

文章编号: 1004-924X(2016)03-0477-5

## 基于可调偏振度源验证偏振光谱强度调制系统

宋志平<sup>1\*</sup>, 殷雨豪<sup>1</sup>, 张明辉<sup>1</sup>, 洪 津<sup>2</sup>

- (1. 安徽大学 物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601;
2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 研制了一种结构简单、稳定性好的可见光波段可调偏振度光源, 用来验证偏振光谱强度调制 (PSIM) 实验系统设计的正确性。该光源内部安装有两块K9玻璃组成的玻璃片堆, 通过改变玻璃片堆的倾角来调整输出的部分偏振光的偏振度。理论推导了二者的关系, 得到了可调偏振度源输出光的偏振度计算方法。根据PSIM系统的实现原理, 搭建了验证PSIM性能的实验装置, 对可调偏振度源输出的不同偏振度谱进行了测量。实验结果表明: 在PSIM实验装置的有效工作波段范围内, 可调偏振度源输出光的理论偏振度值与PSIM实验装置测得结果的误差在1%以内, 验证了可调偏振度源及PSIM实验装置设计的正确性。该装置有望成为标准偏振光源, 用于偏振光谱测量装置的精确标定。

**关键词:** 偏振测量; 可调偏振度源; 偏振光谱强度调制系统; 设计验证

**中图分类号:** TH744.2; O436.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0477

## Verification of PSIM system based on tunable polarization light source

SONG Zhi-ping<sup>1\*</sup>, YIN Yu-hao<sup>1</sup>, ZHANG Ming-hui<sup>1</sup>, HONG Jin<sup>2</sup>

- (1. School of Physics & Material Science, Anhui University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Institute of Optical Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

\* Corresponding author, E-mail: zpsong@aiofm.ac.cn

**Abstract:** A tunable polarization light source with simple structures and good stability was developed to validate the feasibility of a Polarization Spectral Intensity Modulation (PSIM) experimental system designed by us. A glass stack consisting of two K9 glass pieces was mounted into the tunable polarization light source. By changing the tilt angle of the glass stack, the polarization degree of the partial polarization light output from the system could be adjusted. The working principle of the PSIM was derived, and the calculation method of polarization degree of the output light from the tunable polarization light source was obtained. On the basis of the principle of the PSIM system, a experimental device was built to verify the performance of the PSIM system. The measurement verification experiment was carried out in the laboratory and the different polarization degree spectra output from tunable polarization light source was measured. The results show that the error between the theoretical output of the tunable polarization light source and the measured results of the experiment equipment of PSIM is within 1% when the experiment equipment of PSIM works in its effective working wavelength range, which validates the feasibility of experiment device of PSIM and tunable polarization light source. Meanwhile, it verifies that the tunable polarization light source is expected to be a standard polarization light source and used in the calibration of polarization spectral measuring equipment.

收稿日期: 2015-09-15; 修订日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金委员会—中国科学院天文联合基金资助项目(No. U1531113); 国家自然科学基金资助项目(No.60778023)

**Key words:** polarization measurement; tunable polarization light source; Polarization Spectral Intensity Modulation (PSIM) system; design verification

## 1 引言

偏振光谱信息在地球环境遥感监测、天文、军事等领域具有独特的应用优势<sup>[1-6]</sup>。近年来,国内外越来越多的遥感测量专家开始致力于偏振光谱信息获取技术及装置(以下简称“实验装置”)的研究。作为实验装置研究的重要一环,如何验证实验装置的性能是一个值得关注的问题。传统的验证方法主要有两种<sup>[7]</sup>:一种是用实验装置分别测量积分球输出的自然光和起偏器输出的完全偏振光,由测量结果与0和100%的接近程度来判断实验装置的性能;另一种是假定现有偏振测量仪器的测量精度足够高,在相同条件下用它们测量同一个目标,由实验装置的测量结果与现有偏振测量仪器测量结果的接近程度来评价实验装置的性能。前一种方法只测量了两个偏振度极值,不足以判断仪器测量结果的精确度;而后一种方法则对偏振测量仪器的精度要求较高。

