

强度调制偏振光谱仪解调系数参考光测量方法

宋志平¹ 洪 津² 乔延利²

(¹ 安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230039
² 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)

摘要 针对由理论计算得到的解调系数无法实现强度调制偏振光谱仪实验系统(以下简称“实验系统”)测量数据解调处理的问题,提出了测量参考光获取实验系统解调系数的解决方法。该方法通过测量已知偏振态参考光经过实验系统调制器后输出的强度谱,结合傅里叶变换、滤波和逆傅里叶变换等数字信号处理过程,可从测量结果中分离出实验系统的真实解调系数。分析了该方法的理论依据,给出了实验系统解调系数的实测结果,并利用得到的解调系数,对实验系统测量典型待测光源(近似自然光和完全线偏振光)的测量数据进行了解调处理。解调处理结果显示:在有效测量波段范围内(550~650 nm),以卤钨灯为光源的平行光管直接输出光的偏振度值约为 10%;经过线偏振器起偏后,其偏振度值接近 100%,与实际分析结果完全相符。验证了强度调制系统解调系数参考光测量方法的可行性。

关键词 遥感;偏振光谱仪;参考光;解调系数

中图分类号 TP73 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0412003

Method Acquiring the Demodulation Coefficients of Intensity-Modulated Spectropolarimeter by Measuring Reference Light

Song Zhiping¹ Hong Jin² Qiao Yanli²

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

Abstract A novel method is presented to acquire the demodulation coefficients of the intensity-modulated spectropolarimeter (IMS) by measuring the reference light, for the demodulation coefficients obtained by theoretical calculation cannot demodulate the measured data. The demodulation coefficients of IMS can be separated from the intensity spectrum of the reference light passing through the modulator of the IMS, and it is necessary to process the intensity spectrum, such as IFFT, filtering and FFT etc. The principle of the method is analysed in details and the measured results of the demodulation coefficients for IMS prototype are presented. The measured data of quasi-natural light and polarized light from IMS prototype is demodulated by the demodulation coefficients obtained to verify their validity. Experimental results show that the polarization degree of the light from a tungsten-halogen lamp collimator directly is less than 10%, but it is about 100% when the light is polarized by a polarizer in the spectral range of 550~650 nm. These results are coincident with the theoretical results well, which verify the feasibility of the method presented before.

Key words remote sensing; spectropolarimeter; reference light; demodulation coefficient

OCIS codes 120.4640; 120.5410; 120.6200

收稿日期: 2011-11-07; **收到修改稿日期:** 2011-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(60778023)、安徽大学博士科研启动基金(023033190138)和安徽省教育厅重点项目(KJ2011Z021)资助课题。

作者简介: 宋志平(1967—),男,博士,副教授,主要从事偏振光谱信息获取新技术方面的研究。

E-mail: zpsongahu@163.com

1 引 言

偏振光谱信息在地球环境监测、农业遥感、天文观测、医学及目标识别等领域具有广阔的应用前景^[1-13]。强度调制是目前最先进的偏振光谱信息获取技术。该技术利用由两个延迟器和一个检偏器够成的调制器,对表征待测光偏振光谱特性的 4 个 Stokes 矢量元素谱进行调制后形成频域干涉,用光谱仪测量记录待测光经过调制器后输出的强度谱(频域干涉图),结合傅里叶变换、数字滤波、逆傅里叶变换和解调制等数字信号处理算法,可实现待测光 4 个 Stokes 矢量元素谱的同步获取,实现偏振光谱仪的功能。与常规偏振光谱信息获取方法相比,强度调制偏振光谱仪在偏振测量精度、偏振信息的完整性和测量系统的可靠性等方面均具有不可替代的优势^[14,15]。

解调制是强度调制偏振光谱仪测量数据处理过程中最重要的步骤之一,需要用解调系数将待测光 Stokes 矢量元素谱从已调制信号中解调出来。由强度调制偏振光谱仪调制器输出强度谱的表达式可以看出^[15],调制待测光 Stokes 矢量元素谱的载波信号(即解调制过程中的解调系数)完全取决于调制器的硬件设计参数。理论上调制器的硬件设计完成后,解调系数即可直接通过计算得到。但是,在实验

