

# 时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪干涉图 获取模式研究<sup>\*</sup>

严新革<sup>1)2)</sup> 张淳民<sup>1)2)†</sup> 赵葆常<sup>1)</sup>

1)(西安交通大学理学院, 西安 710049)

2)(非平衡物质结构与量子调控教育部重点实验室, 西安 710049)

(2008 年 8 月 10 日收到; 2009 年 9 月 8 日收到修改稿)

基于自行研制的时空混合调制型偏振干涉成像光谱仪(TSMPHS), 提出了一种新的干涉图和光谱的获取模式, 分析了干涉数据的排列方式, 详细阐述了不同时刻获得的一系列干涉图组合的方法, 并由 TSMPHS 获得了单色光和复色光的干涉图。理想的干涉图和复原光谱充分显示了这种探测模式的优越性, 如宽场、高探测灵敏度和高通量等。

**关键词:** 时空混合调制, 偏振干涉成像光谱仪, 获取模式

**PACC:** 0760, 4230S, 4230V

## 1. 引言

成像光谱技术是遥感探测技术的前沿科学, 可应用于紫外、可见光、红外光区域。通过成像技术和光谱技术的结合, 干涉成像光谱仪能获取目标的二维空间信息和一维光谱信息, 它兼有照相机、偏振仪和光谱仪的三重功能, 在资源普查、环境检测、军事侦察等许多光学遥感技术领域都有着重要的应用价值<sup>[1-7]</sup>。

早期的干涉成像光谱仪以迈克耳逊干涉仪为基础, 是一种依靠动镜扫描的时间调制型傅里叶变换光谱仪(TMHS)。它具有一套高精度的动镜驱动系统, 通过改变动镜的位置产生光程差, 获得干涉图像。由于受系统狭缝的限制, 动镜运动一个周期只能得到一列地元的干涉数据。要获得整个待测区域的干涉图, 首先要按时间顺序依次读取某列地元在动镜运动一个周期内各个时刻的干涉数据, 再按空间顺序依次对每一列地元读取一个周期, 组合起来才能得到此地区完整的干涉信息。这种干涉图获取模式要一个周期才能完成对干涉图的采样, 耗时长, 数据记录繁琐, 要严格依照时间和空间顺序读

取数据, 但原理简单, 数据组合容易。

带有扫描部件的传统光谱仪的这些缺点促使无运动部件静态光谱仪的产生。上世纪 90 年代, 随着二维探测技术的发展, 国际上出现了无运动部件的空间调制型干涉成像光谱仪(SMIIS)<sup>[8-10]</sup>。这些装置大部分是基于横向剪切量发生干涉, 例如 Sagnac 干涉仪。与 TMHS 相比, SMIIS 具有稳态、实时、宽场的优点。

空间调制型干涉成像光谱仪以二维面阵 CCD 作为探测器, 能同时得到视场内一列地元的干涉信息, 不必像时间调制型那样等待一个周期。如图 1 所示, 探测时, 每个地元的干涉信息分别被记录在面阵探测器的一行上, 每列地元的干涉数据记录在一幅 CCD 图片里。当仪器视场扫过待测区域, 就可得到整个区域的干涉图。空间调制型干涉成像光谱仪消除了时间因素的影响, 只要按空间探测的顺序, 依次对每一幅 CCD 图片进行处理, 能得到一列地元的干涉数据, 再将这些数据按空间顺序组合, 就可以得到区域的干涉图。这种干涉图获取模式实时性好, 数据后续处理简单, 但由于受到系统狭缝的限制, 视场角和通量不够大, 造成数据相互影响, 信噪比不高。

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号:40537031), 国家高技术研究发展计划(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)资助的课题。

