

光栅色散型成像光谱仪的偏振校正方法研究

王宏博^{1,2} 胡秀清^{3*} 张 璐³ 张崇丙¹ 任百川¹ 黄小仙^{1,2} 危 峻^{1,2}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

²中国科学院大学, 北京 100049

³中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 光栅色散型成像光谱仪工作在可见近红外波段,主要用于海洋水色遥感。仪器采用推扫式成像,共设置 15 个光谱通道,穿轨方向由 1024 个像元组成,总视场宽度为 14.2°。成像仪的各光谱通道对入射光的偏振状态敏感,为了提高大气顶入瞳辐射的测量精度,需要了解仪器的偏振响应特性,包括偏振灵敏度和相位角。发射前搭建了偏振测试系统,测量仪器的偏振灵敏度和相位角,它们是光谱通道和视场像元的函数。其中 980 nm 波段的偏振灵敏度最高,平均值约为 4.69%,443 nm 波段的偏振灵敏度最低,平均值约为 1.81%。随着视场的变化,灵敏度呈现中间低,两边高的变化规律。提出成像仪偏振响应校正方法,利用偏振状态已知的入射光进行实验验证,结果表明该方法可将成像光谱仪偏振响应引入的辐射测量不确定度降低 1%~6%。

关键词 测量; 成像光谱仪; 辐射定标; 偏振校正; 可见近红外波段

中图分类号 P715.6; TH766 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0812004

Polarization Correction for Grating Dispersive Imaging Spectrometer

Wang Hongbo^{1,2} Hu Xiuqing³ Zhang Lu³ Zhang Chongbing¹

Ren Baichuan¹ Huang Xiaoxian^{1,2} Wei Jun^{1,2}

¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract The grating dispersive imaging spectrometer is used for ocean color remote sensing. It is operated in the visible and near infrared range. A push-broom method is applied to the instrument. 15 spectral channels and 1024 cross-track pixels comprising a total field of view of 14.2° are arranged on the focal plane. The spectral channels are sensitive to the polarization of the incident light. To improve the radiation measurement precision at the top of atmosphere, it is necessary to understand the polarization response characteristics of the instrument, including the polarization sensitivity and the phase angle. A polarization testing system is established before launching. The polarization sensitivity and the phase angle data of all spectral channels, which vary with the channel No. and the cross-track pixel, are measured. The 980 nm band has the highest polarization sensitivity and its mean of the cross-track pixels is about 4.69%, while the 443 nm band has the lowest sensitivity with a mean of about 1.81%. The sensitivity of middle field of view is lower than that at the edges in the same channel. A polarization response correction method is proposed for the imaging spectrometer. Verification experiments are performed by introducing the partially polarized light with a known polarization state. The result shows that the radiometric uncertainty caused by polarization response of the instrument can be reduced by 1%-6%.

Key words measurement; imaging spectrometer; radiometric calibration; polarization correction; visible and near-infrared band

收稿日期: 2016-03-16; 收到修改稿日期: 2016-04-18

基金项目: 国防科工局预研项目(Y5X77329N0X)

作者简介: 王宏博(1987—),男,博士研究生,主要从事成像光谱仪定标技术方面的研究。

E-mail: wanghongbo@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 危 峻(1972—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事卫星(飞船)载光学对地观测遥感仪器总体方案设计和整机研制方面的研究。E-mail: weijun@mail.sitp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: huxq@cma.gov.cn

1 引 言

面向海洋遥感应用的光栅色散型成像光谱仪(简称为成像仪或仪器),对地球场景成像的同时能获取光谱信息,在海洋水色观测中具有重要作用。仪器隶属某地球低轨道卫星,将于2016年第3季发射入轨。发射前,实验室使用积分球为成像仪作辐射定标,生成各光谱通道的定标系数。积分球为近似理想的朗伯体,其出射光可看作非偏光。但是太阳光经过大气散射和海洋镜面反射会产生起偏效应,在轨水色遥感仪器的接收辐射具有偏振性,而且仪器对入射光的偏振状态敏感,从而引入测量误差。

一般情况下,水色传感器接收总辐射的90%来自大气程辐射和海表反射辐射,而真正携带海洋水色信息的离水辐射仅占10%^[1]。由于大气散射的存在,通常到达遥感器的辐射线偏振度可达到70%^[2]。以成像仪413 nm波段某像元为例,其偏振灵敏度为3.8%,则偏振响应引起的误差约为±2.4%(±3.8%×0.7×0.9,其中0.9是指大气程辐射占仪器入瞳总辐射的90%),如不校正,无法达到海洋水色反演所需的0.5%辐射定标精度^[3]。

