

# 空间调制线偏振光谱测量的误差影响仿真分析

刘 强<sup>1,2</sup> 李 双<sup>1,2\*</sup> 龚 平<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所光学遥感中心, 安徽 合肥 230031  
<sup>2</sup> 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** 通过理论推导,给出了 1/4 波片-复合双折射光楔-偏振片型空间调制结构的误差矩阵,并在空间调制相位为 0 及  $0.5\pi$  的位置分别计算了理想像面光强受器件误差的影响程度。1/4 波片的延迟量误差是将入射光斯托克斯参量的  $V$  分量引入调制光强中的主要原因,在调制相位为  $0.5\pi$  的位置,当延迟量误差为  $0.02\pi$  时,其调制系数为 0.0314。在给定的器件误差范围内,入射斯托克斯参量具有同样的  $Q, U$  分量时,  $V=0.2$  会使得  $U$  分量测量偏差控制在 0.45% 内的概率从  $V=0$  时的 80% 左右下降到 6%。利用计算机仿真分析得到了线偏振度测量偏差随入射条件的变化,在所有误差取误差范围内的最大值且入射光的  $V$  分量小于 0.04 时,在仪器未定标的条件下,线偏振度的相对测量偏差可以控制在 0.5% 以内。

**关键词** 测量;空间调制;偏振光谱;误差分析;仿真

中图分类号 O433.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0712002

## Analysis for Influence of Element Deviation to DOLP Measured by Spatial Modulating Spectropolarimeter

Liu Qiang<sup>1,2</sup> Li Shuang<sup>1,2\*</sup> Gong Ping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Center of Optical Remote Sensing, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences,  
Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Matrix of deviation for spatial modulating spectropolarimeter that composed of quarter wave plate, double birefringent wedges and polarizer is deduced. Magnitude of influence of element deviation to emergent light is figured out, with that the modulative phase retardance is equal to 0 or  $0.5\pi$ . It is presented that, when retardant phase is  $0.5\pi$  and its deviation is  $0.02\pi$ , the modulating coefficient of Stokes parameter  $V$  is 0.0314. And when  $V=0.2$ , it will cause that the probability of restraint for measuring deviation of Stokes parameter  $U$  under 0.45%, is decreased from about 80% to 6%, compare with  $V=0$ . By simulation analysis, it is presented that the relative measuring deviation of degree of linear polarization (DOLP) is less than 0.5% without instrument polarization calibrating, when all the element deviations are equal to the positive maximum in their span of deviation, and the Stokes parameter  $V \leq 0.04$ .

**Key words** measurement; spatial modulating; spectropolarimetry; error analysis; simulation

**OCIS codes** 120.5410; 120.6200

## 1 引 言

偏振光谱探测可以获得目标偏振信息在光谱上的分布,目前在多个领域都有着广泛的应用,如植被、土壤、水体遥感<sup>[1-4]</sup>,生物及医学诊断<sup>[5-7]</sup>,天文观测<sup>[8-9]</sup>等。当测量目标相对测量仪器具有较高的运动速度,或者测量目标的偏振信息随时间的变化

较为迅速时,分时偏振测量的方式就会对测量的周期时间有严格的限制,而且几乎无法满足高偏振精度的测量要求。空间调制偏振光谱测量技术,可以在无动件的光学系统结构下,利用单次测量获取测量目标偏振信息(斯托克斯偏振参量)随光谱的分布,因此在测量适应性和精度上都具有较好的表现<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-03-11

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(U1331111)

作者简介: 刘 强(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事光学遥感光谱探测技术方面的研究。

E-mail: piglll@aiofm.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: shli@aiofm.ac.cn

