

引用格式: WANG Sun-chen, ZHANG Lei, XUE Mo-gen, *et al.* Optimization with Demodulation Algorithm for Spatially Modulated Full Polarization Imaging System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12): 1211001

王孙晨, 张磊, 薛模根, 等. 空间调制型全偏振成像系统解调算法优化[J]. *光子学报*, 2020, 49(12): 1211001

空间调制型全偏振成像系统解调算法优化

王孙晨^{1,3}, 张磊², 薛模根^{1,3}, 吴云智^{1,3}, 贾睿^{1,3}, 薛莹^{1,3}

(1 中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院 信息工程系, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 合肥 230027)

(3 偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 针对空间调制型全偏振成像系统中二维傅里叶变换解调算法的优化问题, 提出贝塞尔修正的方向选择性二维汉宁切趾优化解调算法, 对比分析了不同切趾函数主瓣宽度与旁瓣衰减的特性. 相比于传统汉宁窗, 该算法旁瓣抑制能力提高了 12.89 dB, 主瓣宽度为 0.065π , 同时在频谱滤波过程中对相对位置在对角线方向上频谱信息有良好抑制作用. 搭建了基于琼斯矩阵的全偏振成像探测系统, 并通过实验进行验证. 实验结果表明: 经过优化的解调算法全偏振分量的解调精度平均提高了 9.48%, 验证了优化解调算法的准确性和有效性.

关键词: 全偏振成像; 空间调制; 干涉图; 傅里叶变换; 琼斯矩阵; 频域滤波; 切趾

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204912.1211001

Optimization with Demodulation Algorithm for Spatially Modulated Full Polarization Imaging System

WANG Sun-chen^{1,3}, ZHANG Lei², XUE Mo-gen^{1,3}, WU Yun-zhi^{1,3}, JIA Rong^{1,3}, XUE Ying^{1,3}

(1 Department of Information Engineering, Chinese Academy of People's Liberation Army Artillery Air Defense Academy, Hefei 230031, China)

(2 Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

(3 Key Laboratory of Polarized Light Imaging Detection Technology in Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to optimize the two-dimensional Fourier transform demodulation in spatially modulated full polarization imaging system, Bessel's correction directional selective two-dimensional Hanning apodization optimal demodulation algorithm is proposed. The characteristics of main lobe width and sidelobe attenuation of different apodization functions are compared and analyzed. Compared with the traditional Hanning window, the proposed algorithm has a sidelobe suppression capability improved by 12.89 dB and a main lobe width of 0.065π . At the same time, it shows a good suppression effect on the diagonal spectrum information of the relative position in the spectrum filtering process. A system imaging simulation platform based on Jones matrix is built and verified by experiments. The experimental results show that the full polarization component demodulation accuracy of the optimized demodulation algorithm is improved by 9.48% on average, which verifies the accuracy and effectiveness of the optimized demodulation algorithm.

Key words: Full polarization imaging; Spatial modulation; Interferogram; Fourier transform; Jones

基金项目: 国家自然科学基金(No.41871229)

第一作者: 王孙晨(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为偏振成像探测. Email: 15754314542@163.com

导师: 薛模根(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为末端防御和偏振成像探测. Email: 315763597@qq.com

通讯作者: 张磊(1978-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光电检测和偏振成像. Email: lzhlzh@ustc.edu.cn

收稿日期: 2020-06-15; 录用日期: 2020-08-27

<http://www.photon.ac.cn>

matrix; Frequency domain filtering; Apodization

OCIS Codes: 110.3175; 110.5405; 070.2615; 070.4790; 260.1440

0 引言

常用的偏振信息获取方式主要有两类:一是通过旋转波片或偏振片实现不同偏振方向图像的分时采集;二是多路偏振光学系统同时对不同偏振方向进行图像采集^[1-2].这两种方式的优势在于不需要后期复杂的算法处理.但是,分时采集方式难以实现对移动目标的实时性探测要求,多路同时采集方式系统的光机结构十分复杂,存在多路信号的串扰和尺度配准问题,会导致信号失真^[3-4].为更好地满足准确性和实时性要求,近年来发展了空间调制型全偏振成像方法,适应小型化、集成化的发展趋势,具有很好的应用前景^[5-6].但是,采集得到的干涉图像在二维傅里叶变换后由于点扩散效应,直接使用滤波函数进行信号处理会导致频谱能量泄露以及频谱信号混叠.为减少频谱泄露及混叠,可采用合适的切趾函数对信号进行处理.切趾的核心思想是在时域上对信号加窗,而在频域上表现为卷积,其卷积过程可以看作被一组具有特定函数形状的滤波器平滑的过程^[7].NAYLOR D A 提出一系列的切趾函数,在使次级最大值的幅度达到最佳降低的同时,保留了 sinc 函数的正交特性^[8].邓竞蓝提出改进的三角窗切趾函数,有效抑制频谱泄露,具有较好的频率分辨率,但只适用于一维干涉光谱信号的处理^[9].叶松针对空间调制型全偏振成像系统复色光入射,提出了修正载波频率的优化算法,但采取的滤波方式为传统的高斯低通滤波,对频谱信息混叠和串扰的抑制作用有限^[10].

针对空间调制型全偏振成像系统的解调算法研究,目前国内外仍然以直接进行低通滤波的方式为主^[11-14].但直接进行低通滤波有一定的局限性,如在频谱选通过程中无法有效抑制不同频谱通道间的信号串扰带来的伪信息增加以及频谱泄露问题,单纯通过调整滤波器窗口大小来解决频谱信息混叠和串扰容易引起目标高频信息的损失.本文首先提出一种贝塞尔修正的方向选择性二维汉宁切趾函数,与传统汉宁窗相比,改进切趾函数在主瓣略微增加的同时,对旁瓣抑制作用明显,并且具有方向选择的特性.用改进切趾函数的优化算法对干涉图进行处理,保留了探测目标的细节信息,同时有效降低了各个频率通道上伪信息的出现,提升了干涉图像全偏振分量解调的准确性.

