

时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪 数据处理研究^{*}

简小华 张淳民[†] 祝宝辉 任文艺

(西安交通大学理学院, 非平衡物质结构及量子调控教育部重点实验室, 西安 710049)

(2009 年 11 月 4 日收到; 2009 年 12 月 21 日收到修改稿)

研究了基于 Savart 偏光镜的偏振干涉成像光谱仪在时空混合调制模式下图像形成、数据分布的特点, 论证了视场补偿型偏振干涉成像光谱仪更适用于单色光条件下的时空混合调制工作模式, 并提出了时空混合调制模式下数据采集与处理的基本原理及其需要注意的问题与解决方法。最后, 应用这种方法对实验获取的干涉图进行了数据处理, 并成功复原出了光谱。

关键词: 时空混合调制, 偏振干涉成像光谱仪, 光程差, 数据处理

PACC: 4230, 0765, 4225J

1. 引言

20 世纪 80 年代后期发展起来的空间调制型干涉成像光谱技术能同时获取目标的二维空间信息和一维光谱信息, 在民用、军用方面都有很高的实用价值^[1-8]。但其系统中的入射狭缝限制了进入仪器的光通量, 降低了系统信噪比。为了克服空间调制型干涉仪的不足, 张淳民、相里斌、赵葆常等人提出了一种新型的基于 Savart 偏光镜的时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪^[9-13], 其以 Savart 偏光镜作为分束器件, 具有大视场、高通量、超小型、高稳态、结构简单等优点, 尤其是可以对偏振目标进行探测, 克服了航天遥感器中普遍存在的探测器对不同偏振度的偏振光响应效率不同的缺点, 具有极其广泛的应用前景。

但时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪干涉数据与光程差分布复杂, 为光谱复原及其后续光谱分析、图像合成等工作带来了诸多不便。为此, 深入分析其数据分布规律, 找到适用的数据处理方法, 将有效地发挥其潜在的诸多优异性能, 提高其获取信息的准确率与实用性。

2. 时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪特点分析

2.1. 时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪

图 1 为基于 Savart 偏光镜的时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪的原理图^[9,12,14]。主要由起偏器、Savart 板、检偏器、成像镜、探测器组成。从光源发出的一束自然光经起偏器后, 成为一束沿起偏器偏振化方向的线偏振光, 入射到 Savart 板的左板。在 Savart 左板内, 入射光线分为寻常光(o 光)和非常光(e 光), o 光沿原方向传播, e 光偏折。射入到 Savart 右板时, 原 o 光变为 e 光偏折, 原 e 光变为 o 光, 偏折后出射光均沿平行于入射光的方向射出。两偏振光经检偏器后变为振动方向相同的两束线偏振光, 最后经成像镜在探测器平面上相遇, 形成干涉图和目标像。

时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪与以往的时间调制和空间调制型干涉成像光谱仪在干涉数据获取方式上有着很大的不同。时间调制型干涉成像光谱仪以迈克耳逊干涉仪为代表, 需依靠改变

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:40537031), 高技术研究发展计划国家(863)项目(批准号:2006AA12Z152), 国防基础科学科研项目(批准号:A1420080187), 国家自然科学基金(批准号:40875013, 40375010, 60278019), 西安交大 985 二期工程资助的课题。

† 通讯联系人。E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

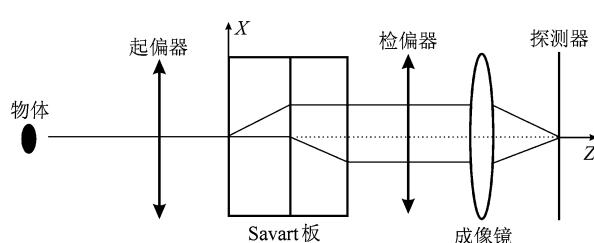


图 1 基于 Savart 板的时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪原理图

动镜的位置产生光程差,获得干涉图像^[15].由于需要动镜扫描一个周期才能完成对干涉数据的采集,因此耗时长,数据记录繁琐,不宜对瞬变目标的扫描.空间调制型干涉成像光谱仪^[1-3]则以面阵 CCD 作为探测器,能同时得到视场内一列目标的干涉信息,当仪器推扫过整个目标区域,就可得到整个区域的干涉图.按空间探测的顺序,依次对每一幅 CCD 图片进行行处理,能得到各列地元的干涉数据,再将这些数据按空间推扫顺序组合,就可以得到探测区域的完整干涉信息.时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪则皆有时间调制与空间调制型干涉成像光谱仪的数据分布与扫描特点,具体分析如下.