过程中发现,由于调制器在加工、装调过程中难免会引入误差,由公式计算出的载波信号和测量过程中调制器实际形成的载波信号间存在差异,因而直接用计算得到的理想解调系数无法实现强度调制系统实验装置测量结果的解调处理,目前国内外尚未见解决此问题的相关研究报道。经过深入的理论分析和实验研究发现:利用强度调制系统实验装置,测量偏振态已知的参考光,经过相关的数字信号处理运算,可以还原出强度调制系统由硬件设计参数决定的、真实的解调系数(载波信号),只要调制器的硬件参数没有改变,得到的解调系数可适用于所有测量结果的解调。本文分析了通过测量参考光得到强度调制系统解调系数的理论依据,经过测量实验和数据处理,得到了已搭建的强度调制系统实验装置的解调系数,并用得到的解调系数,对实验装置测量自然光和线偏振光的测量结果进行了解调处理,验证了论文所提出方法的可行性。

2 基本原理

实验中所用的参考光源的振动方向与水平方向成 22.5° 的线偏振光。参考光源的产生及测量示意图如图 1 所示。

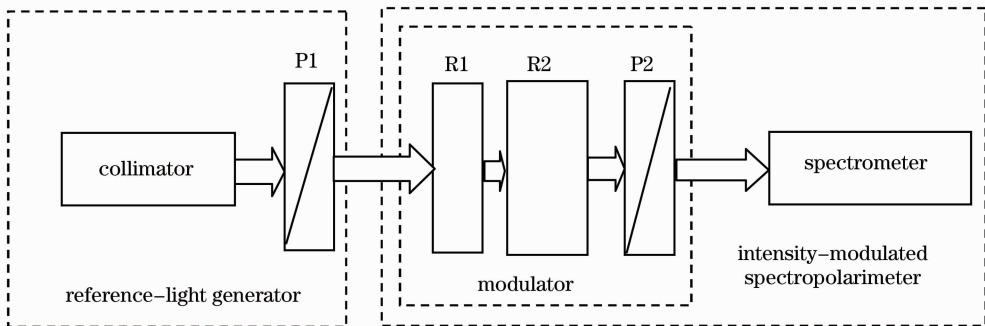


图 1 参考光源的产生与测量

Fig. 1 Generation and measurement of reference light

图 1 中平行光管的光源为功率为 50 W 的卤钨灯,输出平行光。P1 是起偏器,透光轴与水平方向成 22.5° 。P1 的输出光即为本实验中所用的参考光。强度调制偏振光谱仪实验装置可分为调制器和光栅光谱仪两部分。其中的调制器由两个高阶延迟器 R1、R2 及一个检偏器 P2 组成,用来产生调制待测光 Stokes 矢量元素谱的载波信号(解调系数)。参考光经过调制器后的输出强度谱,为已调制的、参考光 4 个 Stokes 矢量元素谱的线性叠加(频域干

涉)。光谱仪用来测量记录参考光经过调制器后输出的强度谱(频域干涉图)。对该强度谱数据进行相关处理,可以得到调制器产生的解调系数。原理如下:

假定从平行光管输出自然光的强度谱为 $s_0(\sigma)$ (可用光谱仪直接测量平行光管的输出得到),由光学件的米勒矩阵^[16]和矩阵运算法则可以得到上述参考光的 Stokes 矢量元素谱

$$\mathbf{S}_R = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 \\ \sqrt{2}/2 & 1/2 & 1/2 & 0 \\ \sqrt{2}/2 & 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0(\sigma) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_0(\sigma) \\ \sqrt{2}/2s_0(\sigma) \\ \sqrt{2}/2s_0(\sigma) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

如果用光谱仪直接测量 P1 输出,将得到的参考光强度谱记为 $I_0(\sigma)$,则

$$I_0(\sigma) = 1/2s_0(\sigma), \quad (2)$$

参考光的 Stokes 矢量谱可用 $I_0(\sigma)$ 表示为

$$\mathbf{S}_R = \begin{bmatrix} rs_0(\sigma) \\ rs_1(\sigma) \\ rs_2(\sigma) \\ rs_3(\sigma) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0(\sigma) \\ \sqrt{2}/2I_0(\sigma) \\ \sqrt{2}/2I_0(\sigma) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由调制器的调制机理可知,当让 P1 输出的参考光通过调制器后,调制器输出光信号的强度谱 $P(\sigma)$,应为已调制参考光 Stokes 矢量元素谱的线性叠加,可表示为

$$P(\sigma) = rs_0(\sigma)cs_0(\sigma) + rs_1(\sigma)cs_1(\sigma) + rs_2(\sigma)cs_2(\sigma) = MS_0(\sigma) + MS_1(\sigma) + MS_2(\sigma), \quad (4)$$