偏振器件的加工精度和安装精度会使得实际的器件光学参数与理论值产生偏差,从而造成偏振测量结果偏离实际值<sup>[11]</sup>。在传统的旋转波片偏振测量法中,器件误差如1/4波片延迟相位等,会对测量结果产生比较大的影响<sup>[12-13]</sup>。空间偏振调制测量也存在同样的问题,在遥感观测时,大气粒子(如气溶胶,沙尘等)在某些波长处及特定的散射方向,对于线偏振光,Mie散射会产生一定强度的圆偏振光<sup>[14-15]</sup>,器件参数的误差会在调制光强中引入额外的圆偏振分量成分,从而对线偏振测量产生较大的影响。因此分析器件误差对于测量结果的影响,对于高精度空间调制线偏振光谱的测量有重要意义。

本文简要介绍了空间调制偏振光谱测量技术,针对单色入射,给出了主要偏振元器件的米勒矩阵,通过一阶误差近似方法分析了器件误差对于偏振调制光强的影响,基于Matlab计算平台,对给定误差下的线偏振度测量精度进行了仿真计算,验证了一阶误差近似方法的正确性。

## 2 空间调制线偏振光谱测量原理

文献[10]给出了具备同时线偏振光谱测量能力的典型qww'结构(q表示1/4波片,w和w'分别表示两个快轴方向彼此正交的光楔对),如图1所示。由1/4波片、复合双折射光楔(W<sub>1</sub>和W<sub>2</sub>)、偏振片组成的结构完成入射光的偏振参量空间调制,然后由透镜组和透射光栅实现光谱色散,最后由面阵相机负责采集,给出调制后的光强空间分布。

入射光的偏振斯托克斯参量为  $S_i = (I_i \ Q_i \ U_i \ V_i)^T$ ,各偏振器件的米勒矩阵按光路顺序分别为  $M_q, M_{w_1}, M_{w_2}, M_p$ ,调制后的出射光偏振斯托克斯参量为  $S_o = (I_o \ Q_o \ U_o \ V_o)^T$ ,为

$$S_o = M_p \cdot M_{w_2} \cdot M_{w_1} \cdot M_q \cdot S_i. \quad (1)$$

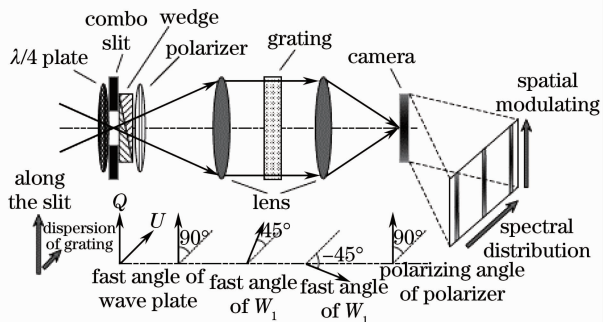


图1 空间调制 qww'结构光路示意图

Fig. 1 Optical sketch for spatial modulation with qww' structure

复合双折射光楔是由两个楔角、材料完全一致的单光楔  $W_1$  及  $W_2$  组成的,类似于巴俾涅补偿器的工作原理。由于快轴角相互正交,两个单光楔的延迟厚度相等的位置,就等效于零级延迟的中心零点,此时可以将复合光楔的组合米勒矩阵看作是  $M_w = M_{w_2} \cdot M_{w_1}$ 。

由图1给出的器件方位角,在理想情况下,各器件的米勒矩阵可以写成<sup>[16]</sup>

$$M_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\Delta) & 0 & -\sin(2\Delta) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin(2\Delta) & 0 & \cos(2\Delta) \end{bmatrix},$$

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\Delta(x, \lambda) = \frac{2\pi \cdot x \tan \xi \cdot |n_o - n_e|}{\lambda}$  为单光楔的延迟梯度分布,随狭缝的相对位置  $x$  及波长  $\lambda$  而变化, $\xi$ 是楔角,  $|n_o - n_e|$ 是双折射材料的折射率差。代入(1)式可得到理想的像面强度分布为

$$I_o(x, \lambda) = 0.5 \cdot \{I_i + Q_i \cos[2\Delta(x, \lambda)] + U_i \sin[2\Delta(x, \lambda)]\}, \quad (3)$$

