

文章编号 1004-924X(2010)11-2325-07

# 强度调制偏振光谱仪的系统设计

宋志平<sup>1,2</sup>, 洪 津<sup>1</sup>, 乔延利<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 安徽大学 物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230039)

**摘要:** 理论分析和实验研究了强度调制偏振光谱仪系统参数的设计。介绍了强度调制偏振光谱仪的结构原理, 分析了调制器设计、光谱仪选型与系统指标间的匹配关系。给出了一个完整的设计实例, 以搭台方式建立了强度调制偏振光谱仪原理实验装置, 并对平行光管直接输出的光和经起偏器起偏后输出的光进行了偏振光谱测量和分析。结果表明: 在有效测量波段内(525 ~ 700 nm), 以卤钨灯为光源的平行光管直接输出光的偏振度值 < 10%; 经过线偏振器起偏后输出光的偏振度值接近 100%, 与理论分析的结果一致, 验证了基于强度调制技术设计偏振光谱仪方法的可行性。

**关键词:** 光学测量; 偏振光谱仪; 强度调制; 解调

**中图分类号:** TP73; TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101811.2325

## System design of intensity modulation spectropolarimeter

SONG Zhi-ping<sup>1,2</sup>, HONG Jin<sup>1</sup>, QIAO Yan-li<sup>1</sup>

- (1. *Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*
2. *School of Physics & Material Science, Anhui University, Hefei 230039, China*)

**Abstract:** The parameter design of a Intensity Modulation Spectropolarimeter (IMS) was studied and analyzed in this paper. The basic concept and structure of the IMS were described and the dependence on modulator design, spectrometer selection and system performance was analyzed. By taking an integrated system design for an example, the IMS experimental system was established in the laboratory, the basic concepts and characteristics of the technique were verified and the polarization spectra from a typical light source were also tested. Experimental results show that the polarized degree of the light from a tungsten-halogen lamp collimator is less than 10%, but it is about 100% when the light is polarized by a polarizer in the spectral range of 525-700 nm. These results are coincident with the theoretical results well, which verifies the feasibility of method that spectropolarimeter can be realized based on the intensity modulation.

**Key words:** optical measurement; spectropolarimeter; intensity modulation; demodulation

收稿日期: 2010-02-02; 修订日期: 2010-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60778023)

## 1 引言

强度调制是近年来快速发展的一种目标高光谱偏振信息同步获取技术。美国 Aerodyne Research 公司的 P. Kebabian 在 20 世纪 90 年代第一次提出了该技术概念<sup>[1]</sup>。由于偏振光谱信息在地球环境监测、大气气溶胶参数检测、目标识别、材料特性研究以及生物医学等领域具有独特的应用优势<sup>[2-6]</sup>, 该技术一经提出即在美国、日本等发达国家得到积极发展<sup>[7-13]</sup>。1999 年底, 日本北海道大学在实验室搭建了基于该技术的偏振光谱仪试验装置, 并进行了测量试验; 2000 年以来, 美国的多所大学和研究所在强度调制成像和非成像偏振光谱信息获取技术领域进行了积极的研究和探索; 2006 年, NASA 开展了强度调制高光谱偏振信息获取技术在气溶胶参数反演方面的应用研究, 取得了比较满意的试验结果, 同时也针对存在的问题制定了后期的研究计划。中科院安徽光机所在偏振光谱信息获取系统研制及偏振信息解译方法研究领域积累了丰富的经验<sup>[14-16]</sup>。针对目前国内普遍采用的偏振光谱信息获取方法存在的不足, 2007 年安徽光机所开始进行强度调制偏振光谱信息获取技术的研究工作, 在国家相关项目支持下, 已经完成了可见光波段的试验台原理实验装置的研制工作, 取得了阶段性的研究成果。