针对该问题,目前国际上主要有两种解决办法,一种是在光学系统中加装偏振扰频器消偏,如MERIS^[4]和SeaWiFS^[5];另外一种是同步测量或模拟计算仪器入瞳辐射的偏振状态,再通过偏振响应模型进行数据校正,如MODIS^[2]和VIIRS^[6]。国内王淑荣等^[7]为FY-3紫外垂直探测仪安装了消偏器以降低偏振对测量结果的影响;李占峰等^[8-9]提出了针对大气紫外航天遥感的在轨偏振校正方案;何贤强等开发了海洋-大气耦合矢量辐射传输数值模型,并基于该传输模式测量了HY-1B/COCTS偏振响应特性,提出了COCTS的在轨偏振校正算法,但由于仪器自身性能以及验证站分布位置受限,部分通道校正效果不理想^[10-11]。

本文针对光栅色散型可见近红外成像光谱仪的偏振响应问题,推演了偏振响应模型,提出成像仪偏振校正算法,搭建实验室偏振响应测试系统,详细测量工程样机的偏振灵敏度和相位角,并且选取仪器第10通道穿轨视场第797像元演示算法的操作流程,最后利用状态已知的偏正光对校正算法进行验证。

2 原理与算法

2.1 仪器偏振响应建模

考虑到仪器对入射光偏振状态敏感,根据Knight^[12]提出的理论模型,偏振响应方程可写为

$$V = V_0 + R_0 R_p I_p, \quad (1)$$

式中 V 为遥感器的输出码值, V_0 为暗电平码值, R_0 为与偏振不相关的响应系数, I_p 为辐射强度, R_p 为仪器对定标源的偏振响应系数。 R_p 需要满足两个归一化条件:1)仪器对目标任意偏振态响应都一致时, $R_p=1$;2)当目标场景与定标源偏振状态一致时($I_{ps}=I_{pc}$, I_{ps} 为目标场景辐射强度, I_{pc} 为定标源辐射强度), $R_p=1$ 。

Stokes 矢量描述入瞳光源偏振状态,Mueller 矩阵表征仪器光学系统响应:

$$V = V_0 + \mathbf{R}_{\text{det}} \mathbf{M} \mathbf{S} = V_0 + \begin{bmatrix} R_{\text{det}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_t \\ Q_t \\ U_t \\ V_t \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{R}_{det} 表示探测器和电子学系统响应, \mathbf{M} 为光学系统 Mueller 矩阵, \mathbf{S} 为 Stokes 矢量,表征入射光的偏振状态。Stokes 矢量各个元素(I_t, Q_t, U_t, V_t)的物理意义在此不再赘述。(2)式展开为

$$V = V_0 + R_{\text{det}} (m_{00} I_t + m_{01} Q_t + m_{02} U_t + m_{03} V_t). \quad (3)$$

在实际目标场景辐射中,圆偏振分量可以忽略不计。经过变换方程写为

$$V = V_0 + \left(1 + \frac{Q_t}{I_t} m_1 + \frac{U_t}{I_t} m_2 \right) r_0 I_t, \quad (4)$$

式中 $m_1 = m_{01}/m_{00}$, $m_2 = m_{02}/m_{00}$, $r_0 = R_{\text{det}} m_{00}$,对比偏振响应方程式可得

$$R_p = \frac{V_s - V_0}{R_0 I_{ts}} = \frac{\left(1 + \frac{Q_t}{I_t} m_1 + \frac{U_t}{I_t} m_2 \right) r_0}{R_0}, \quad (5)$$

式中 I_{ts} 为目标场景的强度真值。根据归一化条件, 接受定标源辐射时 $R_p = 1$, 因此 $R_0 = \left(1 + \frac{Q_{tc}}{I_{tc}}m_1 + \frac{U_{tc}}{I_{tc}}m_2\right)r_0$, 将其代入(5)式, 则

$$R_p = \frac{1 + \frac{Q_{ts}}{I_{ts}}m_1 + \frac{U_{ts}}{I_{ts}}m_2}{1 + \frac{Q_{tc}}{I_{tc}}m_1 + \frac{U_{tc}}{I_{tc}}m_2}, \quad (6)$$