2.2. 时空混合调制型探测模式

由于去掉了前置狭缝等光学系统,因此每次进入时空混合调制偏振干涉成像光谱仪视场的不是一列目标,而是视场区域内的所有目标,且每个目标在一帧 CCD 图像上只有一个特定光程差下的干涉数据^[9,16].随着仪器的推扫,被测目标相对仪器的视场角也不断变化,当仪器扫描过整个目标区域时,视场范围内各个目标都经历了一个光程差范围变化的过程,探测器则分别记录了各个目标在各个光程差下的干涉强度^[17].因此,为了要得到一个目标的完整干涉信息,必须从每一帧 CCD 图像中提取其对应的干涉数据,并结合它们对应的光程差分布进行有规律的排列重组.

2.3. 光程差分布规律

设入射光线与 Savart 偏光镜法线的夹角即入射角为 i ,入射面与主截面的夹角为 ω ,规定从 z 轴正方向向负方向看去,逆时针 ω 为负,反之为正.则 Savart 偏光镜光程差 Δ 与 i 和 ω 的具体表达式如下^[18]:

$$\begin{aligned} \Delta = t & \left[\frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} (\cos \omega + \sin \omega) \sin i \right. \\ & + \frac{a^2 - b^2}{(a^2 + b^2)^{3/2}} \cdot \frac{a^2}{\sqrt{2}} (\cos^2 \omega - \sin^2 \omega) \\ & \left. \times \sin^2 i + \dots \right], \end{aligned} \quad (1)$$

式中 t 为单 Savart 板厚度, a 为晶体 e 光折射率的倒数; b 为 o 光折射率的倒数.

当光线近轴入射时(即 i 值很小)二次项影响不明显,光程差与入射角近似成线性关系,如图 2 所示.其近轴区域条纹可近似认为是等间距余弦条纹,如图 3 模拟的单色光干涉图,这也与实验结果(图 4)符合,可用常规的傅里叶变换进行处理.但当入射角增大时,二次项系数影响效果就会越来越明显,导致干涉条纹扭曲畸变,如图 5 所示,即无法使用要求数据分布等间隔的快速傅里叶变换,这无疑将大大增加数据处理的时间和难度.

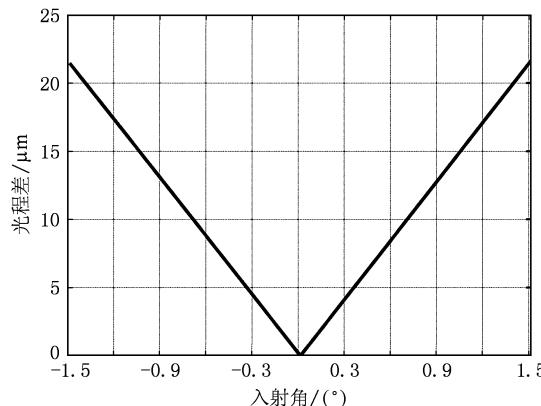


图 2 Savart 偏光镜在近场范围内 ($-1.5^\circ - 1.5^\circ$) 的光程差变化图

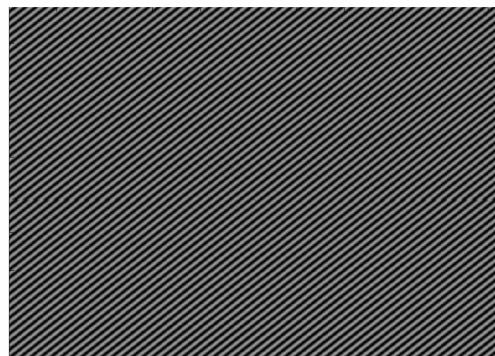


图 3 Savart 偏光镜近轴干涉条纹模拟图(视场角 = 1.5°)

