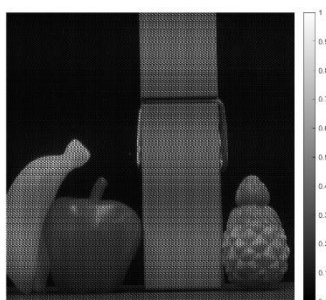


图 5.6 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统多空间频率变化多 Stokes 图片干涉图

Figure 5.6 Interference of more spatial frequency changes Stokes by spatially modulated snapshot imaging polarimeter using two Savart polariscopes

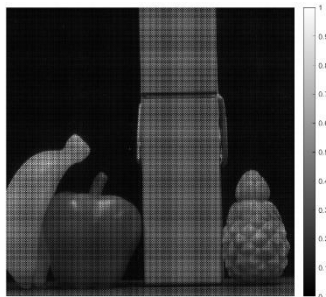


图 5.7 空间调制偏振成像系统多空间频率变化多 Stokes 图片干涉图

Figure 5.7 Interference of more spatial frequency changes Stokes by spatially modulated snapshot imaging polarimeter

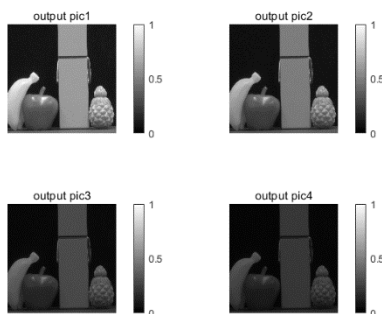


图 5.8 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调输出 Stokes 矢量

Figure 5.8 the output Stokes of spatially modulated snapshot imaging polarimeter using two Savart polariscopes by space demodulation

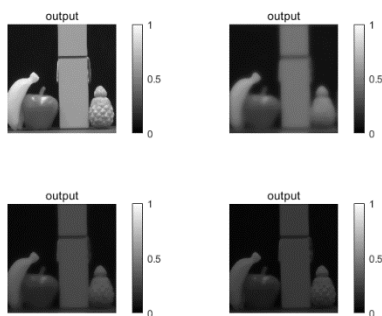


图 5.9 传统空间调制偏振成像系统空域解调输出 Stokes 矢量

Figure 5.9 the output Stokes of Spatially modulated polarization imaging system by space demodulation

为了验证本章提出的方法相对于传统傅里叶变换频域滤波方法解调的效果更好，计算了基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调 Stokes 信息和傅里叶解调 Stokes 信息的 SSIM 值和 PSNR 值，如表 5.3 所示。同样，对于空间调制偏振成像系统的空域解调 Stokes 信息和傅里叶解调 Stokes 信息的 SSIM 值和 PSNR 值如表 5.4 所示。从表 5.3 可以看出，对于基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统，其空域解调和傅里叶频域解调得到的偏振图片的 SSIM 值相差不多，但是对于 PSNR 值，空域解调的 S_0 比傅里叶频域解调的高出 4dB，空域解调的 S_0 、 S_1 、 S_2 比傅里叶频域解调的高出 1dB。从表 5.4 可以看出，对于空间调制偏振成像系统，其空域解调和傅里叶解调得到的 Stokes 图片的 SSIM 和 PSNR 值都相差不多，但是空域解调的 SSIM 和 PSNR 值都是高于傅里叶解调的 SSIM 和 PSNR 值，证实了本章提出算法的可行性。对比表 5.1 和表 5.3，能够看出空间变化多的图片解调出的 SSIM 与 PSNR 值是低于空间频率变化少的图片解调出的 SSIM 值和 PSNR 值，表明图片内空间频率变化的多少对于 Stokes 图片的解调存在一定的影响，空间频率变化多的图片在解调过程中存在更多的噪声，影响 Stokes 解调精度。

表 5.3 基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统空域解调和傅里叶频域滤波解调 Stokes 矢量图片的 SSIM 和 PSNR 值

Table 5.3 SSIM and PSNR values of spatially modulated snapshot imaging polarimeter using two Savart polariscopes by space modulation and Fourier modulation

空域解调	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	35.092	32.597	32.758	37.289
SSIM	0.953	0.931	0.943	0.948
傅里叶解调	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	31.611	32.016	31.662	36.245
SSIM	0.951	0.929	0.943	0.941

表 5.4 空间调制偏振成像系统空域解调和傅里叶频域滤波解调 Stokes 矢量图片的 SSIM

Table 5.4 SSIM and PSNR values of Spatially modulated polarization imaging system by space modulation and Fourier modulation with more spatial frequency changes image

空域解调	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	34.991	32.697	32.054	33.346
SSIM	0.951	0.929	0.941	0.945
傅里叶解调	S_0	S_1	S_2	S_3
PSNR (dB)	31.127	31.136	31.642	31.580
SSIM	0.928	0.921	0.940	0.936

本小节的仿真结果可以充分表明本章提出的通过解欠定方程组的方法对空间调制偏振成像系统 Stokes 偏振信息进行空域解调算法适用于任何结构和任何场景。利用 TwIST-TV 算法解欠定方程组的空域解调算法可以更好的抑制解调过程中的噪声，空域解调偏振信息的 SSIM 值比傅里叶频域解调的值平均高 0.01；空域解调偏振信息的 PSNR 值比傅里叶频域解调的值平均高 3dB。本章提出的方法避免了傅里叶解调带来的通道串扰的问题，有效提高了空间调制偏振成像系统偏振 Stokes 偏振信息解调精度，采用空域解调得到的图片的峰值信噪比，这对推动空间调制偏振成像系统工程化具有重要意义。