式中 $cs_0(\sigma)$ 、 $cs_1(\sigma)$ 和 $cs_2(\sigma)$ 表示由调制器产生的载波信号(即解调制时的解调系数); $MS_0(\sigma)$ 、 $MS_1(\sigma)$ 和 $MS_2(\sigma)$ 表示被载波信号调制后的参考光 Stokes 矢量谱。 $P(\sigma)$ 可用光谱仪直接测量得到,只要延迟器设计合理,使 $P(\sigma)$ 在光程差域中不发生混叠,通过对 $P(\sigma)$ 进行傅里叶变换、滤波和逆傅里叶变换处理,可将 $MS_0(\sigma)$ 、 $MS_1(\sigma)$ 和 $MS_2(\sigma)$ 从调制器输出的强度谱中复原。因此,在测量了参考光的强度谱 $I_0(\sigma)$ 和其经过调制器后输出的强度谱 $P(\sigma)$,结合(3)、(4)式并进行相关处理后,可用(5)~(7)式计算出调制器的载波信号(解调系数):

$$cs_0(\sigma) = \frac{MS_0(\sigma)}{rs_0(\sigma)} = \frac{MS_0(\sigma)}{I_0(\sigma)}, \quad (5)$$

$$cs_1(\sigma) = \frac{MS_1(\sigma)}{rs_1(\sigma)} = \frac{\sqrt{2}MS_1(\sigma)}{I_0(\sigma)}, \quad (6)$$

$$cs_2(\sigma) = \frac{MS_2(\sigma)}{rs_2(\sigma)} = \frac{\sqrt{2}MS_2(\sigma)}{I_0(\sigma)}, \quad (7)$$

计算得到的 $cs_0(\sigma)$ 、 $cs_1(\sigma)$ 和 $cs_2(\sigma)$ 分别对应于待测光信号 Stokes 矢量元素谱 $s_0(\sigma)$ 、 $s_1(\sigma)$ 、 $s_2(\sigma)$ 的解调。由调制原理可知, $cs_2(\sigma)$ 同样适用于 $s_3(\sigma)$ 的解调^[15]。

3 解调系数实测结果与分析

利用上述原理,对已搭建的强度调制系统实验装置的解调系数进行了测量实验。图 2 是测量实验装置的实物照片。分步的测量及处理结果如图 3(a)~(f)所示。

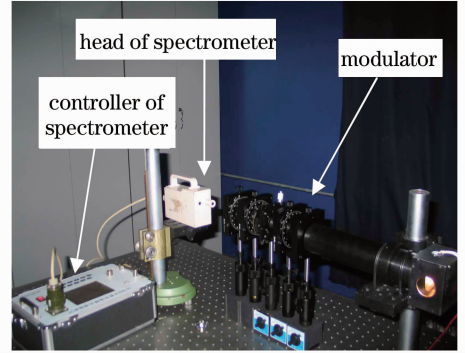


图 2 测量实验装置

Fig. 2 Experimental setup for measurement

首先,用光谱仪直接测量参考光输出,得到参考光的强度谱 $I_0(\sigma)$,结果如图 3(a)所示;第二步:用光谱仪测量参考光经过强度调制系统实验装置调制器后的输出强度谱,如图 3(b)所示;第三步:对参考光经调制器后输出的强度谱进行逆傅里叶变换得到它的自相关函数如图 3(c)所示;最后,对自相关函数进行滤波和傅里叶变换,还原参考光各个 Stokes 矢量元素谱的已调制信号 $MS_0(\sigma)$ 、 $MS_1(\sigma)$ 和 $MS_2(\sigma)$,再按(5)~(7)式计算出实验装置的载波信号(解调系数)如图 3(d)~(f)所示。