为了准确复原出各点目标的光谱必需要先获

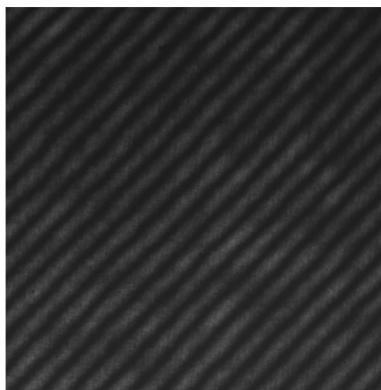


图 4 Savart 偏光镜近轴实验干涉图

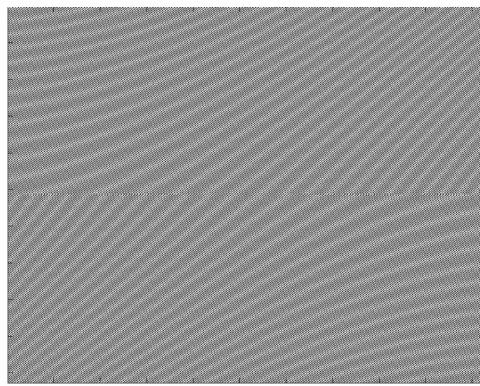


图 5 Savart 偏光镜近轴干涉条纹模拟图(视场角 = 5.5°)

取目标点在不同光程差下对应的干涉强度序列。结合上面 Savart 偏光镜的光程差公式(1),可得到其在焦平面上各点的光程差如图 6 所示(视场角 1.5°)。可见,其光程差分布较复杂,且光程差振幅分布不均匀,如果直接用常规的 Savart 偏光镜按照时空混合调制的方式进行推扫的话,将导致 CCD 面阵上同一行像素点对应的光程差左右不对称,而无法获取精确的双边扫描数据用于光谱复原。为此,我们提出了视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪^[19-24],其原理结构如图 7 所示。

核心部件视场补偿型 Savart 偏光镜是由两块厚度相等的单轴负晶体(方解石),中间加入单轴正晶体(石英或鱼眼石)制成的半波片,再使用冷杉树脂胶黏接所制成。由参考文献[19]可知,视场补偿型 Savart 偏光镜的光程差具体表达式如下:

$$\Delta = 2t(a^2 - b^2)\cos(\omega)\sin(i)/(a^2 + b^2), \quad (2)$$

可见,视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪的光程差消除了二次项及高次项的影响,在近轴条件下,光程差与入射角 i 的线性更好,即意味着近轴区

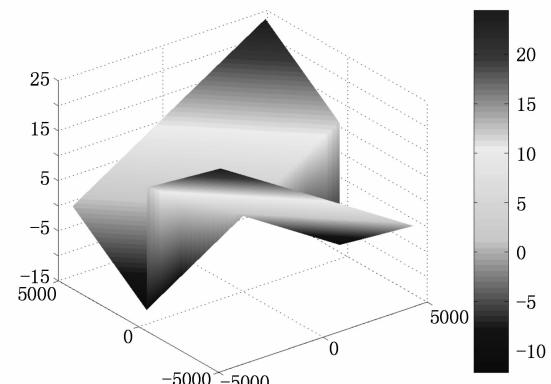


图 6 CCD 探测器面阵上各点光程差示意图

域条纹可近似认为等间距余弦条纹,如图 8 所示。而探测器面阵上各目标点对应光程差的分布,如图 9 所示。

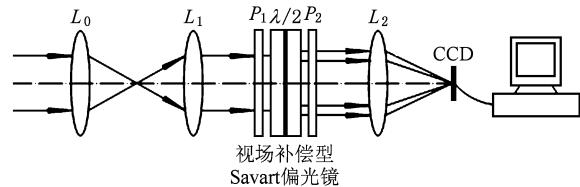


图 7 视场补偿型 Savart 偏光镜原理图

同理,利用(2)式可求得视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪在探测器面阵 CCD 上的光程差分布,如图 9 所示。由图可见,CCD 探测器面阵上各点光程差分布呈中心轴对称,且每行象素点光程差变化范围相同,同行邻近像素点光程差线性均匀分布便于后期的数据提取、保存和光谱复原工作。可见视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪是更适于时空混合调制模式的。



