

强度调制 傅里叶变换光谱偏振技术研究与仿真

王新全^{1,3}, 相里斌², 黄 旻², 胡 亮^{1*}, 景娟娟^{1,3}

1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119

2. 中国科学院光电研究院, 北京 100190

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 强度调制 傅里叶变换光谱偏振技术是一种综合强度调制光谱偏振技术和傅里叶变换光谱技术的新类型光谱偏振测量技术, 能够同时实现全斯托克斯光谱偏振参数测量, 保留了傅里叶变换光谱技术高通量、多通道的特点, 同时具有降低数据处理复杂程度的优点。文章对强度调制 傅里叶变换光谱偏振测量技术的数据采集和光谱偏振复原过程进行了理论分析, 给出了推导公式, 并进行了基于该技术的光谱偏振仪工作全过程的数值模拟, 理论分析及模拟结果证明了该技术在理论上的可行性。

关键词 光谱偏振技术; 强度调制; 傅里叶变换光谱技术

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)07-1980-05

引 言

强度调制光谱偏振技术是由日本学者 Oka 等^[1]提出的一种能够同时获得目标光谱全斯托克斯偏振参数的快照式光谱偏振测量技术, 该方法省却了主动偏振分析器件, 能够实现光谱偏振快速测量。与通信技术中的多路复用技术相似, 采用多级相位延迟器将入射光的斯托克斯偏振参量调制到不同波数上去, 使各参数在傅里叶变换域分开, 然后采用滤波方法分离出各斯托克斯参量的干涉谱, 再经过傅里叶变换方法复原出各斯托克斯参量的光谱, 采用的光谱仪为色散型, 其光谱变量为波长, 在光谱偏振复原中需要进行波长和波数之间的非线性插值转换, 该转换增加了数据处理的难度, 同时会引入误差^[2,3]。也可以应用线性系统理论, 采用奇异值分解的方法进行光谱偏振复原^[4,5], 但是其计算量十分可观。Kudenov 等^[6,7]在强度调制光谱偏振测量技术的基础上改用傅里叶变换光谱仪实现了光谱偏振测量。傅里叶变换光谱仪与色散型光谱仪相比具有高通量 (jacquinot) 和多通道 (fellgett) 的优势, 除这两点外, 采用傅里叶变换光谱仪还具有特殊的优点, 即傅里叶变换光谱技术中的光谱变量为波数, 省却了波数与波长之间的非线性转换, 同时傅里叶变换光谱仪获得的干涉图即为调制谱经过傅里叶变换的结果, 通过适当的参数设置可以使入射光的各斯托克斯参量在干涉图

中直接分开, 给各斯托克斯参量的干涉图分离提供了一种更加直接的方式, 大大降低了数据处理的难度。

文中介绍了强度调制 傅里叶变换光谱偏振探测技术的原理, 对数据采集和光谱偏振复原公式进行了推导, 并对整个过程进行了数值模拟, 验证了方法的可行性。

1 强度调制-傅里叶变换光谱偏振技术理论模型

强度调制 傅里叶变换光谱偏振技术^[6,7]综合了光谱偏振强度调制技术与傅里叶变换光谱技术。强度调制 傅里叶变换光谱偏振仪就是通过傅里叶变换光谱仪前端的准直光路中添加光谱偏振强度调制模块来实现的, 其方块图如图 1 所示。光谱偏振强度调制模块包含两个相位延迟器 R_1 和 R_2 , 后面放置线偏振分析器 A。入射光经准直后依次经过 R_1 ,

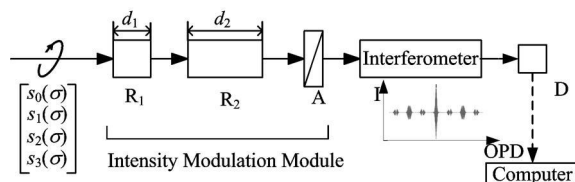


Fig 1 Block diagram of intensity modulation Fourier transform spectropolarimeter

收稿日期: 2010-06-11, 修订日期: 2010-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40805013)和国家重点基础研究发展计划项目(2009CB724005)资助