式中下标 s 和 c 分别代表目标场景和定标源。

遥感仪器地面定标实验采用的积分球或漫射板具有良好的朗伯特性, 可以视为非偏光源, 即 $Q_{tc} \approx 0$, $U_{tc} \approx 0$, 由此简化为

$$R_p = 1 + \frac{Q_{ts}}{I_{ts}}m_1 + \frac{U_{ts}}{I_{ts}}m_2, \quad (7)$$

式中 m_1 和 m_2 两个参数通常在发射前由实验室测量得到, I_{ts} 、 U_{ts} 、 Q_{ts} 为遥感目标场景的 Stokes 分量。假设发射前实验室定标未考虑偏振因素获得偏置和响应系数 V_0 和 R_0 , 则目标场景的辐射测量值为

$$I_{ms} = \frac{V_s - V_0}{R_0}. \quad (8)$$

将(7)、(8)式代入响应方程(1)式可知测量值 I_{ms} 与实际辐射值 I_{ts} 的关系为

$$I_{ms} = I_{ts}R_p = I_t \left(1 + \frac{Q_t}{I_t}m_1 + \frac{U_t}{I_t}m_2\right), \quad (9)$$

式中 m_1 和 m_2 与光学系统 Mueller 矩阵有关, 是仪器固有参数。当实际入瞳辐射强度 I_t 恒定时, 测量值 I_m 会受到不同偏振状态的影响。

2.2 线偏振光入射仿真

假设入瞳辐射为线偏振光, 其 Stokes 矢量可简化为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I_t \\ Q_t \\ U_t \\ V_t \end{bmatrix} = I_t \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\beta \\ \sin 2\beta \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

令 $p_a = \sqrt{m_1^2 + m_2^2}$, 将线偏振 Stokes 矢量表达式代入 R_p , (9)式可写为

$$I_m(\beta) = I_t [1 + p_a \cos(2\beta - 2\delta)], \quad (11)$$

式中 $m_1 = p_a \cos 2\delta$, $m_2 = p_a \sin 2\delta$, β 为线偏振光电场矢量振动方向在垂直于光线传播方向的平面内与参考坐标系 x 轴的夹角, δ 为偏振相位角。线偏振光强度 I_t 为恒定值, 假设 $p_a = 0.2$, $\delta = \pi/2$, 仿真计算得到 $I_m(\beta)/I_t$ 与 β 的关系呈余弦函数变化, 曲线如图 1 所示。

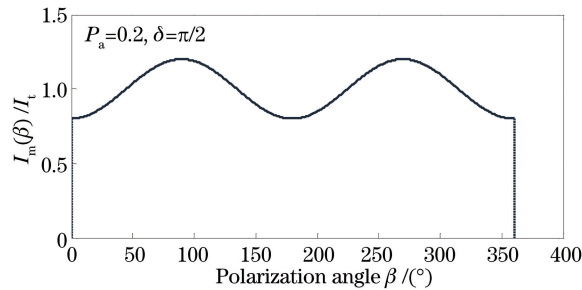


图 1 偏振响应仿真

Fig. 1 Polarization response simulation

当 $\beta = \delta \pm 180^\circ$ 时, 测量值达到最大; 当 $\beta = \delta \pm 90^\circ$ 时, 测量值最小。 β 旋转 360° , $I_m(\beta)$ 变化 2 个周期。 p_a 为偏振响应幅度, $p_a = 0$ 表示仪器对偏振不敏感, 即 $I_m(\beta)$ 不随 β 旋转变化, p_a 越大仪器对偏振越敏感。 成像仪的偏振响应取决于 p_a 、 δ (m_1 和 m_2), 测出该组数值便可了解仪器的偏振响应特性。

2.3 偏振响应校正算法

由于成像仪的偏振响应,测量值 I_{ms} 与真值 I_{ts} 之间存在误差。消除该误差的关键是获取仪器偏振响应系数 R_p , 然后利用(12)式将偏振引入的误差降低,实现辐射响应的偏振校正:

$$I_t = I_m / R_p. \quad (12)$$

由(7)式可知, R_p 随目标场景 Stokes 矢量发生变化,后者由矢量传输模式如 6SV、SCIATRAN 等模拟计算或者基于在轨多角度仪器测量。 $p_a, \delta(m_1$ 和 $m_2)$ 为成像仪固有参数,发射前在实验室中通过偏振响应测试获取。偏振响应校正的流程有三项:1)地面常规辐射定标给出定标方程,偏振响应测试实验确定参数 p_a, δ ; 2)在轨工作时,实时测量或模拟仪器接收辐射的归一化 Stokes 矢量分量 $Q_t/I_t, U_t/I_t$; 3)将其代入(9)、(12)式修正 I_m 得到 I_t 。

