

基于强度调制的编码孔径光谱偏振测量方法

乔亚^{1,3}, 张瑞^{2,3}, 景宁^{2,3}, 李金瑜^{2,3}, 王志斌^{*1,3}

(1. 中北大学理学院, 山西太原 030051; 2. 中北大学信息与通信工程学院, 山西太原 030051;
3. 中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西太原 030051)

摘要: 为实现在单次成像条件下获取图像的光谱偏振信息, 提出了一种基于强度调制的编码孔径测量方法。该方法采用消色差 1/4 波片、多级相位延迟器和检偏器组成的光谱偏振强度调制模块, 将入射光的 Stokes 参量各元素谱调制到不同的频率上, 利用编码孔径和色散棱镜组成的光谱成像系统对该调制光谱进行压缩编码, 并通过 CCD 进行探测。利用 TwIST 算法重构出经调制的光谱信息, 对各个频谱通道进行分离重构出 Stokes 元素谱。以单一像素点为例, 对入射光强度调制、光谱重构及 Stokes 参量的解调进行了数值模拟。结果表明: 该方法可实现对稀疏图像的光谱偏振信息的获取, 该过程仅需对图像进行一次测量, 因此具备高速获取能力。

关键词: Stokes 参量; 强度调制; 编码孔径

中图分类号: O433.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0317003

Spectral polarization measurement method of coded aperture based on intensity modulation

Qiao Ya^{1,3}, Zhang Rui^{2,3}, Jing Ning^{2,3}, Li Jinyu^{2,3}, Wang Zhibin^{*1,3}

(1. College of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to acquire spectral polarization information of the image under single-frame imaging conditions, an encoding aperture measurement method based on intensity modulation was proposed. The method used the spectral polarization intensity modulation module composed of an achromatic 1/4 wave plate, a multistage phase retarder and an analyzer, and modulated the spectrum of each element of the Stokes parameters of the incident light to different frequencies. And the modulated spectrum was compressed and coded by a spectral imaging system composed of coded aperture and dispersive prism, and was detected by CCD. The modulated spectral information was reconstructed using the TwIST algorithm, and then the spectrum of Stokes elements can be reconstructed by further separating the spectrum channels. Taking a single pixel as an example, the modulation of incident light intensity modulation, spectral reconstruction, and demodulation of Stokes parameters were simulated numerically.

收稿日期: 2018-11-05; 修订日期: 2018-12-15

基金项目: 国际科技合作项目(2013DFR10150); 山西省应用基础研究项目(201701D221126)

作者简介: 乔亚(1992-), 女, 硕士生, 主要从事光谱成像方面的研究。Email: 787734593@qq.com

通讯作者: 王志斌(1966-), 男, 教授, 硕士, 主要从事光电探测方面的研究。Email: wangzhibin@nuc.edu.cn

The results show that this method can achieve the acquisition of spectral polarization information of sparse images. This process requires only one measurement of the image and therefore has a high-speed acquisition capability.

Key words: Stokes parameters; intensity modulation; coded aperture

0 引言

光的偏振和频谱特征包含探测目标的重要信息,对其进行分析可实现地球环境监测、大气气溶胶监测^[1]、目标探测与识别、材料特性分析以及生物医学检测等领域^[2]。因此,实现对被测目标的高效、高速的光谱偏振测量具有重要的科学研究价值,成为了热门的研究目标之一。

目前,对光谱偏振测量的方法主要基于强度调制光谱偏振技术,该技术是由日本学者 Oka 等^[3]提出的一种能够同时获得目标全 Stokes 偏振参量的光谱偏振测量技术^[4],该方法中,将被探测光谱在频域上进行强度调制,后经傅里叶变换光谱仪^[5]、沃拉斯顿棱镜^[6]、弹光调制器^[7]等光谱分析设备对光谱偏振信息进行重建。解决了传统偏振参量测量需多次测量的问题,实现光谱偏振快速测量,但在多点或图像目标的光谱偏振测量中仍需进行多次扫描。