5.4.2 实验验证

为了进一步说明本章提出的空域解调算法的理论推导分析和数值仿真的准确性，利用已有的实验装置，本节将进行试验验证。本节的实验只对基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的空域解调算法进行，无论是空域解调还是

傅里叶频域解调都是对实验得到的干涉图进行处理,因此本节将对第三章获得的实验干涉图直接进行空域解调,通过对同一张实验干涉图处理,方便对比空域解调和傅里叶解调结果。

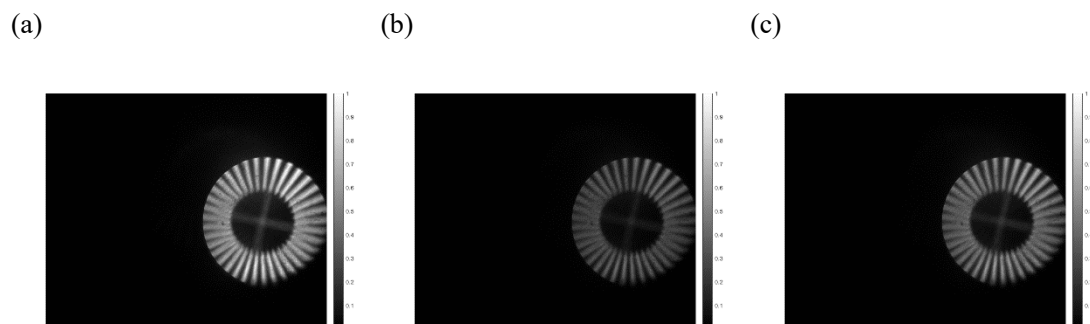


图 5.10 重建的 Stokes 矢量; (a) S_0 , (b) S_1 , (c) S_2

Figure 5.10. The Stokes of the reconstruction: (a) S_0 , (b) S_1 , (c) S_2 .

对图 3.15 的干涉图采用空域解调算法,将干涉图代入 TwIST-TV 算法,解调得到 Stokes 矢量图片如图 5.10 所示。在采用频域解调时,对图像进行归一化处理,使其灰度值在[0-1]之间。将图 5.10 中的 S_1 除以 S_0 ,得到 S_1/S_0 的图片,如图 5.11 所示。从图 5.11 有图像部分的灰度值在 0.5 左右,这完全符合和输入的 30° 线偏振光中 Stokes 矢量的 S_1 与 S_0 的比值。同样的,将图 5.10 中的 S_2 除以 S_0 ,得到 S_2/S_0 的图片,如图 3.12 所示。从图 5.12 成像部分的灰度图可以看出其灰度值在 0.8 左右。这与输入的 30° 线偏振光中 Stokes 矢量的 S_2 与 S_0 的比值十分接近。因此,从灰度图上观察证明了采用解欠定方程组方法的空域解调算法在基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统的可行性。

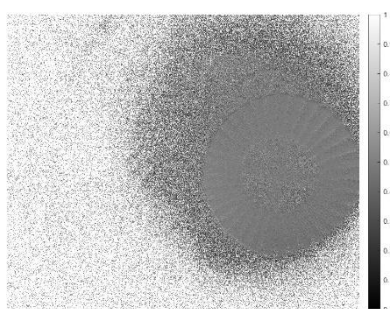
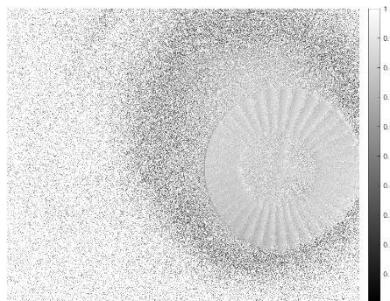
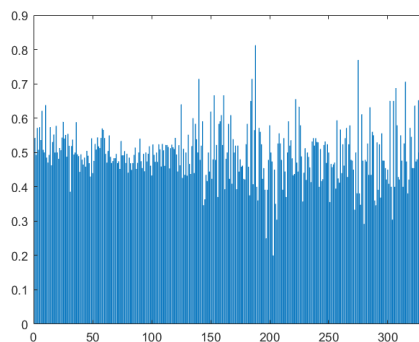
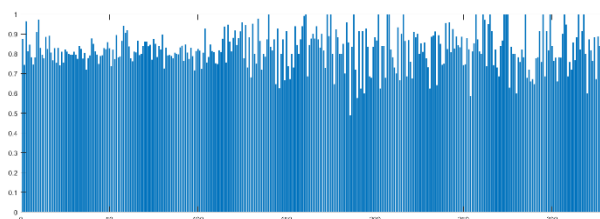


图 5.11 归一化 S_1/S_0 Figure 5.11 The normalized S_1/S_0 ,图 5.12 归一化 S_2/S_0 Figure 5.12 The normalized S_2/S_0

只从图像的灰度图还无法对比空域解调和傅里叶解调的优劣,为了进一步证明空域解调算法的有效性,选取图 5.11 和图 5.12 有图像部分一系列的像素获得他们的条形图如图 5.13 与图 5.14 所示。从图 5.13 的条形图可以看出该列像素的值在 0.5 上下波动,计算其平均值为 0.4941,符合 30° 线偏振光中 Stokes 矢量中 S_1 和 S_0 的比值。从图 5.14 的条形图可以看出,该列像素的值在 0.8 上下波动,计算其平均值为 0.8270,符合 30° 线偏振光中 Stokes 矢量中 S_2 和 S_0 的比值。对比图 3.18 与图 5.13 计算的到的平均值,图 5.13 计算得到的平均值比图 3.18 的高 0.003; 同样对比图 3.19 和图 5.14 计算的平均值,图 5.14 计算的平均值高于图 3.19 计算的平均值,比其高 0.13,图 5.14 更接近 30° 线偏振光中 Stokes 矢量中 S_2 和 S_0 的比值。因此,从条形图的结果可以证实基于解欠定方程组的空域解调算法可以更好的抑制噪声,保留 Stokes 偏振图片更多的高频信息,避免傅里叶解调带来的通道串扰。