1 基于空间调制的干涉图切趾分析

空间调制型全偏振成像系统光路传播过程原理如图 1 所示,含有目标信息的光束首先通过窄带滤光片滤光,再通过由萨瓦偏振光镜(Savart Polariscope, SP)组成的第一棱镜组(SP1)分裂成两束振动方向互相垂直的线偏振光;水平出射的两束线偏振光经过半波片(Half Wave Plate, HWP)后振动方向均旋转 45°;再通过第二 Savart 棱镜组(SP2)后两束线偏振光分别分裂出两束新的振动方向互相垂直的线偏振光;检偏器(Analyzer)将四束线偏振光调制为具有相同的振动方向;由同一光线分裂而来的四束偏振光频率相同,相位差恒定,满足产生干涉的基本条件;最后经过汇聚系统(Lens)在像面上产生干涉效应^[15].

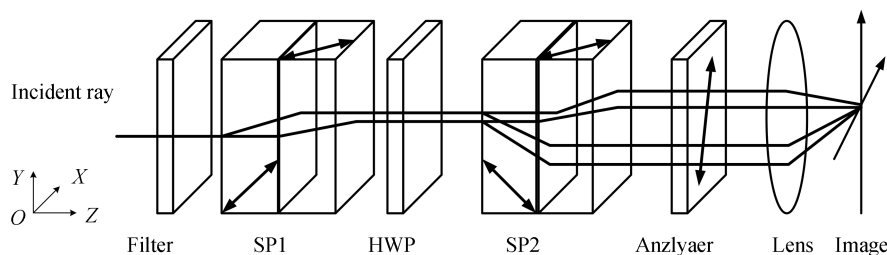


图 1 空间调制型全偏振成像系统光路传播过程原理

Fig.1 Schematic diagram of the optical path propagation process of a spatially modulated full polarization imaging system

空间调制型全偏振成像系统的核心模块中单个 Savart 板工作原理如图 2(a)所示,为了保证最大横向剪切量 Δ ,光轴相对 Z 轴方向为 45°.Savart 棱镜组中第二块 Savart 板相对于第一块的光轴方向沿顺时针旋转 90°,如图 2(b)所示.出射 Savart 棱镜组的两束线偏振光横向剪切量为 $\sqrt{2}\Delta$ ^[16].

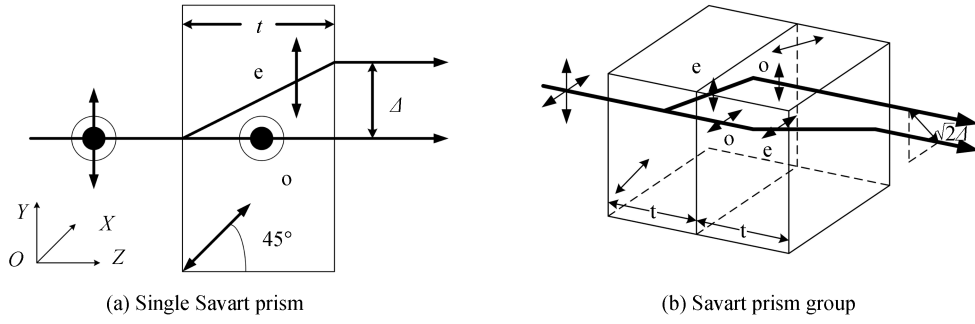


图2 Savart棱镜工作原理
Fig.2 Schematic diagram of Savart prism

像面上的光强分布经过推导可以表示为^[11]

$$I(x, y) = \left\langle \left| \frac{1}{2} E_x(x, y) e^{i\varphi_1} - \frac{1}{2} E_x(x, y) e^{i\varphi_2} + \frac{1}{2} E_y(x, y) e^{i\varphi_3} + \frac{1}{2} E_y(x, y) e^{i\varphi_4} \right|^2 \right\rangle \quad (1)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均值, E_x, E_y 为电场强度, (x, y) 为像面坐标, $\varphi_1 \sim \varphi_4$ 为分裂四束光线经过调制后相位的变化. 全斯托克斯参量和电场强度之间的关系为

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

因此强度信息 $I(x, y)$ 由非偏分量 (S_0)、线偏分量 (S_1, S_2) 与圆偏分量 (S_3) 调制叠加而成^[15], 即

$$I(x, y) = \frac{1}{2} S_0(x, y) + \frac{1}{2} S_1(x, y) \cos [2\pi\Omega(x + y)] + \frac{1}{4} S_2(x, y) \{ \cos [2\pi(2\Omega)x] - \cos [2\pi(2\Omega)y] \} + \frac{1}{4} S_3(x, y) \{ \sin [2\pi(2\Omega)x] + \sin [2\pi(2\Omega)y] \} \quad (3)$$

式中, $\Omega = \Delta / (\lambda f)$, Ω 为空间载波频率, f 为成像透镜的后焦距, λ 为入射光的中心波长. 空域上互相叠加的全偏振分量 (S_0, S_1, S_2, S_3) 通过干涉分别被调制在不同的载波频率上, 因此经过二维傅里叶变换后, 全偏振分量的频谱信息能够在频域上实现分离, 即

$$F[I(x, y)] = \frac{1}{2} F_0(u, v) + \frac{1}{4} [F_1(u - a, v - a) + F_1(u + a, v + a)] + \frac{1}{8} [F_{23}^*(u - 2a, v) + F_{23}(u + 2a, v)] - \frac{1}{8} [F_{23}^*(u, v + 2a) - F_{23}(u, v - 2a)] \quad (4)$$

式中, u, v 为频域坐标, 频域位移大小 $a = \Omega \cdot D \cdot N$, D 为 CCD 像元尺寸, N 为采样数. 由式(3)得到的调制干涉图经过二维傅里叶变换后得到式(4)的频谱, 分布如图3所示. 频谱图上出现7个频点, 其中 $F_0, F_1, F_{23}, F_{23}^*$ (F_{23} 为复数, 其中实部为 S_2 对应的频谱分量, 虚部为 S_3 对应的频谱分量) 分别表示全偏振分量在频域上对应的值及位置.