† 通讯联系人。E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

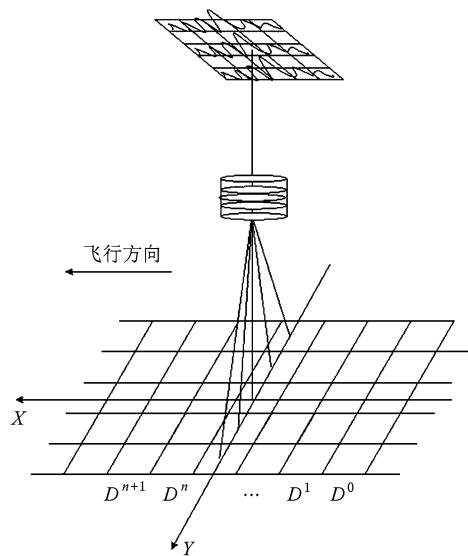


图 1 空间调制型视场区域

## 2. TSMPIIS 干涉图获取原理

### 2.1. 装置

新型的 TSMPIIS 在保留了时间、空间调制型干涉成像光谱仪各项优点的同时,进一步提高了仪器的光通量,增大了仪器的视场角,而且简化了仪器结构,使干涉成像光谱仪结构简单、实用性强、成像效果好<sup>[11-26]</sup>. 本文在简要介绍 TSMPIIS 原理的基础上,着重对它的干涉图获取模式进行了研究,因为它有着独特的干涉图形成模式.

TSMPIIS 在我们以前相关的文章中已有详细的介绍<sup>[11-26]</sup>, 这里只简要提及. 如图 2 为 TSMPIIS 的系统结构图, 它在原理上的主要创新就是去掉了狭缝、傅里叶透镜、柱面透镜, 它只需要加一个收集镜(成像镜)来减少光聚焦和增大光通量, 并用 Savart 偏振镜代替分束器. 要指出的是, 对于此种成像光谱仪, 目标的干涉信息不是同时获得的, 而是依靠仪器的自推扫, 通过光源相对于干涉仪的视场角的变化改变光程差, 在空间区域形成干涉图, 又由于干涉图形成的非同时性, 我们称它为时空混合型偏振干涉成像光谱仪.

当入射光经过 Savart 偏振镜时, 将被分成两束光, 它们之间的横向剪切量为

$$d = \sqrt{2}t \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2}. \quad (1)$$

光程差(OPD)为

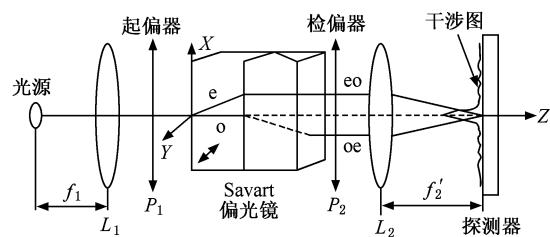


图 2 TSMPIIS 系统结构图

$$\Delta = t \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} (\cos\omega + \sin\omega) \sin i. \quad (2)$$

这个光程差也是探测器所得到的最终的光程差, 其中,  $a = 1/n_e$ ,  $b = 1/n_o$ ,  $n_e$ ,  $n_o$  分别是寻常光和非寻常光的晶体折射率,  $t$  是单个 Savart 偏光镜的厚度,  $\omega$  是入射面和 Savart 偏光镜主截面的夹角, 通常情况下  $\omega = 0$ .

### 2.2. 干涉图获取模式

如图 3 所示, TSMPIIS 改变了空间调制型干涉成像光谱仪的前置光学系统, 每次进入视场的不是一列地元, 而是一定区域内的所有地元, 且每个地元在一帧 CCD 图上只有一个干涉数据. 要得到一个地元的完整干涉信息, 就要按照地元干涉数据形成的特点, 从每一帧 CCD 图中分别取出一个数据, 并将它们有规律的组合. 地元光线的入射角度不同, 所得到的光程差就不同. 随着仪器的移动, 被测物点相对仪器的视场角不断变化, 就会在空间形成干涉图. 这种仪器必须要用二维面阵 CCD 作为探测器, 同时被探测目标与干涉仪之间有相对匀速运