式中  $x$ 是相对于复合光楔延迟零点的距离,即与狭缝中心的高度差。从(3)式可以看到,在每个给定的光谱分辨间隔  $\Delta\lambda$ 内,像面的强度是随着高度位置不同而呈现周期性变化的,通过最小二乘法拟合<sup>[10]</sup>,就可以得到入射光的斯托克斯参量  $I_i, Q_i, U_i$ 。

## 3 器件误差分析

### 3.1 误差米勒矩阵

(3)式给出了理想情况下的像面光强空间分布,在实际的情况下,总会存在各种各样的偏差,比如器件的非理想性差异、安装时造成的角度偏差等。在图1所示的qww'偏振结构中,在单色条件下,定义  $\Delta M_i$ 为各偏振器件的误差矩阵(下标  $i$ 表示不同的器件),则考虑误差后的出射斯托克斯参量  $S'_o$ 可以写成

$$S'_o = (M_p + \Delta M_p) \cdot (M_{w_2} + \Delta M_{w_2}) \cdot (M_{w_1} + \Delta M_{w_1}) \cdot (M_q + \Delta M_q) \cdot S_i. \quad (4)$$

误差对于理想值总是小量,因此各个器件的误差矩阵

可以看做是器件矩阵的微分矩阵，即

$$\Delta \mathbf{M}_i = \sum_j \times \frac{\partial \mathbf{M}_i}{\partial x_j} \cdot \delta x_j,$$

下标  $j$  表示器件内不同的误差变量,  $\delta x_j$  是器件参数的误差。实际获得的出射斯托克斯偏振参量从(4)式可得

$$\mathbf{S}'_o = \mathbf{S}_o + \Delta \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_i. \quad (5)$$

即理想出射参量  $\mathbf{S}_o$  与误差参量  $\Delta \mathbf{S}_o$  之和,  $\Delta \mathbf{M}$  是系统的总误差矩阵。出射斯托克斯偏振参量中的光强分量可以写成

$$I'_o = I_o + (\delta I \cdot I_i + \delta Q \cdot Q_i + \delta U \cdot U_i + \delta V \cdot V_i), \quad (6)$$

直接给出  $\Delta \mathbf{M}$  的理论结果是非常复杂且毫无头绪

表 1 调制光强的偏差系数

Table 1 Deviation coefficient of modulation light intensity

Variable	$\delta I_j$	$\delta Q_j$	$\delta U_j$	$\delta V_j$
$\delta \theta_p$	0	0	0	$\delta \theta_p \cdot t_p$
$\delta \theta_q$	0	$-\delta \theta_q \cdot \sin(2\Delta)$	$\delta \theta_q \cdot \cos(2\Delta)$	$-\delta \theta_q \cdot \cos(2\Delta)$
$\delta \Delta_q$	0	0	0	$0.5 \cdot \delta \Delta_q \cdot \sin(2\Delta)$
$\delta \theta_{w_1}$	0	0	0	$\delta \theta_{w_1} \cdot [\cos(2\Delta) - \cos(\Delta_{w_2})]$
$\delta \Delta_{w_1}$	0	$0.5 \cdot \delta \Delta_{w_1} \cdot \sin(2\Delta)$	$0.5 \cdot \delta \Delta_{w_1} \cdot \cos(2\Delta)$	0
$\delta \theta_{w_2}$	0	0	0	$-\delta \theta_{w_2} \cdot (1 - \cos \Delta_{w_2})$
$\delta \Delta_{w_2}$	0	$-0.5 \cdot \delta \Delta_{w_2} \cdot \sin(2\Delta)$	$-0.5 \cdot \delta \Delta_{w_2} \cdot \cos(2\Delta)$	0