图 5.13 S_1/S_0 条形图Figure 5.13 Bar graph of S_1/S_0 图 5.14 S_2/S_0 条形图Figure 5.14 Bar graph of S_2/S_0

综合上述实验结果可知,运用本章提出解欠定方程组的频域解调方法复原空间调制偏振成像系统的 Stokes 矢量信息时,可以有效提高空间调制偏振成像系统的 Stokes 偏振信息复原精度.通过仿真,空间调制解调 Stokes 矢量的 PSNR 值比傅里叶频域解调 Stokes 矢量的 PSNR 值平均高 3;通过实验,空间调制解调 Stokes 矢量的 S_2/S_1 比傅里叶频域解调 Stokes 矢量 S_2/S_1 的偏振精度平均高 0.13.空间调制型偏振成像系统 Stokes 偏振信息傅里叶解调带来的通道串扰是难以避免的,但是运用本文提出的空域解调方法通过相关算法既可以避免通道串扰还可以抑制解调过程中的噪声,有效保证空间调制偏振成像系统 Stokes 偏振信息解调的精度。

5.5 本章小结

本章主要研究空间调制偏振成像系统空域解调方法,运用解欠定方程组的相关方法对空间调制偏振成像系统进行解调,避免了傅里叶解调方法的通道串扰,抑制了解调过程中的噪声,提高了空间调制偏振成像系统 Stokes 偏振信息的解调精度。

首先,为了证实空域解调算法适用于所有的空间调制偏振成像系统,通过理

论推导构建了传统空间调制偏振成像系统空域欠定方程组模型,同时,推导了本文第三章提出系统的空域欠定方程组模型。

然后,是关于目前对于欠定方程组求解的一些基本算法阐述,提出 TwIST-TV 算法作为本章空间调制偏振成像系统欠定方程组求解的算法。该算法在 TwIST 算法的基础上,通过每次迭代进入 TwIST 算法的值进行 TV 正则化处理,并且将 TwIST 算法内的正则项同样进行 TV 正则化处理,很好的抑制了迭代过程中的噪声,提高了欠定方程组求解的精度。

最后,通过仿真分析和试验对本章提出的基于解欠定方程组的空域解调方法的有效性和可行性进行了验证,结果表明,运用本章提出的空域解调算法可以有效提高 Stokes 偏振信息解调的峰值信噪比,从而使空间调制偏振成像系统 Stokes 偏振信息解调精度得到有效提升。

第6章 总结和展望

6.1 论文工作总结

基于空间调制模块的空间调制偏振成像技术具有无运动部件、无通道配准问题和通过一次测量就可以解调得到目标全部的空间和偏振信息等优点,目前研究大多集中于对空间调制偏振成像仪器结构优化设计、偏振数据获得方法等。但是,现有的空间调制偏振成像系统结构优化设计,仅仅为了获得更大的载波频率和更小化仪器,他们都存在以下两方面的问题:(1)在装调过程中都会存在系统内半波片装调角度误差,(2)对于获得目标不同波段偏振信息,所有优化设计的空间调制偏振成像系统结构需要频繁更换结构内的滤波片和半波片,无法通过一次测量获得目标不同波段偏振信息;对于目前的偏振信息解调方法,多数采用傅里叶变换频域滤波,在偏振信息解调过程中会带来通道串扰从而引入噪声,降低偏振信息解调精度。因此,本论文针对空间调制偏振成像系统实现探测不同波段偏振信息的方法和抑制偏振信息解调过程中噪声的方法进行了研究,相关研究成果如下:

(1) 针对空间调制偏振成像系统结构在装调过程中存在半波片装调角度误差的问题进行了研究。推导了空间调制偏振成像内半波片装调角度误差会给系统带来额外的相位延迟误差,影响偏振信息的解调精度。为解决半波片装调角度误差,对空间调制偏振成像系统结构优化设计,移除系统结构内的半波片,将一块改变光轴方向的 Savart 偏光镜和常规 Savart 偏光镜作为新的空间调制偏振系统的空间调制模块,构建基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统结构,利用偏振的基础知识对新结构理论建模。为提高 Stokes 矢量偏振信息解调精度,数值仿真比较了新的结构不同通道 Stokes 偏振信息选择不同滤波函数解调效果,通过仿真结果确定了不同通道的 Stokes 偏振信息的滤波函数。采用数值仿真和试验的方法准确验证了提出的结构和改进的解调算法,表明本文所提出的基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统是可行的,本文提出的优化结构内部无半波片,避免了半波片的装调误差,不同 Stoke 偏振解调通道采用不同滤波函数,进一步提高偏振信息解调精度,对空间调制偏振成像光谱系统工程化具有重要指导意义。

(2) 针对空间调制偏振成像系统无法同时获得目标不同波段偏振信息的问题进行了研究。了解了计算层析光谱成像技术的结构、原理和数据复原的相关算法。在计算层析成像光谱系统结构中,将第三章提出的基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像系统中的空间调制模块插入到系统结构的前置镜组与视场光阑之间,构成空间调制型计算层析偏振成像光谱系统。新的系统结构通过一次测量两次解调就可以得到目标不同波段的偏振信息。推导了空间调制型计算层析偏振光谱成像系统的理论模型,确定其结构中关键元件参数。分析了空间调制型计算层析偏振成像光谱系统数据重建的原理和算法。最后,利用本文提出的空间调制型计算层析偏振光谱成像系统搭建了实验平台进行验证。结果表明,本文提出的空间调制型计算层析偏振光谱成像系统经过一次测量两次解调就可以得到目标不同波段的偏振信息,对空间调制偏振成像系统的工程化应用带来重大意义。