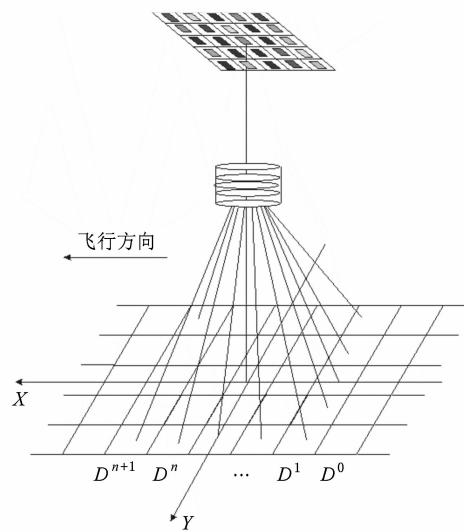


图 3 时空混合型视场区域

动,在满足采样定理的前提下,可获得均匀的干涉数据.

从(2)式中可以看出,入射角不同,光程差就不同.随着TSMPIIS的推扫,被测物点相对仪器的视场角不断地变化,就会在空间形成干涉图.TSMPIIS须用二维面阵CCD作为探测器,同时被探测目标与干涉仪之间有相对匀速运动,在满足采样定理的条件下,可以获得均匀的干涉数据.

在实际应用中,载有成像光谱仪的飞行器在高空飞行,待测地元依次进入仪器视场.视场内不同地元以不同的入射角同时进入光谱仪,探测器记录下了不同地元的干涉强度.下一时刻,飞行器向前运动了一段距离,各地元与飞行器所成的角度相对于前一时刻发生了变化,探测器记录了各个地元在新的入射角时各自的干涉强度.依次类推,当飞行器飞过整个区域时,各个地元都经历了最大入射角、零、负的最大入射角的过程,探测器分别记录下了各个地元在最大光程差、零光程差、负的最大光程差过程中各个状态的干涉强度.由几何成像关系,物点通过此干涉成像光谱仪后与像点关于坐标原点对称.

现在以任意一行地元为例,具体讨论干涉数据的形成过程.以偏振干涉成像光谱仪的轴线对应的地元为坐标原点,飞行器飞行方向为x轴正方向,逆时针旋转90°为y轴正方向,在被测区域和面阵探测器上建立相同的坐标系.

如图4所示,刚开始时,第 $n-2$ 行第一个地元 $D_0$ 进入视场范围,位于( $n, n-2$ ),与光谱仪轴线成最大入射角 $a_0$ ,成像在探测器( $-n, -n+2$ )位置,记为 $d_0$ .时刻1,如图5所示,飞行器向前飞行一段距离, $D_0$ 相对于飞行器向后运动,位于( $n-1, n-2$ ),与光谱仪轴线成角 $a_1$ ,成像于( $-n+1, -n+2$ ),记为 $d_1$ ;第二个地元 $D_1$ 进入视场,成像在 $d_0$ ,与光谱仪轴线成角 $a_0$ ,和上时刻 $D_0$ 状态相同.时刻2,如图6所示,第三个地元 $D_2$ 进入视场,取代 $D_1$ 位置, $D_1, D_0$ 成像位置分别向后移动一位,三点位于( $-n, -n+2$ ),( $-n+1, -n+2$ ),( $-n+2, -n+2$ ),与光谱仪轴线所成角度分别为 $a_0, a_1, a_2$ ,成像在 $d_0, d_1, d_2$ .如此反复,如图7、图8所示, $D_0$ 的位置相对于飞行器不断向后移动,它成的像 $d_0$ 在探测器上不断前移,与此同时,不断有新的地元进入视场,填补前面地元移动后留下的位置.(这里用同种颜色表示对应的物点与像点)