表 1 中偏差系数的下标表示不同误差变量产生的贡献,其总和即为  $\delta I, \delta Q, \delta U, \delta V$ 。

### 3.3 器件误差的影响

表 2 是计算及仿真调制时所采用的主要器件参数及其误差设置,其中 1/4 波片的延迟误差标准取

表 2 器件参数误差的设置

Table 2 Deviation of element setup

Element		Ideal value	Deviation
$\lambda/4$ plate	Azimuth	$\theta_q$ 0°	$\delta \theta_q$ $\pm 0.05^\circ$
	Retardance	$\Delta_q$ 0.5 $\pi$	$\delta \Delta_q$ 0.02 $\pi$
Polarizer of modulation	Azimuth	$\theta_p$ 0°	$\delta \theta_p$ $\pm 0.05^\circ$
	Polarizability	$\eta_p$ 0.0224	
1st wedge	Azimuth	$\theta_{w_1}$ 45°	$\delta \theta_{w_1}$ $\pm 0.1^\circ$
	Retardance		$\delta \Delta_{w_1} / \Delta_{w_1}$ $\pm 0.001$
2nd wedge	Azimuth	$\theta_{w_2}$ -45°	$\delta \theta_{w_2}$ $\pm 0.1^\circ$
	Retardance		$\delta \Delta_{w_2} / \Delta_{w_2}$ $\pm 0.001$

从表 1 可以看到,由于双光楔的光学结构特点,两个光楔在楔角误差一致的情况下,其产生的光强调制系数误差恰好是可以相互抵消的,调制分量的误差系数  $\delta Q, \delta U$  产生的主要因素是 1/4 波片的方位角偏差  $\delta \theta_q$ ,其最大绝对值为  $8.72 \times 10^{-4}$ ,且随着调制相位  $2\Delta$  呈现周期变化。误差系数  $\delta V$  的变化比较复杂,同时受到多个器件的影响,结合表 1 和表 2 可以看到,在 5 个独立分量的影响系数中,由于各器件

的工作,所以接下来的计算将在一阶误差部分展开。

### 3.2 一阶误差调制系数

一阶误差指的是每次误差计算时,仅考虑偏振器件中的某一项参数是非理想的,从(4)式可以知道,误差矩阵  $\Delta \mathbf{M}$  在一阶近似下有 4 个部分,即  $\mathbf{M}_p \mathbf{M}_{w_2} \mathbf{M}_{w_1} \Delta \mathbf{M}_q, \mathbf{M}_p \mathbf{M}_{w_2} \Delta \mathbf{M}_{w_1} \mathbf{M}_q, \mathbf{M}_p \Delta \mathbf{M}_{w_2} \mathbf{M}_{w_1} \mathbf{M}_q$  与  $\Delta \mathbf{M}_p \mathbf{M}_{w_2} \mathbf{M}_{w_1} \mathbf{M}_q$ ,其总和即为一阶近似下的总误差矩阵。按照之前的误差项来源,共可分为 7 个独立的误差变量,即  $\Delta \mathbf{M}_q (\delta \theta_q, \delta \Delta_q), \Delta \mathbf{M}_p (\delta \theta_p), \Delta \mathbf{M}_{w_1} (\delta \theta_{w_1}, \delta \Delta_{w_1}),$  与  $\Delta \mathbf{M}_{w_2} (\delta \theta_{w_2}, \delta \Delta_{w_2}),$  分别计算出各器件误差带来的调制光强偏差系数  $\delta I_j, \delta Q_j, \delta U_j, \delta V_j$  如表 1 所示,表中  $t_p = (1 - \eta_p^2) / (1 + \eta_p^2)$ 。

自 MELLES GRIOT 公司的复消色差型相位延迟器,其延迟量偏差为  $\pm 0.01\lambda$ ,即  $\pm 0.02\pi$ ;各方位角偏差取自结构加工的常规精度,光楔相位偏差取自光楔加工工艺的常规水平;线偏振片的偏振消光比为 2000。

的方位角偏差要比波片的延迟量偏差  $\delta \Delta_q$  小 1 个数量级以上,所以波片延迟量偏差对于误差系数  $\delta V$  的贡献是起到主要作用的,当  $2\Delta = 0.5\pi$  时,其影响达到最大。当  $\delta \Delta_q = 0.02\pi$  时,其引起的  $\delta V$  在一阶误差近似下的计算结果为  $3.14 \times 10^{-2}$ ;用 Matlab 对计入误差后的器件米勒矩阵按(3)式进行乘法计算得到的结果为  $3.138 \times 10^{-2}$ ,一阶误差近似与严格矩阵乘法计算的结果偏差仅为  $2 \times 10^{-5}$ 。