(3) 针对空间调制偏振成像系统傅里叶频域滤波方法会带来通道串扰和解调噪声的问题进行了研究,采用空域解调的方法代替傅里叶频域解调的方法。推导了空间调制偏振成像系统的理论模型,构建了空域解调欠定方程组。介绍了求解欠定方程组的相关原理和实现求解的相关算法。为了抑制解调过程中的噪声,同时提高解调速度,将收敛素快、求解精度高的 TwIST 算法与抑制噪声的 TV 正则化算法相结合,得到求解欠定方程组的 TwIST-TV 算法。最后,对本文提出的空域解调算法利用相关数值仿真验证,为了进一步证明其准确性,对其进行试验验证。仿真结果和试验结果均证明本文提出空域解调的方法相对于传统的傅里叶频域解调方法解调得到的目标偏振图片有更高的峰值信噪比,且本文提出的方法适用于任何的空间调制偏振成像系统解调任何场景的偏振信息,对空间调制偏振成像系统工程化应用具有重要的参考价值。

6.2 论文创新点

(1) 对空间调制偏振成像系统的结构优化设计,提出基于两个 Savart 偏光镜的空间调制偏振成像光谱系统,该系统内部不存在半波片,消除人为带来的半波片的装调角度误差,偏振数据解调峰值信噪比提高 2 倍。

(2) 将计算层析光谱成像系统与基于两个 Savart 偏光镜空间调制偏振成像系统相结合构建了空间调制型计算层析偏振光谱成像系统,通过一次测量两次解调就能够获得目标多个波段的偏振信息与二维空间信息,提高数据探测速度。

(3) 建立了空间调制偏振成像系统的空域模型解调偏振信息, 避免了传统傅里叶频域解调带来的通道串扰, 通过对空域解调相关算法改进, 抑制了频域解调过程中的噪声, 空域解调偏振信息的峰值信噪比平均提高 3dB。

6.3 研究展望

本论文对空间调制偏振成像系统的结构和偏振信息解调方法进行了研究, 取得了相关成果, 单由于时间有限、空间调制偏振成像技术工程化不足等原因, 仍存在一些问题, 具体内容如下:

(1) 目前空间调制偏振成像系统尚只是在实验室内简易的搭建起来, 还不存在成型的仪器。相关的试验也只是在实验室内利用现有的仪器完成的, 因此, 为了进一步证明该结构的有效性, 需要进行一定的室外试验。

(2) 在本文的研究中, 快照光谱成像方式采用的是计算层析技术, 当快照式空间调制型计算层析偏振光谱成像系统解调目标的相关信息时, 解调的波段数越多需要的时间越多, 因此, 有必要对快照式的方式改进或者计算层析解调算法优化, 提高目标的偏振、二维空间和光谱的解调速度。并且, 空域解调算法采用的是解欠定方程组寻最优解的方式解调目标的偏振信息, 寻最优解的算法随着成像探测器越大所需要解调的时间越多, 因此, 有必要对空域解调算法优化, 降低空域解调所需要的时间。

(3) 目前所有的空间调制偏振成像系统的建模是基于傅里叶变换光学或者平面波电矢量和成的, 没有利用矩阵对系统建模, 这是由于空间调制偏振成像系统的探测原理与一般的偏振系统不同, 这大大增加了对系统误差、解调算法误差分析的难度。然而, 矩阵建模可以很好的解决上述难题, 因此, 对空间调制偏振成像系统进行合适的矩阵建模方式是十分必要的。

参考文献

- [1] Sellar R G, Boreman G D. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications [J]. *Opt. Eng.*, 2005, 44(1): 013602.
- [2] Pezzaniti J L, R A Chipman. Imaging polarimeters for optical metrology [J]. *Proc. of SPIE*, 1990, 1317: 280-294.
- [3] Craven-Jones J, Kudenov M W, Stapelbroek M G, et al. Infrared hyperspectral imaging polarimeter using birefringent prisms [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(8): 1170-1185.
- [4] Jensen G L, Peterson J Q, Greenman M, et al. Measurement results from flight measurements with the hyperspectral imaging polarimeter [J]. *Proc. of SPIE*, 2000, 4133: 214-220.
- [5] André Y, Laherrère J-M, Bret-Dibat T, et al. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument [J]. *Proc. of SPIE*, 1995, 2572: 79-90.
- [6] Laherrère J M, Poutier L, Bret-Dibat T, et al. POLDER on-ground stray light analysis, calibration, and correction [J]. *Proc. of SPIE*, 1997, 3221: 132-140.
- [7] 孙夏, 赵慧洁. 基于 POLDER 数据反演陆地上空气溶胶光学特性[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1772-1777.
- [8] Fougnie B, Bracco G, Lafrance B, et al. PARASOL in-flight calibration and performance [J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(22): 5435-5451.
- [9] Marbach T, Fougnie B, Lacana A, et al. Vicarious calibration of the Multi-viewing-channel - polarisation imager (3MI) of the EUMETSAT polar system - second generation (EPS-SG) [J]. *Proc. of SPIE*, 2016, 10000: 1000017-1-9.
- [10] Zhang J, Shao J, Yan C. Cloud and aerosol polarimetric imager [J]. *Proc. of SPIE*, 2014, 9142: 91420X-1-12.
- [11] 张军强, 薛闯, 高志良, 等. 云与气溶胶光学遥感仪器发展现状及趋势[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 679-698.
- [12] Lin H. S, Versteegh A. VisIRIS—A visible/IR imaging spectropolarimeter based on a birefringent fiber-optic image slicer [C]. *Proc. of SPIE*, 2006, 6269: 62690K.
- [13] Pace E, Gambicorti L, Gherardi A, et al. An imaging spectropolarimeter for next UV space

