

文章编号:1007-2780(2016)08-0748-07

液晶光谱偏振系统选偏器方位误差研究

甘世奇*, 陈向宁, 薛俊诗, 赵融生
(中国人民解放军装备学院 光电装备系, 北京 101416)

摘要:为了分析液晶光谱偏振系统的方位误差并降低测量误差,提出了选偏器方位误差的分析方法。该方法基于 Stokes 矢量及 Mueller 矩阵,将偏振角的方位误差转化为 Stokes 矢量传递误差,推导了误差的协方差矩阵,分析了权重系数与延迟相位的变化关系,并对不同偏振态入射光条件下的品质因数变化进行了计算仿真。方位误差依赖于入射光 Stokes 参数与延迟相位,不同偏振态的入射光品质因数随延迟相位成抛物线变化。当延迟相位位于 $[60^{\circ}, 120^{\circ}]$ 区间内,选偏器的方位误差较小,测量误差较小适宜测量。通过对液晶偏振光谱系统配准误差的研究,获得误差来源,为进一步提高系统测量精度奠定了理论基础。

关键词:方位误差;液晶偏振光谱系统;协方差矩阵;Stokes 矢量

中图分类号:O433.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163108.0748

Misalignment errors of polarizer in the liquid crystal spectropolarimetric system

GAN Shi-qi*, CHEN Xiang-ning, XUE Jun-shi, ZHAO Rong-sheng

(*Department of Photoelectric Equipment, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China*)

Abstract: In order to analyze the misalignment errors of the liquid crystal spectropolarimetric system and reduce measurement errors, a research method for misalignment errors of liquid crystal polarizer is proposed. By transforming the misalignment errors of polarizing angle into Stokes vector transfer errors, the errors covariance matrix is derived based Stokes vectors and Mueller matrix. And the relationship between weight coefficients and phase delay and the change of quality factor with different incident light are investigated. The reached conclusion is that azimuth errors depend on Stokes parameters of incident light and phase delay and quality factors are parabolic with different incident polarization state. When delay phase locates in $[60^{\circ}, 120^{\circ}]$, the azimuth errors of polarizer are lesser, which is more appropriate to measure. By investigating the misalignment errors of the liquid crystal spectropolarimetric system, the error sources are obtained which can lay the foundation for measuring accuracy enhancement.

Key words: misalignment error; liquid crystal spectropolarimetric system; covariance matrix; Stokes vector

收稿日期:2016-04-15;修订日期:2016-05-11.

基金项目:国家 863 计划(No.2014AAXXX1072E)

Supported by National High Technology Research and Development Program ("863" Program) of China (No.2014AAXXX1072E)

* 通信联系人, E-mail:15134556671@163.com

1 引言

自 1808 年 Malus 在试验中发现了光的偏振现象,人类对光的偏振特性与应用研究至今已有 200 多年的历史。最近 30 年随着光电成像技术的迅速发展,偏振光谱成像技术成为成像探测领域的研究热点。偏振光谱成像技术通过偏振光谱成像获取探测目标的偏振光谱特征,该特征能够较好地表征物体本质特征,这种特征与背景环境所产生的特征明显不同。因此,它作为目标检测、跟踪、识别等提供了一种新的信息,具有巨大的发展空间与广泛的应用领域^[1-3]。然而这种成像技术从成像原理上无法避免偏振方向选取时带来的误差,因此对偏振仪方位误差的分析成为偏振成像技术中重要的研究命题,如何较好地降低系统误差提高探测精度成为研究热点。

目前在偏振仪误差分析研究主要基于测量方法误差和系统噪声误差两个方面。Sabatke 和 Tyo 针对旋转延迟波片的偏振仪所存在的高斯噪声进行研究^[4-5]。通过研究发现,延迟相位 132° 旋转角度为(−51.7°, −15.1°, 15.1°, 51.7°)能够给系统带来最大信噪比。H. Dong (2013) 通过对 180° 和 360° 范围内等间隔旋转角进行理论与仿真研究^[6],分析了旋转波片偏振仪的由光电探测器噪声带来的误差。代虎等人对旋转波片全偏振仪由波片旋转带来的角度误差进行理论与仿真分析^[7],通过分析表明,提高测量次数减小角度间隔能够有效地消除角度误差。目前现存时序测量偏振仪,绝大多数基于机械偏转^[8-14],利用液晶器件无旋转的时序偏振仪的研究是突破机械旋转、提高偏振成像精度的重要研究方向^[15],但目前该方向的研究在国内少有报道。本文基于 Stokes 矢量及 Mueller 矩阵原理,将液晶选偏器的方位误