偏振光谱强度调制(Polarization Spectral Intensity Modulation, PSIM)是近年来发展起来的一种偏振光谱信息获取技术。该技术只需一次测量即可得到目标反射/辐射光的4个Stokes矢量元素谱信息,理论上比现有的偏振光谱测量技术具有更好的时间分辨率、更高的偏振测量精度<sup>[8-12]</sup>。为了更全面、科学地验证PSIM系统的性能,本文研制了一种可调偏振度光源,该光源结构简单、稳定性好,输出光的偏振度在一定范围内可调节。首先介绍了可调偏振度源及PSIM系统的实现原理,然后通过测量实验同步验证了可调偏振度源及PSIM系统设计的正确性。

## 2 可调偏振度光源

自然光以一定的角度通过玻璃片堆时,出射光是偏振度一定的部分偏振光。改变玻璃片堆的倾角(等效于改变入射光的角度),输出的部分偏振光的偏振度会随之改变,并满足如下定量关系(适用于由两片玻璃组成的玻璃片堆):

$$P = \frac{[A \cos^2(2i) + B \cos(2i) + C]^{[13]}}{[D \cos^2(2i) + E \cos(2i) + F]}, \quad (1)$$

式中: $i$ 为玻璃片堆相对于垂直方向的倾斜角度,系数 $A, B, C, D, E, F$ 分别为:

$$\begin{aligned} A &= -n^8 + 2n^4 - 1, \\ B &= -2n^8 + 4n^6 - 4n^2 + 2, \\ C &= 3n^8 - 4n^6 - 2n^4 + 4n^2 - 1, \\ D &= -A + 8n^4, \\ E &= -B + 16n^6, \\ F &= -C + 8n^8, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $n$ 为玻璃的折射率,与玻璃类型及透过光的波长有关。对于确定材质的玻璃,可查手册得到不同波长点的 $n$ 值。

将不同波长点处的 $n$ 值代入式(2),可计算出不同波长点处的系数 $A, B, C, D, E, F$ 。当玻璃片堆的倾角确定时,将算得的系数和角度代入式(1),即可计算出玻璃片堆在不同波长点处的理论偏振度。图1是按照该原理设计的可调偏振度源实物图。



图1 可调偏振度源实物图

Fig. 1 Photo of tunable polarization degree light source

可调偏振度源箱体内部安装有两块K9玻璃组成的玻璃片堆,设水平方向为光轴方向,限制可调偏振度源的视场角(本设计视场角约为 $3^\circ$ ),使从积分球输出的自然光以近似与光轴方向平行的平行光入射到玻璃片堆上。通过旋转精密转台可以同步控制玻璃片堆的端面与光轴垂直或成一定的夹角。当玻璃片堆的端面与光轴垂直时,式(1)中的 $i$ 值为 $0^\circ$ ,可调偏振度源箱体内部设计有机械卡位,此时精密转台的读数为0。旋转精密转台,可在一定范围内(设计的调节角度为 $0\sim 65^\circ$ )控制玻璃片堆与入射光线的夹角 $i$ ,通过查表可以得到可见光波段范围内K9玻璃的折射率,由此利用式(1)可计算出可调偏振度源输出端出射光的理论偏振度。绕光轴方向旋转可调偏振度源的箱体,可在一定

范围内改变输出光的偏振角。代入相关设计参数可以算出, 本文设计的可调偏振度源在可见光范围内输出光的偏振度在0~43.42%。

### 3 PSIM实验装置

图2是PSIM系统的结构原理示意图。

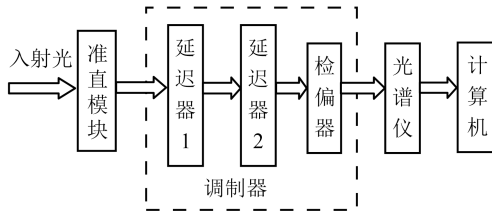


图2 PSIM实验装置原理示意图

Fig. 2 Principle of PSIM experiment devices

PSIM系统的核心硬件由光谱仪和调制器两部分组成。调制器如图2中的虚线框所示, 含有两块快轴方向夹角为 $45^\circ$ 的高阶延迟器和一块偏振器, 偏振器的透光轴方向与第一块延迟器的快轴方向一致。调制器对应待测光的4个Stokes矢量元素谱产生不同频率的载波信号, 其输出是已调制的各个Stokes矢量元素谱的线性叠加。入射光经过准直模块后变成平行光正入射到调制器上, 假定待测入射光的Stokes矢量元素谱为:

$$s(\sigma) = \begin{pmatrix} S_0(\sigma) \\ S_1(\sigma) \\ S_2(\sigma) \\ S_3(\sigma) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

