通道式偏振遥感器偏振解析方向测量误差分析及验证

范慧敏,裘桢炜,袁银麟,康 晴,洪 津

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031)

摘 要:通道式遥感器的偏振测量核心部件通常是相似的,即不同偏振解析方向的检偏器组合进行探测。同一系统中不同偏振解析方向之间的相对角度误差成为影响偏振遥感探测精度的重要因素之一。文中对该相对角度误差的影响以及提高测量精度的方法进行了研究。首先,分析了相对角度误差对偏振测量精度的影响;其次,对测量过程中存在的误差源进行了仿真分析及实验对比分析,根据该设计具体的实验参数和实验方法,验证仿真结果的正确性;最后,通过通道式遥感器偏振实测结果验证其测量的可靠性。系统偏振度测量值与可调偏振度光源输出的偏振度参考值比对,最大平均偏差为 0.735 3%;与 CE318 测量比对的最大平均偏差为 0.036。实验结果满足实际使用的偏振测量精度要求,说明偏振解析方向测量方法选择合理,可以为偏振遥感器的装调和高精度定标提供参考。

关键词:偏振遥感器; 通道式; 偏振解析方向; 高精度

中图分类号:TP732.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.1217007

Measurement error analysis and validation of the angle of polarizer for channel-type polarization remote sensor

Fan Huimin, Qiu Zhenwei, Yuan Yinlin, Kang Qing, Hong Jin

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The core component of the polarization measurement of the channel-type remote sensor is usually the similar, that is, the polarization detection is carried out by using the analyzer in different polarization direction. The relative angular error of different polarizers is an important element affecting the measurement accuracy of polarization. Firstly, the influence of relative angle error among the angle of polarizer on the accuracy of polarization measurement was analyzed. Secondly, the error sources in the measurement process were simulated and analyzed. According to the simulation results, the specific experimental parameters and methods were designed to verify the simulation results. Finally, the comparison of experiment results, which validated the measurement reliability, show that the maximum average deviation between the measured polarization degree of the system and the reference value of the reference source with variable polarization degree (VPOLS-II) is 0.735 3%, and the maximum average

收稿日期:2017-04-05; **修订日期**:2017-05-03

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(41405037)

作者简介:范慧敏(1986-),女,博士生,主要从事偏振遥感方面的研究。Email:fanhuimin1986@126.com

导师简介:洪津(1969-),男,研究员,博士生导师,主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空及航天遥感器工程技术方面的研究。Email:hongjin@aiofm.ac.cn

deviation from the CE318 measurement is 0.036. The experimental results satisfy the real polarization measurement accuracy requirement, which indicates the method of polarization analysis direction measurement is reasonable and provides a powerful support for the high precision calibration of the polarization sensor.

Key words: polarization remote sensor; channel-type; angle of polarizer; high precision

0 引 言

近年来，偏振遥感作为遥感应用中一个新的研究领域备受关注，具有较为广阔的应用前景和发展潜力。偏振遥感器是一种进行偏振遥感探测的传感器，主要通过获取地球表面和大气中的目标光谱辐亮度、偏振度和偏振方位角等多维度信息。自 20 世纪 80 年代开始国内外新兴了多种类型的偏振遥感器，较为著名的如法国的 POLDER[1]，美国的 APS[2]、MISR[3]，中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的多角度偏振成像仪[4]、多角度偏振辐射计[5]等。通道式偏振遥感器是进行偏振遥感探测的主要仪器类型之一，这类仪器的偏振测量核心部件通常是相似的，即不同偏振解析方向的检偏器组合进行偏振探测。不同偏振解析方向之间的相对角度误差是影响偏振成像仪偏振遥感探测精度的重要因素之一，是高精度定量化偏振遥感需要考虑的一个问题[6]。对于特定的偏振遥感器，由于受到测量时光源波动、仪器探测器响应非线性等因素的影响，偏振解析方向的测量精度会降低。偏振解析方向的测量基本原理是利用马吕斯定率来寻找消光位置或者最大光强位置。肖茂森、李春艳等人[7]设计了一种采用磁光调制技术，通过直角棱镜和自准直仪实现偏振器件的起偏器方位角测量的方法，将多次测量平均后的方位角作为最终测量结果。李双[8]采用曲线拟合法以及 Equator-Poles 定标两种方法对偏振解析方向进行测量，并通过最终偏振测量结果进行了验证。