通过设置合理的二维低通滤波器, 对不同频点分别进行频域滤波, 获取全偏振分量分别对应的频谱, 再进行二维傅里叶逆变换, 从而重构出完整的全偏振分量. 就单个通道而言, 频谱分布特性表现为两个方向上 sinc 函数旁瓣的延展与叠加. 由于 sinc 函数旁瓣造成能量扩散, 直接通过二维低通滤波器进行滤波获取全偏振分量必然造成频谱信息的泄露

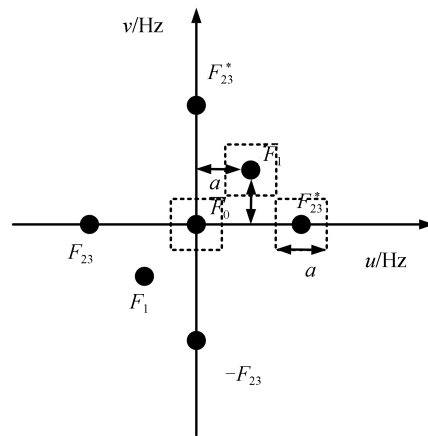


图3 调制频谱示意图
Fig.3 Schematic image of modulation spectrum

以及不同通道间频谱信息的串扰,从而导致复原图像细节的丢失以及伪信息的出现.点扩散函数在 f_x 和 f_y 两个方向上的延展与叠加对每个频谱通道的影响可以描述为

$$\begin{aligned}
 F[I(x, y)] = & \frac{1}{2} S_0 N^2 \text{sinc}(Nf_x) \text{sinc}(Nf_y) + \frac{1}{4} S_1 N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x - \Omega)] \text{sinc}[N(f_y - \Omega)] \right\} + \\
 & \frac{1}{4} S_1 N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x + \Omega)] \text{sinc}[N(f_y + \Omega)] \right\} + \frac{1}{8} S_{23} N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x + 2\Omega)] \text{sinc}(Nf_y) \right\} - \\
 & \frac{1}{8} S_{23} N^2 \left\{ \text{sinc}(Nf_x) \text{sinc}[N(f_y - 2\Omega)] \right\} + \frac{1}{8} S_{23}^* N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x - 2\Omega)] \text{sinc}(Nf_y) \right\} - \\
 & \frac{1}{8} S_{23}^* N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x)] \text{sinc}[N(f_y + 2\Omega)] \right\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

式中, f_x 和 f_y 分别为 x 、 y 方向上的方向余弦.

对旁瓣进行抑制的常用方法是通过设置一个逐渐变化的权重函数与干涉图频谱相乘,不同的频率分量对应的权重函数用 $W(u, v)$ 表示.由于权重函数对点扩散函数旁瓣进行抑制的作用相当于切掉“脚趾”,因此也称为切趾函数.通过选用合理的切趾函数能够有效抑制或者消除旁瓣在滤波复原过程中造成的伪信息,同时降低多个点扩散函数之间信号串扰的影响.式(6)描述了每个频谱通道加上与频谱特性匹配的窗函数,对点扩散效应带来的影响进行抑制的过程.

$$\begin{aligned}
 F[I(x, y)] = & \frac{1}{2} S_0 N^2 \text{sinc}(Nf_x) \text{sinc}(Nf_y) W(Nf_x, Nf_y) + \\
 & \frac{1}{4} S_1 N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x - \Omega)] \text{sinc}[N(f_y - \Omega)] W[N(f_x - \Omega), N(f_y - \Omega)] \right\} + \\
 & \frac{1}{4} S_1 N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x + \Omega)] \text{sinc}[N(f_y + \Omega)] W[N(f_x + \Omega), N(f_y + \Omega)] \right\} + \\
 & \frac{1}{8} S_{23} N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x + 2\Omega)] \text{sinc}(Nf_y) W[N(f_x + 2\Omega), Nf_y] \right\} - \\
 & \frac{1}{8} S_{23} N^2 \left\{ \text{sinc}(Nf_x) \text{sinc}[N(f_y - 2\Omega)] W[Nf_x, N(f_y - 2\Omega)] \right\} + \\
 & \frac{1}{8} S_{23}^* N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x - 2\Omega)] \text{sinc}(Nf_y) W[N(f_x - 2\Omega), Nf_y] \right\} - \\
 & \frac{1}{8} S_{23}^* N^2 \left\{ \text{sinc}[N(f_x)] \text{sinc}[N(f_y + 2\Omega)] W[Nf_x, N(f_y + 2\Omega)] \right\}
 \end{aligned} \tag{6}$$

2 贝塞尔修正的方向选择性二维汉宁切趾优化解调算法

2.1 算法原理

传统汉宁窗能量主要集中在主瓣内,减小频谱泄露^[17-18].但是汉宁窗函数的性能与空间调制型全偏振成像系统频谱特性不能进行匹配,使用汉宁窗函数对于干涉信号的频谱进行切趾时,不能够有效抑制不同通道之间旁瓣能量泄露导致的互相串扰影响.同时通过图3干涉图像的频谱特性可以分析得出,频点之间的距离越近,造成串扰的可能就越大,如 F_0 和 F_1 间隔为 $\sqrt{2}a$, F_0 和 F_{23} 间隔为 $2a$,在滤波过程中 F_1 对 F_0 复原 S_0 分量会增加伪信息,且 F_0 和 F_1 、 F_1 和 F_{23} 位置相对于坐标轴处于对角线上.