作者简介: 王新全, 1982年生, 中国科学院西安光学精密机械研究所光谱成像技术实验室助理研究员 e-mail: wangxinquan@opt.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: huliang@opt.ac.cn

R_2 和 A, 透过 A 的光束再进入干涉仪, 干涉仪输出的光束由探测器接收并由计算机进行处理。入射光经过光谱偏振调制模块后, 其各斯托克斯参量被调制到不同的波数上, 再经干涉仪对被调制光谱进行傅里叶变换, 使得各斯托克斯参量或其组合在干涉图中彼此分开。

1.1 光谱偏振强度调制原理

光谱偏振强度调制模块的组成如图 2 所示^[4,8], R_1 和 R_2 是两个厚度分别为 d_1 和 d_2 的多级相位延迟器, A 为线偏振分析器。 R_1 的快轴方向和 A 的透光轴方向平行, R_2 的快轴方向相对于 R_1 的快轴方向旋转 45° 角。

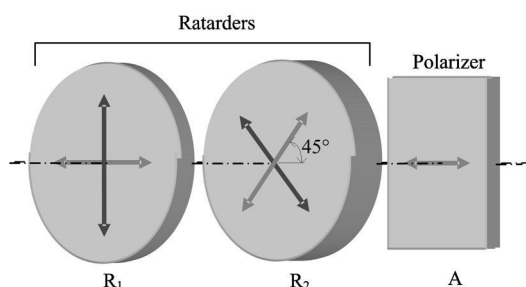


Fig 2 Polarimetric spectral modulation module

由偏振光学理论可知, 入射光在经过调制器前后其斯托克斯矢量元素谱间的关系可用级联矩阵表示为^[3,6]

$$S_{out} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_2 & 0 & -\sin \varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \varphi_2 & 0 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 \\ 0 & 0 & -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, 等号右边的矩阵分别是线偏振器 A、相位延迟器 R_2 、相位延迟器 R_1 的米勒矩阵和输入光的斯托克斯向量, φ_1 和 φ_2 分别是入射光经过 R_1 和 R_2 的相位延迟量, s_0, s_1, s_2 和 s_3 分别为与强度相关的斯托克斯参量, 它们都是波数 σ 的函数, 相位延迟量的值为

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

式中, d 为相位延迟器材料的厚度, Δn 为材料双折射率, 即在给定波数下的寻常光轴和异常光轴上的折射率之差的绝对值, $L = d \cdot \Delta n$ 为寻常光和异常光之间产生的光程差。

将式(1)的矩阵进行相乘, 得到输出光的斯托克斯向量为

$$S_{out} = 1/2 \begin{bmatrix} s_0 + s_1 \cos \varphi_2 + s_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 - s_3 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ s_0 + s_1 \cos \varphi_2 + s_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 - s_3 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于探测器本身只响应总光强, 不能够区分偏振信息, 其响应值对应于输出斯托克斯向量的第一个分量。因此, 探测器记录的随波数变化的光强为

$$I(\sigma) = \frac{1}{2}(s_0 + s_1 \cos \varphi_2 + s_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 - s_3 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2) \quad (4)$$

采用欧拉公式 $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$ 对式(4)进行改写得

$$I(\sigma) = \frac{1}{2}s_0 + \frac{1}{4}s_1(e^{i\varphi_2} + e^{-i\varphi_2}) + \frac{1}{8}[(-s_2 + is_3)e^{i(\varphi_2 + \varphi_1)} + (-s_2 - is_3)e^{-i(\varphi_2 + \varphi_1)} + (s_2 + is_3)e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} + (s_2 - is_3)e^{-i(\varphi_2 - \varphi_1)}] \quad (5)$$

由式(5)可知, 光强对应七个由相位延迟量确定的不同的频率分量: $0, \pm \varphi_2, \pm(\varphi_2 + \varphi_1)$ 和 $\pm(\varphi_2 - \varphi_1)$ 。通过选择合适的相位延迟量, 七个频率通道将会彼此分开, 对探测器采集到的光谱进行傅里叶变换, 可以看到七个与光程差相关的彼此分开的频率通道。同时由式(5)可知, 每一个频率通道对应一个斯托克斯参量或几个斯托克斯参量的组合, 图 3 所示为对经调制过光谱进行傅里叶变换的幅度谱。为了从傅里叶变换谱中复原出给定的偏振光谱分量, 我们需要选择需要的频率通道, 通过乘以一个窗口函数, 分离出该通道信息, 再经过逆傅里叶变换复原出该通道随波数变化的偏振态。