当入射光经过调制器后, 根据入射光Stokes矢量元素谱、构成调制器光学件的级联米勒矩阵及调制器出射光Stokes矢量元素谱三者间的关系, 可计算出调制器出射光的强度谱为<sup>[9]</sup>:

$$P(\sigma) = \frac{1}{2} S_0(\sigma) + \frac{1}{2} S_1(\sigma) \cos[\phi_2(\sigma)] + \frac{1}{4} |S_{23}(\sigma)| \cos[\phi_2(\sigma) - \phi_1(\sigma) + \arg\{S_{23}(\sigma)\}] - \frac{1}{4} |S_{23}(\sigma)| \cos[\phi_2(\sigma) + \phi_1(\sigma) - \arg\{S_{23}(\sigma)\}], \quad (4)$$

式中:

$$S_{23}(\sigma) = S_2(\sigma) + iS_3(\sigma), \quad (5)$$

$$\phi_j(\sigma) = 2\pi B(\sigma)D_j\sigma, \quad (6)$$

其中:  $D_j(j=1, 2)$ 表示两块延迟器的厚度;

$B(\sigma) = n_e(\sigma) - n_o(\sigma)$ 表示延迟器中e光和o光的折射率差;  $\sigma$ 为待测全色光的波数(对应不同的待测光波长, 波数 $\sigma$ 有一定的取值范围)。利用光谱仪测量和记录调制器输出的强度谱数据。

式(4)表明了调制器输出强度谱与已调制入射光Stokes矢量元素谱间的线性叠加关系。调制入射光 $S_0(\sigma)$ ,  $S_{23}(\sigma)$ ,  $S_1(\sigma)$ 和 $S_{23}^*(\sigma)$ 的载波信号(解调系数)用指数形式表示如下<sup>[8]</sup>:

$$K_0(\sigma) = \frac{1}{2}, \quad (7)$$

$$K_-(\sigma) = \frac{1}{8} \exp\{i[\phi_2(\sigma) - \phi_1(\sigma)]\}, \quad (8)$$

$$K_2(\sigma) = \frac{1}{4} \exp\{i[\phi_2(\sigma)]\}, \quad (9)$$

$$K_+(\sigma) = -\frac{1}{8} \exp\{i[\phi_2(\sigma) + \phi_1(\sigma)]\}. \quad (10)$$

其中心频率由延迟器中o、e光间的折射率差 $B(\sigma)$ 和延迟器的厚度 $D_j(j=1, 2)$ 决定。假定待测光信号的Stokes矢量元素谱是带限的, 通过适当设计两块延迟器的厚度, 可在变换域(光程差域)中将已调制的信号分开, 再通过后续的滤波和解调处理理论上可将待测光的Stokes矢量元素谱解调出来<sup>[14]</sup>, 实现偏振光谱仪的功能。

### 4 验证实验

以自行研制的可调偏振度光源作为待测光源, PSIM实验装置为测量系统, 开展了PSIM性能验证实验。PSIM实验装置调制器的关键参数如下:

延迟器材料: 石英晶体;

波片厚度和直径:  $D_1 = (1.90 \pm 0.01)$  mm,  $D_2 = (3.80 \pm 0.01)$  mm,  $\Phi = 20$  mm;

表面平整度: 优于 $1/4\lambda$  ( $\lambda = 0.633$   $\mu\text{m}$ );

偏振片消光比: 10 000: 1。

实验装置选用VF921型光谱仪, 其主要性能参数如下: 光谱响应波段为380~1 080 nm; 光谱分辨率为2 nm; 采用光栅分光方式和512元线阵探测器; 视场角为 $3^\circ$ ; 量化精度为12 bit。

实验现场如图3所示。图中, 积分球是可调偏振度源的输入。由于可调偏振度源的视场角很小, 来自积分球的输入光可近似看作与光轴(水平方向)平行的平行光。通过旋转精密转台, 使可调偏振度源中玻璃片堆的端面法线与入射光线分别成 $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 和 $60^\circ$ 角, 由式(1)计算不同角度下可调偏振度源在可见光波段输出光的理论偏