当地元 $D_0$ 移出了视场范围,它所成的像就不

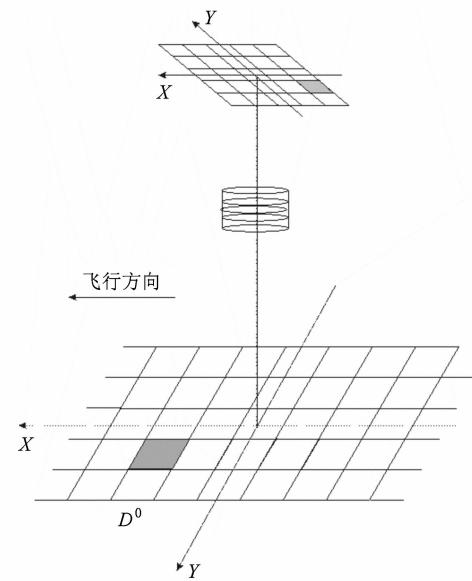


图4  $D_0$ 进入视场瞬间

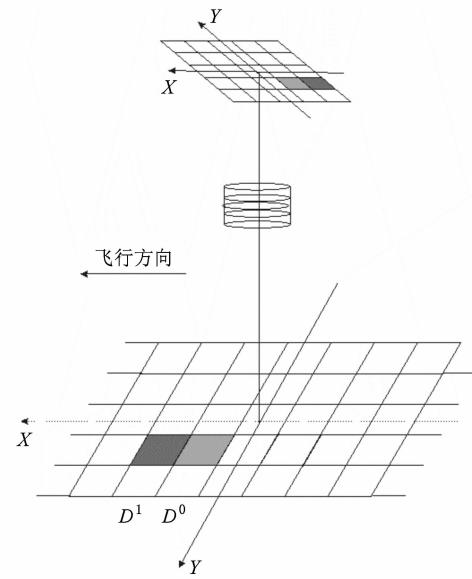


图5 时刻1成像瞬间

能够被探测器接收到,如图9所示.地元 $D_0$ 从进入视场到移出视场,面阵探测器记录了这一过程中此列地元在各个位置时的干涉强度,用数组简要表示:

时刻0:  $d_0^0$ .

时刻1:  $d_1^0, d_0^1$ ,

时刻2:  $d_2^0, d_1^1, d_0^2$ ,

.....