为实现单次测量获取图像的光谱信息,美国 Duke 大学的 A.Wagadarikar 等^[8]将压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论(即利用高维空间目标投影到低维空间的降维信息可重构出原目标)运用在光谱成像技术中,并设计了编码孔径快照光谱成像仪(Coded

Aperture Snapshot Spectral Imager, CASSI)^[9-10], 该技术采用编码孔径、色散棱镜替代光谱分析设备,将具有三维信息的光谱图像数据经压缩编码降为二维,利用 TwIST 算法重构出被测目标光谱图像数据立方体,可在单次成像中获得图像的光谱信息。该光谱获取过程无需进行扫描,也解决了信息丢失锥体问题。文中在编码孔径快照光谱成像系统前对入射光预先进行偏振强度调制,即对偏振强度调制光谱进行压缩编码,利用探测器 CCD 获得的二维图像信息,并经 TwIST 算法重构,可实现光谱偏振图像四维信息的获取。

1 基于强度调制的编码孔径光谱偏振成像测量

基于强度调制的编码孔径快照光谱偏振成像测量系统是通过在编码孔径快照光谱成像仪物镜前端的准直光路中增加光谱偏振强度调制模块来实现的,其结构如图 1 所示,其中光谱偏振强度调制模块由消色差 1/4 波片 R_1 、多级相位延迟器 R_2 以及线偏振器 P 组成;编码孔径快照光谱成像模块由编码孔径、中继透镜、双 Amici 色散棱镜以及 CCD 探测器组成。入射光经过强度调制模块后,其 Stokes 参量各

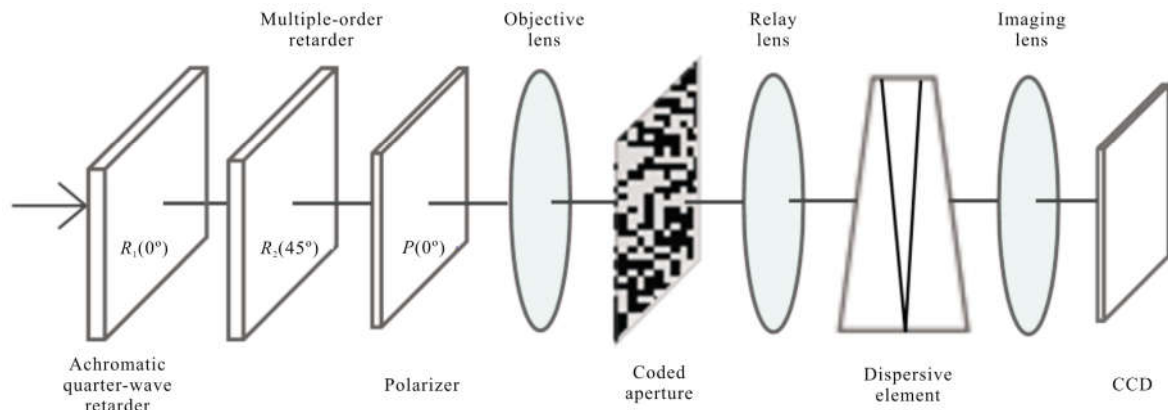


图 1 强度调制的编码孔径光谱偏振测量系统结构示意图

Fig.1 Construction of coded aperture spectral polarization measurement system based on intensity modulation

元素被调制到不同的频率上,再经编码孔径快照光谱成像系统进行压缩编码,使得偏振强度调制光谱降维,并被 CCD 探测,利用压缩感知 TwIST 重构算法得到复原光谱,再经强度解调算法便可得到被测目标 Stokes 参量元素谱。