忽略除 1/4 波片外其余误差对于  $\delta V$  的影响,按表 1 给出的调制系数误差,可以将(6)式改写为

$$I'_o = 0.5 \cdot [I_i + \cos(2\Delta) \cdot (Q_i + A_u \cdot U_i) + \sin(2\Delta) \cdot (U_i + A_q \cdot Q_i + A_v \cdot V_i)], \quad (7)$$

式中  $A_u = -2\delta\theta_q + (\delta\Delta_{w1} - \delta\Delta_{w2})$ ,  $A_q = 2\delta\theta_q + (\delta\Delta_{w1} - \delta\Delta_{w2})$ ,  $A_v = \delta\Delta_q$ .按照最小二乘拟合过程,得到的偏振系数测量结果为:  $U'_i = U_i + A_q \cdot Q_i + A_v \cdot V_i$ ,  $Q'_i = Q_i + A_u \cdot U_i$ ,由于方位角偏差要远小于延迟量误差,所以当入射参量含有一定圆偏振分量时,对于测量得到的偏振分量,  $U_i$  受到的影响将明显严重于  $Q_i$ ,其影响程度主要由波片延迟量误差  $\delta\Delta_q$  和圆偏振分量强度共同决定,且成线性变化关系。

### 4 仿真计算

通过一阶误差的理论计算得知,对于调制光强分布影响最大的误差引入是 1/4 波片的延迟量非理想偏差,测量目标的斯托克斯参量  $V$  分量水平决定了其偏离程度,因此首先仿真分析的是具有不同入射斯托克斯参量时的偏振测量精度,仿真时暂不引

入系统信噪比因子,为了验证一阶误差近似的正确性,仿真计算时调制光强将严格按照矩阵乘法进行。偏振参量的计算方式为最小二乘法拟合<sup>[10]</sup>;每一次计算时器件的误差值在该器件的误差范围内随机取值,每个入射参量条件计算 50000 次。测量目标的入射偏振斯托克斯参量分别设定为:  $(1 \ 0.2 \ 0.2 \ 0)^T$  及  $(1 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2)^T$ 。

图 2 是仿真结果,横坐标是计算得到的斯托克斯参量与入射目标的相对误差,纵坐标是测量偏差处于该误差范围内的概率。可以看到,误差对  $Q$  分量的影响几乎没有,但是对  $U$  分量的影响较大。如前所述,这是由于  $U$  分量的调制函数与 1/4 波片延迟量误差额外引入的  $V$  分量调制函数具有同样的调制相位导致的,额外引入的  $V$  分量调制光强在最小二乘法解调时被计入到  $U$  分量调制中,从而造成  $U$  分量解调产生较大的偏差。当入射斯托克斯参量中不含圆偏振分量时,  $U$  分量计算结果的相对偏差有 80% 的概率可以控制在 0.45% 以内;而含有  $V_{in} = 0.2$  的圆偏振分量时,同样的偏差控制范围,概率仅为 6% 左右。