文中主要研究通道式遥感器的探测系统偏振解析方向的测量方法。偏振探测方式采用分孔径同时探测，根据系统的特点，对曲线拟合法进行改进，采用旋转消光拟合法测量。首先分析了偏振解析方向相对角度误差对通道式偏振遥感器偏振测量精度的影响，推导了偏振解析方向相对角度误差与偏振测量精度和偏振方位角误差定量化之间的关系；详细介绍了旋转消光拟合法，并仿真分析了测量过程中存在的误差源，重点分析了信噪比和采样间隔对旋转消光拟合方法测量偏振解析方向结果的影响，根据仿真分析结果，设计具体的实验参数和实验方法，验证仿真结果的正确性；最后，将 490、670、870 nm 三个波段探测系统的偏振度测量值分别与可调偏振度光源输出的偏振度参考值和具有偏振测量能力的 CE318-NE DPS9 多波段太阳光度计进行了对比实验，验证通道式偏振遥感器偏振解析方向的测量精度和定标精度。

1 偏振解析方向影响分析

如图 1 所示为通道式偏振遥感器的系统光学基本原理图，若要获得入射目标光束的斯托克斯参数及相应的偏振度和偏振角，则需对同一光谱波段的三个偏振通道在三个角度方向上进行测量，通常选取(0°,60°,120°)三偏振解析方向的探测方式。

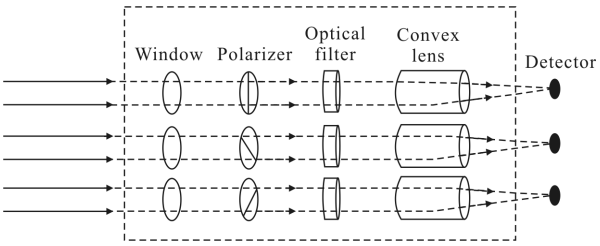

图 1 通道式偏振遥感器偏振探测系统光学基本原理图

Fig.1 Optical basic principle of polarization detection system of channel-type polarization remote sensor

假设目标辐射光束的 Stokes 参数为 $S_i=(I_i,Q_i,U_i,V_i)^T$，若偏振片的最大透过率为 t_x 和最小透过率为 t_y，入射线偏振光与偏振片透过轴方向的夹角为 θ，当其通过米勒矩阵为 M_a 的偏振器件后，若忽略圆偏振，光电探测器接收到的透过偏振片的出射光总光

强值为[9]：

$$L(\theta)=\frac{1}{2}((t_x+t_y)I+(t_x-t_y)Q\cos2\theta+(t_x-t_y)U\sin2\theta) \quad (1)$$

假设检偏器在装调过程产生的相对角度偏差（相对0°的偏振方位)为 δ_{60} 和 δ_{120}，则通过三偏振片后，目标光束的 Stokes 参数为：

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix}=2\begin{bmatrix} (t_{1x}+t_{1y}) & (t_{1x}-t_{1y})\cos2(0) & (t_{1x}-t_{1y})\sin2(0) \\ (t_{2x}+t_{2y}) & (t_{2x}-t_{2y})\cos2\left(\frac{1}{3}\pi+\delta_{60}\right) & (t_{2x}-t_{2y})\sin2\left(\frac{1}{3}\pi+\delta_{60}\right) \\ (t_{3x}+t_{3y}) & (t_{3x}-t_{3y})\cos2\left(\frac{2}{3}\pi+\delta_{120}\right) & (t_{3x}-t_{3y})\sin2\left(\frac{2}{3}\pi+\delta_{120}\right) \end{bmatrix}^{-1}\cdot\begin{pmatrix} L(0) \\ L(60) \\ L(120) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中：t_{1x}，t_{2x}，t_{3x} 分别为三个偏振片的最大透过率；t_{1y}，t_{2y}，t_{3y} 分别为三个偏振片的最小透过率；$L(0)$、$L(60)$和 $L(120)$分别为三个通道中光电探测器接收到的透过偏振片的出射光总光强。