差视为统计误差,利用协方差矩阵对液晶偏振光谱系统的方位误差进行研究,推导了由系统角度误差带来的 Stokes 矢量误差的协方差矩阵,并对不同偏振态入射光引起的误差进行了仿真分析。通过对液晶偏振光谱系统方位误差的研究,可以更好地得到误差来源,为进一步提高系统测量精度奠定了理论基础。

2 理论分析

液晶偏振光谱系统结构简图如图 1 所示,液晶相位延迟器固定在快轴与 x 轴夹角 45° 的位置,液晶可调谐滤波器的透射轴方向与 x 轴的夹角为 0°。液晶选偏器 360° 扫描全角度,扫描速率满足 $\theta = 2\pi f_0 t + \theta_0$,其中 θ 为透振方向与 x 轴的夹角, θ_0 为波片的初始角度。

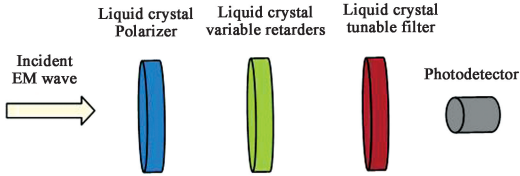


图 1 液晶光谱偏振系统结构示意图
Fig.1 Schematic structure of liquid crystal spectro-polarimetric system

利用 Stokes 矢量及 Mueller 传输矩阵可以得到液晶光谱偏振仪 CCD 探测的光强为:

$$I(t) = \frac{1}{4} [(1 + \cos\delta \cos 2\theta) S_0 + (\cos 2\theta + \cos^2 2\theta \cos\delta) S_1 + (\sin 2\theta + \cos\delta \cos 2\theta \sin 2\theta) S_2] \quad (1)$$

将式(1)写成 Stokes 矩阵传递的形式

$$\mathbf{I} = \mathbf{W}\mathbf{S}, \quad (2)$$

$$\mathbf{S} = [S_0, S_1, S_2]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{W} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \cos(\delta) \cos(2\theta_1) & \cos(2\theta_1) + \cos^2(2\theta_1) \cos(\delta) & \sin(2\theta_1) + \cos(\delta) \cos(2\theta_1) \sin(2\theta_1) \\ 1 + \cos(\delta) \cos(2\theta_2) & \cos(2\theta_2) + \cos^2(2\theta_2) \cos(\delta) & \sin(2\theta_2) + \cos(\delta) \cos(2\theta_2) \sin(2\theta_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 + \cos(\delta) \cos(2\theta_N) & \cos(2\theta_N) + \cos^2(2\theta_N) \cos(\delta) & \sin(2\theta_N) + \cos(\delta) \cos(2\theta_N) \sin(2\theta_N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

以上各式中,由于受系统透过率限制, $\mathbf{S}$ 表示忽略圆偏振分量的入射光 Stokes 参数, $\mathbf{W}$ 为系

统理想测量矩阵,表示系统对入射光 Stokes 参数的传递矩阵, $\mathbf{I}$ 表示探测器通过多次测量探测到

的光强。 δ 为液晶相位延迟器的延迟相位, θ_1 为选偏器的初始角度, $\theta_i = \theta_1 + \frac{2\pi}{N}, (i=1, 2, \dots, N-1, N)$ 为选偏器不同时间扫描的透振角。假设在理想情况下, 不考虑系统自身的噪声, 探测误差仅来源于选偏器的角度误差和延迟器的相位误差。那么, 我们可以得到

$$\Delta I = (W' - W)S = \Delta WS, \tag{5}$$

式中: $W' = W + \Delta W$ 为实际的传递矩阵, ΔW 为由角度偏差带来的误差矩阵, ΔI 为误差强度。当误差角度足够小, 在理想情况下将误差矩阵按泰勒公式展开, 取首项并近似得

$$\Delta W_{ij} = W'_{ij} - W_{ij} \approx \xi_i \frac{\partial W_{ij}(\theta)}{\partial \theta} \Big|_{\theta_i}, \tag{6}$$