图 8 视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪干涉模拟图

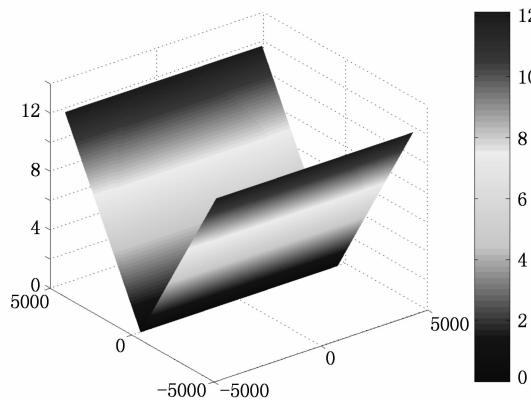


图 9 视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪 CCD 探测器面上各点光程差示意图

3. 时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪数据处理中的问题

现以视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪为例, 分析时空混合调制模式下数据处理的基本步骤以及需注意的问题.

3.1. 数据点采样

时空混合调制下的数据采样, 除了需根据光程差分布来提取相应的数据外, 必须确保前后对象的统一, 因此需要协调好仪器推扫与 CCD 扫描的速度. 由文献[9,12,19]等可知, 视场补偿型 Savart 偏光镜的出射光与入射光为平行光, 即决定目标最终成像的为最后的成像系统, 且由于 CCD 探测器放置在焦平面上, 因此在理想情况下其在焦平面上的成像与一般的透镜成像系统相仿. 以 Sarnoff CAM512 CCD 为例, 其面阵为 512×512 , 像素尺寸为 $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$, 帧频 f 为 100 fps, 假设空间分辨率 s 为 100 m, 则其推扫速度必须满足 $V_{\text{scan}} = fs = 10 \text{ km/s}$. 若速度大于 10 km/s, 则意味着 CCD 不能及时的获取每个目标在不同光程差下的干涉数据, 从而降低仪器的光谱分辨率; 但若速度小于 10 km/s, 则 CCD 每次记录的目标前后不是同一个目标, 即目标的部分区域在同一光程差下可能被重复扫描到. 虽然这有助于提高仪器光谱分辨率, 但同时也会带来增加处理的数据量与复杂性, 降低仪器扫描的效率等缺点.

3.2. 背景去除

令 $I(\delta)$ 为干涉图为在不同光程差下 CCD 记录

强度值, 为了去除背景的影响, 以满足傅里叶变换基本关系 $B(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} [I(\delta) - \frac{1}{2}I(0)] e^{-i2\pi\sigma\delta} d\delta$ ^[12]. 必须找到各目标点在零光程差的强度值 $I(0)$. 由图 9 光程差的分布可知, 其零光程差位于 CCD 平面的中心列上, 若不考虑其他方面的影响, 即可从每帧 CCD 图片的中心列获取对应的一列目标的零光程差强度值 $I(0)$. 依次类推, 当仪器扫面过全区域, 即可获得所有目标的零光程差强度值. 再将提取的每个目标的光程差序列强度值 $I(\delta)$ 都减去 $\frac{1}{2}I(0)$, 即获得了可用于傅里叶光谱变换的最终强度值 $I(\delta) - \frac{1}{2}I(0)$.

3.3. FFT 变化

由于快速傅里叶变换 FFT 采用的是蝶形换算, 即运行需要的数据量必须满足 2^n 关系, 且数据步长必须一致, 即在时空混合调制模式下, 要求获取的数据必须是等光程差间隔的强度值. 若当数据不满足 2^n 关系或数据不是等间隔取样时, 必须进行适当的补零充位工作^[25]. 而视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪则较好地避免了这些不足.

4. 实验模拟干涉图与光谱复原

图 10 是根据上面讨论的时空混合调制视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪数据分布特点模拟得到的单色光干涉图, 视场角为 1.5° , 单色光源波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器, 字母 XJTU 为其背景目标, 可见其条纹分布规律与实验获得干涉图 11 一致. 极好的证明了上面论述方法的正确性.