- telescopes [C]. Proc. of SPIE, 2008, 7011: 70111Z.
- [14] Deschamps P. Y, Breon F. M, Leroy M, et al. The POLDER mission: instrument characteristic and scientific objectives [C] IEEE, 1994, 32(3): 598-615.
- [15] Duggin M J, Loe R. Algorithms for target discrimination and contrast enhancement using narrowband polarimetric image data [J]. Proc. of SPIE, 2002, 4481: 247-256.
- [16] 唐攀科, 李永丽, 李国斌, 等. 成像光谱遥感技术及其在地质中的应用[J].矿产与地质, 2006,(4): 160-164.
- [17] 杨清华, 吴小娟, 肖政浩, 等. CASI/SASI 航空高光谱遥感矿物技术研究-以甘肃北山柳园地区为例[J].地质力学学报, 2015, 21(2): 241-251.
- [18] 王润生. 高光谱遥感的物质组分和物质成分反演的应用分析[J].地球信息科学, 2009, 11(3): 261-267.
- [19] 叶发旺, 刘德长, 赵英俊. CASI/SASI 航空高光谱遥感测量系统及其在铀矿勘查中的初步应用[J].世界核地质科学, 2011, 28(4): 231-236.
- [20] 李淑军, 姜会林, 朱京平. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 2013, 6(6):803-809.
- [21] Duggin M. J, Loe R. S. Calibration and exploitation of a narrow-band imaging polarimeter [J]. Opt. Eng., 2002, 41(5): 1039-1047.
- [22] De M. A, Kim Y. K, Garcai-Caurel E, et al. Optimized Mueller polarimeter with liquid crystals [J]. Opt. Lett., 2003, 28(8): 616-618.
- [23] Gendre L, Foulonneau A, Bigue L. Full Stokes polarimetric imaging using a single ferroelectric liquid crystal device [J]. Opt. Eng., 2011, 50(8): 081209.
- [24] 赵海盟, 刘思远, 李俊生, 等. 高信息-背景反差比滤波特性的水、雪、植被偏振遥感探测[J].遥感学报, 2018, 22(6): 957-968.
- [25] 孙仲秋, 赵云升, 卢珊, 等. 偏振反射信息在植被遥感双向反射研究中的作用[J].遥感学报, 2018,22(6): 947-956.
- [26] Suzuki T, Kurosaki H, Enkyo S, et al. Application of an AOTF imaging spectropolarimetry[J]. Proc. of SPIE, 1997, 3121: 356-365.//////
- [27] Glenar D A, Hillman J J, Saif B, et al. Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing[J]. Appl. Opt., 1994, 33(31): 7412-7424.
- [28] Gupta N, Denes L J, Gottfried M, et al. Object detection with a field-portable spectropolarimetric

- imager[J]. Appl. Opt., 2001, 40(36): 6227-6632.
- [29] Denes L J, Gottlieb M, Kaminsky B, et al. Spectro-polarimetric imaging for object recognition[J]. Proc. of SPIE, 1998, 3240: 8-18.
- [30] Homma K, Shingu H, Yamamoto H. Agro-environment observation using near-infrared LCTF spectropolarimeter[J]. Proc. of SPIE, 2005, 5655: 407-418.
- [31] 孙尧, 张淳民, 杜鹃, 等. 一种基于新型偏振干涉成像光谱仪的目标偏振信息探测新方法[J].物理学报, 2010, 59(6): 3863-3870.
- [32] Peralta R J, Nardell C, Cairns B, et al. Aerosol polarimetry sensor for the glory mission [J]. Proc. of SPIE, 2007, 6786: 67865L.
- [33] Elders J P, Azene H M, Betraun G T, et al. Aerosol polarimeter sensor (APS) contamination control requirements and Implementation [J]. Proc. of SPIE, 2010, 7794: 779406.
- [34] Persh S, Shaham Y J, Benami O, et al. Ground performance measurements of the glory aerosol polarimetry sensor [J]. Proc. of SPIE, 2010, 7807: 780703.
- [35] 柏财勋, 李建欣, 周建强, 等. 基于微偏振阵列的干涉型高光谱偏振成像方法[J].红外与激光工程, 2017, 46(1): 0138003-1-6.
- [36] 李杰, 朱京平, 齐春, 等. 静态傅里叶变换超光谱全偏振成像技术[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 044206-1-6.
- [37] 李杰, 朱京平, 齐春, 等. 大孔径静态超光谱全偏振成像技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 574-578.
- [38] 王新全. 静态光谱偏振成像技术研究[D].西安.中国科学院西安光学精密机械研究所, 2011.
- [39] 王新全, 相里斌, 黄旻, 等. 静态成像光谱偏振仪[J]. 光电子激光, 2011, 22(5): 689-692.
- [40] Gu X, Qiao Y, Wang J. High Resolution Directional Polarimetric Camera (DPC) used in the remote sensing of aerosol properties [J]. Proc. of SPIE, 2006, 7807: 78070W-1-7.
- [41] 国宏伟. 快照式高光谱相机的设计及开发[D].天津.天津大学, 2016.
- [42] Dwight J G, Tkaczyk T S. Lenslet array tunable snapshot imaging spectrometer (LATIS) for hyperspectral fluorescence microscopy[J]. Opt Exp, 2017, 8(3): 1950-1964.
- [43] 刘铭鑫. 基于压缩感知的编码孔径光谱成像技术研究[D].长春.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.
- [44] 冯维一. 快照式压缩光谱集成成像技术研究[D].南京.南京理工大学, 2018.