式中: ξ_i 为选偏器第 i 次测得的角度方向误差, 因此 ΔW 可由上式解得

$$\Delta W = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -2\cos\delta \sin 2\theta_1 \xi_1 & (-2\sin 2\theta_1 - 4\sin 2\theta_1 \cos 2\theta_1 \cos\delta) \xi_1 & (2\cos 2\theta_1 + 2\cos 4\theta_1 \cos\delta) \xi_1 \\ -2\cos\delta \sin 2\theta_2 \xi_2 & (-2\sin 2\theta_2 - 4\sin 2\theta_2 \cos 2\theta_2 \cos\delta) \xi_2 & (2\cos 2\theta_2 + 2\cos 4\theta_2 \cos\delta) \xi_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ -2\cos\delta \sin 2\theta_N \xi_N & (-2\sin 2\theta_N - 4\sin 2\theta_N \cos 2\theta_N \cos\delta) \xi_N & (2\cos 2\theta_N + 2\cos 4\theta_N \cos\delta) \xi_N \end{bmatrix}. \tag{7}$$

为了更好地研究探测到的误差光强 ΔI 与方位误差 ξ 之间的关系, 我们可以得到式(8), ξ_1 ,

$\xi_2, \dots, \xi_N$ 分别表示 N 次测量的角度误差, ξ 是由多次测量构成的误差向量。

$$\Delta I = \Delta WS = Q\xi = \begin{bmatrix} -\cos\sin 2\theta_1 S_0 - (\sin 2\theta_1 + \cos\delta \sin 4\theta_1) S_1 + (\cos 2\theta_1 + \cos\delta \cos 4\theta_1) S_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\cos\sin 2\theta_2 S_0 - (\sin 2\theta_2 + \cos\delta \sin 4\theta_2) S_1 + (\cos 2\theta_2 + \cos\delta \cos 4\theta_2) S_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\cos\sin 2\theta_N S_0 - (\sin 2\theta_N + \cos\delta \sin 4\theta_N) S_1 + (\cos 2\theta_N + \cos\delta \cos 4\theta_N) S_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \dots \\ \xi_{N-1} \\ \xi_N \end{bmatrix}. \tag{8}$$

因此, 由角度误差造成的 Stokes 误差向量为 $\chi = W^+ \Delta I$, 其中: W^+ 为伪逆矩阵, 可以被表示为 $W^+ = (W^T W) - 1 W^T$. 假设方位误差满足正态分布, 标准差为 σ , 则 Stokes 误差矢量的协方差矩阵可以表示为

$$\Gamma_\chi = \langle \chi \chi^T \rangle = (W^T W)^{-1} W^T Q \langle \xi \xi^T \rangle Q^T W (W^T W)^{-1}. \tag{11}$$

由于时序偏振测量每次角度改变分时进行, 因此每次测得的角度误差相互独立, 即误差向量中的元素相互独立, 因此式(11)变为

$$\Gamma_\chi = \sigma^2 (W^T W)^{-1} W^T Q (W^T Q)^T (W^T W)^{-1}, \tag{12}$$

我们令 $\Lambda = W^T Q (W^T Q)^T$, $\Gamma = (W^T W)^{-1} \Lambda (W^T W)^{-1}$. $\tag{13}$

通过(4)可以求出 $\tag{14}$

$$(\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} = \frac{4}{N} \begin{bmatrix} \frac{8 + 6 \cos^2 \delta}{3 \cos^4 \delta - 6 \cos^2 \delta + 8} & \frac{-16 \cos \delta}{3 \cos^4 \delta - 6 \cos^2 \delta + 8} & 0 \\ \frac{-16 \cos \delta}{3 \cos^4 \delta - 6 \cos^2 \delta + 8} & \frac{16 + 8 \cos^2 \delta}{3 \cos^4 \delta - 6 \cos^2 \delta + 8} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4}{2 + \cos^2 \delta} \end{bmatrix}.$$

(15)

由于扫描偏振方向的角速度保持不变, θ_i 均匀分布在整个 360° 内, 三角函数构成的级数可以进行化简, 通过式(4), (9)和(13)可以得出

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} & \Lambda_{13} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \Lambda_{23} \\ \Lambda_{31} & \Lambda_{32} & \Lambda_{33} \end{bmatrix},$$

(16)