目前，常规采用的偏振片消光比约为 10^{-3}，消光质量较好的偏振片或偏振器的消光比可达到 10^{-4} 及以上。文中采用消光比为 10^{-3}，则 $(t_{1x}+t_{1y})=(t_{2x}+t_{2y})=(t_{3x}+t_{3y})=0.999$，$(t_{1x}-t_{1y})=(t_{2x}-t_{2y})=(t_{3x}-t_{3y})=0.997$，对公式(2)进行仿真分析，仿真结果如图 2 所示。图 2(a)为 δ_{60} 和 δ_{120} 皆为 0.5°(基准为三偏振器中 0°的偏振方位)时，输入光的偏振度从 0 变化到 1，偏振方位角

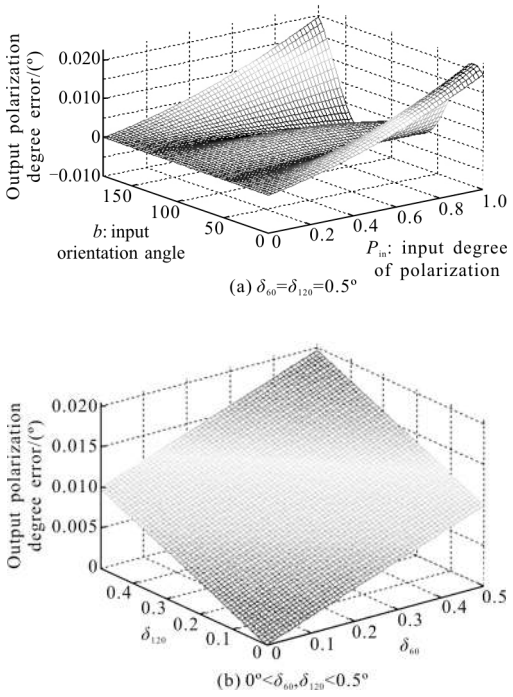

图 2 偏振解析方向相对角度误差对偏振度敏感性分析

Fig.2 Sensitivity analysis of relative angle error among the angle of polarizer in polarization degree

从 0°变化到 180°(基准为三偏振器中 0°的偏振方位)条件下，输出的偏振度误差变化图；图 2(b)为输入光的偏振度为 1，方位角为 0°时，δ_{60} 和 δ_{120} 从 0 变化到 0.5 时输出偏振度误差的变化图。从图中可以看到仅偏振方位角这一个误差源，对最终计算得到偏振度误差，在方位角误差为 0.5 时可以达到 2%。故在实际使用时，需要对每一个偏振解析方向的偏振器件进行定标，以获得高精度的偏振解析方向角度偏差。

2 偏振解析方向测量原理

2.1 测量原理及误差分析

旋转消光拟合法测量偏振解析方向的原理如图 3 所示。该实验主要通过精密电控转台带动参考偏振片等间隔在 0°~360°范围内进行连续旋转，每隔 N°记录通道式偏振遥感器的探测器响应值，得到的响应值呈余弦曲线变化的周期性信号，其初始相位 α 即为该通道与参考起偏器的偏振解析方向之间的相对角度差。

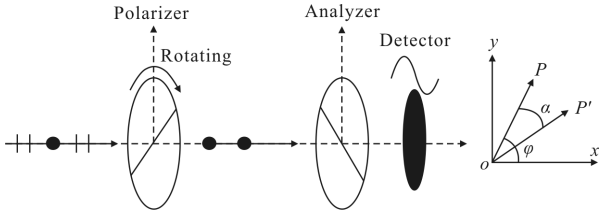

图 3 偏振解析方向测量原理图

Fig.3 Schematic diagram of the angle of polarizer measurement

假设光学系统产生的相位延迟为 δ，起偏器偏振透过轴和通道式偏振遥感器偏振解析方向之间的夹角为 α，起偏器透过轴与 x 轴之间的夹角为 φ，则偏振遥感器偏振解析方向与 x 轴之间的角度为$(\varphi-\alpha)$，假设目标光束 λ 波段的输入偏振态 Stokes 矢量为 $S_i=[I_{\lambda,i},Q_{\lambda,i},U_{\lambda,i},V_{\lambda,i}]^T$，输出偏振态 Stokes 矢量为 $S_o=[I_{\lambda,o},Q_{\lambda,o},U_{\lambda,o},V_{\lambda,o}]^T$，则有：

$$\begin{bmatrix} I_{\lambda,o} \\ Q_{\lambda,o} \\ U_{\lambda,o} \\ V_{\lambda,o} \end{bmatrix} = t_{\lambda,e} M_1 R(\delta) M_2 \begin{bmatrix} I_{\lambda,i} \\ Q_{\lambda,i} \\ U_{\lambda,i} \\ V_{\lambda,i} \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中