3 实验与讨论

3.1 测量方法

实验室使用积分球发出模拟自然光,穿过偏振片产生线偏光作为测试光源,偏振片安装在旋转支架上,起偏角度 β 由支架旋转调节。积分球出光口直径为 400 mm,起偏器旋转支架通过机械装置固定在积分球出光口中心。采用 Thorlabs 货架产品 WP50L-UB 金属线栅偏振片,直径为 50 mm,该起偏器性能良好,在 400~1000 nm 波段消光比优于 5000:1。使用右手坐标系,光线沿 z 轴传播, β 为光束电场矢量振动方向与 x 轴夹角。

成像仪工作波段涵盖 0.4~1.04 μm , 共有 15 个光谱通道,其中心波长和带宽如表 1 所示。其中 CH01 为 Smear 通道,用于扣除 CCD 拖尾^[13]。采用推扫式成像,穿轨方向由 1024 个像元组成,总视场(FOV)宽度为 14.2°。被测成像仪放置在电动转台上,转动转台实现视场切换。测量系统如图 2 所示。

表 1 成像仪的光谱通道中心波长和带宽

Table 1 Central wavelength and bandwidth of each channel in imaging spectrometer

Channel No.	Central wavelength /nm	Band width /nm	Channel No.	Central wavelength /nm	Band width /nm
CH02	980	20	CH09	665	20
CH03	940	20	CH10	620	20
CH04	905	20	CH11	565	20
CH05	865	40	CH12	520	20
CH06	820	20	CH13	490	20
CH07	750	20	CH14	443	20
CH08	682.5	10	CH15	413	20

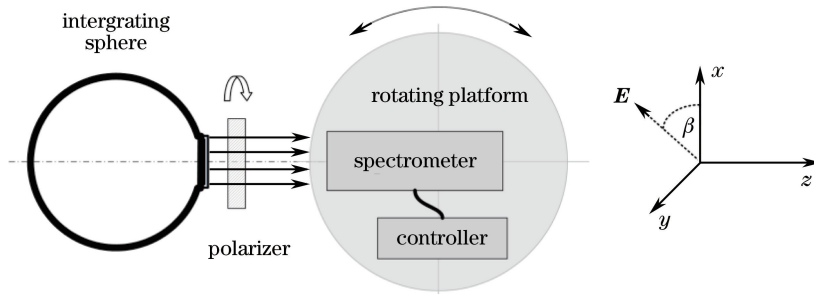


图 2 偏振灵敏度测试系统

Fig. 2 Polarization sensitivity measurement system

线偏振光 I_t 与 $I_m(\beta)$ 之间的关系可由(11)式表示,等式两端同时对 β 积分可得

$$\int_0^{360^\circ} I_m(\beta) d\beta = \int_0^{360^\circ} I_t [1 + p_a \cos(2\beta - 2\delta)] d\beta = I_t \int_0^{360^\circ} d\beta + 0. \quad (13)$$

因此,改变 β (角度步长 $\Delta\beta=10^\circ$)取 $I_m(\beta)$ 均值近似求得

$$I_t \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_m(\beta_i) \quad (14)$$

将(11)式作归一化处理,则归一化偏振响应为

$$I_n(\beta) = \frac{I_m(\beta)}{I_t} - 1 = p_a \cos(2\beta - 2\delta) \quad (15)$$

利用最小二乘法拟合余弦函数,可以求出仪器偏振响应参数 p_a 、 δ 。图 3 为成像仪 CH10 穿轨视场第 797 像元的测量结果。

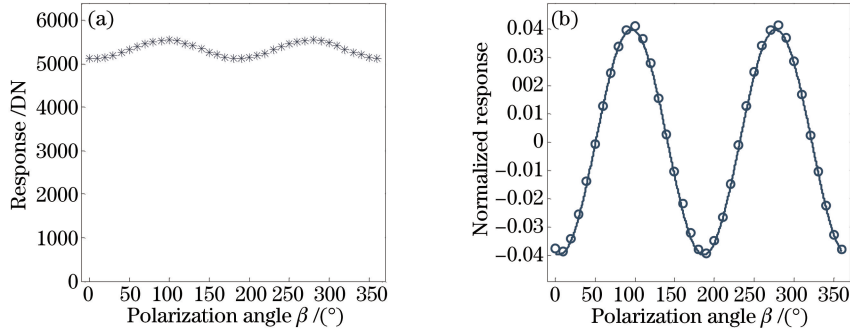


图 3 CH10-Pixel797 偏振响应余弦拟合

Fig. 3 Cosine fitting of CH10-Pixel797 polarization response

图 3(a)为仪器响应码值随起偏器角度 β 的变化规律,图 3(b)对归一化响应 $I_n(\beta)$ 进行了余弦曲线拟合。求得 $p_a = 3.97\%$ 、 $\delta = 95.692^\circ$ 。根据偏振灵敏度的定义

$$P_{LPS} = \frac{I_m^{\max} - I_m^{\min}}{I_m^{\max} + I_m^{\min}}, \quad (16)$$