进一步结合式(14)可计算得到 $\mathbf{F}$ 。协方差矩阵 $\mathbf{F}$ 的对角线元素表示选偏器选偏方位误差对入射光

Stokes 参数误差传递的增益因数, 非对角元素表示对应参数误差相关性系数^[7]。因此, 协方差矩阵 $\mathbf{F}$ 的迹可以表示为

$$\begin{aligned} \text{Tr}(\mathbf{F}) &= \frac{16\sigma^2}{N} \\ & (C_1 s_0^2 + C_2 s_1^2 + C_3 s_2^2 + C_4 s_0 s_1 + \\ & C_5 s_0 s_2 + C_6 s_1 s_2), \end{aligned}$$

(17)

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{(8+6\cos^2\delta)\left(\frac{1}{2}\cos^2\delta+\frac{1}{8}\cos^4\delta\right)-(128+96\cos^2\delta)\left(\frac{1}{8}\cos^3\delta+\frac{1}{8}\cos^4\delta\right)}{3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8}-\frac{16\cos\delta\left(\frac{1}{8}\cos^3\delta+\frac{1}{8}\cos^4\delta\right)(8+6\cos^2\delta)+\cos^6\delta}{(3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8)^2} \\ C_2 &= 8\frac{(8+6\cos^2\delta)\left(\frac{1}{2}+\frac{3}{8}\cos^2\delta+\frac{3}{4}\cos^3\delta+\frac{1}{4}\cos^4\delta\right)-(128+96\cos^2\delta)\left(\frac{3}{8}\cos\delta-\frac{1}{4}\cos^2\delta+\frac{3}{8}\cos^3\delta-\frac{3}{16}\cos^4\delta\right)+256\cos\delta\left(\frac{1}{2}+\frac{3}{8}\cos^2\delta-\frac{3}{4}\cos^3\delta+\frac{1}{4}\cos^4\delta\right)}{3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8}+ \\ & \frac{16\cos\delta\left(\frac{3}{8}\cos\delta-\frac{1}{4}\cos^2\delta+\frac{3}{8}\cos^3\delta-\frac{3}{16}\cos^4\delta\right)(8+6\cos^2\delta)-16\cos^2\delta\left(\frac{1}{8}-\frac{5}{16}\cos\delta+\frac{3}{4}\cos^2\delta+\frac{1}{2}\cos^3\delta+\frac{5}{32}\cos^4\delta\right)}{(3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8)^2} \\ C_3 &= \frac{(8+256\cos\delta+6\cos^2\delta)\left(\frac{1}{2}+\frac{5}{32}\cos^2\delta+\frac{3}{4}\cos^3\delta+\frac{1}{4}\cos^4\delta\right)-16(8+6\cos^2\delta)\left(\frac{3}{32}-\frac{3}{8}\cos\delta+\frac{5}{16}\cos^2\delta+\frac{1}{16}\cos^3\delta+\frac{1}{32}\cos^4\delta\right)}{3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8}- \\ & \frac{[16\cos\delta+16](8+6\cos^2\delta)-(16+8\cos^2\delta)]\left(\frac{3}{32}-\frac{3}{8}\cos\delta+\frac{5}{16}\cos^2\delta+\frac{1}{16}\cos^3\delta+\frac{1}{32}\cos^4\delta\right)}{(3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8)^2} \\ C_4 &= \frac{(8+256\cos\delta+6\cos^2\delta)\left(\frac{1}{2}+\frac{15}{8}\cos^2\delta+\frac{1}{4}\cos^3\delta+\frac{1}{4}\cos^4\delta\right)-16(8+\cos\delta+6\cos^2\delta)\left(\frac{3}{32}-\frac{3}{8}\cos\delta+\frac{5}{16}\cos^2\delta+\frac{1}{16}\cos^3\delta+\frac{1}{32}\cos^4\delta\right)}{3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8}- \\ & \frac{[16\cos\delta(8+6\cos^2\delta)-\cos\delta(16+8\cos\delta)-(16+8\cos\delta)^2]\left(\frac{3}{32}-\frac{3}{8}\cos\delta+\frac{5}{16}\cos^2\delta+\frac{1}{16}\cos^3\delta+\frac{1}{32}\cos^4\delta\right)}{(3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8)^2}+\frac{16\left(\frac{3}{32}-\frac{3}{8}\cos\delta-\frac{5}{16}\cos^2\delta+\frac{1}{16}\cos^3\delta+\frac{1}{32}\cos^4\delta\right)}{(2+\cos^2\delta)^2} \\ C_5 &= \frac{(8+256\cos\delta+6\cos^2\delta)\left(\frac{1}{2}+\frac{19}{8}\cos^2\delta+\frac{3}{4}\cos^3\delta+\frac{3}{8}\cos^4\delta\right)-16(8+6\cos^2\delta)\left(\frac{3}{16}\cos^3\delta+\frac{5}{32}\cos^4\delta+\frac{3}{32}-\frac{3}{8}\cos\delta+\frac{5}{16}\cos^2\delta\right)}{3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8}- \\ & \frac{[16(\cos\delta+1)(8+6\cos^2\delta)-8(2+\cos^2\delta)\cos\delta]\left(\frac{3}{16}\cos^3\delta+\frac{5}{32}\cos^4\delta+\frac{3}{32}-\frac{3}{8}\cos\delta+\frac{5}{16}\cos^2\delta\right)+16\cos^2\delta\left(\frac{1}{16}\cos^2\delta+\frac{3}{32}-\frac{5}{16}\cos\delta+\frac{1}{8}\cos^3\delta+\frac{1}{32}\cos^4\delta\right)}{(3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8)^2} \\ C_6 &= \frac{(8+256\cos\delta+6\cos^2\delta)\left(1+\frac{7}{2}\cos^2\delta+\frac{1}{2}\cos^4\delta\right)-16(8+16\cos\delta+6\cos^2\delta)\left(\frac{1}{16}\cos^2\delta+\frac{7}{16}\cos^3\delta-\frac{5}{32}\cos^4\delta+\frac{3}{32}\right)}{3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8}- \\ & \frac{[16\cos\delta(8+6\cos^2\delta)-(16+8\cos^2\delta)\cos\delta+16\cos\delta]\left(\frac{1}{16}\cos^2\delta+\frac{7}{16}\cos^3\delta-\frac{5}{32}\cos^4\delta+\frac{3}{32}\right)-[16\cos^2\delta-(16+8\cos^2\delta)^2]\left(\frac{3}{32}-\frac{3}{8}\cos\delta+\frac{19}{32}\cos^2\delta+\frac{39}{32}\cos^3\delta+\frac{1}{32}\cos^4\delta\right)}{(3\cos^4\delta-6\cos^2\delta+8)^2} \end{aligned}$$