从图 3(d)可以看出,在实验装置的有效测量波段范围内, $s_0(\sigma)$ 的解调系数近似为常数,调制器的调制机理分析表明,调制器没有为待测光的 $s_0(\sigma)$ 产生载波信号,与测量结果吻合。图 3(e), (f)表明, $s_1(\sigma)$ 、 $s_2(\sigma)$ 和 $s_3(\sigma)$ 的载波信号频率不同,且近似有 2 倍关系。调制机理表明: $s_1(\sigma)$ 的载波中心频率由调制器中 R2 的厚度决定,而 $s_2(\sigma)$ 和 $s_3(\sigma)$ 载波中心频率取决于调制器中 R2 与 R1 的厚度差。实验装置中 R2 的厚度是 R1 厚度的 2 倍,测量结果与理论分析结果吻合。从图 3(e), (f)也可以看出,测量得到的解调系数并不是完美的正弦波,其原因是由于调制器透射系数有一定的色差所致。此外,由于调制器中所用检偏器的消光比在波长大于 650 nm 时急剧下降,光源的能量在波长小于 500 nm 时较弱,光谱仪的信噪比已不足以精确检测出待测光的偏振信息,所以实验系统的有效波段范围为 550~650 nm(对应波数范围是 $1.8 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$)。图中两端

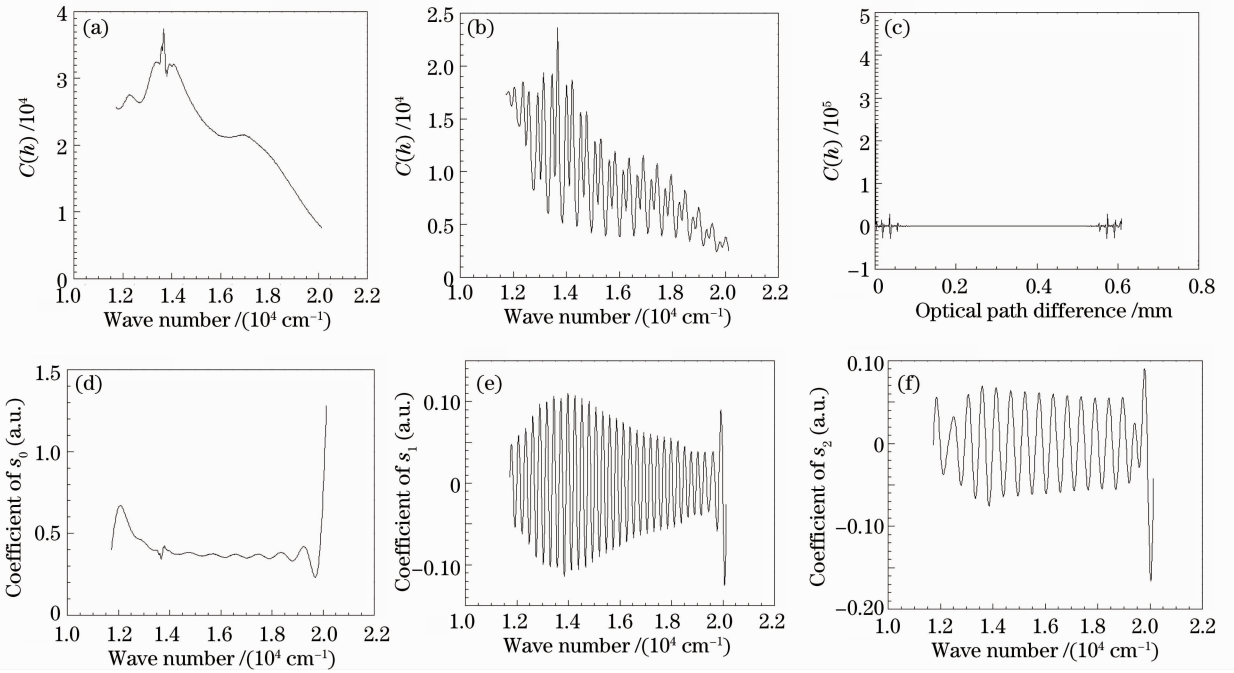


图 3 解调系数测量处理结果。(a)参考光的 $I_0(\sigma)$; (b)参考光经过调制器后输出的强度谱; (c)参考光的自相关函数; (d)由测量参考光得到的实验装置 $s_0(\sigma)$ 的解调系数; (e)由测量参考光得到的实验装置 $s_1(\sigma)$ 的解调系数; (f)由测量参考光得到的实验装置 $s_2(\sigma)$ 、 $s_3(\sigma)$ 的解调系数