时刻 $n-1$ :  $d_{n-1}^0, d_{n-2}^1, \dots, d_2^{n-3}, d_1^{n-2}, d_0^{n-1}$ ,

时刻 $n$ :  $d_n^0, d_{n-1}^1, d_{n-2}^2, \dots, d_2^{n-2}, d_1^{n-1}, d_0^n$ ,

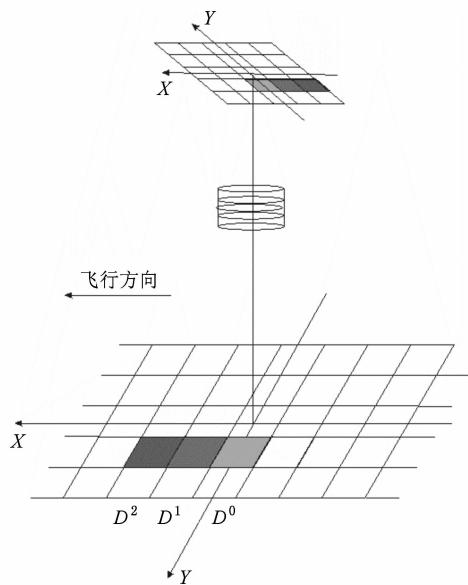


图 6 时刻 2 成像瞬间

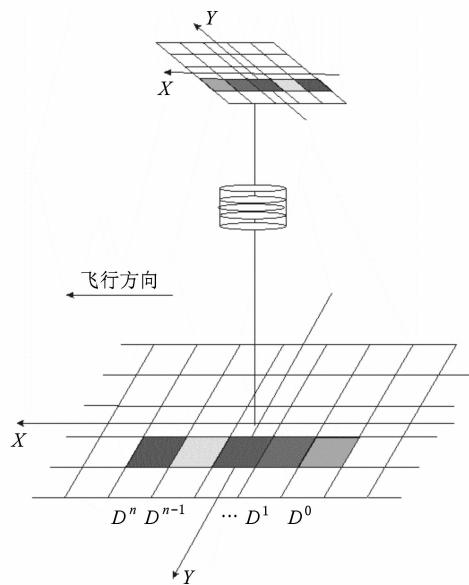


图 8 时刻 4 成像瞬间

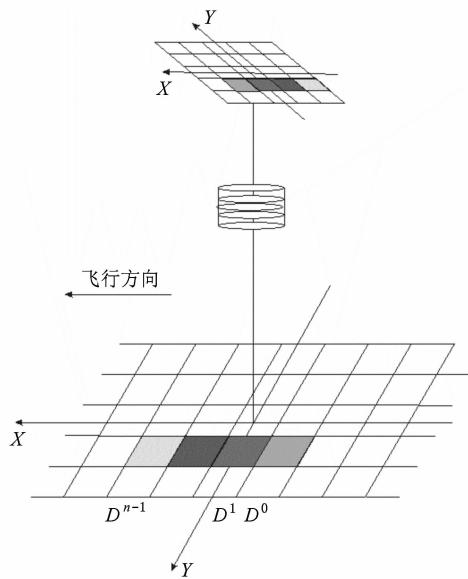
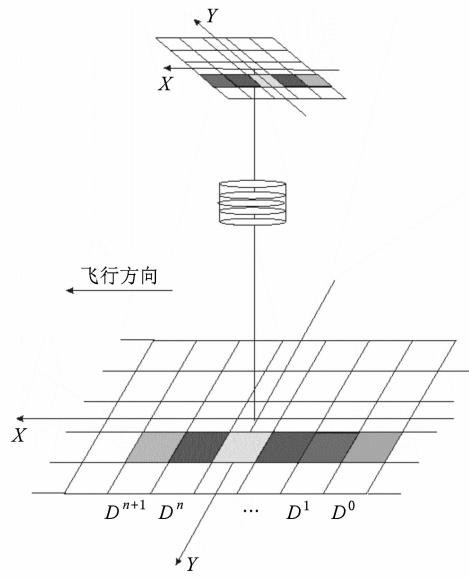


图 7 时刻 3 成像瞬间

图 9  $D_0$  移出视场瞬间

$d$  的上标表示面阵探测器记录的地元序号,下标表示记录地元数据的面阵探测器的序号.

设飞行器飞行高度为  $H$ , CCD 像元间距  $l_1 = 10 \mu\text{m}$ ,透镜  $L_2$  的焦距  $f_2 = 50 \text{ mm}$ .如图 10 所示,由几何成像关系

$$\frac{l_1}{f_2} = \frac{l_2}{H}, \quad (3)$$

得  $l_2 = 2H \times 10^{-4} \text{ m}$ .

可见,CCD 上相邻两个像元,记录着地面上相邻  $2H \times 10^{-4} \text{ m}$  两个点的信息.如此进行一次拍摄时,理

论覆盖面积为  $1024H \times 1024H \times 10^{-8} \text{ m}^2$ .若任一地元  $A$  的地面坐标为  $(x, y)$ ,  $A$  点距地面坐标原点的距离

$$l = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} i = \frac{l}{H}. \quad (5)$$