1.1 光谱偏振强度调制

光谱偏振强度调制主要包括消色差 1/4 波片 R_1 、相位延迟器 R_2 和线偏振分析器 P ,其中 R_1 快轴方向与 P 透光轴方向平行, R_2 快轴方向与 R_1 快轴方向成 45° 角。入射光依次被 R_1 、 R_2 和 P 强度调制后的 Stokes 参量为:

$$\begin{bmatrix} I'(\sigma) \\ Q'(\sigma) \\ U'(\sigma) \\ V'(\sigma) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi(\sigma) & 0 & -\sin\varphi(\sigma) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin\varphi(\sigma) & 0 & \cos\varphi(\sigma) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I(\sigma) \\ Q(\sigma) \\ U(\sigma) \\ V(\sigma) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:等号左边是输出光的 Stokes 参量,等号右边依次为: P 、 R_2 、 R_1 的穆勒矩阵和输入光的 Stokes 参量。其中 $\varphi(\sigma)$ 表示入射光经过 R_2 的相位延迟量, I 、 Q 、 U 和 V 与入射光强度相关,且都是波数 σ 的函数,其相位延迟量为:

$$\varphi(\sigma) = 2\pi d \Delta n \sigma \quad (2)$$

式中: d 和 Δn 分别表示 R_2 的厚度和双折射率。

探测器获取到的光强为 Stokes 参量中的 $I'(\sigma)$ (即偏振强度调制输出光谱)。所以输出光谱可表示为:

$$I'(\sigma) = \frac{1}{2} [I(\sigma) + Q(\sigma)\cos\varphi(\sigma) + U(\sigma)\sin\varphi(\sigma)] \quad (3)$$

利用欧拉公式,公式(3)可以改写为:

$$I'(\sigma) = \frac{1}{2} I(\sigma) + \frac{1}{4} [Q(\sigma) - iU(\sigma)] e^{i\varphi(\sigma)} + \frac{1}{4} [Q(\sigma) + iU(\sigma)] e^{-i\varphi(\sigma)} \quad (4)$$

从公式(4)可以看出,偏振强度调制输出光谱是相位延迟量 $0, \pm\varphi(\sigma)$ 所决定的三个频率分量的组合。通过合理选择相位延迟量 $\varphi(\sigma)$,可避免三个频率分量重叠。

仿真过程输入光的 Stokes 参量各元素谱如图 2 所示,波数范围为 $15385 \sim 22220 \text{ cm}^{-1}$ (对应波长范围

为 $450 \sim 650 \text{ nm}$),多级相位延迟器 R_2 厚度 d 为 0.5 mm ,其双折射率 $\Delta n = 0.01$ (延迟器采用石英晶体材料)。根据公式(4),入射光经过强度调制后的模拟光谱曲线如图 3 所示。

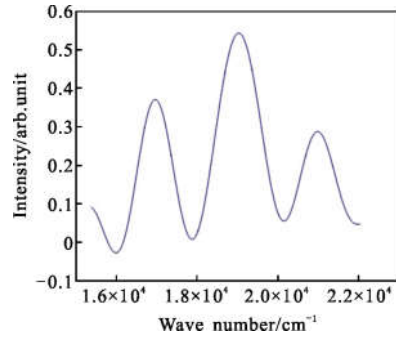


图 2 入射光 Stokes 参量元素谱

Fig.2 Stokes parameter element spectrum of incident light

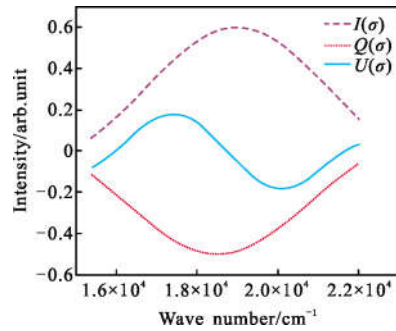


图 3 强度调制光谱

Fig.3 Intensity modulation spectrum

1.2 光谱成像压缩编码

利用编码孔径快照光谱成像系统的编码孔径和色散棱镜对光谱偏振强度调制输出光谱 $I'(\sigma)$ 进行压缩编码调制,其过程如图 4 所示。设编码孔径之

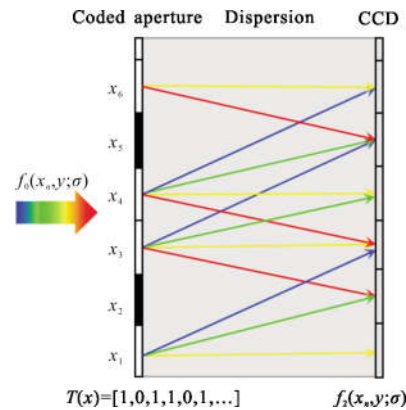


图 4 调制光谱压缩编码过程

Fig.4 Compression and encoding process of the modulation spectrum

前和之后的空间光谱密度分别为 $f_0(x, y; \sigma)$ 和 $f_1(x, y; \sigma)$, (x, y) 表示空间图像坐标, 且令编码孔径传输函数为 $T(x, y)$, 则编码孔径后面的光谱密度为:

$$f_1(x, y; \sigma) = f_0(x, y; \sigma)T(x, y) \quad (5)$$

在光谱通过编码孔径、中继透镜和色散棱镜之后, 到达 CCD 的光谱密度为:

$$f_2(x, y, \sigma) = \iint \delta(x' - [x + \alpha(\sigma - \sigma_c)])\delta(y' - y) \times f_1(x', y'; \sigma)dx'dy' = f_0(x + \alpha(\sigma - \sigma_c), y; \sigma) \times T(x + \alpha(\sigma - \sigma_c), y) \quad (6)$$

式中: α 为色散棱镜的色散系数; σ_c 为光谱经色散棱镜未偏转所对应的中心波数。

光谱图像数据立方体中光谱维压缩是通过不同波段数对应不同横坐标 x 的移动量来实现的。设 CCD 的像素尺寸为 Δ , 受其限制, CCD 在 (n, m) 处的光强应表示为:

$$I_{nm} = \iint I(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta} - m, \frac{y}{\Delta} - n\right) dx dy = \iint f_0(x + \alpha(\sigma - \sigma_c), y; \sigma) T(x + \alpha(\sigma - \sigma_c), y) \times \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta} - m, \frac{y}{\Delta} - n\right) dx dy d\sigma \quad (7)$$

式中: 函数 rect 为矩形窗函数, 将光谱密度 $f_0(x, y; \sigma)$ 表示离散形式 f_{ijk} , 将孔径码函数 $T(x, y)$ 表示为形式 t_{ij} , 则 CCD 获得的信号可写为:

$$I_{nm} = \sum_k f_{(m+k)nk} t_{(m+k)n} = (Hf)_{nm} \quad (8)$$

式中: H 为系统的总的传递函数。

2 偏振光谱重建

2.1 图像光谱重构

在 CCD 上获取的是光谱图像三维数据立方体的二维编码投影, 即对光谱维进行了压缩编码, 再利用 TwIST 算法重构出包含光谱信息的三维数据立方体。以 CCD 上单像素点为例, 重构出的光谱数据结果如图 5 所示。该数据并非原始图像的光谱信息, 而是经过强度调制后的多通道偏振光谱叠加信号, 需进一步对每个频率通道进行分离提取并恢复光谱偏振信息。

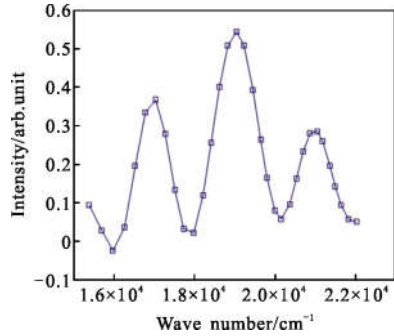


图 5 重构光谱

Fig.5 Reconstruction of spectrum

2.2 光谱偏振反演

由公式(4)可见 Stokes 参量各元素分别被调制到频域 $0, \pm\varphi(\sigma)$ 处, 为后期数值截取方便, 将相位延迟量 $\varphi(\sigma)$ 利用光程差表示, 则经过编码孔径光谱成像系统重构的偏振光谱叠加信号 $I''(\sigma)$ 表示为:

$$I''(\sigma) = \frac{1}{2} I''(\sigma) + \frac{1}{4} [Q''(\sigma) - iU''(\sigma)] e^{i2\pi L\sigma} + \frac{1}{4} [Q''(\sigma) + iU''(\sigma)] e^{-i2\pi L\sigma} \quad (9)$$