Fig. 3 Measured results of demodulation coefficients. (a) $I_0(\sigma)$ of reference light; (b) intensity spectrum of the reference light passing through the modulator; (c) IFFT of (b); (d) demodulation coefficient of $s_0(\sigma)$; (e) demodulation coefficient of $s_1(\sigma)$; (f) demodulation coefficient of $s_2(\sigma)$ and $s_3(\sigma)$

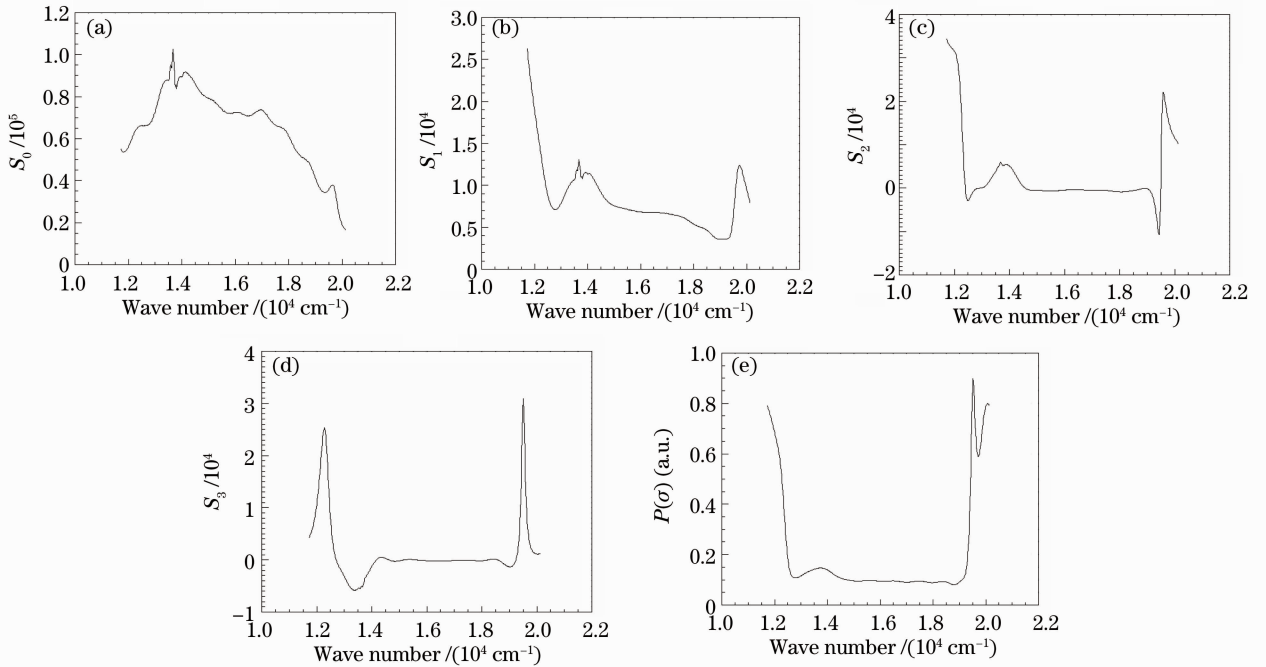


图 4 平行光管直接输出光信号的解调处理结果。(a)解调得到的 $s_0(\sigma)$; (b)解调得到的 $s_1(\sigma)$; (c)解调得到的 $s_2(\sigma)$; (d)解调得到的 $s_3(\sigma)$; (e)偏振度谱

Fig. 4 Demodulation results of the light from collimator. (a) $s_0(\sigma)$; (b) $s_1(\sigma)$; (c) $s_2(\sigma)$; (d) $s_3(\sigma)$; (e) spectrum of the polarization degree