则任意一点地元  $A$  的入射角

$$i = \arctg(\sqrt{x^2 + y^2}/H), \quad (6)$$

视场角也可由  $x$  方向的偏角和  $y$  方向的偏角表示  $(i_x, i_y)$ ,

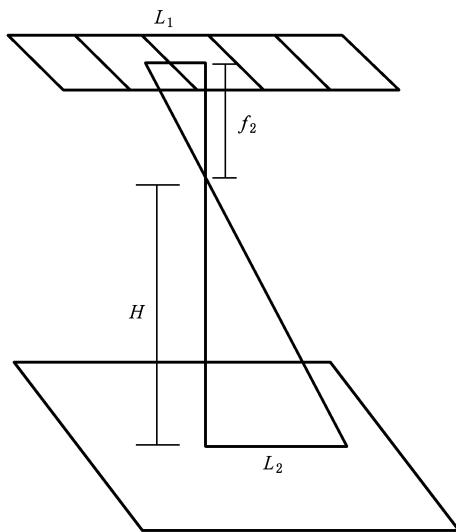


图 10 物像几何关系

$$i_x = \arctg(x/H), \quad (7)$$

$$i_y = \arctg(y/H). \quad (8)$$

### 3. 实验及数据处理

我们用 STMPIIS 对目标进行实验, 得到目标区域 512 幅连续 CCD 图像, 图 11 是用波长为 0.6328  $\mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器作为单色光源, 得到的其中的一幅<sup>[12]</sup>. 这里采用敏通 512  $\times$  512 CCD 相机, CCD 像元尺寸为  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ , 总光敏面尺寸为  $5.12 \times 5.12 \text{ mm}^2$ , 探测器总面积为  $26.2144 \text{ mm}^2$ , CAMPE1000 图像采集卡作为图像采集系统, 横向剪切量  $d = 1 \text{ mm}$ , 透镜  $L_2$  的焦距  $f_2 = 50 \text{ mm}$ . 装置参数如下.

最大光程差

$$\Delta_{\max} = d \times x_{\max}/f_2 = 0.0512 \text{ mm}; \quad (9)$$

理论分辨率

$$\Delta\sigma = 1/2 \times \Delta_{\max} = 97.66 \text{ cm}^{-1}, \quad (10)$$



图 11 单色光的干涉图和目标像

视场角的最大值是  $i \approx 3^\circ$ .

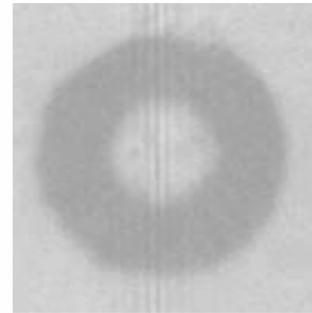


图 12 白光的干涉图和目标像

### 3.1. 数据处理

实验中, 背景噪音是产生数据误差的主要来源, 它在整幅图中符合均匀分布. 在下面处理中, 我们忽略其他次要因素对数据的影响. 由于干涉图中间部分的干涉信息较强, 噪声不明显, 而始末端噪声占的比重相对大些, 针对这种情况, 我们以开始 20 个数据的平均值作为噪音滤除:

$$\text{filter}(a) = a - \frac{1}{20} \times \sum_{i=1}^{20} a(i), \quad (11)$$

这里,  $a$  为地元的干涉数据.

为了进一步减小干涉图在区间边缘的不连续性, 抑制光谱还原后谱线旁瓣的产生, 我们进行三角切趾:

$$A(n) = 1 - \frac{2|n|}{N}, \\ n = -\frac{N}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N}{2}, \quad (12)$$

$$I(\Delta) = \text{filter}(a)A(n). \quad (13)$$

由于各种误差的影响, 常常会出现零光程差找不准的情形, 有必要进行相位修正. 首先找出  $I(\Delta)$  中干涉数据最大处, 以其为中心, 用左右各 32 个点作一短边傅里叶变换. 因为误差的存在, 左右数据不是关于中心对称的, 这样得到的短边光谱数据有实部, 也有虚部存在<sup>[27,28]</sup>.

$$B(v) = \int_{-32}^{+32} I(\Delta) \cos(i2\pi v \Delta) d\Delta, \quad (14)$$

令

$$\varphi(v) = \arctg \frac{\text{Im}(B(v))}{\text{Re}(B(v))}, \quad (15)$$

作为相位修正因子. 重新用中心一侧较多数据点作一长边傅里叶变换, 得到长边光谱  $B'(v)$ , 根据<sup>[29]</sup>

$$B_0(v) = B'(v) e^{-i\varphi(v)}, \quad (16)$$

可以将真实光谱  $B_0(v)$  复原出来.