$$M_i = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} (t_{i,\lambda,x}^2+t_{i,\lambda,y}^2) & (t_{i,\lambda,x}^2-t_{i,\lambda,y}^2)\cos 2\theta_i & (t_{i,\lambda,x}^2+t_{i,\lambda,y}^2)\sin 2\theta_i & 0 \\ (t_{i,\lambda,x}^2-t_{i,\lambda,y}^2)\cos 2\theta_i & (t_{i,\lambda,x}^2+t_{i,\lambda,y}^2)\cos^2 2\theta_i+2t_{i,\lambda,x}t_{i,\lambda,y}\sin^2 2\theta_i & (t_{i,\lambda,x}^2-t_{i,\lambda,y}^2)\sin 2\theta_i\cos 2\theta_i & 0 \\ (t_{i,\lambda,x}^2-t_{i,\lambda,y}^2)\sin 2\theta_i & (t_{i,\lambda,x}^2-t_{i,\lambda,y}^2)^2\sin 2\theta_i\cos 2\theta_i & (t_{i,\lambda,x}^2+t_{i,\lambda,y}^2)\sin^2 2\theta_i+2t_{i,\lambda,x}t_{i,\lambda,y}\cos^2 2\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2t_{i,\lambda,x}t_{i,\lambda,y} \end{bmatrix}$$

$$i=1,2;\ \theta_1=\varphi;\ \theta_2=\varphi-\alpha$$

$$R(\delta)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\delta & \sin\delta \\ 0 & 0 & -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix}$$

式中：M_1 为起偏器米勒矩阵；M_2 为仪器检偏器米勒矩阵；$t_{1,\lambda,x}$ 为起偏器 x 轴透过率，$t_{1,\lambda,y}$ 为起偏器 y 轴透过率；$t_{2,\lambda,x}$ 为检偏器 x 轴透过率；$t_{2,\lambda,y}$ 为检偏器 y 轴透过率；δ 为光学系统产生的相位延迟；$R(\delta)$为其对应的米勒矩阵，$t_{\lambda,e}$ 为其他光学元件的透过率。当起偏器和检偏器的消光比为 10^{-3}，$t_{1,\lambda,x}\approx t_{2,\lambda,x}\approx 1$，$t_{1,\lambda,y}\approx t_{2,\lambda,y}\approx 0.001$，实验采用的光源为非偏光，并通过平行光管入射到遥感器系统内的探测器。非偏光的斯托克斯矢量为$[1\ 0\ 0\ 0]^T$，则系统探测器接收到的光强为：

$$I_{\lambda,o}=\frac{1}{4}t_{\lambda,e}I_{\lambda,i}(\cos 2\varphi\cos 2(\varphi-\alpha)-\sin 2\varphi\sin 2(\varphi-\alpha)\cos\delta+1) \tag{4}$$

如果起偏器等间隔地步进旋转一周，步进间隔为 $N°$，起偏器从任意位置开始连续等角度间隔旋转 360°，设起偏器透过轴起始角度为 0°，则第 k 个角度的测量结果为：

$$I_{\lambda,o}^{k}=\frac{1}{4}t_{\lambda,e}I_{\lambda,i}(\cos 2(kN)\cos 2(kN-\alpha)-\sin 2(kN)\sin 2(kN-\alpha)\cos\delta+1) \tag{5}$$

偏振遥感器偏振解析方向测量的主要误差源包括探测器随机噪声[10]，光源的不稳定性[11]，旋转台的定位误差，光源的非线性偏移[12]等，由于这些误差的存在导致测得的相位存在偏差。为了分析这四种误差的影响，首先对实验使用的卤钨光源进行检测，检测时间为开机后半小时至一个小时内，卤钨灯光源噪声如图 4(a)所示，依此对光源的噪声进行仿真分析。首先将光源的噪声分成随机噪声和非线性偏移两部分，其随机噪声服从高斯分布且均值为 0，方差为光源幅值的 0.2%，而非线性偏移为每小时衰减 2%；设计探测器的随机噪声服从高斯分布且均值为 0，方差为探测器响应 DN 值的 0.2%；实验采用的旋转台分辨率为0.000 2°，重复定位精度小于 0.004°，设计旋转台定位误差服从高斯分布且均值为 0，方差为 0.004。