针对频谱的滤波特性和频点的位置分布特性,提出改进的切趾函数,其时域特性 $w(x, y)$ 表示为

$$w(x, y) = \text{Hanning}(x, y) \times q(x, y) \tag{7}$$

式中, $q(x, y)$ 是一组采样点数为 (x, y) 的权重系数, $\text{Hanning}(x, y)$ 是汉宁窗函数的离散形式,其表达式为

$$\text{Hanning}(x, y) = 0.5 + 0.5 \cos \left[\frac{2\pi(x+y)}{N} \right] \tag{8}$$

通过第一类修正的二维四阶贝塞尔函数设计权重 $q(x, y)$ 表示为

$$q(x,y) = \frac{I_4 \left[2 \sqrt{1 - \frac{2(x+y)}{N-1}} \right]}{I(2)} \quad 0 \leq x, y \leq N-1 \quad (9)$$

式中, $I(2)$ 表示二维的四阶贝赛尔函数, (x, y) 表示窗函数的采样点序列.

从一维角度对改进的切趾函数进行定量分析, 如图4所示. 在时域上, 通过加权后的汉宁窗函数向内收缩, 尤其越靠近窗口边缘收缩越明显. 在频域上, 主瓣宽度由 0.055π 增加到 0.065π , 小于同等条件下布莱克曼窗的主瓣宽度 0.068π , 旁瓣衰减由 -72.5 dB 增加到 -85.39 dB , 因此在保证频率分辨率的同时, 频谱泄露的抑制作用增强, 对谱间串扰也有良好的抑制作用.

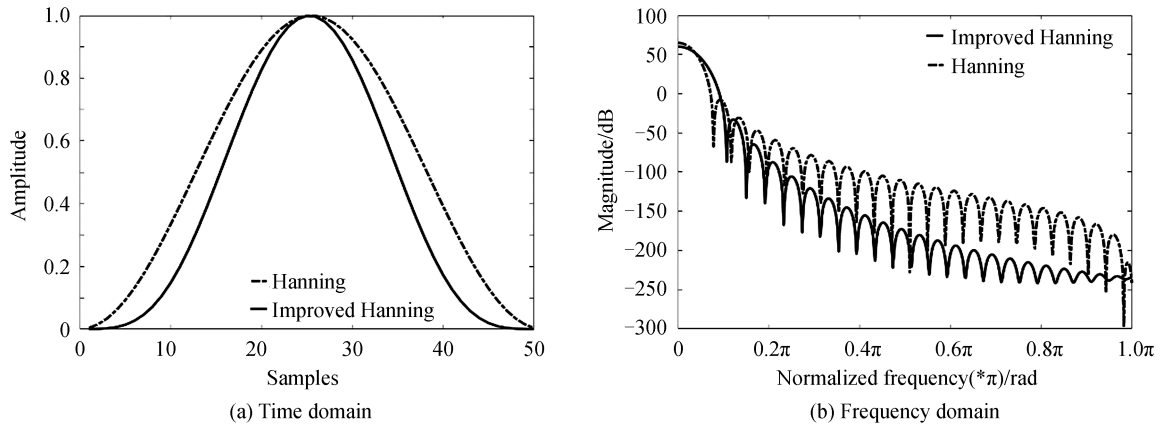


图4 时频域分析
Fig.4 Time-frequency domain analysis

三角窗、矩形窗、凯塞窗、汉明窗、布莱克曼窗、汉宁窗等是实际应用中常用的切趾函数. 对比分析了常用的切趾函数与改进的切趾函数, 切趾函数窗口大小与系统载波频率相匹配的窗函数的性能分析如图5及表1所示. 可以看出, 优化后的汉宁窗旁瓣衰减为 -85.39 dB , 比传统的汉宁窗函数提升了 12.89 dB , 有较高的幅值识别精度; 且主瓣宽度优于布莱克曼窗, 因此频率分辨率得到了保证. 同时, 和凯瑟窗函数相比, 优化后的汉宁窗在保证主瓣宽度的前提下, 对高频部分信息抑制作用较好, 符合该系统的切趾需求.

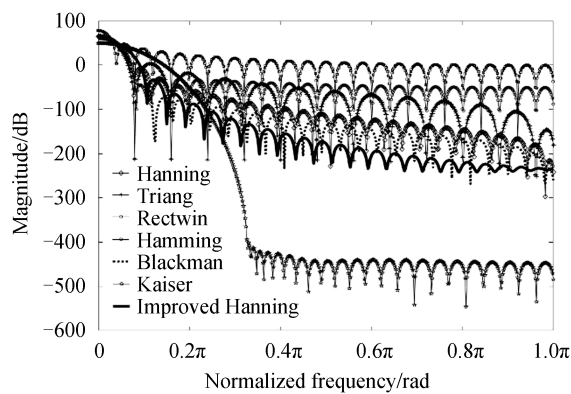


图5 常用切趾函数的频谱
Fig.5 The spectrum of different apodization functions

表 1 不同切趾函数的的主瓣宽度与旁瓣相对衰减

Table 1 The mainlobe width and relative sidelobe attenuation of different apodization function

Apodization function	Relative sidelobe attenuation/dB	Mainlobe width
Kaiser ($\beta=25$)	-207.71	0.114π
Rectangular	-30.52	0.032π
Hamming	-110.33	0.053π
Blackman	-133.81	0.068π
Triang	-61.42	0.049π
Hanning	-72.50	0.055π
Improved Hanning	-85.39	0.065π

从二维角度对改进的切趾函数进行定性分析,如图6所示,可以看出,该切趾函数在箭头所示的对角线方向对频谱的抑制作用明显,对应了临近频点的方向.而沿 u 、 v 轴也有较快的衰减,因此具有良好的方向选择特性.