### 3.2. 实验结果

图 13 是 TSMPIIS 在 TSM 模式下获得的一个白光干涉图和目标像。图 14 是从 CCD 图像中取出数据并组合成的目标点的干涉图。图 15 是通过对实验干涉数据进行滤波、三角切趾后得到的白光的干涉图，图 16 是白光的复原光谱图。

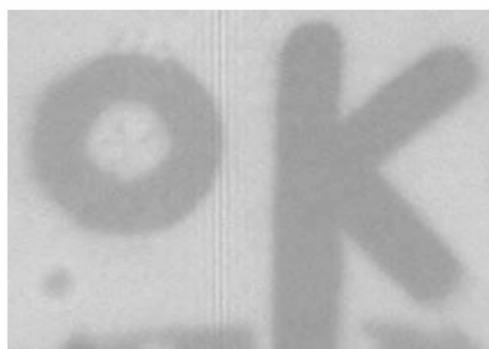


图 13 白光干涉图和目标像

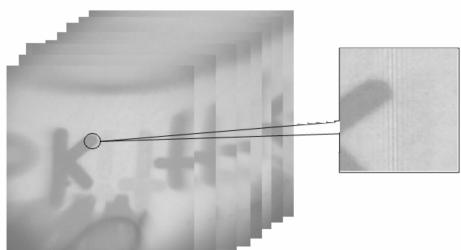


图 14 目标点的组合干涉图

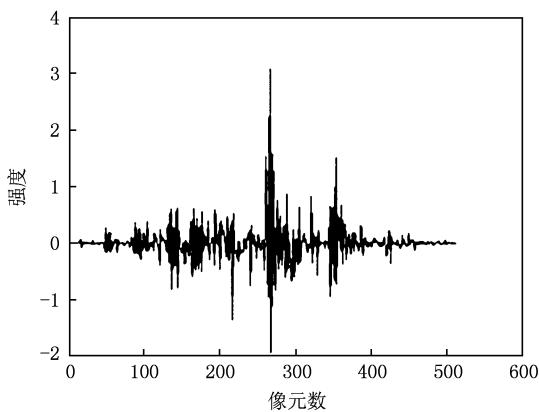


图 15 白光的干涉图

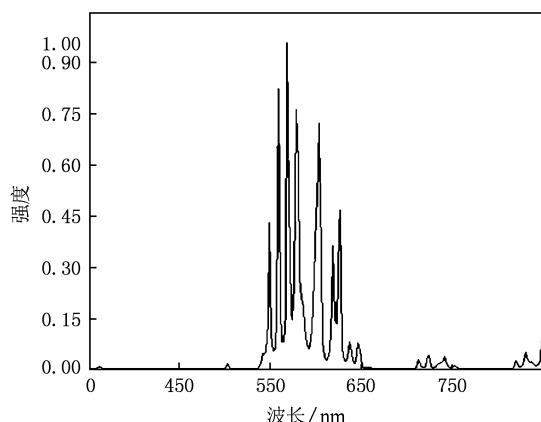


图 16 白光的复原光谱图

### 4. 结 论

1. TSMPIIS 是一种利用偏振光进行干涉成像的新型成像光谱仪, 它通过自推扫, 造成地元偏振光线入射角不断改变, 从而得到地元各个状态时的一系列干涉数据. 地元的干涉图是由各时刻的干涉数据按照物像对应规律组合而成.

2. 时间调制型成像光谱仪要改变动镜位置一个周期, 用线阵 CCD 探测器得到一列目标的干涉图; 空间调制型成像光谱仪用面阵 CCD 可实时得一列目标的干涉图; 而 TSMPIIS 通过偏振仪将一束入射光线分为两束线偏振光, 用面阵 CCD 探测器一次可得到目标区域整体干涉图, 每个目标点在图中只有一个干涉数据. 通过空间位置的变化, 目标点的入射角也就发生变化, 这样 TSMPIIS 就可以获得一系列的干涉数据. 目标的干涉图就是不同时刻的这些干涉数据的有规律的叠加.