令 $I_{12} = Q'' - iU''$, 其中 $L = \Delta nd$ 表示经过 R_2 寻常光和非寻常光的光程差。

对 $I''(\sigma)$ 进行傅里叶反变换, 得到其对应的自相关函数如下:

$$C(h) = A_0(h) + A_1(h-L)A_2(-h-L) \quad (10)$$

式中: $A_0(h) = F^{-1}\left\{\frac{1}{2}I''(\sigma)\right\}$; $A_1(h) = F^{-1}\left\{\frac{1}{4}I_{12}(\sigma)\right\}$; $A_2(h) = F^{-1}\left\{\frac{1}{4}I_{12}^*(\sigma)\right\}$ 。

分别截取对应频率通道的信号, 通过下式可解调出 Stokes 参量各元素谱为:

$$\begin{aligned} F\{A_0(h)\} &= \left[\frac{1}{2}\right] I''(\sigma) \\ F\{A_1(h-L)\} &= \left[\frac{1}{4}e^{i\varphi(\sigma)}\right] Q''(\sigma) \\ F\{A_2(-h-L)\} &= \left[\frac{1}{4}e^{-i\varphi(\sigma)}\right] U''(\sigma) \end{aligned} \quad (11)$$

按照公式(11)解调出各 Stokes 参量元素谱如图 6 所示, 可以看出, Stokes 复原结果和模拟输入光谱(图 2)基本重合, 实现了在单次成像过程中对图像的光谱偏振信息的获取。个别复原点存在偏差主要是光谱分辨率低, 强度解调过程需用到插值处理所致。

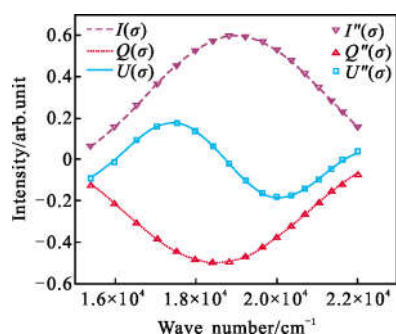


图 6 复原 Stokes 矢量谱

Fig.6 Restoration of Stokes vector spectrum

3 结 论

文中采用强度调制将待测光的 Stokes 参量各元素谱调制到不同的频率通道, 并利用编码孔径和色散棱镜组成的光谱成像系统对该调制光谱进行压缩编码, 利用 TwIST 算法重构出图像光谱信息, 并在不同频率通道分别进行复原, 得到 Stokes 参量各元素复原谱。数值仿真结果显示出光谱偏振信息复原效果良好, 实现了在一次测量情况下得到图像的光谱偏振信息, 在光谱偏振测量领域具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] Huang Xujie, Jin Yangming, Pan Qiao, et al. Optical design of multi angle polarization imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (11): 1118002. (in Chinese)

[2] Zhang Rui. High precision hyperspectral full polarization imaging system based on acousto-optic and liquid crystal

modulation [D]. Taiyuan: North University of China, 2017. (in Chinese)

[3] Tyo J S, Turner T S. Imaging spectropolarimeters for use in visible and infrared remote sensing[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1999, 3753: 214-225.

[4] Li Jie, Zhu Jingping, Qi Chun, et al. Large aperture static hyperspectral full polarization imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 574-578. (in Chinese)

[5] Wang Xinquan, Xiang Libin, Huang Min, et al. Static imaging spectral ellipsometry[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011(5): 689-692. (in Chinese)

[6] Yu Hui, Zhang Rui, Li Kewu, et al. Measurement principle and simulation of dual intensity modulation static Fourier transform polarization imaging system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(5): 82-91.

[7] Chen Youhua, Wang Zhaoba, Wang Zhibin, et al. Elastic light modulation Fourier transform spectroscopy is used to study [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6): 1502-1505.

[8] Wagadarikar A, John R, Willett R, et al. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 44-51.

[9] Wang Peng, Rong Zhibin, He Junhua, et al. Research on polarized light imaging technology based on compressive sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0228005. (in Chinese)

[10] Sullenberger R M, Milstein A B, Rachlin Y, et al. Computational reconfigurable imaging spectrometer [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31960-31969.