将(11)式代入(16)式可以求得 $P_{LPS} = p_a = 3.97\%$,可知(11)式中偏振响应幅度 p_a 的物理意义对应于偏振灵敏度,曲线拟合的均方根误差 $Q_{RMSE} = 0.04\%$ 。以上测量过程基于两点假设,即积分球的出射光均匀各向同性,且起偏器产生线偏光具有理想消光比。

3.2 测试结果

依照上述方法,利用已搭建偏振测试系统测量了成像仪 14 个光谱通道、1024 个视场像元(不包括 Smear 通道)的偏振响应特性,生成偏振响应参数查找表($p_{a,channel,pixel}$ 和 $\delta_{channel,pixel}$),为在轨偏振响应校正奠定基础。

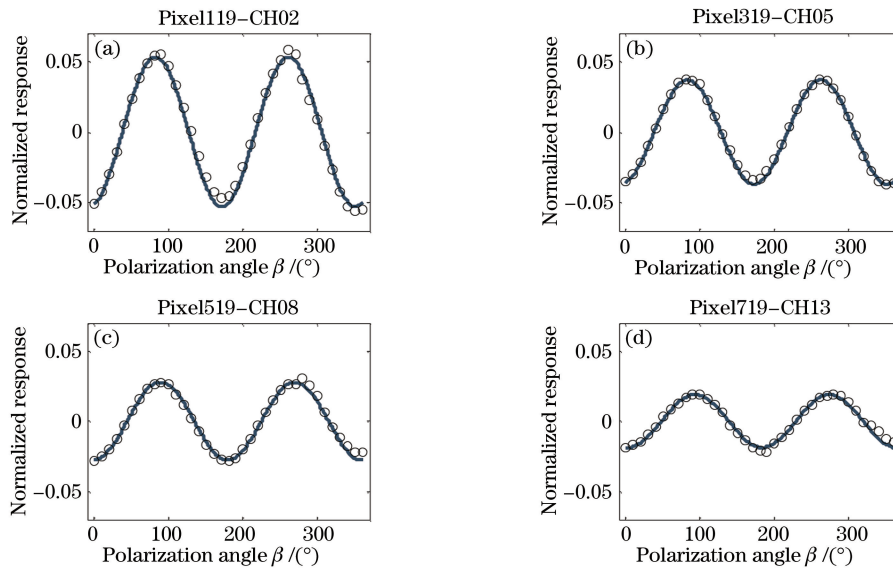


图 4 归一化偏振响应余弦拟合

Fig. 4 Cosine fitting of normalized polarization response

图 4 所示为 4 个不同通道视场像元的归一化偏振响应余弦拟合曲线,其中 CH02 左侧视场 119 像元偏振灵敏度约为 5.31%,CH13 右侧视场 719 像元偏振灵敏度偏小,约为 1.92%。它们的偏振相位角度 δ 不同,从图中可以看出,图 4(c)、(d)中的曲线相对图 4(a)、(b)中的曲线沿 x 轴向右平移,计算可知 4 条曲线中,图 4(a)和图 4(d)的曲线相位差最大,约为 10.7° ,余弦拟合 $Q_{\text{RMSE}} < 0.39\%$,具体结果如表 2 所示。

表 2 偏振灵敏度和相位角

Table 2 Polarization sensitivity and phase angle

	P_{LPS}	$\delta / (^\circ)$	Q_{RMSE}
CH02	0.0529	84.606	0.0039
CH05	0.0368	85.412	0.0016
CH08	0.0278	90.601	0.0021
CH13	0.0188	95.334	0.0018

偏振灵敏度随视场像元的变化规律如图 5 所示,三个通道的偏振灵敏度随视场均呈抛物线变化,中间低两边高,最右侧视场相对最左侧偏大。940 nm 波段(CH03)中心视场偏振响应最小值为 3.73%,左侧视场的最大值为 6.01%,右侧视场最大值为 6.38%,峰峰值跨度为 2.65%,平均值为 4.58%。