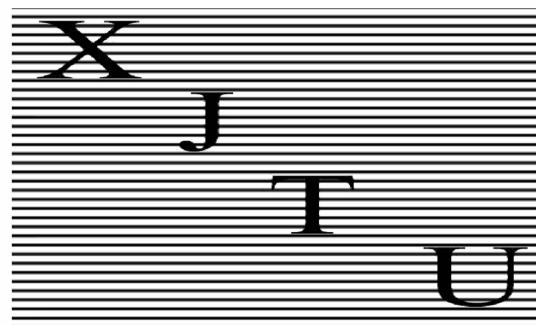
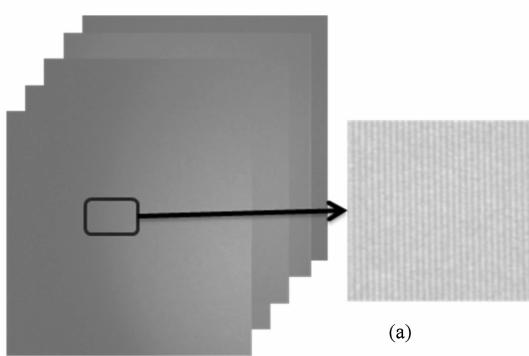


图 10 视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪单色光干涉模拟图 XJTU

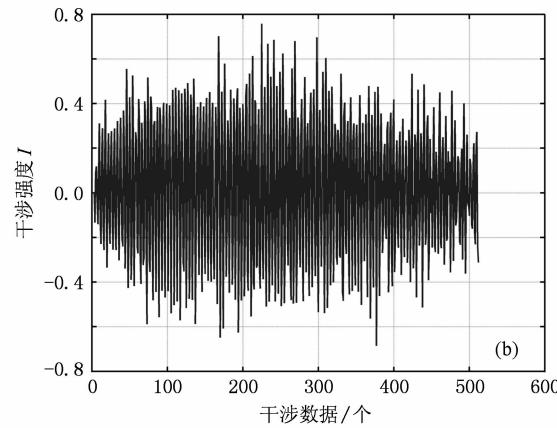


图 11 实验获得的视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪干涉图

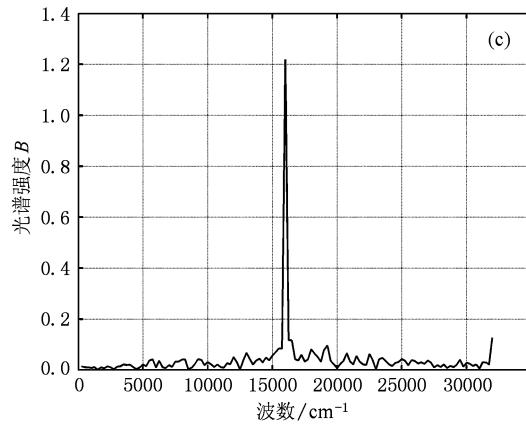
图 12 为用我们自行研制的时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪进行模拟卫星探测实验时所获取目标的干涉图和复原光谱,其中图 12 (a)左侧为对一单色均匀面光源推扫后仪器扫描记录的原始干涉图序列,图右侧是其具体干涉条纹分布的放大图;图 12(b)为针对面光源中的一点目标,按照上述时空混合调模式下的光程差分布规律,从图 12(a)原始干涉图序列中提取的一组干涉数据。图 12(c)为根据傅里叶变换光谱学的关系,利用图 12(b)干涉数据成功复原出的目标光谱图,其光谱分辨率约为 $0.01 \mu\text{m}$ 。



(a)



(b)



(c)

图 12 时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪模拟卫星探测实验图 (a) 单色光原始干涉图 ; (b) 经滤波和去除背景后的干涉图
(c) 视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱复原图

5. 结 论

1. 时空混合调制模式下干涉数据的处理必须依据光程差分布特点为依据,进行保存、提取与相关处理;

2. 视场补偿型 Savart 偏振干涉成像光谱仪更适用于单色光下的时空混合调制模式;