与传统的偏振光谱信息测量方法相比, 强度调制技术的优点主要体现在以下几个方面: 一是采用单路光学系统, 一次测量即可得到目标的高光谱偏振信息, 解决了传统测量方法存在的时间配准或空间配准问题, 有效提高了偏振测量精度; 二是可以获取目标圆偏振和完整的高光谱偏振信息; 三是获取系统无转动部件, 硬件结构简单可靠, 易于工程化, 其性能主要由全新的调制解调机理及系统中选用的光谱仪性能决定。因此, 调制器设计、光谱仪选型及解调算法设计是整个系统设计的关键。本文针对强度调制偏振光谱仪系统设计进行了探讨, 给出了设计实验结果。

## 2 基本原理

强度调制偏振光谱仪系统结构原理如图 1 所示。

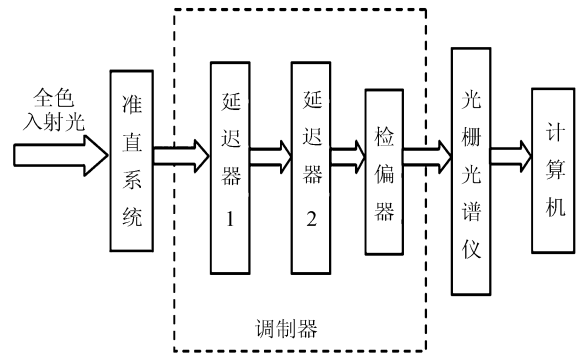


图 1 强度调制偏振光谱仪结构原理

Fig. 1 Configuration of spectropolarimeter based on intensity modulation

强度调制偏振光谱仪由准直系统、调制器、光栅光谱仪和计算机组成。其中, 准直系统将入射光变成平行光后垂直正入射到调制器; 调制器由两块延迟器和一块检偏器组成, 延迟器 1 的快轴方向与延迟器 2 的快轴方向成  $45^\circ$ ; 检偏器的透光轴方向与延迟器 1 的方向平行; 光栅光谱仪用来测量调制器输出的功率谱; 计算机执行解调算法程序从功率谱数据中解调出入射光的 4 个 Stokes 矢量元素谱, 从而实现偏振光谱仪的功能。其原理的数学描述如下:

由偏振光学理论及矩阵的级联计算方法, 可以得到调制器输出功率谱  $P(\sigma)$  的表达式如下<sup>[17]</sup>:

$$P(\sigma) = \frac{1}{2}S_0(\sigma) + \frac{1}{2}S_1(\sigma)\cos\phi_2(\sigma) + \frac{1}{2}S_2(\sigma)\sin\phi_1(\sigma)\sin\phi_2(\sigma) - \frac{1}{2}S_3(\sigma)\cos\phi_1(\sigma)\sin\phi_2(\sigma), \quad (1)$$

式中:  $\sigma=1/\lambda$ , 为波数;  $S_0(\sigma), S_1(\sigma), S_2(\sigma), S_3(\sigma)$  为入射光的 Stokes 矢量元素谱;  $\phi_j(\sigma)=2\pi\Delta n D_j\sigma$  ( $j=1, 2$ ) 表示光线在经过延迟器 1 和延迟器 2 过程中 O 光和 E 光间的相位差。其中  $\Delta n$  表示延迟器中 O 光和 E 光的折射率差,  $D_j$  ( $j=1, 2$ ) 分别表示两个延迟器的厚度。

令

$$S_{23}(\sigma) = S_2(\sigma) + iS_3(\sigma)$$

则

$$S_2(\sigma) = |S_{23}(\sigma)|\cos(\arg\{S_{23}(\sigma)\}), \quad (2)$$

$$S_3(\sigma) = |S_{23}(\sigma)|\sin(\arg\{S_{23}(\sigma)\}), \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1)并整理可得

$$P(\sigma) = \frac{1}{2}S_0(\sigma) + \frac{1}{4}S_1(\sigma)(e^{i2\pi L_2\sigma} + e^{-i2\pi L_2\sigma}) + \frac{1}{8}\{S_{23}(\sigma)e^{i[2\pi(L_2-L_1)\sigma]} + S_{23}^*(\sigma)e^{-i[2\pi(L_2-L_1)\sigma]}\} - \frac{1}{8}\{S_{23}(\sigma)e^{-i[2\pi(L_2+L_1)\sigma]} + S_{23}^*(\sigma)e^{i[2\pi(L_2+L_1)\sigma]}\}, \quad (4)$$