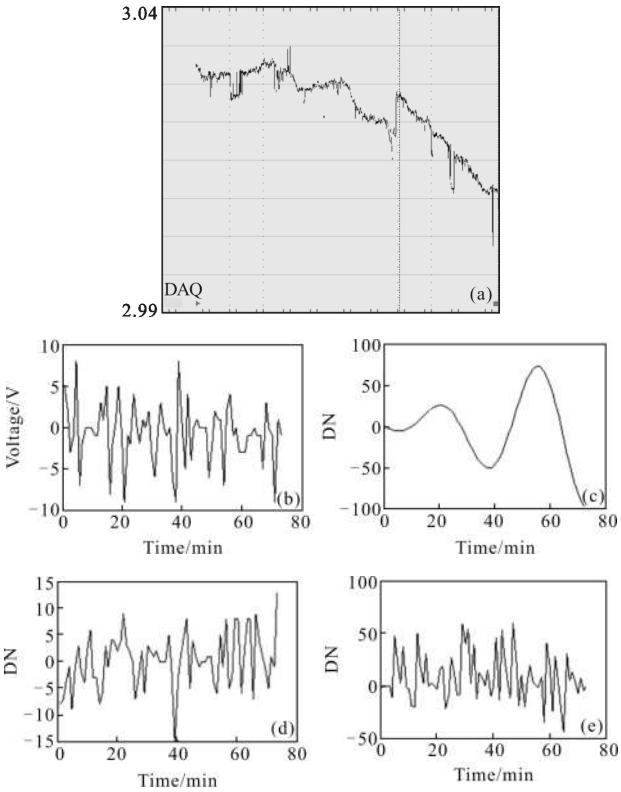

图 4 光源稳定性测试结果及 MATLAB 仿真使用的噪声图

Fig.4 Stability measurements results of the light source and the noise figures of MATLAB simulation

利用 MATLAB 数值分析及逐项扰动的方法对测量误差进行仿真。如图 4 所示为光源稳定性测试结果及根据实测结果利用 MATLAB 仿真时，作用在

最终测量结果中的噪声图，仿真计算时将探测器理想 DN 值逐渐增大，且噪声不变，并利用正弦曲线函数和最小二乘方法对获取的信号进行拟合。对拟合结果进行统计分析如图 5 所示，在采用间隔为 5°条件下，拟合得到的相位差和信噪比相关，随着信噪比的增大，拟合得到的相位误差呈递减趋势；当以上四种误差的大小相同时，直接叠加到探测器的随机噪声对最终的结果影响大于其余噪声；在信噪比较小时，采样间隔越小，得到的拟合曲线的相位误差越小；随着信噪比的增大，相同的误差条件下，误差的差异越来越小；当信噪比增加到一定程度，相位误差降低的速率也渐趋于变小。

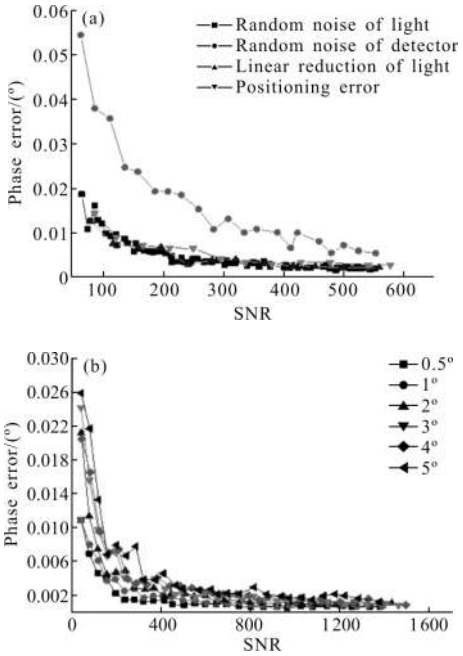

图 5 不同误差源和采样间隔条件下，信噪比与拟合的相位误差关系图

Fig.5 Relational graph of SNR and fitted phase error among different noises and sampling intervals