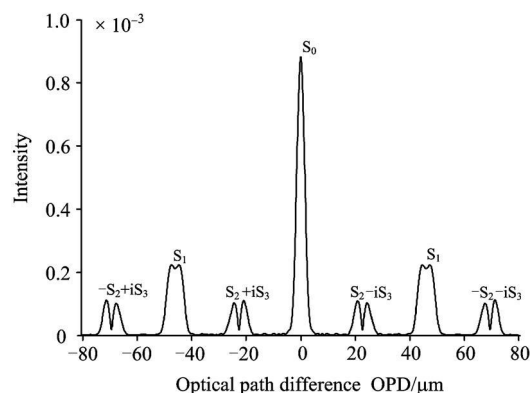


Fig 3 Stokes parameters separated in optical path difference domain

1.2 强度调制傅里叶变换光谱偏振测量原理

当光谱偏振强度调制技术与傅里叶变换光谱技术相结合时, 可以利用傅里叶变换光谱仪的傅里叶变换功能实现不同斯托克斯参量的分离。经调制的光束进入傅里叶变换光谱仪后, 其输出干涉图 $I(\sigma, \Delta z)$ 可表示为^[6,7]

$$I(\sigma, z) \propto \frac{(1 + \cos \varphi_z)}{2} [s_0 + s_1 \cos \varphi_2 + s_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 - s_3 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2] \quad (6)$$

式中 φ_z 为干涉仪产生的两相干光束的相位差, 定义为

$$\varphi_z(\sigma) = 2\pi \Delta z \sigma \quad (7)$$

式中 Δz 为两相干光束的光程差。将式(6)展开并整理, 忽略掉与 Δz 无关的常数项(该常数项对复原光谱无贡献), 可得^[6,7]

$$I(\sigma, z) \propto \cos \varphi_z [s_0 + s_1 \cos \varphi_2 + s_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 - s_3 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2] = \frac{s_0}{2} \cos(2\pi \Delta z \sigma) + \frac{s_1}{4} [\cos[2\pi(\Delta z + L_2)]\sigma + \cos[2\pi(\Delta z - L_2)]\sigma] + \frac{s_2}{8} [-\cos[2\pi(\Delta z + L_2 + L_1)]\sigma - \cos[2\pi(\Delta z - L_2 - L_1)]\sigma] + \cos[2\pi(\Delta z + L_2 - L_1)]\sigma + \cos[2\pi(\Delta z - L_2 + L_1)]\sigma]$$

$$-L_2 + L_1) \sigma] + \frac{s_3}{8} \{ -\sin[2\pi(\Delta z + L_2 + L_1) \sigma] + \sin[2\pi(\Delta z - L_2 - L_1) \sigma] - \sin[2\pi(\Delta z + L_2 - L_1) \sigma] + \sin[2\pi(\Delta z - L_2 + L_1) \sigma] \} \quad (8)$$

由式(8)可知, 经过干涉仪后, s_0 的干涉图的零光程差位置保持不变, s_1 的干涉图的零光程差被搬移到 $\pm L_2$ 处, $-s_2 - is_3$ 的干涉图零光程差被搬移到 $(L_2 + L_1)$ 处, $-s_2 + is_3$ 的干涉图零光程差被搬移到 $-(L_2 + L_1)$ 处, $s_2 - is_3$ 的干涉图零光程差被搬移到 $(L_2 - L_1)$ 处, $s_2 + is_3$ 的干涉图零光程差被搬移到 $-(L_2 - L_1)$ 处。在干涉图中截取各斯托克斯分量对应的干涉图即可经过傅里叶变换复原出其对应的光谱图。