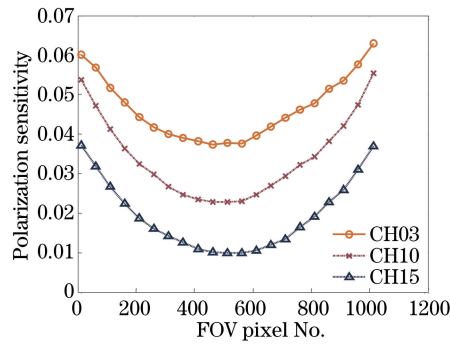


图 5 偏振灵敏度随穿轨视场像元的变化

Fig. 5 Polarization sensitivity varying with cross-track pixels

图 5 所示通道以外的其余通道,偏振灵敏度随视场的变化规律与图 5 中三个通道相似。考虑全部通道,980 nm 波段(CH02)的偏振灵敏度平均值最大为 4.69%,443 nm 波段(CH14)的平均值最小为 1.81%,跨度最大和最小的分别是 682.5 nm 波段(CH08,3.50%)、905 nm 波段(CH04,2.40%),仪器各通道偏振灵敏度如表 3 所示。

表 3 成像仪通道偏振灵敏度

Table 3 Polarization sensitivity of channels in the imaging spectrometer

	P_{max}	P_{min}	P_{mean}
CH01	—	—	—
CH02	0.0657	0.0376	0.0469
CH03	0.0638	0.0373	0.0458
CH04	0.0619	0.0379	0.0457
CH05	0.0651	0.0334	0.0436
CH06	0.0621	0.0315	0.0413
CH07	0.0660	0.0312	0.0425
CH08	0.0624	0.0274	0.0386
CH09	0.0613	0.0266	0.0376
CH10	0.0563	0.0225	0.0331
CH11	0.0500	0.0175	0.0277
CH12	0.0441	0.0145	0.0240
CH13	0.0394	0.0124	0.0212
CH14	0.0348	0.0091	0.0181
CH15	0.0379	0.0094	0.0188

图 6 所示为三个通道偏振相位角 δ 随视场像元的变化规律,总体上三个通道的相位角随视场像元编号的增大逐渐增大。940 nm 波段(CH03)左侧有最小相位角 83.5° ,随视场近似线性增大到最大相位角 97.7° ,偏振相位角跨度为 14.2° ,平均值为 90.3° 。

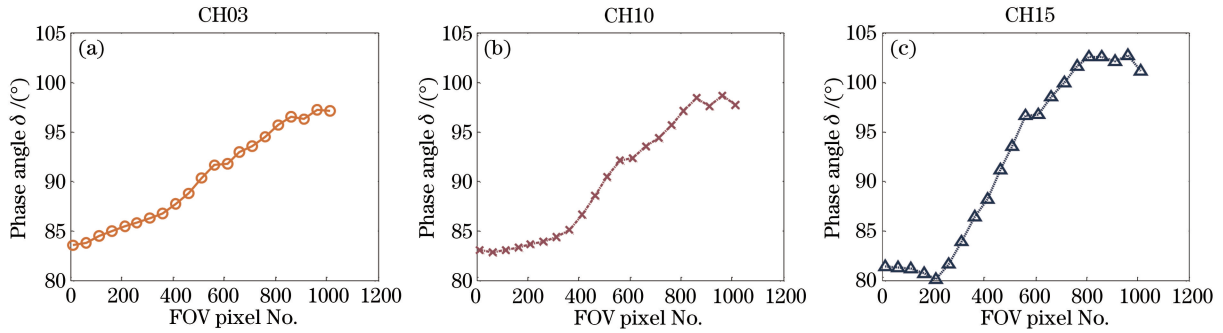


图 6 偏振相位角随穿轨视场像元变化

Fig. 6 Phase angle varying with cross-track pixels

665 nm 波段(CH10)相位角随视场的变化规律可分为三段:第一段缓慢增加,中间段快速增加,第三段稍微回落。413 nm 波段(CH15)与 665 nm 波段(CH10)随视场的变化相似,但前者的第一段表现为下降。CH03、CH10、CH15 以外其余通道的偏振相位角随视场的变化规律介于这三个通道之间,通道编号越接近变化规律越相似。单一通道内相位角跨度最小的是 980 nm 波段(CH02),约为 12.9° ,跨度最大的是 413 nm 波段(CH15),约为 23.8° ,相位角跨度随着通道中心波长的减小而增加。