通过以上分析可知，在光源波动性相同的条件下，提高探测器信噪比可以降低这种旋转消光拟合测得的相位误差；同时当信噪比稍高时，采样间隔的变小，不能有效降低拟合得到的相位误差，但是信噪比增加到一定程度，相位误差降低的速率也渐趋于变小，针对该通道式偏振遥感器若以偏振解析方向的旋转消光拟合法为考量，信噪比设置为 300~600 是合适的。

2.2 实验及其数据分析

为满足偏振遥感器从可见光到近红外的多波段测试需求，测试采用具有连续谱的溴钨灯作为光源。并且光源配备有稳流电源及水冷系统，从而使输出光强波动<1%。光源出射光经准直镜转化为平行光，起偏器采用消光比为 10^3 的偏振片，安装在可以360°自由旋转的精密转台上，同时旋转台重复定位精度小于 0.004°，并且可由计算机控制转动并记录转动信息。文中所述实验是在 870 nm 波段进行的。此外，为了避免市电系统不稳定对测试造成干扰，所有的电子仪器都经由 UPS 稳压电源供电。实验时每个采样点采集 32 次，平均值作为该采样点的采样值，同时获得三个偏振通道的探测器数据，若以偏振通道 P1 的检偏器透过轴方位角为基准坐标，通过曲线拟合即可获得其余两个偏振通道相比基准通道的相对角度偏差。首先以 5°为间隔采集数据，测量时通过逐渐增大光源的输出强度，使探测器的信噪比发生变化；其次，多次使用旋转消光拟合测各通道偏振解析方向；随后，在两种信噪比的条件下，从 0.5°~20°改变采样间隔，获得采样间隔变化时偏振解析方向的测量标准差，结果如表 1、2 和图 6 所示。

表 1 信噪比与测量标准差测量结果

Tab.1 Signal to noise ratio and measurement results of standard deviation

870 nm-P1		870 nm-P2	
SNR	Standard error of phase deviation	SNR	Standard error of phase deviation
639.001	0.044 52	783.708	0.035 23
634.841	0.044 81	704.606	0.040 38
634.727	0.044 82	570.156	0.049 74
629.275	0.045 21	543.54	0.052 17
616.629	0.046 13	542.567	0.052 27
616.522	0.046 14	539.413	0.052 57
616.511	0.046 14	515.515	0.053 53
606.462	0.046 9	432.729	0.065 54
599.74	0.047 43	430.519	0.065 88
549.583	0.050 79	427.84	0.066 29
526.399	0.053 47	427.721	0.066 31
499.674	0.055 89	410.278	0.069 13
417.228	0.067 47	385.265	0.070 04
348.674	0.081 72	353.558	0.082 85
324.626	0.089 1	309.324	0.094 71

表 2 采样间隔与测量标准差测量结果

Tab.2 Sampling interval and measurement results of standard deviation

Low SNR		High SNR	
Span/(°)	Standard error of phase deviation	Span/(°)	Standard error of phase deviation
0.5	0.011 05	0.5	0.002 19
1	0.015 69	1	0.003 13
2	0.022 32	2	0.004 38
5	0.035 43	5	0.007 08
10	0.050 69	10	0.009 98
15	0.062 52	15	0.012 49
20	0.073 79	20	0.014 82

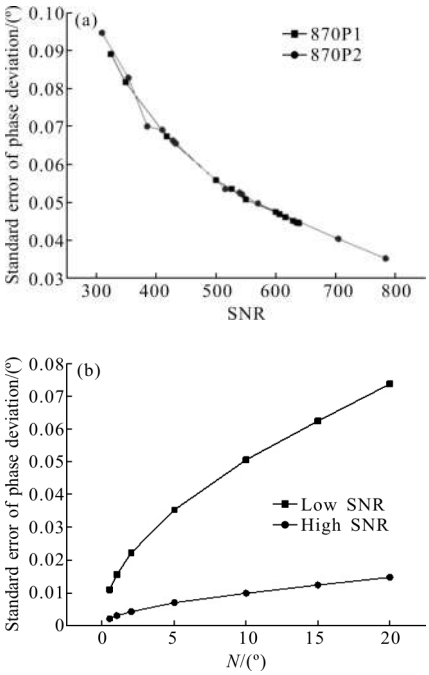

图 6 采样间隔与角度偏差的方差关系图

Fig.6 Variance of sampling interval and angle deviation

由图 6(a)可知,标准差的变化与信噪比的变化规律相反,当信噪比变大,标准差变小;图 6(b)为采样间隔与多次测量的标准差变化的规律，可以看到随着采样间隔的变大,标准差也增大,但当信噪比提高后,方差的变化速度变小。