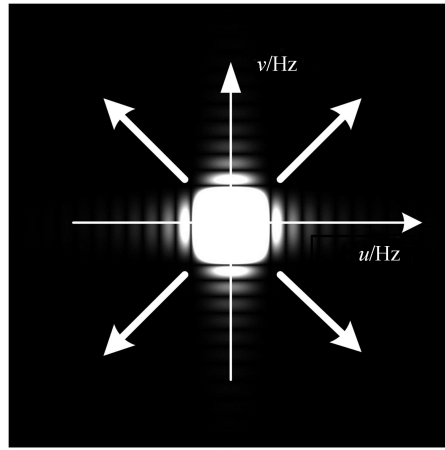


图 6 贝塞尔修正的方向选择性二维汉宁切趾函数示意图

Fig.6 Schematic diagram of direction selective 2-D Hanning apodization function modified by Bessel

2.2 基于琼斯矩阵的空间调制型全偏振成像系统仿真设计和分析

光波在传输过程中不仅包括强度信息,还包括相位信息.全斯托克斯参量的四个参数都为实数,只能表示彼此独立光束的标量叠加.光束经过双折射晶体进行相位调制、光线分裂、叠加以后,相位差会产生干涉项,虽然琼斯矢量和琼斯矩阵相比米勒矩阵含有的元素更少,但是在描述光波复振幅叠加的干涉过程中更为适用.

设系统的入射光波用琼斯矩阵表示为 $J_{in}(x, y) = [E_x(x, y), E_y(x, y)]^T$, 经过空间调制型全偏振成像系统出射光波的琼斯矩阵表示为 $J_{out}(x, y) = [E'_x(x, y), E'_y(x, y)]^T$, 检偏器 LP 的琼斯矩阵为 J_{LP} , 半波片 HWP 的琼斯矩阵为 J_{HWP} , 从入射到出射单个 Savart 棱镜琼斯矩阵依次为 J_{S1} 、 J_{S2} 、 J_{S3} 、 J_{S4} , 可以得到空间调制模块的琼斯表达式 J_{SP}

$$J_{SP}(x, y) = \begin{pmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{pmatrix} = J_{LP} J_{S4} J_{S3} J_{HWP} J_{S2} J_{S1} \quad (10)$$

因此系统对光波的调制过程可以表示为

$$\begin{pmatrix} E'_x(x, y) \\ E'_y(x, y) \end{pmatrix} = J_{SP}(x, y) \begin{pmatrix} E_x(x, y) \\ E_y(x, y) \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中,半波片 J_{HWP} 的琼斯矩阵为

$$J_{HWP}[\delta'(x, y), \theta'] = \begin{pmatrix} \cos^2\theta' + \sin^2\theta'e^{i\delta'} & \frac{1}{2}\sin^2\theta'(1 - e^{i\delta'}) \\ \frac{1}{2}\sin^2\theta'(1 - e^{i\delta'}) & \sin^2\theta' + \cos^2\theta'e^{i\delta'} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中,半波片 $\delta' = \pi$, 该系统中波片快轴相对于 x 轴的夹角为 22.5° .

检偏器的 J_{LP} 的琼斯矩阵为

$$J_{LP}[\theta''(x, y)] = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta'' & \frac{1}{2} \sin 2\theta'' \\ \frac{1}{2} \sin 2\theta'' & \sin^2 \theta'' \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中,检偏振器透光轴方向相对于 x 轴的夹角 θ'' 为 45° .

以双折射晶体为材料的 Savart 棱镜的琼斯矩阵为

$$J_S[\delta(x, y), \alpha] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha \exp(i\delta_e) + \sin^2 \alpha \exp(i\delta_o) & \sin \alpha \cos \alpha [\exp(i\delta_e) - \exp(i\delta_o)] \\ \sin \alpha \cos \alpha [\exp(i\delta_e) - \exp(i\delta_o)] & \sin^2 \alpha \exp(i\delta_e) + \cos^2 \alpha \exp(i\delta_o) \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式(14)变形为

$$J_S[\delta(x, y), \alpha] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha \exp[i(\delta_e - \delta_o)] + \sin^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \{ \exp[i(\delta_e - \delta_o)] - 1 \} \\ \sin \alpha \cos \alpha \{ \exp[i(\delta_e - \delta_o)] - 1 \} & \sin^2 \alpha \exp[i(\delta_e - \delta_o)] + \cos^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, α 为入射平面和光轴定义的平面之间的夹角,且不同的 Savart 棱镜有不同的光轴取向关系. $\delta = \delta_e - \delta_o$ 为 e 光和 o 光通过 Savart 棱镜时的相位差. 单位厚度的双折射晶体产生的相位差为

$$\Delta(\theta, \omega, \epsilon, \sigma) = \Delta_e - \Delta_o = \frac{1}{C} - \frac{1}{b} + \frac{(a^2 - b^2) \sin \epsilon \cos \epsilon \cos \omega}{C^2} \sin \theta + \frac{\sin^2 \theta}{2} \left[\left(b - \frac{a^2}{C} \right) \sin^2 \omega + \left(b - \frac{a^2 b^2}{C^3} \right) \cos^2 \omega \right] \quad (16)$$

式中, θ 为光线入射角, ω 表示双折射晶体主截面与光线入射平面的夹角, ϵ 表示双折射晶体晶面法线与光轴的夹角, a, b, C 与双折射晶体 n_o, n_e 有关^[19]. 因此单个 Savart 棱镜上任意一点产生的相位差为

$$\delta(x, y, \sigma) = (2\pi/\lambda) \cdot t \cdot \Delta(x, y, \sigma) \quad (17)$$

式中, σ 为波数, $\lambda = 670 \text{ nm}$ 为入射光的中心波长, $t = 6 \text{ mm}$ 为单个 Savart 棱镜的厚度.

经空间调制型全偏振成像系统调制后出射的光强表达式为

$$I(x, y) = |E'_x(x, y)|^2 + |E'_y(x, y)|^2 \quad (18)$$

为了验证改进的切趾函数对提高解调精度的可行性和有效性,通过 MATLAB 软件对上述空间调制型全偏振成像系统的成像过程进行仿真. 设置参数:入射光中心波长为 670 nm , Savart 单板的厚度为 6 mm , 对 o 光折射率为 $n_o = 1.652$, 对 e 光折射率为 $n_e = 1.484$; CCD 探测器的分辨率为 1024×1024 , 像元尺寸为 $12 \mu\text{m}$, 后焦距为 165.8 mm ; 输入琼斯矩阵表示的偏振态 $[1, 0]^T$, 那么全偏振分量可以通过图 7 表示, 其中 S_0, S_1, S_2, S_3 中的圆形白色区域表示归一化强度值为 1, 黑色区域表示归一化强度值为 0.