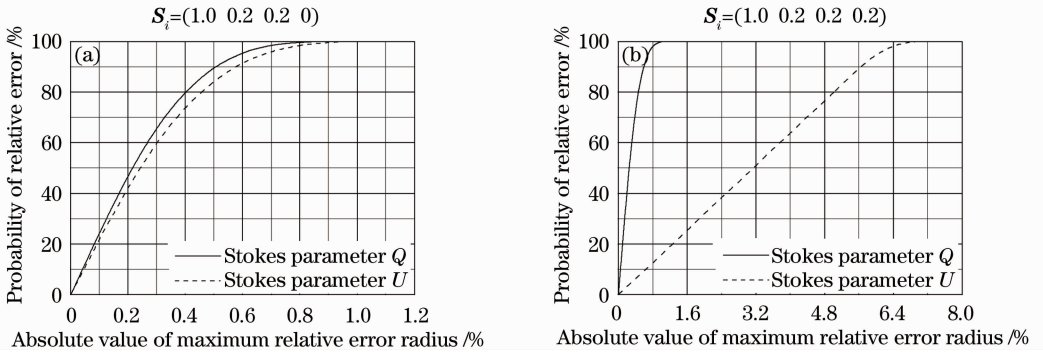


图 2 不同入射参量的测量结果对比。(a)  $V_{in} = 0$ ; (b)  $V_{in} = 0.2$

Fig. 2 Graphical comparison of measuring precision in different Stokes polarization parameter of incident light. (a)  $V_{in} = 0$ ; (b)  $V_{in} = 0.2$

图 3 分别给出了线偏振度(DOLP)受波片延迟误差及入射斯托克斯矢量变化的影响曲线,延迟误

差影响计算时,除波片延迟量外,各误差量都取正向最大误差;入射条件影响计算时,所有误差量都取正

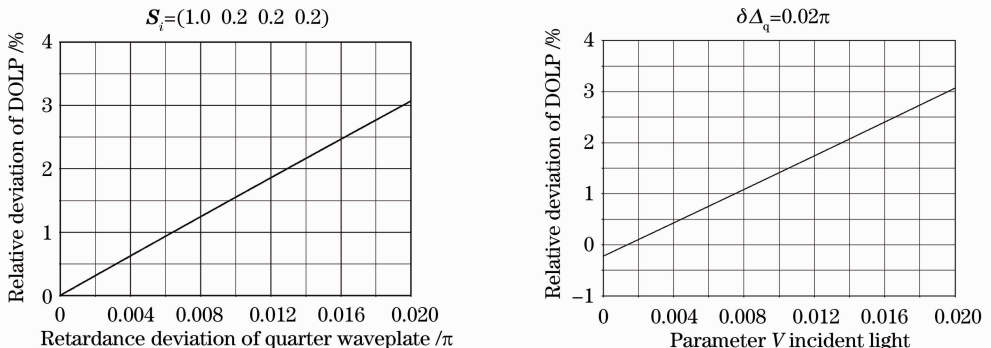


图 3 延迟误差及入射条件对线偏振度测量精度的影响。(a)延迟误差; (b)入射条件

Fig. 3 Influence of retardance deviation and incident light to DOLP. (a) Retardance and (b) condition of incident light

向最大误差。从图中可以看到,在给定的计算条件下,延迟误差与入射斯托克斯  $V$  分量对线偏振度的影响都近似于线性关系,这一点与(7)式给出的理论预测完全一致。从入射条件影响曲线可以看到,当入射光的  $V$  分量小于 0.04 时,在给定的误差条件下,未定标时的线偏振度相对测量精度可以达到 0.5% 的水平。

## 5 结 论

以斯托克斯参量的线偏振分量测量为例,通过理论推导,在一阶误差近似条件下给出了器件误差与像面光强变化的关系,一阶误差近似的采用可以避免光强计算时频繁的使用矩阵乘法,加快了仿真计算的速度。调制光强的理论计算表明,1/4 波片的延迟量误差会引入额外的圆偏振分量调制,在入射光具有一定圆偏振分量时,波片的延迟量误差将会对最终的调制光强造成较为明显的影响。仿真结果给出了入射光在  $S_i = (1 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2)^T$  的条件下,器件误差引起  $U$  分量测量偏差的概率分布,与无圆偏振分量入射光相比,在给定的器件误差范围内, $U$  分量测量偏差控制在 0.45% 内的概率下降到 1/14;文章最后给出了在给定误差范围的最大正向误差条件下,线偏振度的相对测量偏差随入射光  $U$  分量的变化趋势,当入射光的  $V$  分量小于 0.04 时,相对测量偏差可以控制在 0.5% 以内。本文所讨论的内容,没有考虑由于量子波动引入的信噪比影响,即认为探测器工作在理想状态下。实际入射光的泊松统计涨落及电路的信噪比等因素也会使得像面光强具有一定的随机波动偏差,但与器件误差相比,随机波动的影响在最小二乘法拟合下可以被忽略。对于圆偏振分量调制引入的误差,因为  $qww'$  的偏振调制结构不具备圆偏振调制的能力,难以通过偏振定标的手段来完全消除,因此在设计系统时,需要结合测量目标斯托克斯参量的实际变化范围来对器件参数的偏差水平予以相应的控制。