相同视场像元下,偏振灵敏度随通道的变化规律如图 7(a)所示。总体而言,偏振灵敏度随通道中心波长的增加而变大,个别通道在局部范围有微小波动如 CH04、CH07、CH15。蓝光波段偏振灵敏度较小,因为仪器设计中强调了该波段的偏振灵敏度要求,制造过程中光学镜片通过镀膜等手段将该值降低。边缘视场 Pixel119、Pixel919 的偏振灵敏度高于中间视场 Pixel519。对比 Pixel319、Pixel719 以及 Pixel119、Pixel919 两对曲线发现,右侧视场偏振灵敏度大于左侧视场,从图 5 也可明显观察到这一规律。中间视场(Pixel519)偏振灵敏度最大值 3.95%和最小值 0.96%对应的通道分别为 CH02 和 CH14,该视场通道之间的灵敏度跨度为 2.99%。边缘视场 Pixel119、Pixel919 通道之间的灵敏度跨度分别为 2.81%和 3.01%。图 7(b)所示为偏振相位角随通道的变化规律,除 CH14、CH15 之外,中心视场 Pixel519 不同光谱通道之间,偏振相位角相差很小,几乎相等。左侧视场 Pixel119、Pixel319 偏振相位角随通道中心波长的减小呈递减趋势,右侧视场与左侧相反,呈递增趋势,在图 6 中也可观察到这一现象。

3.3 算法验证

为了证明模型和算法的正确性与实用性,选用一束 Stokes 矢量已知的光作为成像仪的输入,其分量分别表示为 I_t^e, Q_t^e, U_t^e ,根据定义其线偏振度 P_{DoLP} 和偏振方位角 β^e 为

$$P_{DoLP} = \frac{\sqrt{Q_t^e{}^2 + U_t^e{}^2}}{I_t^e}, \quad (17)$$

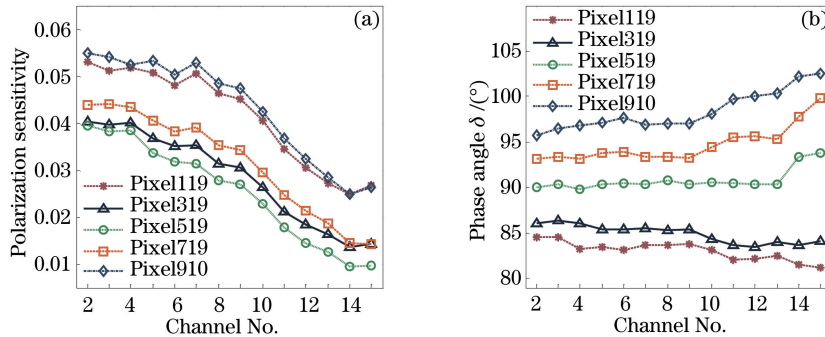


图 7 (a)偏振灵敏度随光谱通道的变化;(b)偏振相位角随光谱通道的变化

Fig. 7 (a) Polarization sensitivity varying with channel No. ; (b) phase angle varying with channel No.

$$\beta' = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U_t'}{Q_t'}\right) \quad (18)$$

参考(9)、(11)式,仪器的测量值可写为

$$I_m(\beta') = I_t' [1 + p_a P_{\text{DoLP}'} \cos(2\beta' - 2\delta)] \quad (19)$$

$$p_a' = p_a P_{\text{DoLP}'} \quad (20)$$

实验室采用苏州大学现代光学技术研究所提供的部分起偏器,根据供方数据该起偏器在 620 nm 波段(CH10)的线偏振度 $P_{\text{DoLP}} = 0.810$,将其安装在图 2 所示旋转支架上替换线偏振片,其他设备状态不变,利用已搭建的系统进行测试。

方位角 β' 通过旋转支架变化,转动区间 $\beta' \in [0^\circ, 360^\circ)$,步长 $\Delta\beta' = 10^\circ$,共 36 个不同的方位角状态。仿照(15)式对(19)式作归一化处理,结果如图 8 所示,余弦拟合得到 CH10 穿轨视场第 797 像元的等效偏振响应幅度 $p_a' = 3.18\%$,将 CH10 第 797 像元的偏振灵敏度 3.97% 代入(20)式求得偏振度为 0.802,对比部分起偏器的标称线偏振度 0.81,相对误差小于 1%。拟合相位角为 95.696° ,与 CH10 第 797 像元的相位角 95.692° 相比,二者偏差约为 0.004° 。