其中的  $L_j = \Delta n D_j$  ( $j=1, 2$ ), 是 O 光和 E 光在经过延迟器过程中产生的光程差。式(4)表明:调制器输出的功率谱是已调制入射光 Stokes 矢量元素谱的线性叠加, 调制器中两延迟器的厚度决定了载波信号的频率。

对式(4)进行傅里叶反变换可得到其形如式(5)的自相关函数。

$$C(h) = A_0(h) + A_1(h - (L_2 - L_1)) + A_1^*(-h - (L_2 - L_1)) + A_2(h - L_2) + A_2^*(-h - L_2) + A_3(h - (L_2 + L_1)) + A_3^*(-h - (L_2 + L_1)), \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} A_0(h) &= F^{-1}\left\{\frac{1}{2}S_0(\sigma)\right\} \\ A_1(h) &= F^{-1}\left\{\frac{1}{8}S_{23}(\sigma)\right\} \\ A_2(h) &= F^{-1}\left\{\frac{1}{4}S_1(\sigma)\right\} \\ A_3(h) &= F^{-1}\left\{\frac{1}{8}S_{23}^*(\sigma)\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

待测光的 Stokes 矢量元素谱通常是“带限”的, 通过合理设计延迟器的厚度, 适当控制载波信号的频率, 可确保已调信号在频率域中无混叠现象, 则式(5)中的每一项均可通过带通滤波器截取出来。当截取式(5)中的  $A_0(h)$ ,  $A_1[(h - (L_2 - L_1))]$  和  $A_2(h - L_2)$  3 项后, 再按式(7), (8), (9)即可计算出入射光的 Stokes 矢量元素谱, 最后按式(10)可计算出入射光的偏振度谱。

$$F\{A_0(h)\} = \left[\frac{1}{2}\right]S_0(\sigma), \quad (7)$$

$$F\{A_1(h - (L_2 - L_1))\} = \left[\frac{1}{8}e^{i[\phi_2(\sigma) - \phi_1(\sigma)]}\right] \{S_2(\sigma) + iS_3(\sigma)\}, \quad (8)$$

$$F\{A_2(h - L_2)\} = \left[\frac{1}{4}e^{i\phi_2(\sigma)}\right]S_1(\sigma), \quad (9)$$

$$P(\sigma) = \frac{\sqrt{S_1(\sigma)^2 + S_2(\sigma)^2 + S_3(\sigma)^2}}{S_0(\sigma)}. \quad (10)$$

### 3 系统设计分析

上述强度调制偏振光谱仪功能的实现, 有赖于其结构原理中调制器、光栅光谱仪及解调算法等模块的合理设计, 相关参数的选择必须满足一定的制约关系。

#### 3.1 调制器设计

调制器是强度调制偏振光谱仪中实现待测光偏振光谱信息调制的核心模块, 由两块延迟器和一块检偏器组成。调制器的设计关键体现在两个方面: 一是两块延迟器的方向以及检偏器的透光轴方向必须满足结构原理中所述的角度关系; 二是两块延迟器的厚度参数的选择。其中第一点可借助精密转台, 结合延迟器、偏振器的光学特性, 通过光学方法得到保证; 第二点则需要根据系统所设计的偏振光谱分辨率指标, 结合选用的光栅光谱仪的参数进行必要的分析计算。

首先, 从式(5)和式(6)可以看出, 延迟器输出的功率谱是待测光信号的 Stokes 矢量元素谱经过 7 个载波信号调制后的线性叠加, 其载波中心频率分别为  $-(L_2 + L_1)$ ,  $-L_2$ ,  $-(L_2 - L_1)$ ,  $L_2 - L_1$ ,  $L_2$  和  $L_2 + L_1$ 。由此可知, 强度调制偏振光谱仪的极限偏振光谱分辨能力为系统所选用的光栅光谱仪的  $1/7$ 。如果两延迟器的厚度取两倍关系  $D_2 = 2D_1$ , 则  $L_2 = 2L_1$ , 对应延迟器 1 的厚度取值满足式(11)关系:

$$7D_1\Delta n \leq \frac{s_N}{\Delta\sigma}, \quad (11)$$

式中  $s_N$  为光栅光谱仪的采样点数,  $\Delta\sigma$  为光栅光谱仪能够响应的波数范围。通常延迟器的厚度设计取决于系统的偏振光谱分辨率, 比如在  $\Delta\sigma$  波数范围内需要分辨  $N$  个波段的偏振信息, 则  $D_1$  可按式(12)进行计算, 但必须满足式(11)的制约关系:

$$D_1 = \frac{N}{\Delta\sigma \times \Delta n}. \quad (12)$$

调制器中的检偏器只要在测量的波数范围内具有足够高的消光比即可。

#### 3.2 光栅光谱仪选型

系统中的光栅光谱仪可以选用成品的光谱仪, 但必须根据强度调制偏振光谱仪的设计参数来进行光栅光谱仪的选型, 重点关注光谱响应范

围、光谱分辨率及系统的信噪比等参数。

### 3.3 解调算法实现

解调算法的主要任务是用软件的方法从调制器输出的功率谱中解调出入射光的 Stokes 矢量元素谱。由上述强度调制偏振光谱仪的基本原理可知,在合理设计调制器、正确选用光栅光谱仪的前提下,采用傅里叶方法可以实现解调过程,具体步骤如下:

(1) 对光栅光谱仪记录的调制器输出功率谱信号进行傅里叶反变换,得到如式(5)的自相关函数;

(2) 对自相关函数进行滤波处理,截取其中的  $A_0(h)$ ,  $A_1[(h-(L_2-L_1))]$  和  $A_2(h-L_2)$  3 项;

(3) 分别对截取的 3 项进行傅里叶变换,按式(7)可计算出目标的 Stokes 矢量元素谱  $S_0(\sigma)$ ,  $S_1(\sigma)$ ,  $S_2(\sigma)$  和  $S_3(\sigma)$ ,再按式(8)计算出目标的偏振度谱。

## 4 设计实例与实验验证

### 4.1 设计实例

下面是强度调制偏振光谱仪设计实例,其设计指标为:光谱波段  $25\ 000\sim 14\ 285.7\ \text{cm}^{-1}$  ( $400\sim 700\ \text{nm}$ ),偏振光谱分辨能力  $669.6(18.7\ \text{nm})$ ,即在可见波段范围内一次测量可解调出 16 个波段的 Stokes 矢量元素谱信息。

#### 4.1.1 确定延迟器厚度

按照  $D_2=2D_1$  的厚度关系设计延迟器,再预留一定的余量,按一次测量解调 20 个波段的 Stokes 矢量元素谱信息来进行厚度计算,则

$$D_1 = \frac{N}{\Delta\sigma \times \Delta n} = \frac{20}{10\ 714.3} = 0.001\ 866\ \text{cm},$$

选用石英材料的延迟器,  $\Delta n \approx 0.009\ 6$ ,可计算出  $D_1 \approx 1.9\ \text{mm}$ ,相应的  $D_2 = 2D_1 = 3.8\ \text{mm}$ 。此时,要求光栅光谱仪在可见波段的采样点数应在 140 以上。

#### 4.1.2 检偏器

选用日本滨松公司的线偏振器作为系统调制器中的检偏器,消光比为  $100\ 000:1$ ,工作波段的标称值为  $400\sim 700\ \text{nm}$ 。