- [45] 朱丹彤. 编码孔径成像光谱仪系统集成及光谱复原实验研究[D]. 长春. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [46] Gehm M E, John R, Brady D J, et al. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture[J]. *Opt Exp*, 2007, 15(21): 14013-14027.
- [47] Wagadarikar A, John R, et al. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging[J]. *App Opt*, 2008, 47(10): B44.
- [48] Wagadarikar A, Brady D J, et al. Video rate spectral imaging using a coded aperture snapshot spectral imager[J]. *Opt Exp*, 2009, 17(8): 6368-6388.
- [49] 赵振理. 层析成像光谱仪的复原算法研究[D]. 西安. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2004.
- [50] 杜文芳. 一种基于低秩约束的 CTIS 图像重建方法[D]. 天津. 天津大学, 2017.
- [51] Oka T, and Yamaguchi I. Simultaneous acquisition of spectral image information [J]. *Opt Lett*, 1991, 18(16): 1277-1279.
- [52] Michael R D, Tomasa S, and Tkaczyk. The Computed Tomography Imaging Spectrometer [J]. *IEEE*, 2003, 03(0-7803-7888-1): 460-461.
- [53] Scholl, James, Dereniak, Eustace, Garcia, John, Tebow, Christopher, Garrood, and Dennis. Computational modeling of the imaging system matrix for the CTIS imaging spectrometer [J]. *Proc of SPIE*, 2002, 4816: 437-447.
- [54] Scholl, James, Hege, E. Keith, O'Connell, Daniel, Dereniak, and Eustace. Model based compression of the calibration matrix for hyperspectral imaging systems [J]. *Proc of SPIE*, 2007, 6700: 670002-1-670002-10.
- [55] Wilson, Daniel, Maker, PAUL, Muller, and Richard. Reconstructions of computed-tomography imaging spectrometer image cubes using calculated system matrices [J]. *Proc of SPIE*, 1997, 97: 184-192.
- [56] Descour M and Dereniak E. Computed-Tomography Imaging Spectrometer: Experimental Calibration and Reconstruction result [J]. *Sppl. Opt*, 1995, 34(22), 4817-4826.
- [57] Hagen N, and Dereniak E L. Analysis of computed tomographic imaging spectrometers. I. Spatial and spectral resolution [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(28): F85-F95.
- [58] Zhou P W, Jin S Z, Deng C, and Li N C. Development of a blurred spectral images restoration technology for CTIS imaging spectrometer [J]. *Opt Exp*, 2016, 24(5): 4881-4889.

- [59] Hagen N, Dereniak E L. New grading designs for a CTIS imaging spectrometer [J]. Proc of SPIE, 2007, 6565, 65650N.
- [60] Vandervlugt, et al. Visible imaging spectro-polarimeter [J]. Proc of SPIE, 2007, 6661: 666104-1-666104-7.
- [61] Tsai H T, and Brady D J. Coded aperture snapshot spectral polarization imaging [J]. Appl Opt, 2013, 52(10): 2153-2160.
- [62] Fu C, Arguello H, et al. Compressive spectral polarization imaging by a pixelized polarizer and colored patterned detector [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(11): 2178-2188.
- [63] Mu T K, Pacheco S, et al. Snapshot linear-Stokes imaging spectropolarimeter using division-of-focal-plane polarimetry and integral field spectroscopy [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42115.
- [64] Ren W Y, Fu C, and Arce R G. The first result of Compressed Channeled Imaging Spectropolarimeter [J]. Imaging and Applied Optics, 2018: JTU4A.21.
- [65] Ren W Y, Fu C, Wu D, et al. Channeled compressive imaging spectropolarimeter [J]. Opt Exp, 2019, 27(3): 2197-2210.
- [66] OKA K. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms [J]. Opt Exp, 2003, 11:1510-1519.
- [67] OKA K and Sayio N. Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates [J]. Proc of SPIE, 2006, 6295: 629508.
- [68] Luo H, OKA K, Dehoog E, et al. Compact and miniature snapshot imaging polarimeter [J]. Appl Opt, 2008, 47: 4413-4417.
- [69] Cao Q Z, Zhang C M and DeHoog E. Snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes [J]. Appl Opt, 2012 51(24): 5791-5795.
- [70] Zhang J, Yuan C A, Cao Q Z, et al. Acquisition of a full-resolution image and aliasing reduction for a spatially modulated imaging polarimeter with two snapshots [J]. Appl Opt, 2018, 57(10):2376-2382.
- [71] 龚冠源. 空间调制全偏振成像信息处理算法研究[D]. 合肥. 中国科学院合肥物质科学研究院, 2016.
- [72] 刘震. 空间调制型全偏振成像系统关键误差分析与性能优化研究[D]. 合肥. 中国科学技术大学, 2016.