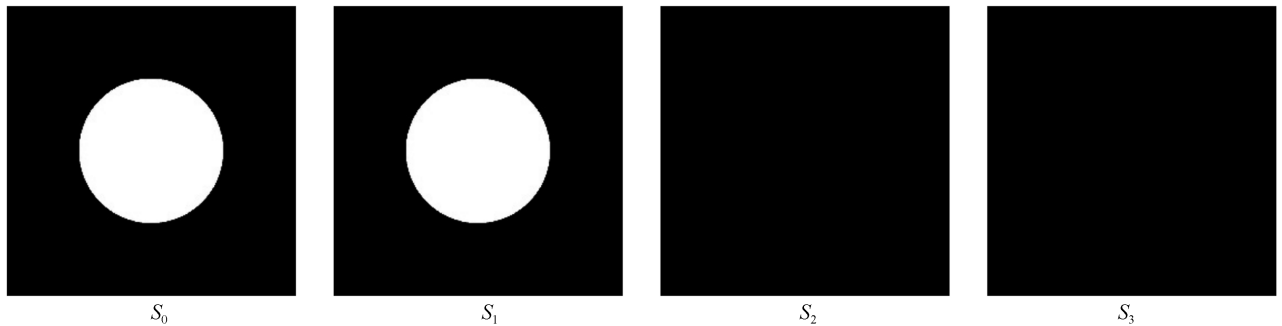


图7 输入偏振态
Fig.7 Input polarization state

入射偏振光经过空间调制型全偏振成像系统后的仿真干涉图如图8所示.

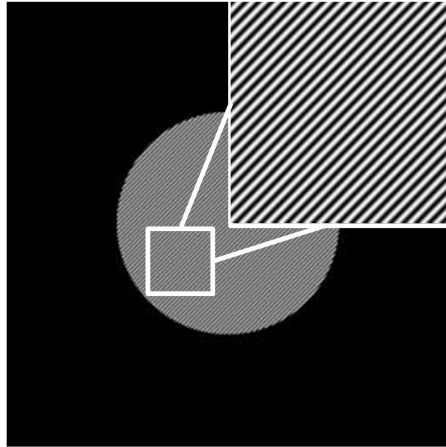


图8 仿真干涉图像

Fig.8 Simulated interference image

对得到的仿真干涉图像在频域上进行全偏振分量的解调,设置对频谱信号进行切趾的窗函数为无窗函数、改进的切趾函数;然后对解调得到的全偏振分量精度进行对比分析,结果如图9和10所示,可以看出:传统解调算法解调的全斯托克斯参量中 S_0 和 S_1 分量边缘有明显的模糊现象,说明损失了部分高频信息, S_2 和 S_3 出现白色边缘,内部灰度分布明显不均匀,说明 S_0 和 S_1 对应的频点对 S_2 和 S_3 产生了串扰.而经过改进的切趾函数优化后的算法解调使 S_2 和 S_3 内部的灰度不均匀性得到了明显的改善.

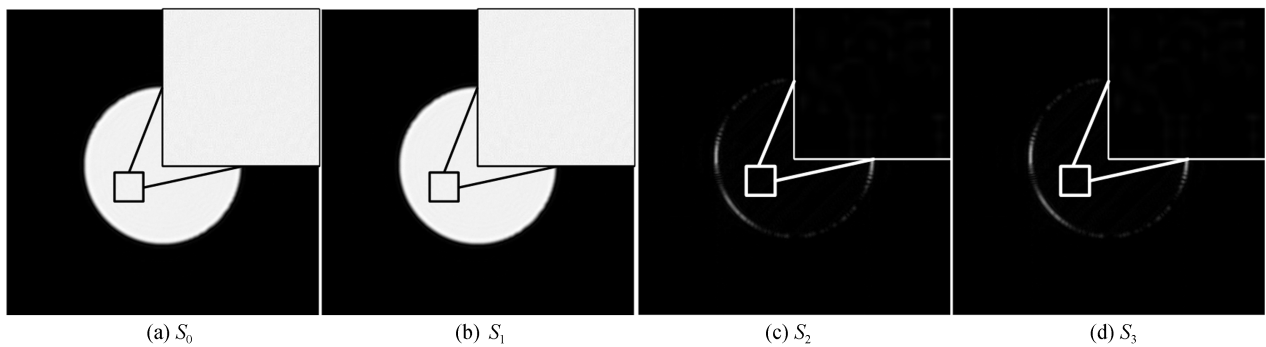


图9 仿真干涉图像传统解调算法得到的全偏振分量

Fig.9 The full polarization component obtained by traditional demodulation algorithm of simulated interference image

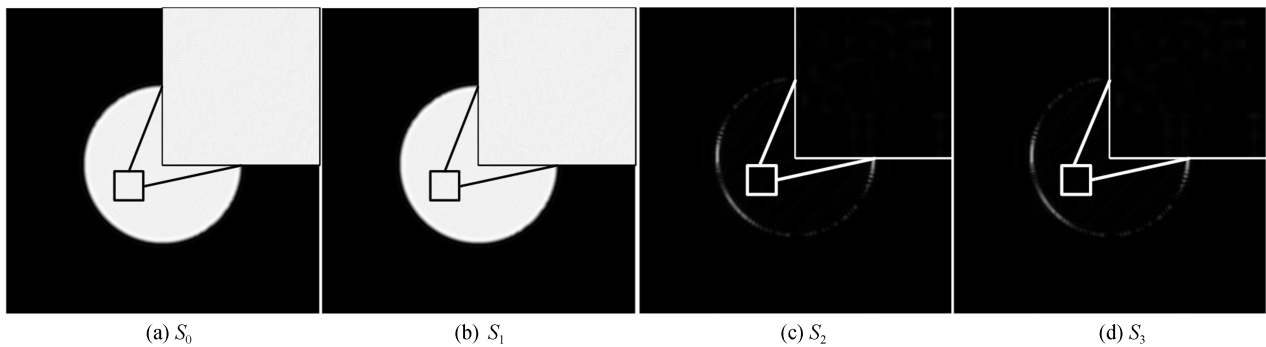


图10 仿真干涉图像优化解调算法得到的全偏振分量

Fig.10 The full polarization component obtained by optimized demodulation algorithm for simulated interference

3 实验研究与结果分析

空间调制型全偏振成像系统如图 11(a)所示.首先在暗环境条件下进行 10 次图像采集取得平均值后获得基底噪声,以平行光管为纯光源,调整线偏振片 1 至 0° (输入归一化偏振态为 $[1,0]^T$),采集 10 幅经过空间调制后的干涉图求平均值,进行基底噪声的去除后得到有效干涉图如图 11(b)所示,通过局部放大可以看出有明显的干涉条纹出现.