振度,再用PSIM实验装置对可调偏振度源的输出进行实际测量。图4是可调偏振度源输出光偏振度谱的理论计算结果与PSIM实验装置实测结果间的对比图。

从图4可以看出,当玻璃片堆的倾角分别为 $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ 和 $60^\circ$ 时,波数在 $15\ 000\sim 19\ 000\text{ cm}^{-1}$ (对应波长为 $526\sim 666\text{ nm}$ )内,可调偏振度源输出光信号的理论偏振度与PSIM实验装置的实测结果吻合程度非常好(最大误差在1%以内)。波数在 $13\ 000\sim 15\ 000\text{ cm}^{-1}$ (对应波长为 $666\sim 766\text{ nm}$ )内,可调偏振度源输出光的理论偏振度与PSIM实验装



图 3 PSIM性能验证实验现场

Fig. 3 Experimental field for PSIM performance verification

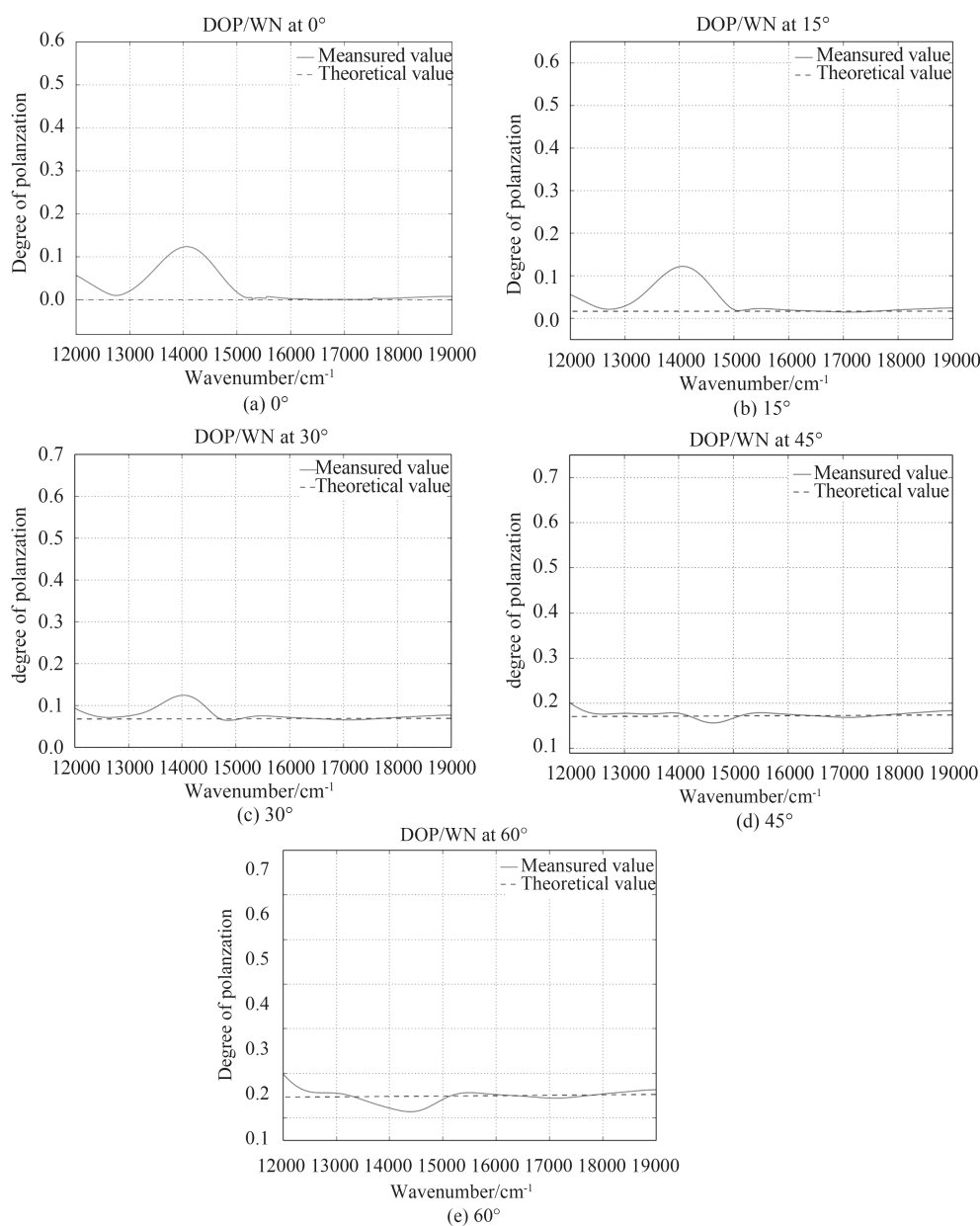


图 4 可调偏振度源的理论输出及PSIM系统实测结果

Fig. 4 Theoretical outputs of tunable polarization degree light source and measurement results with PSIM experimental device