2 数值模拟

前面的理论推导对强度调制傅里叶变换光谱仪的光谱偏振获取和复原过程进行了分析, 下面将对整个过程进行数值模拟。

假定输入光的全斯托克斯光谱偏振曲线如图 4(a) 所示, 其光谱范围为 500~700 nm, 对应的波数范围是 14 280~20 000 cm^{-1} , 各参量强度进行了归一化。

假定多级相位延迟器采用石英晶体材料, 其厚度 d_1 和 d_2 分别为 2.5 和 5 mm, 双折射率 Δn 取为 0.009 2 (忽略双折射色散的影响)。根据式 $L = d\Delta n$ 得两相位延迟器产生的寻常光和异常光的光程差分别为 23 和 46 μm 。按照式(4)的调制过程, 可得经过调制的光谱曲线如图 4(b) 所示。

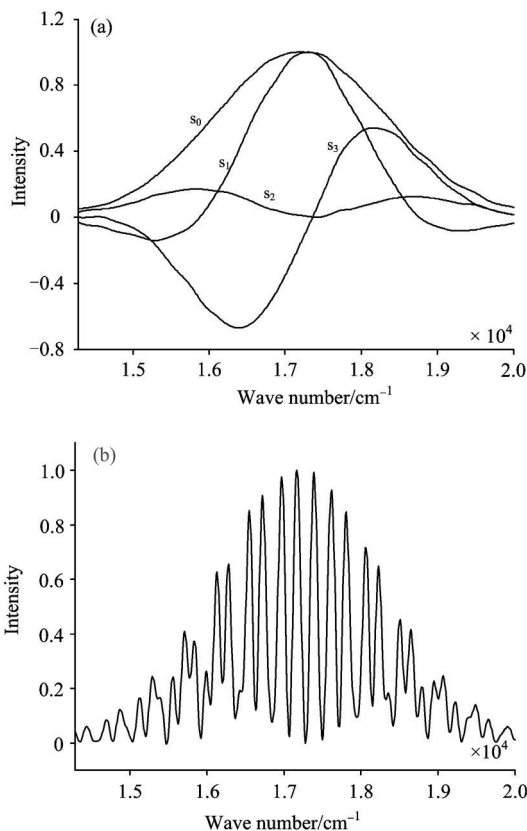


Fig 4 Input Stokes spectrum and its modulated spectrum

干涉数据采集过程采用双边干涉数据采集, 干涉图的光程差采样间隔为 78.7 nm, 最大光程差为 80 510 nm。采用式(8)得到的模拟干涉图如图 5 所示, 图中为各斯托克斯参量及组合对应的干涉图, 产生的各调制分量的干涉图的中心分别在 0, ± 23 , ± 46 和 $\pm 69 \mu\text{m}$ 处, 分别对应于光程差 0, $\pm L_1$, $\pm(L_2 - L_1)$ 和 $\pm L_2$ 。

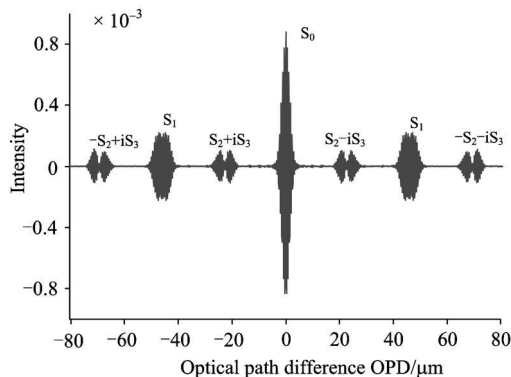


Fig 5 Simulated interferogram

截取光程差为 $-11 \sim 11 \mu\text{m}$ 之间的干涉图, 即为 s_0 对应的干涉图, 如图 6(a) 所示, 采用干涉光谱复原算法^[9]复原出 s_0 , 如图 6(b) 所示, 复原过程中未进行切趾操作, 同时, 由于是在理想情况下, 未进行相位修正操作。下面的其他斯托克斯参量的光谱复原过程与上述相同。