- [73] 叶松, 严浩方, 孙晓兵, 等. 空间调制型全偏振成像系统的图像解调算法修正[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0607001-1-0607001-7.
- [74] 胡巧云, 杨伟峰, 胡亚东, 洪津. 空间调制型全 Stokes 参量偏振成像系统原理及仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211004-1-021104-7.
- [75] 廖延彪. 偏振光学[M].北京: 科学出版社, 2003: 52-54.
- [76] Jones R C. A new calculus for the treatment of optical systems[J]. J. Opt. Soc. Am, 1941, 31(7): 500-503.
- [77] Zhang C M, Ren W Y, Mu T K. Effects of optical axis direction on optical path difference and lateral displacement of Savart polariscope [J]. Chin. Phys. B, 2010, 19(2): 024202-1-024202-9.
- [78] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 32-34.
- [79] 穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 等. 差分偏振干涉成像光谱仪 I. 概念原理与操作[J]. 物理学报, 2014, 63(11):110704-1-110704-8.
- [80] 穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 等. 差分偏振干涉成像光谱仪 II. 光学设计与分析[J]. 物理学报, 2014, 63(11):110705-1-110705-8.
- [81] David A, Naylor and Margaret K. Tahic. Apodizing function for Fourier transform spectroscopy [J]. Optical Society of America, 2007,24(11):3644-3648.
- [82] Pickalov V V, Kazantesv D I, Golubyatnikov V P. The central slice theorem generalization for a fan-beam tomography [J]. Sobolev Institute of Mathematics, 2006: 180-184.
- [83] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社.
- [84] 黄力宇, 朱守平, 匡涛. 医学断层图像重建仿真实验[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社.
- [85] 高宇. 迭代重建算法的研究进展[J]. 中国医疗设备, 2013, 28(3): 23-25.
- [86] 袁惠, 周进, 谈苏庆. 计算层析成像光谱仪中二元光学元件的研究[J]. 激光技术, 2001, 25(2): 112-114.
- [87] Forsgren A, Gill P E, Wright H. Interior methods for nonlinear optimization [J]. SIAM Review, 2002, 44(4): 525-597.
- [88] Figueiredo M A T, Nowak R D, Wright S J. Gradient projection for sparse reconstruction: application to compressed sensing and other inverse problems [J]. IEEE Journal of Selected

- Topic in Signal Processing, 2007, 1(4): 586-597.
- [89] Forsgren A, Gill P E, Wright M H. Interior methods for nonlinear optimization [J]. SIAM Review, 2002, 44(4): 525-597.
- [90] Bioucas-dias J M, Figueiredo M. Two-step algorithms for linear inverse problems with non-quadratic regularization [J]. Proceedings of IEEE International Conference on Image processing, 2007: I -105- I -108.
- [91] Bioucas-dias J M, Figueiredo M. A new TwIST: two-step iterative shrinking/thresholding algorithms for image restoration [J]. IEEE Trans on image Processing, 2007, 16(12): 2992-3004.
- [92] Candes E, Tao T. Near optimal signal recovery from random projection: universal encoding strategies [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [93] Tropp J, Gilbert A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [94] Needell D, Vershynin R. Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Journal of selected topics in signal processing, 2010, 4(2): 310-316.
- [95] Needell D, Vershynin R. Uniform uncertainty principle and signal recovery via regularized orthogonal matching pursuit [J]. Foundations of computational mathematics, 2009, 9(3): 317-334.
- [96] Needell D, Tropp J. Cosamp: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples [J]. Applied and computational harmonic analysis, 2009, 26(3): 301-321.
- [97] Blumensath T, Davies M E. Gradient pursuits [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(6): 2370-2382.
- [98] Blumensath T, Davies M E. Stagewise weak gradient pursuits [J]. 2009, 57(11): 4333-4346.
- [99] Figueiredo M A T, Nowak R D, Wright S J. Gradient projection for sparse reconstruction: application to compressed sensing and other inverse problems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(4): 587-597.
- [100] Osher S, Mao Y, et al. Fast linearized Bregman iteration for compressive sensing and sparse denoising [J]. Communications in Mathematical Sciences, 2010,8(1): 93-111.

- [101] Goldstein T, Osher S. The split Bregman method for L1-regularized problems [J]. *SIAM Journal on Imaging Science*, 2009, 2(2): 323-343.
- [102] 高鸿涛. 高光谱成像实验及其数据处理 [D]. 西安. 西北工业大学, 2005.
- [103] 苏丽娟, 袁艳, 胡亮. 一种快照式高通量的光谱成像方法和光谱成像仪: 中国, 20120145761.X [P]. 2013-02-27.
- [104] Diner D J, Davis A, Hancock B, et al. Dual-photoelastic-modulator-based polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(35): 8428-8445.
- [105] Diner D J, Davis A, Hancock B, et al. First results from a dual photoelastic-modulator-based polarimetric camera[J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(15): 2929-2946.
- [106] Diner D J, Xu F, Garay M J, et al. The Airborne multiangle spectropolarimetric imager (AirMSPI): a new tool for aerosol and cloud remote sensing[J]. *Atmos. Meas. Tech*, 2013, 6: 2007–2025.
- [107] Kudenov M W, Dereniak E L. *Imaging Spectrometers and Polarimeters* [J]. *Frontiers in Optics*. Optical Society of America, 2011: FYhQ1.
- [108] Kudenov M W, Dereniak E L. Compact snapshot real-time imaging spectrometer [J]. *International Society for Optics and Photonics*, 20011, 8186: 81860W-81812.
- [109] Kudenov M W, Dereniak E L. Compact real-time birefringent imaging spectrometer [J]. *Optics express*, 2012, 20(16): 17973-17986.
- [110] Kester R T, Bedard N, Gao L, et al. Real-time snapshot hyperspectral imaging endoscope [J]. *Journal of biomedical optics*, 2011, 16(5): 056005-056012.
- [111] Horstmeyer R, Euliss G, Athale R, et al. Flexible multimodal camera using a light field architecture [J]. *IEEE International Conference*, 2009: 1-8.
- [112] Harvery A R, Fletcher-Holmes D W. A snapshot fovea hyperspectral imager [J]. *SPIE*, 2002, 4(816): 407-414.
- [113] Johnson W R, Wilson D W, Fink W, et al. Snapshot hyperspectral imaging in ophthalmology [J]. *Journal of biomedical optics*, 2007, 12(1): 014036.
- [114] 张宇. 基于微透镜阵列的快照式成像光谱技术研究 [D]. 哈尔滨. 哈尔滨工业大学, 2014.
- [115] 曹奇志, 元昌安, 胡宝清, 等. 基于双折射晶体的快拍穆勒矩阵成像测偏原理分析 [J]. *物理学报*, 2018, 67(10): 104209-1-104209-7.