的畸变是由信号变换处理过程中的边界效应所引起的,已在有效测量波段范围之外,故可舍弃。

4 解调系数有效性验证

利用测量参考光得到的解调系数,对典型待测光源进行了测量实验和解调处理,部分待测光源的解调处理结果如图4和图5所示。

图4是平行光管直接输出光信号的解调处理结

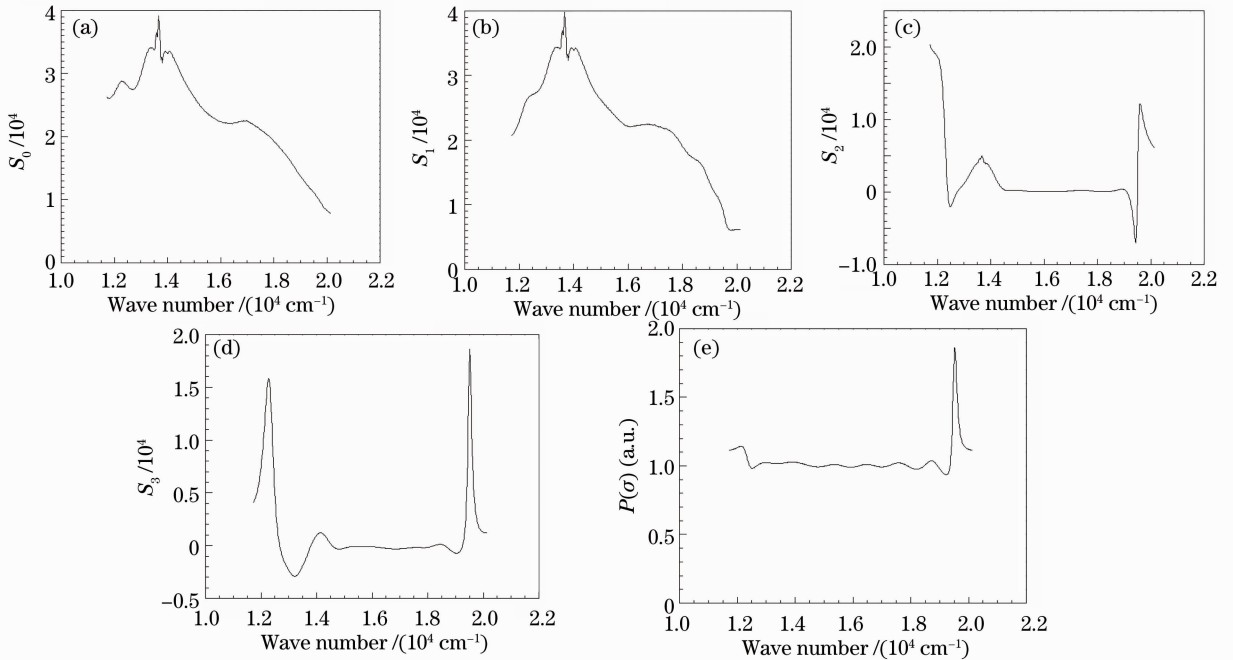


图5 平行光管加透光轴水平方向的起偏器后输出光信号的解调处理结果。(a)解调得到的 $s_0(\sigma)$; (b)解调得到的 $s_1(\sigma)$; (c)解调得到的 $s_2(\sigma)$; (d)解调得到的 $s_3(\sigma)$; (e)偏振度谱

Fig. 5 Demodulation results of the light from the colimator polarized by a transmitted light axis horizontal polarizer (a) $s_0(\sigma)$; (b) $s_1(\sigma)$; (c) $s_2(\sigma)$; (d) $s_3(\sigma)$; (e) spectrum of the polarization degree

图5是平行光管加透光轴水平方向起偏器后输出光信号的解调处理结果。从图中可以看出,振动方向为水平方向的线偏振光含有近似相同的 $s_0(\sigma)$ 和 $s_1(\sigma)$ 分量,而 $s_2(\sigma)$ 和 $s_3(\sigma)$ 分量近似为零,整个谱段范围内偏振度近似为 100%,与理论分析结果完全一致。同样,图中两端的畸变也是因为信号处理过程中的边界效应所致,在实验装置的有效测量波段之外,故应舍弃。

5 结论

针对由理论计算得到的解调系数不适用于强度调制偏振光谱仪实验装置测量结果解调的问题,提出了利用测量已知偏振态参考光获取实验装置解调系数的解决方案,给出了该方案的理论依据并进行