(18)

3 仿真分析

从第二部分的推导可以明显看出,由选偏器透光轴的方位误差经过系统传递增益后,最终对入射光的 Stokes 参数均造成了不同程度的影响。根据式(17)可以得到,误差矩阵的迹也就是系统误差增益系数,主要依赖于入射光的 Stokes 参数与延迟相位 δ ,同时随着测量次数的增加,方位误差与测量次数成反比变化。为了更好地分析每个变量对系统方位误差的影响,不妨定义式(17)中的后半部分为品质因数 Q ,即各个 Stokes 参量的增益系数的加权和,我们可以表达为

$$Q = C_1 + C_2 \bar{s}_1^2 + C_3 \bar{s}_2^2 + C_4 \bar{s}_1 + C_5 \bar{s}_2 + C_6 \bar{s}_1 \bar{s}_2.$$

(19)

入射光的 Stokes 矢量经过归一化处理为 $\mathbf{S}_{in} = (1, \bar{S}_1, \bar{S}_2, X)^T$ 。因此分析品质因数 Q 每个系数的变化,可以直观的得出不同权重的系数的影响,从而通过改变延迟相位优化系统,使得方位误差最小化降低系统误差。

从图 2 可以明显看出,权重系数 C_5, C_6 为负值,其余权重系数均为正值。 C_1, C_2, C_6 随着延迟相位 δ 的增加,变化剧烈,数值有较大的浮动。当延迟相位 δ 位于 $[60^\circ, 120^\circ]$ 区间内,所有权重系数