3. 在时空混合调制模式下数据的处理过程中,必须注意等光程差间隔取样,去背景,CCD 帧速与仪器扫描速度协调等问题。

本文研究的虽然是针对时空混合调制型偏振

干涉成像光谱仪干涉图的数据处理与光谱复原方法,但也同样适用于其它时空混合调制型干涉成像光谱仪,只需根据各仪器不同的光程差分布规律改

变其数据提取规律即可。这些研究工作对干涉成像光谱技术的应用和工程化具有理论与实践指导意义。

-
- [1] Rafert J B, Sellar R G, Blatt J H 1995 *Appl. Opt.* **34** 7228
 - [2] Matthew P D, Mohammad A K 1992 *Appl. Opt.* **31** 6096
 - [3] Otten L J, Butler E W 1995 *SPIE* **2480** 418
 - [4] Zhang C M, He J 2006 *Opt. Express* **14** 12561
 - [5] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C, Zhang L, Zhu L Y 2009 *Acta Phys. Sin* **58** 2286 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常、张霖、朱兰艳 2009 物理学报 **58** 2286]
 - [6] Mu T K, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3877 (in Chinese) [穆廷魁、张淳民、赵葆常 2009 物理学报 **58** 3877]
 - [7] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 67 (in Chinese) [叶剑勇、张淳民、赵葆常 2008 物理学报 **57** 67]
 - [8] Wu H Y, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1642 (in Chinese) [吴海英、张淳民、赵葆常 2009 物理学报 **58** 1642]
 - [9] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
 - [10] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2002 *Opt. Commun.* **203** 21
 - [11] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
 - [12] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** 815
 - [13] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B, Li Y C 2006 *OPTIK* **117** 265
 - [14] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]
 - [15] R. J. Bell, 1972 *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* (New York: Academic Press) p40
 - [16] Zhang C M, Yan X G, Zhao B C 2008 *Opt. Commun.* **281** 2050
 - [17] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Opt. Commun.* **281** 2424
 - [18] Wu L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Opt. Commun.* **273** 67
 - [19] D J, Zhang C M, Zhao B C, Sun Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6311 (in Chinese) [杜娟、张淳民、赵葆常、孙尧 2008 物理学报 **57** 6311]
 - [20] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
 - [21] Peng Z H, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Wu F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6374 (in Chinese) [彭志红、张淳民、赵葆常、李英才、吴福全 2006 物理学报 **55** 6374]
 - [22] Zhang CM, Zhao BC, Yuan ZL, Huang WJ 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 085401
 - [23] Zhang C M, Jian X H 2010 *Opt. Lett.* **35** 366
 - [24] Jian X H, Zhang C M, Zhang L, Zhao B C 2010 *Opt. Express.* **18** 5674
 - [25] Cabib Method for interferometer based spectral imaging of moving objects. 2000

The data processing method of the temporarily and spatially mixed modulated polarization interference imaging spectrometer*

Jian Xiao-Hua Zhang Chun-Min[†] Zhu Bao-Hui Ren Wen-Yi

(School of Science, Xi'an Jiao Tong University, Non-equilibrium Condensed Matter and Quantum Engineering Laboratory,
the Key Laboratory of Ministry of Education Xi'an 710049, China)

(Received 4 November 2009; revised manuscript received 21 December 2009)

Abstract

A new method of the interferogram formation, recording and processing is proposed for the polarization interference imaging spectrometer. According to the regularities of the optical path difference distribution on the detector, the wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer (WPIIS) is proved to be much suitable for working under temporally and spatially mixed model. In addition, the originally experimental interferogram obtained by WPIIS is processed in this new way, the satisfactory result of interference data and reconstructed spectrum proved that the method is exact and useful.

Keywords: temporarily and spatially mixed modulation, polarization interference imaging spectrometer, optical path difference, data processing

PACC: 4230, 0765, 4225J

* Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA12Z152), the National Defense Basic Scientific Research Project (Grant No. A1420080187), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40875013, 40375010, 60278019), and the "985" Information and Electron Project of Xi'an Jiaotong University.

† Corresponding author. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn