

偏振二向反射分布函数测量误差分析

汪杰君^{1,2} 杨 杰¹ 李 双³ 张文涛^{1,2} 王新强^{1,2} 叶 松^{1,2*}

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

²桂林电子科技大学广西高校光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

³中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 针对遥感偏振探测过程中获取的偏振信息与目标真实偏振信息存在差异的问题,探讨了遥感偏振成像系统的3类系统误差源对偏振二向反射分布函数、偏振度和偏振相角测量精度的影响,建立了遥感偏振探测误差分析模型。分析了起偏器角度定位误差对斯托克斯参量测量的影响,通过数值模拟研究了起偏器角度定位对偏振探测精度的影响;依据遥感偏振探测的地物空间间隔和成像CCD分辨率分析了空间视场重合误差对偏振二向分布函数分量的影响;分析了成像系统的光子噪声等固有系统误差对偏振探测结果的影响;根据误差的传递原则对3类误差源导致的测量误差进行了合成,进一步推导出线偏振度和偏振相角总误差模型。实验分析表明,该遥感偏振探测误差模型能真实反映偏振探测系统误差源对偏振二向反射分布函数测量精度的影响。

关键词 测量; 遥感; 偏振测量; 偏振精度; 二向反射分布函数

中图分类号 TP73

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0312004

Measurement Error Analysis of Bidirectional Reflectance Distribution Functions

Wang Jiejun^{1,2} Yang Jie¹ Li Shuang³ Zhang Wentao^{1,2} Wang Xinqiang^{1,2} Ye Song^{1,2}

¹*School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

²*Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing of Guangxi Colleges and Universities, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

³*Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*

Abstract According to the discrepancy between the measured polarization information obtained from polarization remote sensing detection and the real polarization information, the measuring accuracy of the polarimetric bidirectional reflectance distribution function (BRDF), the polarization degree and the polarization phase angle can be affected by three system error sources in polarization remote imaging system, which is discussed. The error analysis model of polarization remote sensing detection is established. The influence of polarizer angle positioning error on measuring Stokes parameters is analyzed, and the influence of polarizer angle orientation on polarization detection accuracy is numerically simulated; based on the feature space interval of polarization remote sensing detection and the resolution ratio of the imaging CCD, the influence of the visual field space coincidence error on BRDF is discussed; then the influence of photon noise of imaging system and other inherent systematic errors on polarization detection results is analyzed. According to error transfer principle, the measuring errors caused by three

收稿日期: 2015-09-07; 收到修改稿日期: 2015-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(U1331111)、广西自然科学基金(2012GXNSFB053170)、广西教育厅重点项目(ZD2014053)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ14108, YQ15111)、桂林电子科技大学创新团队项目

作者简介: 汪杰君(1974—),男,硕士,副教授,主要从事光电检测和遥感信息处理等方面的研究。

E-mail: wangjiejun@guet.edu.cn

*通信联系人。E-mail: yesongmail@sina.com

error sources are compounded, and the general error model with respect to linear polarization degree and polarization phase angle is derived. Experiments show the error model of polarization remote sensing detection can truly reflect the influence of polarization detection system error sources on measuring accuracy of BRDF.

Key words measurement; remote sensing; polarization measurements; polarimetric accuracy; bidirectional reflectance distribution functions

OCIS code 120.4640; 290.1483; 120.5410; 110.5405; 010.0280

1 引 言

偏振是电磁波的重要特征,自然界存在各种各样的天然反射起偏器,如植物叶片、土壤、水面等,太阳光经过它们反射后均能产生偏振现象。偏振遥感正是利用这一特征为遥感目标提供新的、潜在的信息。然而偏振测量过程中,受探测方法、仪器和环境等影响,测量结果不能准确描述目标的偏振信息。裘桢炜等^[1]以多角度偏振成像仪的光学系统为例改进了探测仪器,提高了偏振测量的精度;王羿等^[2]针对视场不完全重合是偏振测量的共性问题,探讨了视场重合程度对分时偏振测量精度的影响;季尔优等^[3]针对3通道偏振成像系统存在的视场差异和非一致性误差进行了校正,克服了视场差异和响应度非一致性的影响;Hudson等^[4-6]分析了旋转起偏器对偏振精度的影响;陈立刚等^[7-8]针对起偏器的影响提出提高偏振测量精度的方法;张雪冰等^[9]通过旋转波片法研究了成像斯托克斯偏振仪误差;康晴等^[10]对大动态范围可调线性偏振度参考光源进行了检测和不确定度分析。上述研究主要依据单一误差源分析偏振测量误差,没有对偏振误差进行系统分析。因此,本文依据遥感偏振成像系统中3个重要组成部分存在的系统误差,即起偏器的角度定位误差、成像系统的空间视场重合误差和成像系统CCD的固有误差等对偏振二向反射分布函数测量影响进行系统分析,建立了较为完整的偏振探测系统误差模型。

2 遥感偏振特性误差分析模型

二向反射分布函数(BRDF)表示了光学的一个基本特性,是自然界中物体表面反射的宏观现象,反映了目标反射光谱的空间结构信息,为实现多角度遥感奠定了理论基础。偏振二向反射分布函数(pBRDF)是标量二向反射分布函数的一般形式,完整地反映了材料的反射特性,不仅可以量化方向散射的大小,还能够给出散射的偏振特性。探测器接收到的辐射强度、偏振态等反映场景目标表面的信息,其本质为光子与目标表面及内部的散射行为,通过研究探测器接收到的信息,可以分析观测目标的内部结构和表面状态。

在可见光遥感区域,到达探测目标表面的能量主要来自2部分:太阳直射到达探测目标表面的能量 L_r 和大气散射到达探测目标表面的能量 L_s 。探测器接收到的总能量可近似分解为3部分:经场景目标散射后直接到达探测器的太阳光能量 L_r ,包含太阳光经场景目标表面及内部发生散射的能量;目标反射的天空散射光能量 L_s ;经大气散射后,直接沿着目标-探测器方向进入探测器的太阳光能量 L_u ,这部分能量所占比例较少,在实际遥感偏振测量过程中往往被忽略。

假设当遥感偏振成像系统接收到的能量为总辐射能量(光强值为 $L_r + L_s$)时,获得偏振图像T,图像能量为 T ;当成像系统接收到的能量只有大气散射光强(光强值为 L_s)时,获得偏振图像R,图像能量为 R ,同时自然表面反射无圆偏振光,则pBRDF第1列分量简化为

$$\begin{bmatrix} f_{00} \\ f_{10} \\ f_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}[(T_0 - R_0) + (T_{60} - R_{60}) + (T_{120} - R_{120})] \\ \frac{2}{3}[2(T_0 - R_0) - (T_{60} - R_{60}) - (T_{120} - R_{120})] \\ \frac{2}{\sqrt{3}}[(T_{60} - R_{60}) - (T_{120} - R_{120})] \end{bmatrix}. \quad (1)$$

线偏振度 D_{lp} 和偏振相角 Φ 可表示为

$$D_{lp} = \frac{\sqrt{f_{10}^2 + f_{20}^2}}{f_{00}}, \Phi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{f_{20}}{f_{10}}\right). \quad (2)$$

2.1 起偏器角度定位误差

尽管不同遥感偏振成像仪的光学结构有所差异,然而偏振测量的核心部件大多采用不同方位角的起偏器与同一波段的滤光片组合进行遥感偏振参量探测。当起偏器确定 0° 参考方向后,在方位角 φ 的起偏器的Stokes-Müller矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_\varphi = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi \\ \cos 2\varphi & \cos^2 2\varphi & \sin 2\varphi \cos 2\varphi \\ \sin 2\varphi & \sin 2\varphi \cos 2\varphi & \sin^2 2\varphi \end{bmatrix}. \quad (3)$$

光的偏振信息可以用Stokes 矢量表示,定义Stokes 参量为 $[I, Q, U, V]^T$,其中 I 表示光强信息, Q 和 U 表示线偏振的方向与强度, V 表示圆偏振分量。绝大多数地物的反射光中圆偏振分量在仪器探测范围内可以忽略,因此取 $V=0$ 。在角度 φ 上偏振相机接收到的光谱辐射强度可表示为

$$I_c(\varphi) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\varphi + U \sin 2\varphi). \quad (4)$$

将Stokes 参量归一化后,偏振相角 Φ 和线偏振度 D_{LP} 可表示为

$$\Phi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right), \quad D_{LP} = \sqrt{Q^2 + U^2}. \quad (5)$$

则Stokes 参量中的 Q 和 U 可表示为

$$Q = D_{LP} \cdot \cos 2\Phi, \quad U = D_{LP} \cdot \sin 2\Phi. \quad (6)$$

当 φ 取值 0° 、 60° 和 120° 时,Stokes 参量计算可表示为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}[I_c(0) + I_c(60) + I_c(120)] \\ \frac{2}{3}[2I_c(0) - I_c(60) - I_c(120)] \\ \frac{2}{\sqrt{3}}[I_c(60) - I_c(120)] \end{bmatrix}. \quad (7)$$

设入射光的Stokes 参量为 S_{in} ,由(3)式和(7)式可得:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}(M_0 + M_{60} + M_{120})S_{in} \\ \frac{2}{3}(2M_0 - M_{60} - M_{120})S_{in} \\ \frac{2}{\sqrt{3}}(M_{60} - M_{120})S_{in} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

假设起偏器在角度 φ 的定位误差为 η_φ ,其中 η_φ 服从均值为0的正态分布,当 φ 不同时满足独立正态分布。根据(3)式和(7)式可得 Q 分量的误差为

$$Q = \frac{1}{3} \left\{ Q_{in} [2 \cos(0 + 2\eta_0) - \cos(120^\circ + 2\eta_{60}) - \cos(120^\circ + 2\eta_{120})] + U_{in} [2 \sin(0 + 2\eta_0) - \sin(120^\circ + 2\eta_{60}) - \sin(240^\circ + 2\eta_{120})] \right\}. \quad (9)$$

同理可得 U 分量:

$$U = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ Q_{in} [\cos(120^\circ + 2\eta_{60}) - \cos(240^\circ + 2\eta_{120})] + U_{in} [\sin(120^\circ + 2\eta_{60}) - \sin(240^\circ + 2\eta_{120})] \right\}. \quad (10)$$

根据(6)式, Q 分量可表示为

$$Q = \frac{1}{3} \left\{ D_{LP} \cdot \cos 2\Phi [2 \cos(0^\circ + 2\eta_0) - \cos(120^\circ + 2\eta_{60}) - \cos(120^\circ + 2\eta_{120})] + D_{LP} \cdot \sin 2\Phi [2 \sin(0^\circ + 2\eta_0) - \sin(120^\circ + 2\eta_{60}) - \sin(240^\circ + 2\eta_{120})] \right\}. \quad (11)$$

同理 U 分量:

$$U = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ D_{LP} \cdot \cos 2\Phi [\cos(120^\circ + 2\eta_{60}) - \cos(240^\circ + 2\eta_{120})] + D_{LP} \cdot \sin 2\Phi [\sin(120^\circ + 2\eta_{60}) - \sin(240^\circ + 2\eta_{120})] \right\}. \quad (12)$$

依据(7)式和(8)式可得 I 的表达式:

$$I = I_{in} + \frac{Q_{in}}{3} [\cos(0^\circ + 2\eta_0) + \cos(120^\circ + 2\eta_{60}) + \cos(240^\circ + 2\eta_{120})] + \frac{U_{in}}{3} [\sin(0^\circ + 2\eta_0) + \sin(120^\circ + 2\eta_{60}) + \sin(240^\circ + 2\eta_{120})] \quad (13)$$

由于起偏器的角度定位误差而造成的偏振测量误差是无法校正的,因此起偏器的角度放置精度很重要,这是提高遥感偏振探测精度的关键因素之一。

2.2 空间视场重合误差

当遥感系统利用起偏器获取 3 个角度的偏振图像时,这 3 幅图像有可能存在场景在空间视场上不一致。同时获取偏振图像过程中,1 个像素中可能包含多个实际目标,导致对目标探测时获取的偏振信息与真实的偏振信息存在差异,产生伪偏振,从而对偏振参量的精度造成影响。遥感偏振测量的空间视场不重合因素主要有两方面:遥感偏振仪器和仪器搭载平台的运动状态。当图像配准误差不大于 1 个像素时,空间视场重合误差主要与遥感偏振图像的地物空间间隔(ground separation distance, G_{SD} ;单位:m)有关,当图像分辨率为 2.45A pixel/cm 时,则空间视场重合误差可表示为

$$\eta_{reg} = \frac{0.0127}{K} \times 100\%, \quad (14)$$

式中 $K = 2.45A \times G_{SD}$, 图像 T 和 R 之间的空间配准误差可以忽略,由(1)式可得 f_{00} 、 f_{10} 和 f_{20} 空间视场重合误差:

$$\begin{cases} \eta_{reg}(f_{00}) = \frac{0.0127}{K} \sqrt{2D_{N,T}^2 + 2D_{N,R}^2} \\ \eta_{reg}(f_{10}) = \frac{0.0127}{K} \sqrt{3D_{N,T}^2 + 3D_{N,R}^2} \\ \eta_{reg}(f_{20}) = \frac{0.0127}{K} \sqrt{D_{N,T}^2 + D_{N,R}^2} \end{cases}, \quad (15)$$

式中 D_N 为遥感影像像素亮度值(DN)。

2.3 成像系统的固有误差

所有的成像系统均存在光子噪声,同时光子噪声与光子总数的均方根成正比。对于灰度级为 12 bit 的遥感偏振图像,当光量子效率为 0.5 时, D_N 约为 43.5^[11],即光子噪声可表示为

$$\eta_p = \frac{\sqrt{43.5D_N}}{43.5D_N} = (43.5D_N)^{-\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

由于 12 bit 图像数据表征灰度值一致性的重复性范围^[11]为 $\pm 2D_N$, 因此偏振图像 T 的成像系统固有误差可表示为

$$\eta_{inh-T} = \left[2^2 + \left(\frac{D_N}{\sqrt{43.5D_N}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

当曝光时间相同时,根据大气散射与太阳直射的辐射比可知,一般情况下,大气散射的强度 L_r 为探测器接收到总强度 ($L_r + L_s$) 的 1/8^[11],因此对于偏振图像 R 的成像系统固有误差可表示为

$$\eta_{inh-R} = \left[2^2 + \left(\frac{\frac{D_N}{8}}{\sqrt{43.5 \frac{D_N}{8}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (18)$$

根据误差的传递原则,可得 f_{00} 、 f_{10} 和 f_{20} 的固有误差可表示为

$$\begin{cases} \eta_{inh}(f_{00}) = \sqrt{3\eta_{inh,T}^2 + 3\eta_{inh,R}^2} \\ \eta_{inh}(f_{10}) = \sqrt{4\eta_{inh,T}^2 + 4\eta_{inh,R}^2} \\ \eta_{inh}(f_{20}) = \sqrt{2\eta_{inh,T}^2 + 2\eta_{inh,R}^2} \end{cases}. \quad (19)$$

由于上述 3 类 pBRDF 测量误差是相互独立的,根据误差传递原则可得 f_{00} 分量总误差为

$$\eta(f_{00}) = \sqrt{\eta_{\text{inh}}(f_{00})^2 + \eta_{\text{reg}}(f_{00})^2 + \eta_{\text{fil}}(f_{00})^2}. \quad (20)$$

类似可得 f_{10} 分量总误差 $\eta(f_{10})$ 、 f_{20} 分量总误差 $\eta(f_{20})$ 。根据(2)式,可得 D_{LP} 的误差可表示为

$$\eta(D_{\text{LP}}) = \left\{ \left[\frac{\delta D_{\text{LP}}}{\delta f_{00}} \eta(f_{00}) \right]^2 + \left[\frac{\delta D_{\text{LP}}}{\delta f_{10}} \eta(f_{10}) \right]^2 + \left[\frac{\delta D_{\text{LP}}}{\delta f_{20}} \eta(f_{20}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (21)$$

即

$$\eta(D_{\text{LP}}) = \left\{ \left[-\frac{\sqrt{f_{10}^2 + f_{20}^2}}{f_{00}^2} \eta(f_{00}) \right]^2 + \left[\frac{f_{10}}{f_{00} \sqrt{f_{10}^2 + f_{20}^2}} \eta(f_{10}) \right]^2 + \left[\frac{f_{20}}{f_{00} \sqrt{f_{10}^2 + f_{20}^2}} \eta(f_{20}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (22)$$

由(2)式,同理可得偏振相角 Φ 的误差:

$$\eta(\Phi) = \left\{ \left[-\frac{f_{20}}{2f_{10}^2 \left(1 + \frac{f_{20}^2}{f_{10}^2} \right)} \eta(f_{10}) \right]^2 + \left[\frac{1}{2f_{10} \left(1 + \frac{f_{20}^2}{f_{10}^2} \right)} \eta(f_{20}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (23)$$

3 实验分析

首先分析起偏器的角度定位误差。为分析方便,假定起偏器角度定位误差 η_φ 范围均为 $\pm 0.3^\circ$, 根据(11)式和(12)式可得 Q 和 U 分量绝对误差和相对误差最大值与偏振相角 Φ 的关系曲线,如图1所示。

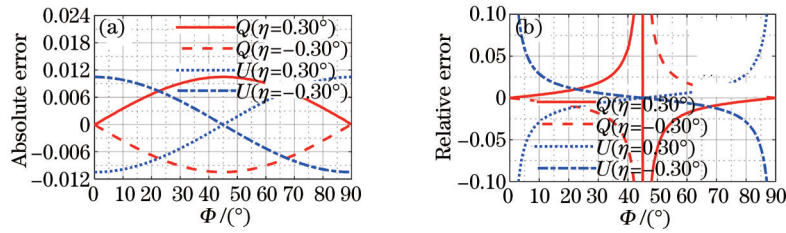


图1 Q 和 U 分量误差最大值与 Φ 的关系曲线。(a) 绝对误差; (b) 相对误差

Fig.1 Errors of Q and U components as functions of Φ . (a) Absolute error; (b) relative error

由图1(a)可知, Q 分量绝对误差关于 $\Phi = 45^\circ$ 偶对称, 而 U 分量绝对误差关于 $(45^\circ, 0)$ 奇对称。同理, 由图1(b)可知, Q 和 U 的相对误差关于 $(45^\circ, 0)$ 奇对称。同时, 根据图1可知, Q 和 U 分量的绝对误差和相对误差关于偏振定位角度正误差或负误差具有相对称的影响。为进一步分析起偏器角度定位误差对 Stokes 参量的影响

表1 起偏器的角度定位误差对 Stokes 参量、 D_{LP} 、 Φ 测量结果的影响

Table 1 Influence of polarizer angle positioning error on the measured Stokes vector, D_{LP} and Φ

$\Phi / (^\circ)$	Quantity	Truth	Mean	Standard deviation σ
0	I	1.00000	1.00000	0.00428
	Q	1.00000	0.99994	0.00428
	U	0.00000	0.00001	0.00740
	D_{LP}	1.00000	0.99997	0.00428
	$\Phi / (^\circ)$	0.00000	-0.00011	0.21188
30	I	1.00000	1.00000	0.00427
	Q	0.50000	0.49996	0.00676
	U	0.86603	0.86598	0.00523
	D_{LP}	1.00000	0.99997	0.00427
	$\Phi / (^\circ)$	30.00000	30.00024	0.21214
45	I	1.00000	1.00000	0.00428
	Q	0.00000	-0.00001	0.00740
	U	1.00000	0.99994	0.00427
	D_{LP}	1.00000	0.99997	0.00427
	$\Phi / (^\circ)$	45.00000	44.83106	0.00023

响,根据起偏器角度定位误差 η_φ 满足均值为0的正态分布, η_φ 范围为 $\pm 0.3^\circ$, 依据 3σ 准则,数值模拟 10^5 次起偏器角度定位测量误差,当线偏振度 $D_{LP} = 1.0$, 偏振相角 Φ 取 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时,仿真测量结果如表1所示。

当 $\Phi = 30^\circ$, $D_{LP} = 1.0$ 时,根据表1可知, I 、 Q 和 U 分量的相对误差分别为0.43%、1.35%、0.60%。当 $D_N(T) = 2000$, $D_N(R) = 250$, 根据(1)式,可得 $\eta_{in}(f_{00}) = 3500 \times 0.43\% = 14.79$, $\eta_{in}(f_{10}) = 1750 \times 1.35\% = 23.66$, $\eta_{in}(f_{20}) = 1750 \times 0.60\% = 10.58$ 。

偏振图像T和偏振图像R的绝对成像系统固有误差和相对成像系统固有误差与像素亮度值 D_N 的关系曲线分别如图2所示。

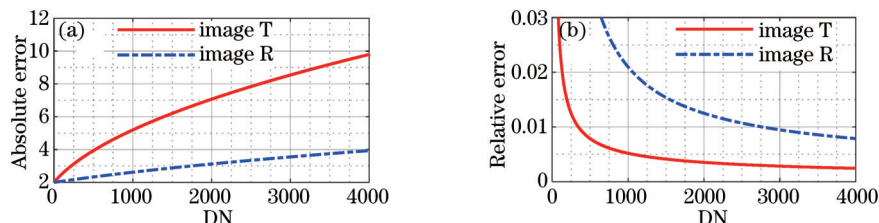


图2 成像系统的固有误差与像素亮度值的关系曲线。(a) 绝对误差; (b) 相对误差

Fig.2 Inherent error of imaging system as a function of digital number value of T and R images.

(a) Absolute error; (b) relative error

由图2可以发现,偏振图像T的绝对误差大于偏振图像R,然而偏振图像R的相对误差较大,当图像像素亮度值 $D_N \geq 2000$, 由(17)式可得 $\eta_{inh,T} \geq 7.07$, 偏振图像T的相对误差小于0.35%,同理可得偏振图像R的相对误差小于1.25%,在遥感偏振测量过程中,应依据实际测量环境改变偏振相机CCD的增益,提高像素亮度值,减小成像系统的相对固有误差,根据(19)式可得当 $D_N = 2000$ 时, $\eta_{inh}(f_{00}) = 13.39$, $\eta_{inh}(f_{10}) = 15.46$, $\eta_{inh}(f_{20}) = 10.93$ 。

假定遥感偏振相机的图像分辨率 $A = 171.5$ pixel/cm,则由(14)式和(15)式可得空间视场重合误差为 $\eta_{reg}(f_{00}) = 0.5171/G_{SD}$, $\eta_{reg}(f_{10}) = 0.7313/G_{SD}$, $\eta_{reg}(f_{20}) = 0.3658/G_{SD}$,根据(20)式对3类误差进行误差合成得到总误差:

$$\begin{cases} \eta(f_{00}) = D_N \sqrt{13.39^2 + \left(\frac{0.5171}{G_{SD}}\right)^2} + 14.97^2 \\ \eta(f_{10}) = D_N \sqrt{15.46^2 + \left(\frac{0.7313}{G_{SD}}\right)^2} + 23.66^2 \\ \eta(f_{20}) = D_N \sqrt{10.93^2 + \left(\frac{0.3658}{G_{SD}}\right)^2} + 10.58^2 \end{cases} \quad (24)$$

根据(24)式得出pBRDF分量的总误差,误差曲线分别如图3所示。从图3可知,当 $G_{SD} \geq 0.05$ m时, G_{SD} 的影响几乎不再变化。

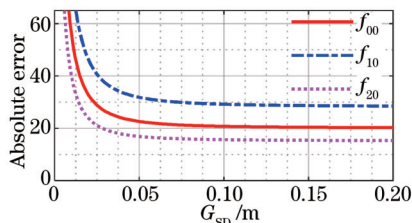


图3 f_{00} 、 f_{10} 和 f_{20} 分量的像素亮度值误差与 G_{SD} 的关系曲线

Fig.3 Digital number (D_N) error of f_{00} and f_{10} and f_{20} components as a function of G_{SD}

在遥感偏振探测中,偏振信息的测量精度会因光的偏振态不同而发生变化,因此为分析线偏振度测量误差,首先设定仿真环境:探测环境亮度值较大时, $f_{00} = 3500$, 探测环境亮度值较小时, $f_{00} = 1000$,线偏振度 D_{LP} 分别取 $D_{LP} = 0.0$ 和 $D_{LP} = 0.5$ 。根据(23)式可得上述4种情况的线偏振度误差曲线 $\eta(D_{LP})$,结果如图4所示。由图4可以发现,在 $G_{SD} = 1.27$ cm,当探测器环境亮度值较大即 $f_{00} = 3500$, $D_{LP} = 0.0$ 时,线偏振度的误差为

0.014, 当 $D_{LP} = 0.5$ 时, 误差值为 0.0191, 相对误差为 3.82%。当探测器环境亮度值较小时, 即 $f_{00} = 1000$, 原图像数据像素亮度值为 500, 误差有明显增加, $D_{LP} = 0.0$ 时, D_{LP} 误差值为 0.05, $D_{LP} = 0.5$ 时, 误差值为 0.067, 相对误差为 13.4%。

当 $f_{00} = 3500, \Phi = 22.5^\circ, D_{LP} = 0.5$ 时, $f_{10} = f_{20} = 1237$; 当 $D_{LP} = 0.0$ 时, $f_{10} = f_{20} = 247$ 。由(23)式可知, D_{LP} 为 0.5 和 0.0 时, 偏振相角 Φ 的误差 $\eta(\Phi)$ 曲线如图 5 所示。

由图 5 可得, $G_{SD} = 1.27$ cm, 当 $D_{LP} = 0.5, \eta(\Phi) = 0.82^\circ$ 时, 相对误差为 3.46%; 当 $D_{LP} = 0.5, \eta(\Phi) = 4.11^\circ$ 时, 相

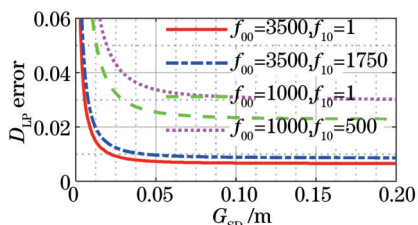


图 4 4 种条件下线偏振度的误差曲线

Fig.4 Estimations of D_{LP} measurement error under four conditions as a function of G_{SD}

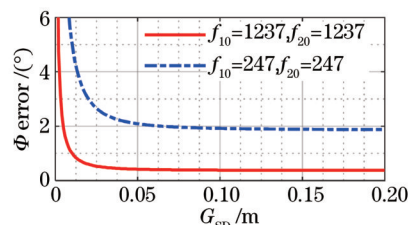


图 5 偏振相角的误差与 GSD 的关系曲线

Fig.5 Estimations of Φ measurement error in degrees as a function of G_{SD}

对误差为 12.87%。

由上述分析可知, 当 G_{SD} 为定值时, 图像像素的亮度值越大, 相对误差越小, 因此当探测的场景目标亮度值较小时(场景灰度值低于系统亮度灰度级动态范围的 0.125 倍, 对于 12 bit 图像, 像素灰度值小于 512, 增大探测仪器的增益, 增大获取图像的像素亮度值, 可以有效提高遥感偏振的测量精度。像素亮度值一定时, 当 $G_{SD} \leq 1.27$ cm 时, 偏振信息的相对误差较大, 空间视场重合误差较大; 当 $G_{SD} \geq 1.27$ cm 时, 随着 G_{SD} 增大, 偏振信息的相对误差变化趋势变缓, 考虑探测信息精度和偏振信息测量误差, 应根据实际需要选择合适的 G_{SD} 值。

4 结 论

在遥感偏振探测中, 偏振参量测量的精确度受到探测环境变化、偏振测量部件的测量准确性和前面光学系统的偏振特性等因素影响, 使得偏振参量的测量值不能准确反演目标信息。分析了起偏器的角度定位误差、空间视场重合误差和成像系统的固有误差对偏振二向反射分布函数测量精度的影响, 并分析了对线偏振度和偏振相角参量的影响。由于偏振成像过程中的不确定因素是复杂的, 为定量探讨偏振探测系统的不确定度, 文中对误差分量进行了数值模拟, 分析了误差源对 pBRDF 参量的影响。尽管在分析探测误差过程中进行了近似假设, 然而误差结果被实际偏振探测系统证实是合理的。当探测系统设计组装完成之后, 偏振器的角度定位误差和系统固有噪声已经确定, 为提高遥感偏振探测精度, 应根据探测的场景目标亮度选择合理的探测仪器增益和 G_{SD} 值, 以有效提高遥感偏振的测量精度。本误差模型为研究遥感偏振探测系统的测量不确定度提供了新思路。

参 考 文 献

- 1 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.
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.
- 2 Wang Yi, Hong Jin, Luo Donggen, *et al.*. Influence of field of view alignment on division of time polarimetry accuracy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 606-610.
王 羿, 洪 津, 骆冬根, 等. 视场重合程度对分时偏振测量精度的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 606-610.
- 3 Ji Eryou, Gu Guohua, Bai Lianfa, *et al.*. Three-channel polarization imaging systems and system error correction method[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(1): 0111002.
季尔优, 顾国华, 柏连发, 等. 三通道偏振成像系统及系统误差校正方法[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 0111002.
- 4 Derek Hudson, Jeffrey R Piepmeier, David G Long. Polarization rotation correction in radiometry: An error analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(10): 3212-3223.

- 5 Costel Fluerau, Sofiane Latoui, Johann Besse, *et al.*. Error analysis of a rotating quarter-wave plate Stokes' polarimeter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(4): 731-735.
- 6 Li Cuili, Sun Xiaobing, Wang Han, *et al.*. Accuracy analysis of simultaneous polarized measurement based on polarizing beam splitter [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0412004.
李翠丽, 孙晓兵, 王 涵, 等. 基于偏振分束组件的同时偏振探测精度分析[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0412004.
- 7 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.
- 8 Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of Stokes parameters[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.
- 9 Zhang Xuebing, Li Yanqiu, Zheng Meng, *et al.*. Calibration and error compensation of an imaging Stokes polarimeter based on rotating quarter-wave plate method[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708007.
张雪冰, 李艳秋, 郑 猛, 等. 旋转波片法成像斯托克斯偏振仪误差标定和补偿[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708007.
- 10 Kang Qing, Li Jianjun, Chen Ligang, *et al.*. Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412003.
康 晴, 李健军, 陈立刚, 等. 大动态范围可调线性偏振度参考光源检测与不确定度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412003.
- 11 James R, Shell II. Polarimetric Remote Sensing in the Visible to Near Infrared[D]. New York: Rochester Institute of Technology, 2005.

栏目编辑: 何卓铭