#### 4.1.3 光栅光谱仪

选用 VF921 型光栅光谱仪测量记录调制器输出的功率谱,其主要参数为:光谱波段  $380\sim$

$1\ 080\ \text{nm}$ ,512 元线阵探测器,光谱分辨率  $2\ \text{nm}$ ,可以满足系统的设计要求。

### 4.2 实验验证

通过实验室搭台方式建立强度调制偏振光谱仪原理实验装置,并进行强度调制偏振光谱信息获取实验。实验装置如图 2 所示,集成在光学平台上。

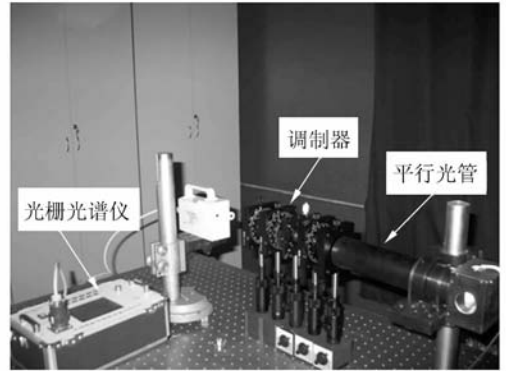


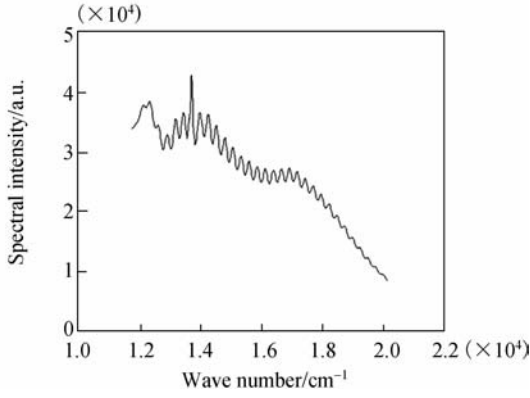
图 2 原理实验装置

Fig. 2 Experimental rig

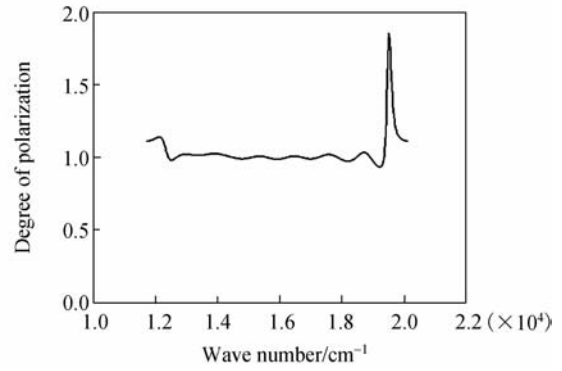
对典型光源的测量实验,可有效验证系统的偏振光谱信息获取能力。实验对两种输出光源进行了比对测量:一个是以卤钨灯泡为光源的平行光管直接输出;另一个是在平行光管的出光口加线偏振器起偏后输出。

图 3 是对平行光管直接输出的测量结果。图 3(a)是调制器输出的功率谱;图 3(b)是经过解调处理后按式(10)计算得到的偏振度谱。从图中可以看出:从平行光管直接输出的光信号具有弱偏振性(在有效测量波段范围内约为 10%左右)。分析认为这主要是由卤钨灯泡的外壳及平行光管中透镜的起偏效应引起的。图 4 是对平行光管的出光口加线偏振器起偏后的测量结果,其中图 4(a)是调制器输出的功率谱;图 4(b)是经过解调处理后按式(10)计算得到的偏振度谱。从图中可以看出调制器具有明显的调制效果,在有效的测量波段范围内,其偏振度均在 100%左右。

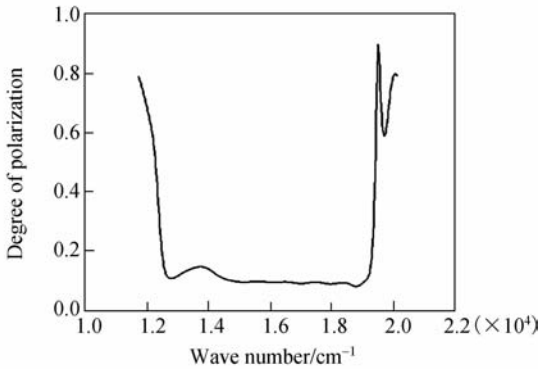
图 3、图 4 中(b)图两端的畸变是由傅里叶变换过程中的边界效应引起的,可通过边界延拓等方法消除或舍弃。另外,实验中所用的线偏振器经检测在小于  $500\ \text{nm}$  波长时的透过率非常低,严重影响了系统的信噪比,所以测量结果的有效