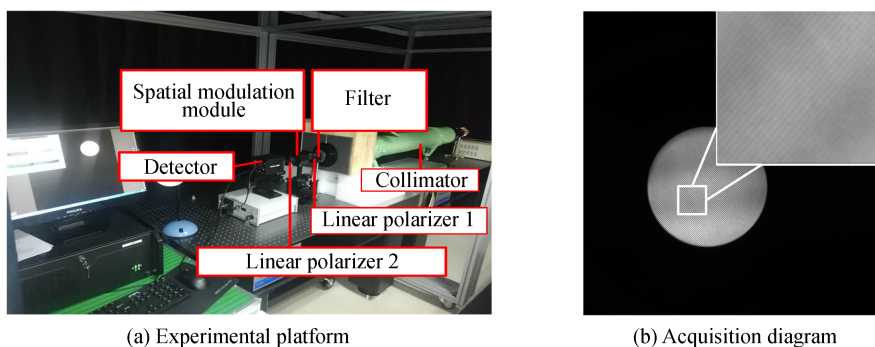


图 11 实验过程

Fig.11 Experimental process

由传统解调算法和经过改进的切趾函数优化的算法对干涉图像进行全偏振分量解调,结果分别如图 12 和 13 所示,结合图 7 对比分析可以看出:理论上输入线偏振光中不存在的 S_2 、 S_3 分量在优化后的解调算法中明显降低.说明优化解调算法在保证目标解调准确性的同时,对谱间信号的串扰有良好的抑制作用.

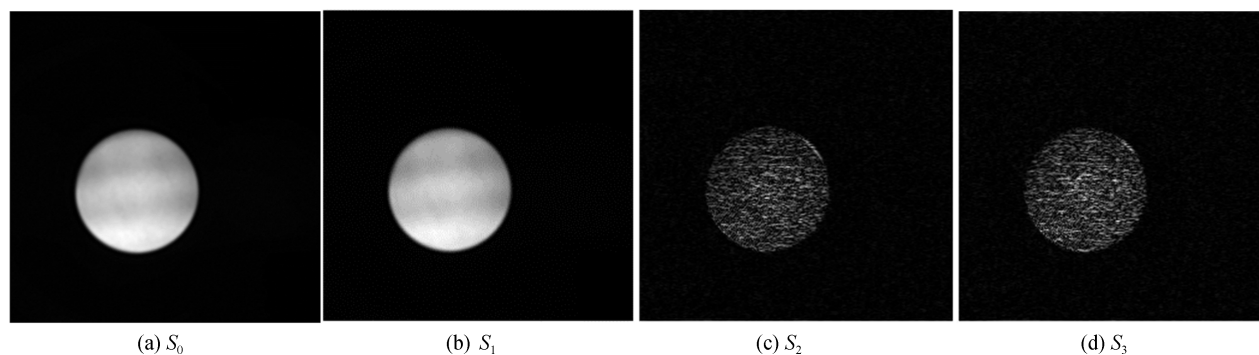


图 12 实验干涉图像传统解调算法得到的全偏振分量

Fig.12 The full polarization component obtained by experimental interference image traditional demodulation algorithm

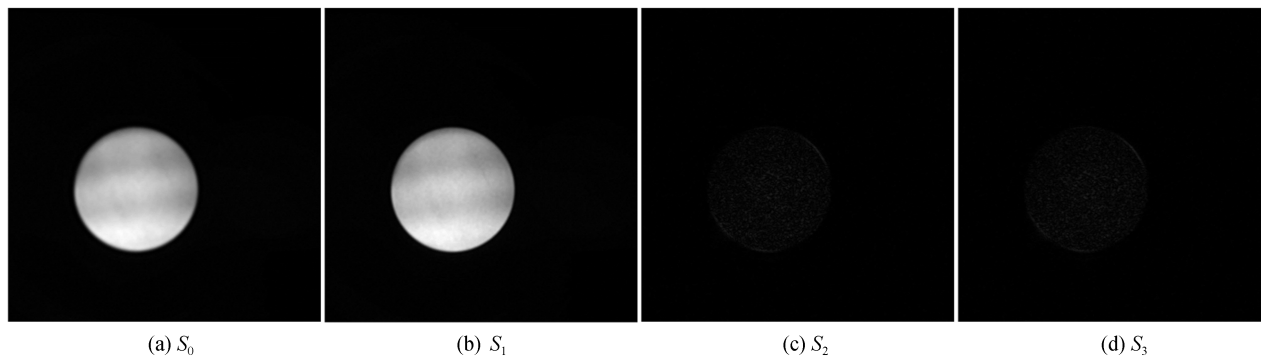


图 13 实验干涉图像优化解调算法得到的全偏振分量

Fig.13 The full polarization component obtained by experimental interferogram optimization demodulation algorithm

对解调干涉图像的全偏振分量(S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3)精度进行对比分析,结果见表2.可以看出,经过改进的切趾函数优化的解调算法全偏振分量解调精度平均提高了9.48%,验证了优化解调算法的有效性.