- [116] 张海洋. 分振幅偏振成像系统定标研究[D]. 长春. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [117] Azzam R M A . Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light[J]. *Opt. Lett.*, 1985, 10(7): 309-311.
- [118] 杨斌. 强度调制型偏振光谱成像系统测量误差及定标研究[D]. 长春. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [119] 刑文赫. 通道色散型偏振光谱成像系统偏振辐射定标研究[D]. 长春. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
- [120] Azzam R M A . Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light[J]. *Opt. Lett.*, 1985, 10(7): 309-311.
- [121] Pezzaniti J L, Chenault D B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter[J]. *Opt. Eng.*, 2005, 44(3): 515-533.
- [122] Boger J K , Tyo J S , Ratliff B M , et al. Modeling precision and accuracy of a LWIR microgrid array imaging polarimeter[J]. *Proc. of SPIE*, 2015, 5888:58880U.
- [123] Bo Jian, Xing Wenhe, Gu Yunting, Yan Changxiang, Wang Xiaodong, and Ju Xueping. Spatially modulated snapshot imaging polarimeter using two Savart polariscopes [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(28): 9023-9031.

致 谢

时间如白驹过隙,五年的硕博连读生活即将结束。回首过往五年的学习生活,学习中,有过开题初期的迷茫、获得科研成果的喜悦,从战胜一个个困难不断完善自己;生活中,虽有磕磕绊绊,但以乐观心态面对,从中领悟生活的真谛。五年的成长,得益于老师、同学、亲人和朋友的关心及帮助。

首先要感谢我的指导老师颜昌翔研究员,颜老师学识渊博,和蔼可亲,思维敏锐,工程经验丰富,对我博士期间的科研工作及论文的写作给予了悉心的指导。颜老师对学生个人的科研兴趣和爱好都给予支持与帮助,使我选择感兴趣的课题起到了重要的作用。还要感谢匡海鹏研究员,匡老师学识广博,平易近人,在我的科研工作和课题方向上提出了很多有益的建议。

感谢鞠学平师兄对我科研路上的帮助和生活上的照顾,总能够耐心解答我所遇到的问题,师兄认真的态度和对身边人细致入微的关心一直是我学习的方向。

感谢职工师兄胡春晖、吴从均、顾志远、邵建兵师兄在我科研过程中所给予的建议与指导,感谢师兄鞠学平、李颐、杨丰福、宋绍漫、李梦阳、徐力智、黄亚伟、王鑫、徐泽明、贺靖伦、申箫,师姐潘云、邢文赫、袁静在我学习和生活上的帮助。感谢同窗冯朝、丁宁,师弟董有志、任颐杰、王雪峰、陈志伟、王含文、刘鹏辉、李文杰、于博,师妹谢丹丹,实验室一起学习、娱乐的日子令人怀念。

感谢好朋友赵猛、支政、九五老铁这些人对我生活上的帮助,分享我生活中的酸甜苦辣。感谢好朋友刘祥对我科研上的帮助,帮我探讨分析遇到的一个又一个的科研问题。

在此要特别感谢我的女朋友谷韵婷,感谢她在我读博期间对我生活上的照顾和学习上的鼓励,她的理解、支持与陪伴让我的读博生涯更轻松、更有动力。

最后,要感谢养育我多年、无时无刻不牵挂我的家人,是他们在我背后对我巨大的支持,让我有动力走过二十余载的求学之路,督导我不断前行。

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:

2013年9月——2017年6月,在哈尔滨工业大学获得工学学士学位。

2017年9月——2022年6月,在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读博士学位。

已发表(或正式接受)的学术论文:

[1] **Bo Jian**, Xing Wenhe, Gu Yunting, Yan Changxiang, Wang Xiaodong, and Ju Xueping. Spatially modulated snapshot imaging polarimeter using two Savart polariscopes [J]. Applied Optics, 2020, 59(28): 9023-9031. (SCI)

[2] **Bo Jian**, Gu Yunting, Xing Wenhe, Ju Xueping, Yan Changxiang, and Wang Xiaodong. Spatially modulated snapshot computed tomographic polarization imaging spectrometer [J]. Applied Optics, 2021, 60(20): 5860-5866. (SCI)

[3] Xing Wenhe, Ju Xueping, **Bo Jian**, Yan Changxiang, Yang Bin, Xu Shuyan, and Zhang Junqiang. Polarization Radiometric Calibration in Laboratory for a Channeled Spectropolarimeter [J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8295. (SCI)

[4] Gu Yunting, Lv Jinguang, **Bo Jian**, Zhao Baixuan, Chen Yupeng, Tao Jin, Qin Yuxin, Wang Weibiao, and Liang Jingqiu. Joint Dense 3D Reconstruction Method for Endoscopic Images of Weak Texture Scenes [J]. IEEE Access, 2021, 9: 138254-138265. (SCI)

参加的研究项目情况:

1. 国家自然科学基金青年基金项目《偏振光谱强度调制技术的偏振测量稳定性分析及修正方法研究》(No. 61505199);

2. XX 小型偏振高光谱侦察项目 (No. XXXXXXXXXXXXX);

3. 航空航天技术领域所创新面上项目《新型高光谱偏振成像技术》(No. Y4CX1SS143);

4. 长春光机所-复旦大学合作基金项目《纳米表面结构窄带滤波片及在光谱成像上的应用研究》(No. Y9R633A190)。