果。从图中可以看出,在实验装置的有效测量波段范围内,平行光管直接输出光信号的 $s_0(\sigma)$ 和 $s_1(\sigma)$ 不为零,而 $s_2(\sigma)$ 和 $s_3(\sigma)$ 近似为零,在整个谱段范围内线偏振度约为 10%,其原因是由灯泡外壳及平行光管中的透镜的起偏效应所引起的。图中两端的畸变是由信号处理过程中的边界效应所致,已在实验装置的有效测量波段之外,故可舍弃。

了实验验证,得到以下主要结论:1)利用强度调制系统实验装置测量偏振态已知的参考光,经过相关的数字信号处理过程,可以得到实验装置的实际解调系数;2)由于调制器的透射系数存在色差,强度调制系统实验装置的实际解调系数通常并不是完美的正弦波;3)只要不改变强度调制系统实验装置中调制器的设计参数,通过测量参考光得到的实验装置解调系数适用于各种待测光测量结果的解调处理。

值得注意的是如果强度调制系统在实际使用过程中,因为某种原因使得调制器中光学件的参数发生了改变,则先前测量得到的解调系数就可能不再适用于当前测量结果的解调。采用该方法得到的解调系数能容许调制器参数的变化范围,尚待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Walter G. Egan. Polarization in remote sensing [C]. *SPIE*, 1992, **1747**: 2~48
- 2 Bruce Winker, Dongfeng Gu, Bing Wen *et al.*. Liquid crystal tunable polarization filter for target detection applications [C]. *SPIE*, 2008, **6972**: 697209
- 3 Kohzo Homma, Hirokimi Shingu, Hiromichi Yamamoto *et al.*. Application of an imaging spectropolarimeter to agro-environmental sciences [C]. *SPIE*, 2004, **5234**: 638~647
- 4 Sun Xuejin, Li Hao, Tang Liping. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0501001
孙学金, 李浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气体散射偏振度特性研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0501001
- 5 Yu. S. Ivanov, I. I. Sinyavskii, M. G. Sosonkin. Astrospectropolarimeters for weak objects [J]. *J. Opt. Technol.*, 2006, **73**(12): 879~882
- 6 Hirokimi Shingu, Hirohisa Kurosaki, Kohzo Homma *et al.*. Earth observation system incorporating an LCTF spectropolarimeter [C]. *SPIE*, 2003, **4881**: 503~510
- 7 Yongqiang Zhao, Lei Zhang, Quan Pan. Spectropolarimetric imaging for pathological analysis of skin [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(10): D236~D246
- 8 Paul Lemaillet, Jessica C. Ramella-Roman. Hemispherical Stokes polarimeter for early cancer diagnosis [C]. *SPIE*, 2011, **7883**: 788304
- 9 Richard J. Peralta, Carl Nardell, Brian Cairns *et al.*. Aerosol polarimetry sensor for the glory mission [C]. *SPIE*, 2007, **6786**: 67865L
- 10 J. Scott Tyo, Dennis L. Goldstein, David B. Chenault *et al.*. Shaw. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(22): 5453~5469
- 11 Frans Snik, Jeroen H. H. Rietjens, Gerard van Harten *et al.*. SPEX: the spectropolarimeter for planetary exploration [C]. *SPIE*, 2010, **7731**: 77311B
- 12 Sun Zhongqiu, Zhao Yunsheng, Yan Guoqian *et al.*. Further study on calculating the density of seawater with polarized light technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2451~2457
孙仲秋, 赵云升, 阎国倩等. 利用偏振光技术计算海水密度的深入研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2451~2457
- 13 Liu Ying, He Wenliang, Liu Cheng. Research on the fluorescence polarization characteristic of alcoholism blood [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2065~2068
刘莹, 何文亮, 刘诚. 乙醇中毒血液荧光偏振特性研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2065~2068
- 14 Kazuhiko Oka, Takayuki Kato. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1475~1477
- 15 O. K. A. Kazuhiko. Singleshot spectroscopic polarimetry using channeled spectrum [C]. *SPIE*, 2002, **4919**: 167~175
- 16 Liao Yanbiao. Polarization Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003. 45~62
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 45~62

栏目编辑: 何卓铭