取值较小且变化平缓,此时品质因数 Q 较低,选偏器的方位误差较小,测量误差较小适宜测量。

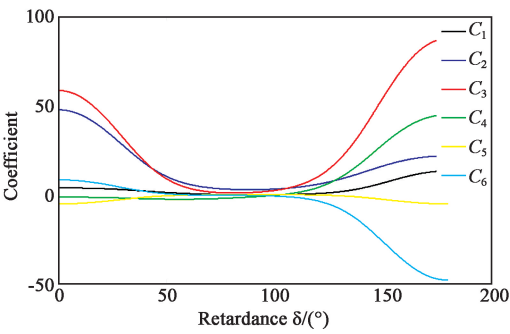


图 2 品质因数 Q 的权重系数与延迟相位 δ 的关系
Fig.2 Relationship between weight coefficients of quality factor Q and delay phased δ

对于不同偏振态入射光,由式(17)可知,方位误差依赖于入射光 Stokes 参数,品质因数因此也随之不同,如表 1 所示。对不同入射光的品质因数进行仿真,结果如图 3 所示,可以明显看出对于不同偏振态的入射光品质因数 Q 随延迟相位 δ 成抛物线变化,当 δ 位于 80° 附近抛物线处于最小值,此时系统方向误差最小。从变化幅度可以看出,当 s_1 与 s_2 差值较小时,即曲线 P_2 和 P_6 ,与其他曲线相比随 δ 的增加变化幅度最小。

表 1 不同偏振态入射光的 Stokes 矢量及品质因数 Q

Tab.1 Quality factor and Stokes vector with different incident polarization state

Incident light	Stokes vector	Quality factor
Average incident polarization state P_1	$\left(1, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{6}}\right)^T$	$C_1 + \frac{C_2}{2} + \frac{C_3}{3} + \frac{C_4}{\sqrt{2}} + \frac{C_5}{\sqrt{3}} + \frac{C_6}{\sqrt{6}}$
Average incident polarization state P_2	$\left(1, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^T$	$C_1 + \frac{C_2}{3} + \frac{C_3}{3} + \frac{C_4}{\sqrt{3}} + \frac{C_5}{\sqrt{3}} + \frac{C_6}{3}$
-45° linear polarization light P_3	$(1, 0, -1, 0)^T$	$C_1 + C_3 - C_5$
45° linear polarization light P_4	$(1, 0, 1, 0)^T$	$C_1 + C_3 + C_5$
Horizontal linear polarization light P_5	$(1, 1, 0, 0)^T$	$C_1 + C_2 + C_4$
Circular polarization light P_6	$(1, 0, 0, \pm 1)^T$	C_1

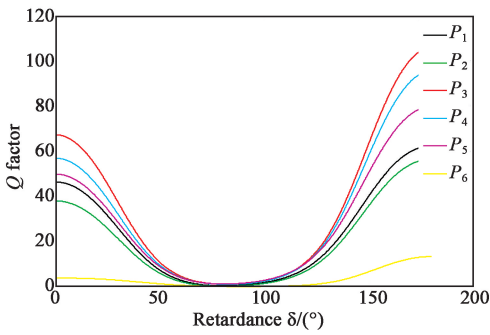


图 3 不同偏振态入射光品质因数 Q 与延迟相位 δ 的关系

Fig. 3 Relationship between quality factor Q and delay phase δ with different incident light

4 结 论

利用 Stokes 矢量及 Mueller 矩阵原理,将液

晶偏振光谱系统中的选偏器方位误差分析转化为对 Stokes 矢量传递误差的分析,推导了传递误差的协方差矩阵,并对权重系数与延迟相位的变化关系进行仿真。改变入射光的偏振态,得到不同 Stokes 矢量的品质因数与延迟相位的变化关系。计算及仿真结果表明:1)方位误差依赖于入射光 Stokes 参数与延迟相位,不同偏振态的入射光品质因数随延迟相位成抛物线变化,当 s_1 与 s_2 差值较小时曲线变化幅度较小;2)延迟相位位于 $[60^\circ, 120^\circ]$ 区间内,误差系数曲线处于最低,此时选偏器的方位误差最小,系统测量误差低适宜测量;3)随着测量次数的增加,方位误差与测量次数成反比变化,增加测量次数能够有效降低方位误差。深入分析偏振光谱系统配准误差来源,有利于修正系统误差,从而提高探测精度,为以后系统整体的误差分析和性能评估奠定理论基础。

参 考 文 献:

[1] CLARKE D, GRAINGER J F. *Polarized Light and Optical Measurement* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1971: 56-58.

[2] ZHAO Y Q, ZHANG L, ZHANG D, *et al.* Object separation by polarimetric and spectral imagery fusion [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, 113(8): 855-866.