置的实测结果间有很大差异。对大量实验数据进行分析 and 研究后发现, 其原因在于待测光源信号的Stokes元素谱在此波长范围内的频率过高, 这些结果误差较大, 应舍弃。

## 5 结 论

利用可调偏振度源验证PSIM实验装置的性能, 可一定程度弥补仅测量自然光和完全偏振光验证方法的局限性。在有效测量波段内, PSIM实验装置的测量结果与可调偏振度源的理论输出结果间具有良好的一致性, 表明可调偏振度源及

PSIM实验装置的设计均是可行的。但是, PSIM测量系统仅适用于缓变Stokes矢量元素谱的测量, 当待测光的Stokes矢量谱变化较快, 即接近或超过由系统设计参数决定的载波信号频率时, PSIM系统的测量结果会出错, 这是由PSIM系统的调制机理决定的。本文提出的可调偏振度光源结构简单, 其输出光信号的偏振度在一定范围内连续可调, 并且可以通过理论计算得到。在满足机械加工和装调精度的前提下, 该装置有望成为标准偏振光源, 用于偏振光谱测量装置的精确标定。

## 参考文献:

- [1] EGAN W G. Polarization in remote sensing [J]. *SPIE*, 1992, 1747: 2-48.
- [2] STENFLO J O. Solar magnetic fields as revealed by Stokes polarimetry[J]. *Astron Astrophys Rev*, 2013, 21: 66.
- [3] SHIN S, MULLER D, KIN Y J, *et al.*. The retrieval of the Asian dust depolarization ratio in Korea with the correction of the polarization-dependent transmission[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 49(1): 19-25.
- [4] SHANGGUAN J Y, YAN H R. Study of interplanetary magnetic field with Ground State Alignment[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2013, 343(1): 335-344.
- [5] SAPP J W, FRASIER S J, DVORSKY J, *et al.*. Airborne dual-polarization observations of the sea surface NRCS at C-band in high winds[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4): 726-730.
- [6] JR LEE R L, SAMUDIO O R. Spectral polarization of clear and hazy coastal skies[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7499-7508.
- [7] 宋志平, 洪津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪的系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2325-2330.  
SONG ZH P, HONG J, QIAO Y L. System design of intensity modulation spectropolarimeter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2325-2330.(in Chinese)
- [8] OKABE H, MATOBA K, HAYTAKAWA M, *et al.*. New configuration of channeled spectropolarimeter for snapshot polarimetric measurement of materials[J]. *SPIE*, 2005, 58780H: 1-8.
- [9] OKA K, KATO T. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(21): 1475-1477.
- [10] LI J, ZHU J P, WU H Y. Compact static Fourier transform imaging spectropolarimeter based on channeled polarimetry[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3784-3786.
- [11] OKA K, KINOSHITA T, ISE A, *et al.*. Channeled spectropolarimeter using a wavelength scanning laser and a channeled spectroscopic polarization state generator[J]. *SPIE*, 2011, 8160: 81600S-1-81600S-7.
- [12] ALENIN A S, TYO J S. Generalized channeled polarimetry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2014, 31(5): 1013-1022.
- [13] *Polarizing Box Polbox User's Guide*[M]. Lille, 1998.
- [14] 宋志平, 洪津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪解调系数参考光测量方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412003-1-6.  
SONG ZH P, HONG J, QIAO Y L. Method acquiring the demodulation coefficients of intensity-modulated spectropolarimeter by measuring reference Light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412003-1-6. (in Chinese)

## 作者简介:



宋志平(1967-), 男, 安徽肥西人, 博士, 副教授, 主要从事偏振光谱信息获取技术的研究。E-mail: zpsong@aiofm.ac.cn