(a) 调制器输出的功率谱  
(a) Power spectrum of modulator

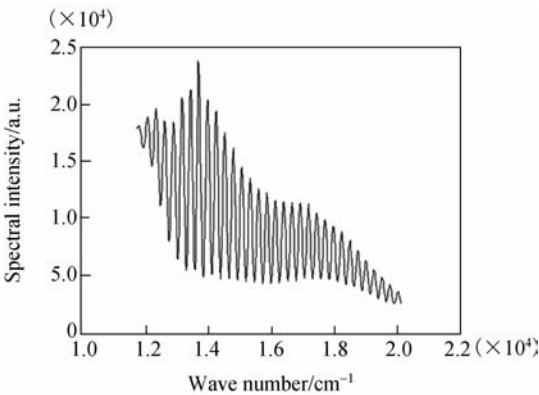


(b) 偏振度谱  
(b) Spectrum of polarization degree



(b) 偏振度谱  
(b) Spectrum of polarization degree

图 3 平行光管直接输出的测量结果  
Fig. 3 Experiments of collimator



(a) 调制器输出的功率谱  
(a) Power spectrum of modulation

图 4 平行光管加起偏器输出的测量结果

Fig. 4 Experiments of polarized collimator

波段取 525~700 nm。由于全色双线偏振光谱源的构建难度非常大,系统的偏振光谱分辨能力很难通过直接测量双线偏振光谱源来进行试验验证,但上述对不同偏振度谱的测量结果与理论分析结果的一致性依然可以表明本文设计方法的科学性和有效性。

### 5 结 论

强度调制是一种全新的偏振光谱信息获取方法,该方法硬件结构简单、实现思路巧妙。本文主要针对系统的基本实现原理及核心设计参数进行讨论,分析了强度调制偏振光谱信息获取系统的设计,并给出了设计实例。通过实验室搭台实验,对平行光管直接输出和经起偏器起偏后的输出进行了偏振光谱信息的测量和解析,在有效的波段内,前者的偏振度值约为 10%,后者的偏振度值约为 100%,与理论分析结果一致,验证了新型偏振光谱仪系统设计、测量及解析方法的有效性。当然实际应用中还有许多问题需要研究,如偏振测量精度的精确标定,系统的信噪比分析以及解调方法的优化设计等。因此,系统实际应用设计中还必须综合考虑诸多因素,方可实现稳定可靠的性能。