[3] 赵永强,潘泉,陈玉春,等.基于偏振成像技术和图像融合理论杂乱背景压缩[J].电子学报,2005,33(3):433-435.
ZHAO Y Q, PAN Q, CHEN Y C, *et al.* Clutter reduction based on polarization imaging technology and image fusion theory [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 433-435. (in Chinese)

[4] SABATKE D S, DESCOUR M R, DERENIAK E L, *et al.* Optimization of retardance for a complete Stokes polarimeter [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 802-804.

[5] TYO J S. Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(4): 619-630.

[6] DONG H, TANG M, GONG Y D. Noise properties of uniformly-rotating RRFP Stokes polarimeters [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9674-9690.

[7] DAI H, YAN C X. Measurement errors resulted from misalignment errors of the retarder in a rotating-retarder complete Stokes polarimeter [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11869-11883.

[8] SUZUKI T, KUROSAKI H, ENKYO S, *et al.* Application of an AOTF imaging spectropolarimeter [C]. *Proceedings of SPIE 3121, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing*, San Diego, CA, United States: SPIE, 1997, 3121: 356-365.

[9] GUPTA N. Remote sensing using hyperspectral and polarization images [C]. *Proceedings of SPIE 4574, Instrumentation for Air Pollution and Global Atmospheric Monitoring*, Boston, MA: SPIE, 2002, 4574: 184-192.

[10] GUPTA N, SUHRE D R. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(14): 2632-2637.

[11] HOMMA K, SHINGU H, YAMAMOTO H, *et al.* Agro-environment observation using near-infrared LCTF spectropolarimeter [C]. *Proceedings of SPIE 5655, Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications II*, Honolulu, HI: SPIE, 2005, 5655: 407-418.

[12] LI J, ZHU J P, WU H Y. Compact static Fourier transform imaging spectropolarimeter based on channeled polar-

imetry [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3484-3786.

[13] LOER S, DUGGIN M J. Hyperspectral imaging polarimeter design and calibration [C]. *Proceedings of SPIE* 4481, *Polarization Analysis and Measurement IV*, San Diego, CA, USA: SPIE, 2002, 4481: 195-205.

[14] DUGGIN M J, LOE R S. Algorithms for target discrimination and contrast enhancement using narrowband polarimetric image data [C]. *Proceedings of SPIE* 4481, *Polarization Analysis and Measurement IV*, San Diego, CA, USA: SPIE, 2002, 4481: 247-256.

[15] 张颖, 赵慧洁, 程宣, 等. 基于 LCVR 调谐的全偏振多谱段成像系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(5): 1375-1378.

ZHANG Y, ZHAO H J, CHENG X, *et al.* Design of full-polarized and multi-spectral imaging system based on LCVR [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(5): 1375-1378. (in Chinese)

[16] 何正红, 叶志成, 苏翼凯. 胆甾型液晶彩色滤光片分析[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(4): 538-541.

HE Z H, YE Z C, SU Y K. Analysis of cholesteric liquid crystal color filter [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(4): 538-541. (in Chinese)

作者简介:陈向宁(1962—),男,江西崇仁人,工学博士,现任解放军装备学院光电装备系教授,博士生导师,国家遥感中心遥感软件测评专家,从事光学工程学科光学遥感领域研究。E-mail:laser115@163.com

甘世奇(1991—),男,新疆奇台人,硕士,2010 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2010 至今就读于中国人民解放军装备学院光学工程研究生,主要液晶器件的偏振成像方面的研究。E-mail:15134556671@163.com.

Busch 真空技术

致力于平板显示器生产





COBRA Semicon
干式螺杆真空泵

- ▶ 独特螺杆设计，实现强劲的抽气性能及卓越的粉尘耐受能力
- ▶ 配备高效电机及世界先进的休眠模式功能，可节省大量能耗
- ▶ 卓越的 PGMEA 等溶剂处理能力

Busch 根据 CVD、PVD、刻蚀、PR 涂层、成盒、OLED 蒸镀、封装、离子注入等不同工艺需求，为客户量身定制专业的真空解决方案。

www.buschvacuum.com | www.busch-china.com



普旭真空设备国际贸易（上海）有限公司
上海市松江工业区东部新区茜浦路 195 弄 5 号
电话：+86 (0)21 6760 0800 | info@busch-china.com