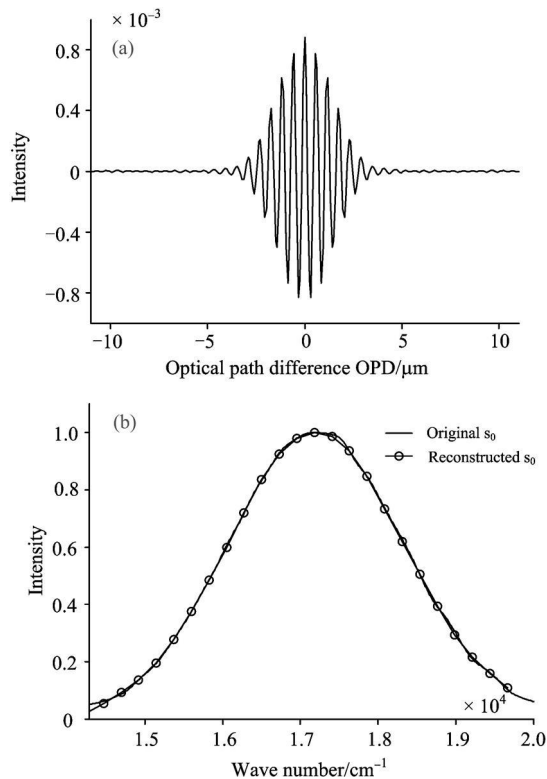


Fig 6 Interferogram and reconstructed spectrum of s_0

截取光程差为 34.5~57.5 μm 之间的干涉图, 即为 s_1 对应的干涉图, 如图 7(a) 所示, 复原 s_1 的光谱如图 7(b) 所示。

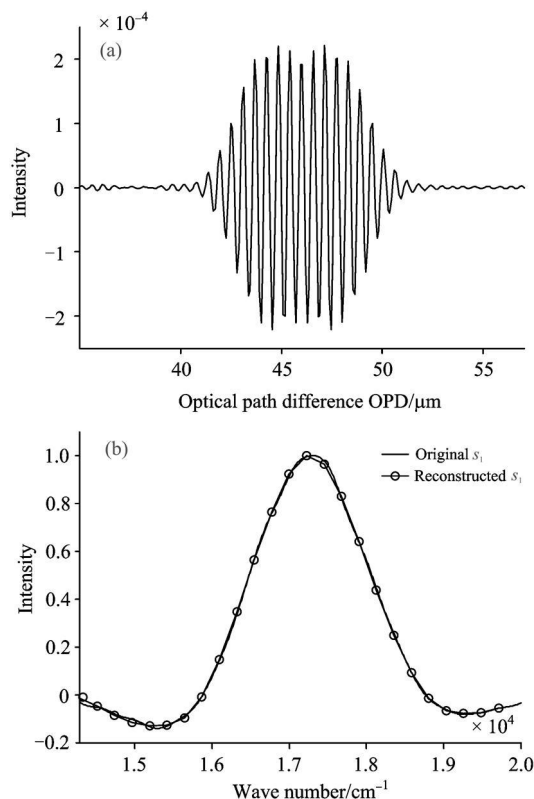


Fig 7 Interferogram and reconstructed spectrum of s_1

截取光程差为 $57.5 \sim 80.5 \mu\text{m}$ 之间的干涉图, 即为 $-s_2 - is_3$ 对应的干涉图, 如图 8(a) 所示。经过傅里叶变换, 获得结果的实部为 $-s_2$ 光谱, 虚部为 $-s_3$ 光谱, 如图 8(b) 所示。从复原结果可以看出与原始输入光谱之间有一定的偏差, 这主要是由于其他分量的干涉图与本分量的干涉图混叠造成的, 经过仿真验证, 在没有其他分量的情况下能够获得较好的复原结果。