## 参考文献:

- [1] IANNARILLI F J, JONES S H. Polarimetric-Spectral Intensity Modulation (P-SIM): enabling simultaneous hyperspectral and polarimetric imaging[J]. *SPIE*, 1999, 3698: 474-481.
- [2] PUST N, SHAW J A. Imaging spectropolarimetry of cloudy skies[J]. *SPIE*, 2006, 6240: 624006-1 - 624006-5.
- [3] CUN Y, CAO N N, CHU J K, *et al.*. Design of sky-light polarization measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1431-1435.
- [4] WINKER B, GU D F, WEN B, *et al.*. Liquid crystal tunable polarization filter for target detection applications[J]. *SPIE*, 2008, 6972: 697209-1-697209-18.
- [5] ARAI K, NISHIMURA Y. Aerosol parameter estimation through atmospheric polarization observation with the different observation angles [J]. *SPIE*, 2009, 7461: 746106-1-746106-9.
- [6] TONIZZO A, ZHOU J, GILERSON A, *et al.*. Multiangular and Hyperspectral Investigation of Polarized light in Case 2 Waters[J]. *SPIE*, 2009, 7473: 747306-1-747306-9.
- [7] WANG B L, SPARKS W B, GERMER T A, *et al.*. A spectroscopic polarimeter for detecting chiral signatures in astrobiological samples[J]. *SPIE*, 2009, 7441: 744108-1-744108-11.
- [8] OKA K, KATO T. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(21): 1475-1477.
- [9] HOMMA K, SHIBAYAM M, YAMAMOTO H, *et al.*. Water pollution monitoring using a hyperspectral imaging spectropolarimeter [J]. *SPIE*, 2005, 5655: 419-426.
- [10] HOMMA K, SHINGU H, YAMAMOTO H, *et al.*. Application of an imaging spectropolarimeter to agro-environmental sciences [J]. *SPIE*, 2004, 5234: 638-647.
- [11] MCMILLAN R W, DERENIAK E, AUMILLER R, *et al.*. Single-frame polarization measurement techniques [J]. *SPIE*, 2008, 6972: 69720T-1-69720T-8.
- [12] JONES S H, IANNARILLI F J, KEBABIAN P L. Realization of quantitative-grade fieldable snapshot imaging spectropolarimeter [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6559-6573.
- [13] AUMILLER R W, VANDERVLUGT C, DERENIAK E L, *et al.*. Snapshot imaging spectropolarimetry in the visible and infrared [J]. *SPIE*, 2008, 6972: 69720D-1-69720D-1.
- [14] 乔延利, 杨世植, 罗睿智, 等. 对地遥感中的光谱偏振探测方法研究[J]. 高技术通讯, 2001, 11(7): 36-39.  
QIAO Y L, YANG SH ZH, LUO R ZH, *et al.*. Research on polarized spectral monitoring for remote sensing of earth [J]. *High Technology letters*, 2001, 11(7): 36-39. (in chinese)
- [15] 宋志平, 洪津, 乔延利, 等. 基于强度调制的新型偏振光谱仪调制器优化设计[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 331-333.  
SONG ZH P, HONG J, QIAO Y L, *et al.*. Optimum design of the modulator in the novel spectropolarimeter based on intensity modulation [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 331-333. (in Chinese)
- [16] 杨伟锋, 洪津, 乔延利, 等. 无人机载偏振 CCD 相机光机系统设计[J]. 光学技术 2008, 34(3): 469-472.  
YANG W F, HONG J, QIAO Y L, *et al.*. Optical-mechanical system design of unmanned aerial vehicle polarization CCD camera [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 469-472. (in chinese)
- [17] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
LIAO Y B. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

## 作者简介:



宋志平(1967—),男,安徽肥西人,博士研究生,副教授,2003年于中科院安徽光学精密机械研究所获得硕士学位,主要从事高光谱偏振信息获取技术及应用的研究。E-mail: zpsong@aiofm.ac.cn



乔延利(1958—),男,河南洛阳人,研究员,博士生导师,1982年于北京邮电大学获学士学位,1984年于中科院安徽光学精密机械研究所获硕士学位,主要从事遥感辐射定标基础、遥感传感器辐射校正、目标及背景波谱特征、偏振遥感成像探测机理和技术以及光学遥感信息表征技术的研究。



洪津(1969—),男,浙江萧山人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获学士学位,主要从事光电信息获取理论及技术的研究。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

## ● 下期预告

## 光纤傅里叶变换光谱技术在 光纤光栅传感解调中的应用

朱 灵,陈明星,方 杰,刘 勇,王 安

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 光电子技术研究室,安徽 合肥 230031)

基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪结构,采用傅里叶变换光谱算法对光纤 Bragg 光栅传感器的波长进行了解调。介绍了光纤傅里叶变换光谱仪(Fiber Fourier Transform Spectrometer,FFTS)基本原理及其结构。宽带光源发出的光经过光纤耦合器进入光纤 Bragg 光栅,其反射光由耦合器返回进入到 FFTS 中进行测量,FFTS 的最高光谱分辨率达到  $0.05\text{ cm}^{-1}$ ,即在近红外  $1\ 550\text{ nm}$  处分辨率为  $0.012\text{ nm}$ 。分别对光纤 Bragg 光栅的应变特性和温度特性进行了测量。实验结果表明:光纤 Bragg 光栅的应变灵敏度是  $0.833\text{ pm}/\mu\epsilon$ ,温度灵敏度是  $19.78\text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。表明 FFTS 系统具有高分辨率、大测量范围的特点,可满足光纤 Bragg 光栅传感器波长解调的需求。