表2 全偏振分量解调精度比较
Table 2 Comparison of full polarization component demodulation accuracy

	S_0	S_1	S_2	S_3
Theoretical value	1	1	0	0
Traditional algorithm	0.919 6	0.880 5	0.159 6	0.136 5
Optimization	0.982 4	0.943 5	0.019 2	0.033 4
Promoted	6.9%	6.3%	14.04%	10.31%

4 结论

分析了空间调制型全偏振成像系统的频谱特性和谱间串扰对解调精度的影响;在此基础上,提出了针对该系统频谱特性的贝塞尔修正的方向选择性二维汉宁切趾函数优化算法,与其他常用切趾函数的特性进行了对比分析,验证了优化解调算法的有效性.搭建了基于琼斯矩阵的系统成像仿真平台,并进行了实验验证分析.结果证明优化后的解调算法对全偏振分量的复原精度平均提高了9.48%,有效提高空间调制型全偏振成像系统解调算法的精度.研究结果可为基于空间调制体制的全偏振成像系统的解调算法深入研究提供参考.

参考文献

- [1] WENG Jian-wen, YUAN Yin-lin, KANG Qing, *et al.* Smearing correction method for solar flare area in remote sensing image of multi-angle polarization imager[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(2): 0228002.
翁建文,袁银麟,康晴,等.多角度偏振成像仪遥感图像太阳耀斑区的拖尾校正方法[J].光子学报,2020,**49**(2): 0228002.
- [2] LI Song, ZHANG Ran, CHEN Yong-tai, *et al.* Research on the calibration method of amplitude polarization imaging camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(7): 0711001.
李松,张然,陈永台,等.分振幅偏振成像相机标定方法研究[J].光子学报,2020,**49**(7):0711001.
- [3] YAN Yu, XU Xiao-hong, FAN Zhi-guo, *et al.* Calibration method for micro-polarizer array type long-wave infrared imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(6): 0611004.
闫羽,徐小红,范之国,等.微偏振片阵列型长波红外成像系统定标方法[J].光子学报,2019,**48**(6):0611004.
- [4] YIN Yu-long, SUN Xiao-bing, SONG Mao-xin, *et al.* Analysis and optimization of the error of the fast axis adjustment of the wave plate in the four-split full Stokes simultaneous polarization imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(1): 0112002.
殷玉龙,孙晓兵,宋茂新,等.四分束全Stokes同时偏振成像系统波片快轴装调误差的分析及优化[J].光学学报,2019,**39**(1):0112002.
- [5] QUAN Nai-cheng, ZHANG Chun-min, LI Qi-wei, *et al.* Full linearly stokes interference imaging spectropolarimeter based on channeled polarimetric technique with high optical throughput[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **110**: 141-148.
- [6] AI Jing-jing, GAO Peng, CHEN Qing-ying, *et al.* Image quality and spectral performance evaluations of a polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(21):5933-5938.
- [7] LI Zhi-wei, SHI Hai-liang, LUO Hai-yan, *et al.* Study on the relationship between apodization function and signal-to-noise ratio of hyperspectral spatial interference data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, **40**(1): 29-33.
李志伟,施海亮,罗海燕,等.超光谱空间干涉数据切趾函数与信噪比关系研究[J].光谱学与光谱分析,2020,**40**(1): 29-33.
- [8] NAYLOR D A, TAHIC M K. Apodizing functions for Fourier transform spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, **24**(11): 3644-3648.
- [9] DENG Jing-lan, TONG Jing-jing, GAO Min-guang, *et al.* Triangular window apodization function weighted based on zero-order Bessel function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(3): 0307001.
邓竞蓝,童晶晶,高闽光,等.基于零阶贝塞尔函数加权的三角窗切趾函数[J].光学学报,2020,**40**(3):0307001.
- [10] YE Song, YAN Hao-fang, SUN Xiao-bing, *et al.* Modification of image demodulation algorithm for spatial modulation full polarization imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(6): 0607001.
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.
- [11] ZHANG Ning, ZHU Jing-ping, ZHANG Yun-yao, *et al.* Broadband snapshot polarimetric imaging based on dispersion-compensated Savart plates[J]. *Optics Communications*, 2020, **457**: 124607.

- [12] CAO Qi-zhi, ZHANG Jing, EDWARD D H, *et al.* Demonstration of snapshot imaging polarimeter using modified Savart polariscopes[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2016, **55**(5): 954-959.
- [13] EDWARD D H, LUO Hai-tao, OKA K, *et al.* Snapshot polarimeter fundus camera.[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(9): 1663-1667.
- [14] CAO Qi-zhi, ZHANG Jing, EDWARD D H, *et al.* Research on steady state micro-snap imaging deviation measurement technology of spatial modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(5): 31-42.
曹奇志,张晶,EDWARD D H,等.空间调制稳态微型快拍成像测偏技术研究[J].物理学报,2016,**65**(5):31-42.
- [15] OKA K, SAITO N. Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates [C]. International Society for Optical Engineering, 2006: 629508.
- [16] LIU Zhen, HONG Jin, GONG Guan-yuan, *et al.* Angular error optimization of spatially modulated full-polarization imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(1): 169-175.
刘震,洪津,龚冠源,等.空间调制型全偏振成像系统的角度误差优化[J].红外与激光工程,2017,**46**(1):169-175.
- [17] TAN Jian, WEN Bi-yang, TIAN Ying-wei, *et al.* Frequency convolution for implementing window functions in spectral analysis[J]. *Circuits Systems and Signal Processing*, 2017, **36**(5): 2198-2208.
- [18] ZHOU Lei, LI Zheng-ying, XIANG Na, *et al.* High-speed demodulation of weak fiber Bragg gratings based on microwave photonics and chromatic dispersion[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(11): 2430-2433.
- [19] LIU Jie, LI Jian-xin, BAI Cai-xun, *et al.* Theory and method of Fourier transform hyperspectral Mueller matrix imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(7): 0711004.
刘杰,李建欣,柏财勋,等.傅里叶变换高光谱Mueller矩阵成像理论与方法[J].光学学报,2020,**40**(7):0711004.