## 参 考 文 献

- Lü Yunfeng. Study of hyperspectral polarized reflectance of vegetation canopy at nadir viewing direction [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 1028—1031.  
吕云峰. 基于垂直观测的植被冠层高光谱偏振反射特性研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1028—1031.
- Han Yang, Zhao Yunsheng, Wang Yeqiao, *et al.*. Quantitative research on spectral polarization characteristics of soil with different water content [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(5): 1077—1086.

- 韩 阳, 赵云升, 王野乔, 等. 不同含水量土壤偏振光谱特征定量分析 [J]. 遥感学报, 2013, 17(5): 1077—1086.
- Pan Banglong, Wang Xianhua, Zhu Jin, *et al.*. Polarized hyperspectral inversion model of chlorophyll in the lake water [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1665—1669.  
潘邦龙, 王先华, 朱 进, 等. 湖泊水体叶绿素偏振高光谱反演模型研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1665—1669.
- Wu Taixia, Yan Lei, Xiang Yun, *et al.*. The multi-angle polarization spectral character of water and its application in water color remote sensing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(2): 448—452.  
吴太夏, 晏 磊, 相 云, 等. 水体的多角度偏振波谱特性及其在水色遥感中应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 448—452.
- I Gruia, S B Yermolenko, C Gavrilă, *et al.*. Measurements in dynamics of cells membrane modifications induced by free radicals of oxygen attacks by spectropolarimetry and biochemical techniques [C]. SPIE, 2011, 8338: 83380M.
- Yongqiang Zhao, Lei Zhang, Quan Pan. Spectropolarimetric imaging for pathological analysis of skin [J]. Appl Opt, 2009, 48(10): D236—D246.
- Sergey Yermolenko, Pavlo Ivashko, Wojciech Surtel. Spectropolarimetry and fluorescence in biotissue cancer diagnostics [C]. SPIE, 2012, 8698: 86980B.
- Tetsu Anan, Kiyoshi Ichimoto, Akihito Oi, *et al.*. Developments of the wideband spectropolarimeter of the domeless solar telescope at hida observatory [C]. SPIE, 2012, 8446: 84461C.
- Vincenzo Greco, Fabio Cavallini. Optical design of near-infrared imaging spectropolarimeter for the advanced technology solar telescope [J]. Opt Eng, 2013, 52(6): 063001.
- William Sparks, Thomas A Germer, John W Mackenty, *et al.*. Compact and robust method for full stokes spectropolarimetry [J]. Appl Opt, 2012, 51(22): 5495—5511.
- Chen Ligang, Hong Jin, Qiao Yanli, *et al.*. Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10): 2384—2387.  
陈立刚, 洪 津, 乔延利, 等. 一种高精度偏振遥感探测方式的精度分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2384—2387.
- Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of Stokes parameter [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408006.  
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 一种提高偏振光斯托克斯参量测量精度的方法 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408006.
- Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Calibration of rotating quarter-wave method based polarimeter [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912005.  
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 旋转波片法偏振检测装置器件参数校准 [J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912005.
- Zhang Qianqian, Gao Jun, Xu Xiaohong, *et al.*. Analysis of multiple scattering polarization transmission properties [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1213001.  
张倩倩, 高 隽, 徐小红, 等. 多粒子散射的偏振传输特性分析 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1213001.
- Hao Zenzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust Aerosol particles [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101002.  
郝增周, 龚 芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性 [J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101002.
- Shintani Rynichi, Fan Aiying, Kang Changhe. Polarization Light [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994. 125—130.  
新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤. 偏振光 [M]. 北京: 原子能出版社, 1994. 125—130.