3 结 论

从理论上分析了强度调制 傅里叶变换光谱偏振技术的

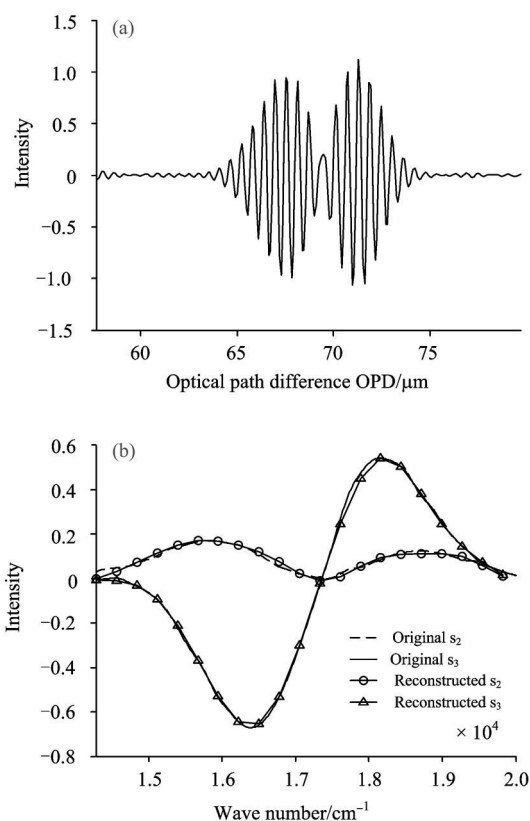


Fig 8 Interferogram and reconstructed spectrum of $(-s_2 - is_3)$

可行性, 对其数据采集及光谱偏振复原进行了理论推导, 得到光谱偏振调制与解调的完整公式, 在此基础上对基于该原理的光谱偏振仪的数据采集与复原过程进行了数值模拟, 模拟输入的各项参数尽量接近实际, 模拟结果表明该技术在原理上是可行的。复原光谱与实际光谱之间的偏差主要是由于干涉图的有限光程差和不同分量之间的混叠造成的, 通过合理的设计可以将其控制在可接受的范围之内, 多级相位延迟器的双折射色散也需要进行考虑, 这也将是下一步研究的重点。文章的理论分析和模拟结果为该技术的进一步研究和仪器设计奠定了理论基础。

References

- [1] Kazuhiko Oka, Takayuki Kato. Optics Letters, 1999, 24(21): 1475.
- [2] Stephen H Jones, Frank J Iannarilli, Paul L Kebabian. Optics Express, 2004, 12(26): 6559.
- [3] SONG Zhiping, HONG Jin, QIAO Yanli, et al(宋志平, 洪 津, 乔延利, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2008, 37(3): 577.
- [4] Derek S Sabatke, Ann M Locke, Eustace L Dereniak, et al. Optics Express, 2003, 11(22): 2940.
- [5] Derek S Sabatke, Ann M Locke, Eustace L Dereniak, et al. J. Opt. Soc. Am., 2005, 22(8): 1567.
- [6] Michael W Kudenov, Nathan A Hagen, Haitao Luo, et al. Proc. of SPIE, 2006, 6295: 62950A.
- [7] Michael W Kudenov, Nathan A Hagen, Eustace L Dereniak, et al. Optics Express, 2007, 15(20): 12792.
- [8] Riley W Aumiller, Corrie Vandervlugt, Eustace L Dereniak, et al. Proc. of SPIE, 2008, 6972: 69720D.
- [9] LÜ Qurbo, YAO Tao, XIANGLI Bin, et al(吕群波, 姚 涛, 相里斌, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(1): 114.

Study and Simulation of the Intensity Modulation Fourier Transform Spectropolarimeter

WANG Xin quan^{1,3}, XIANGLI Bin², HUANG Min², HU Liang^{1*}, JING Juan Juan^{1,3}

1. Laboratory of Spectral Imaging Technique, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China
2. Academy of Optical Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Intensity modulation Fourier transform spectropolarimetry (IMFTSP) is a novel technology that combines the intensity modulation spectropolarimetry and Fourier transform spectroscopy. The IMFTSP can obtain full Stokes spectropolarimetric parameters simultaneously, and maintains the throughput (Jacquinot) and multiplex (Fellgett) advantages. Yet aside from this, the IMFTSP has the advantage of reducing the complexity of data processing. The data collecting and spectropolarimetric parameters reconstruction processes were analyzed theoretically in this paper, the theoretical formulas are presented, and a whole process mathematical simulation for the IMFTSP system is introduced. The theory analysis and simulation results proved the feasibility of the IMFTSP.

Keywords Spectropolarimetry; Intensity modulation; Fourier transform spectroscopy

(Received Jun. 11, 2010; accepted Sep. 6, 2010)

* Corresponding author