3 偏振定标精度验证

通道式偏振遥感器和偏振解析方向完成装调后,通过可调偏振度光源(VPOLS-II)对遥感器的偏振定标结果进行精度验证，即将探测系统实测到的偏振度与可调偏振度光源输出偏振度参考值进行对比。可调偏振度光源的原理是利用自然光通过旋转玻片堆产生不同偏振度的线偏振光，可实现偏振度的连续输出。实验时，可调偏振度光源输出 0、5%、10%、15%、20%、25%、30%、45%和 60%共计九种状态偏振度参考值，同时探测系统的 490、670、870 nm 波段的偏振通道采集数据。通过遥感器的偏振度测量值与可调偏振度光源参考值的偏差和测量不确定度来判断偏振测量精度是否满足定标要求。表 3 为探测系统的偏振度测量值和可调偏振度参考光源的参考值及其偏差。

表 3 偏振光源输出偏振度与系统对其测量结果的对比

Tab.3 Comparison between polarization degree of the reference of VPOLS-II and the measured value

P_C[a]	490 nm		670 nm		870 nm	
	P_M[b]	$\lvert P_M-P_C\rvert$[c]	P_M	$\lvert P_M-P_C\rvert$	P_M	$\lvert P_M-P_C\rvert$
0	0	0	0	0	0	0
5%	4.90%	0.09%	4.73%	0.27%	4.56%	0.44%
10%	10.05%	0.06%	9.84%	0.16%	9.86%	0.14%
15%	15.03%	0.03%	15.01%	0.01%	14.82%	0.18%
20%	20.21%	0.21%	20.07%	0.07%	19.62%	0.38%
25%	25.25%	0.25%	25.09%	0.09%	24.634%	0.37%
30%	30.38%	0.38%	30.15%	0.15%	29.70%	0.30%
45%	45.61%	0.61%	45.53%	0.53%	45.12%	0.12%
Mean	0.204%		0.16%		0.241%	
Variance	0.043%		0.030%		0.024%	

In the table, a: designed degree of polarizer; b: measured degree of polarizer; c: deviation between designed degree of polarizer and measured degree of polarizer.

外场定标精度验证通过与具有偏振测量能力的 CE318-NE DPS9 多波段太阳光度计进行同时测试，对比实验结表 4 所示。

由表 3 可知，490 nm 波段偏振度测量值与可调偏振度光源输出的偏振度参考值的偏差范围为 0~0.61%,平均偏差为 0.204%;670 nm 波段偏差范围为 0~0.53%，平均偏差为 0.16%;870 nm 波段偏差范围为 0~0.44%,平均偏差为 0.241%。表 4 中对比 CE318 测量结果，在 490 nm 波段偏振度的偏差范围为

表 4 系统测量的偏振度与 CE318 对比结果

Tab.4 Polarization degree comparison with system measurement and CE318

Time	DOLPa			CE318-DOLP			Deviation		
	490 nm	670 nm	870 nm	500 nm	675 nm	870 nm	490/500	670/675	870/870
17:55:28	0.515	0.351	0.217	0.490	0.347	0.302	0.025	0.004	0.085
18:03:49	0.533	0.363	0.230	0.477	0.350	0.258	0.056	0.013	0.028
18:10:09	0.548	0.375	0.241	0.503	0.387	0.266	0.045	0.013	0.025
18:14:28	0.559	0.384	0.249	0.511	0.376	0.282	0.048	0.008	0.033
18:19:51	0.575	0.406	0.258	0.515	0.376	0.242	0.061	0.030	0.016
9:28:07	0.218	0.196	0.142	0.187	0.143	0.130	0.031	0.053	0.012
9:36:00	0.208	0.186	0.132	0.181	0.136	0.120	0.027	0.050	0.012
9:38:31	0.253	0.183	0.124	0.177	0.132	0.114	0.076	0.050	0.009
9:43:17	0.194	0.174	0.115	0.173	0.130	0.111	0.021	0.044	0.003
9:48:22	0.184	0.169	0.110	0.168	0.124	0.107	0.016	0.045	0.003
9:54:36	0.173	0.171	0.099	0.161	0.120	0.101	0.012	0.051	0.001
9:57:17	0.171	0.171	0.096	0.157	0.116	0.097	0.014	0.055	0.001
Mean							0.036	0.034 667	0.019

In the table, a: the channel-type polarization remote sensor measured degree of polarizer.