3. TSMPIIS 取消了分束器, 并用成像镜代替傅里叶透镜, 增大了视场角和光通量, 而且地元各个干涉数据是从不同时刻的 CCD 图中分别取得, 这种数据获取模式减小了数据间的相关度, 提高了信噪比, 消除了数据对时间顺序和空间顺序的双重依赖性, 增加了复原光谱的准确性, 也存在后续数据处理复杂的缺点<sup>[30]</sup>, 但随着计算机技术和数学算法的发展, 这一问题是逐步可以解决的.

[1] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2000 *Opt. Tech.* **26** 232 (in Chinese) [张淳民、相里斌、赵葆常 2000 光学技术 **26** 232]  
[2] Bel R J 1972 *Introductory to Fourier Transform Spectroscopy*

(New York: Academic) p19  
[3] Persky M J 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 4763  
[4] Zhang C M, He J 2006 *Opt. Exp.* **14** 12561

- [5] Wu L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Opt. Commun.* **273** 67  
[6] He J, Zhang C M 2005 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** 613  
[7] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 67 (in Chinese) [叶健勇、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 67]  
[8] Junnila M L, Kauppinen J, Ikonen E 1991 *J. Opt. Soc. Am. A* **8** 1457  
[9] Junnila M L 1992 *Appl. Opt.* **31** 4106  
[10] Moller K D 1995 *Appl. Opt.* **34** 1493  
[11] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2002 *Opt. Commun.* **203** 21  
[12] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2003 *Opt. Commun.* **227** 221  
[13] Wu L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Opt. Commun.* **273** 67  
[14] 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]  
[15] 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]  
[16] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090  
[17] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** 815  
[18] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 192 (in Chinese) [张淳民、赵葆常、相里斌 2001 光学学报 **21** 192]  
[19] Zhang C M, Zhao B C, Yuan Z L, Huang W J 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 085401  
[20] Zhang C M, Yan X G, Zhao B C 2008 *Optics Communications* **281** 2050  
[21] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B, Li Y C, Peng Z H 2006 *Proc. SPIE* **6150** 615001  
[22] Zhang C M Zhao B C, Yuan Y, He J 2006 *Proc. SPIE* **6032** 60320T1  
[23] Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Ye J Y 2007 *Proc. SPIE* **6279** 62791D1  
[24] Zhang C M, Jian X H 2010 *Opt. Lett.* **35** 366  
[25] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B, Li Y C 2006 *Optik* **117** 265  
[26] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2000 *Proc. SPIE* **4087** 957  
[27] Patterson B A, Antoni M, Courtial J 1996 *Opt. Commun.* **130** 1  
[28] Courtial, Patterson B A, Harvey A R 1996 *Appl. Opt.* **35** 6698  
[29] Zhang G Z 1988 *Theory of Fourier Transform Spectrometer* (Guangzhou: Sun Yat-sen University Press) p44 (in Chinese) [张光昭 1988 (广州:中山大学出版社) 第 44 页]  
[30] 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]

## Research on the mode of obtaining interferograms based on the temporally and spatially mixed modulated polarization interference imaging spectrometer\*

Yan Xin-Ge<sup>1(2)</sup> Zhang Chun-Min<sup>1(2)†</sup> Zhao Bao-Chang<sup>1)</sup>

1) (School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Non-equilibrium Condensed Matter and Quantum Engineering Laboratory, the Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an 710049, China)

(Received 10 August 2008; revised manuscript received 8 September 2009)

### Abstract

Based on the temporally and spatially mixed modulated polarization interference imaging spectrometer (TSMPIIS) developed by us, a novel mode for obtaining interferogram and spectrum is proposed. The interference data arrays acquired with this mode are analyzed, and the method for combining a series of interferograms at different moments is explained in detail. Furthermore, the interferograms of monochromatic light and polychromatic light obtained by TSMPIIS are processed. The satisfactory interferogram and reconstructed spectra show the superiority of this detection mode, such as wide field of view, high detection sensitivity and high throughput, etc.

**Keywords:** temporally and spatially mixed modulated, polarization interference imaging spectrometer, interferogram obtaining model

**PACC:** 0760, 4230S, 4230V

\* 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).

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