0.012~0.076，平均偏差为 0.036；670 nm 波段测量得到偏振度的偏差范围为 0.004~0.055，平均偏差为 0.034 667；870 nm 波段偏振度的偏差范围为 0.001~0.085，平均偏差为 0.019。实验结果满足实际使用的偏振测量精度要求，说明偏振解析方向测量方法选择合理。

4 结 论

检偏器角度误差是影响偏振成像仪偏振遥感探测精度的重要因素之一，检偏器方位角的精度直接影响着仪器最终的测试结果。文中对影响偏振解析方向的主要误差因素即探测器非线性噪声、光源的不稳定性、旋转台的定位误差和光源的线性偏移对最终拟合的结果的误差影响进行了仿真分析，分析这四种误差对测量结果的影响。仿真结果表明提高信噪比可以降低拟合误差，但提高采样间隔不能有效提高拟合精度。据此通过设计具体实验确定获得偏振解析方向的较低水平测量标准不确定度的条件，实验结果表明，通过设置合适的信噪比和合适的采样次数，可以有效的控制测量误差，提高偏振解析方向的测量精度，为偏振遥感器的装调和高精度定标提供了有力支撑。为实际工程优化及误差分析提供了依据。最后，通过与可调偏振度光源的实验室对比实验及与 CE318 的外场对比实验，对比结果的偏差较小，满足实际使用的偏振测量精度要求，说明偏振解析方向测量方法选择合理，测量的结果精度满足要求。

参考文献：

[1] Kox S, Furget C, Real J, et al. POLDER -A tensor polarimeter for intermediate-energy deuterons [J]. ***Nuclear Instrument & Methods in Physics Research Section a Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment***, 1994, 346(3): 527-543.

[2] Persh S, Shaham Y J, Benami O, et al. Ground performance measurements of the glory aerosol polarimetry sensor [C]// SPIE, 2010, 7807(1): 1-9.

[3] Lallart P, Kahn R, Tanre D. POLDER2/ ADEOSII, MISR, and MODIS/Terra reflectance comparisons [J]. ***J Geophys Res-Atmos***, 2008, 113(D14): 762-770.

[4] Qiu Zhenwei, Hong Jin, Li Shuang, et al. Methods to simultaneously achieve radiometric and polarimetric accuracy for multichannel ultra-wide-angle polarimetric camera [J].

Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0828003. (in Chinese)
裘桢炜, 洪津, 李双, 等. 多通道超广角偏振相机辐射精度和偏振精度的同时实现方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0828003.

[5] Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, et al. System design and implementation of multi-angle polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003. (in Chinese)
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828003.

[6] Yang Changjiu, Li Shuang, Qiu Zhenwei, et al. Study on image registration of simultaneous imaging polarization system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 262-267. (in Chinese)
杨长久, 李双, 裘桢炜, 等. 同时偏振成像探测系统的偏振图像配准研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 262-267.

[7] Xiao Maosen, Li Chunyan, Wu Yiming, et al. Measurement of azimuth by using new polarizer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 611-615. (in Chinese)
肖茂森, 李春艳, 吴易明, 等. 利用新型偏振器件实现方位角测量[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 611-615.

[8] Li Shuang, Qiu Zhenwei. Polarization orientation calibration of simultaneous imaging polari-meter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4100-4104. (in Chinese)
李双, 裘桢炜. 同时偏振成像仪检偏方位校正研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4100-4104.

[9] Li Zhengqiang, Luc Blarel, Thierry Podvin, et al. Calibration of the degree of linear polarization measurement of polarized radiometer using solar light [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(8): 1249-1256.

[10] Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, et al. Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0530001. (in Chinese)
李志伟, 熊伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0530001.

[11] Lin Guanyu, Yu Xiangyang. High precision intelligent calibration device of visible/near-infrared integral sphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (8): 2520-2525. (in Chinese)
林冠宇, 于向阳. 高精度智能化可见/近红外积分球辐射定标装置[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2520-2525.

[12] Sun Yuyang. The research of near-infrared light source stability control systems and application[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
孙玉洋. 近红外光源稳定控制系统及应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.