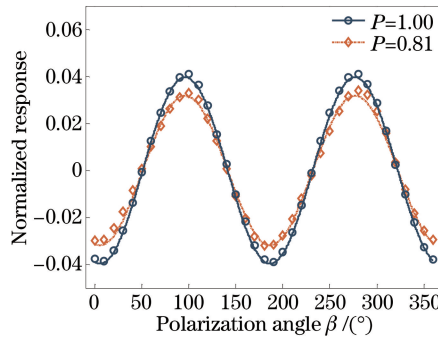


图 8 部分偏振光的归一化余弦拟合

Fig. 8 Cosine fitting of normalized polarization response of partially polarized light

利用该起偏器对其他通道进行相同的测试,各个通道的等效偏振响应幅度与实际偏振灵敏度之比约为 0.8,因苏州大学未提供其余波段的线偏振度具体值,此处不作定量分析。事实上,测试用偏振片无法产生绝对线偏振光,由(19)式可知偏振响应测试系统通过余弦拟合求得的偏振灵敏度严格意义上属于等效偏振灵敏度,是灵敏度与线偏振度的乘积,但是成像仪偏振性能测试所用偏振片在可见近红外波段的消光比优于 5000:1,误差可以忽略。

偏振校正主要关心响应系数 R_p 的大小,由(7)、(19)式可知 R_p 只与入瞳辐射的线偏振度 $P_{\text{DoLP}'}$ 和方位角 β' 有关,与绝对光强 I_t' 无关。因此,在仪器偏振响应特性测试过程中并不关心光强绝对值,只需在特定光强下仪器满足一定信噪比即可。为了降低噪声对测试结果的影响,每一个角度成像仪连续 100 次采样取平均作为该点测量值。理论上,部分偏振光可用于测量成像仪的偏振灵敏度,但起偏器产生的部分偏振光在较宽波段内的线偏振度不是恒定值,使用时需要增加额外测试而且精度不高。但是,利用部分偏振光测量相位角是可行的,验证实验的结果已经证明。

4 结 论

成像光谱仪对入瞳辐射的偏振状态敏感,使海洋遥感离水辐射反演引入较大误差。针对这一问题,通过理论模型分析了偏振影响仪器辐射定标的原理,偏振引入的误差不属于系统误差,而是可变误差,与仪器偏振响应系数 R_p 有关,影响 R_p 大小的因素包括偏振响应幅度 p_a 和相位角 δ ,以及接收辐射的偏振状态即线偏振度 $P_{\text{DoLP}'}$ 和方位角 β' 。提出了成像仪偏振校正算法,通过求取偏振响应系数 R_p 对测量值进行校正。发射前搭建了仪器偏振响应特性测试系统,测量了成像光谱仪工程样机的偏振响应关键参数 p_a 和 δ ,它们是光谱通道和视场像元的函数,偏振灵敏度随中心波长的增加而变大,随视场呈抛物线形状变化,中间视场的偏振灵敏度低,两边视场的偏振灵敏度高,980 nm 波段(CH02)的偏振灵敏度平均值为 4.69%,413 nm 波段

(CH15)平均值为 1.88%, 偏振响应相位角 δ 随视场变化规律为左侧低右侧高, 峰峰值跨度约为 16° , 生成了 14 个光谱通道、1024 个视场像元偏振响应参数查找表, 为仪器在轨偏振校正提供了参考。以 CH10 穿轨视场第 797 像元为例, 利用 Stokes 矢量已知的部分偏振光对算法进行了验证, 结果表明, 该算法适用于成像光谱仪偏振响应校正。在入射光束为完全线偏振光且偏振状态已知的情况下, 根据不同通道视场像元的偏振响应幅度, 该算法可将偏振引入的大气顶入瞳辐射测量不确定度降低 1%~6%, 能够提高海洋遥感离水辐射的测量精度。

参 考 文 献

- 1 Wang M, Gordon H R. Calibration of ocean color scanners: How much error is acceptable in the near infrared[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(2-3): 497-504.
- 2 Meister G, Kwiatkowska E J, Franz B A, *et al.* Moderate-resolution imaging spectroradiometer ocean color polarization correction[J]. Applied Optics, 2005, 44(26): 5524-5535.
- 3 Gordon H R. Ocean color remote sensing systems: Radiometric requirements[C]. SPIE, 1988, 924: 151-167.
- 4 Bezy J L, Delwart S, Gourmelon G, *et al.* Medium-resolution imaging spectrometer (MERIS)[C]. SPIE, 1997, 2957: 31-41.
- 5 Barnes R A, Barnes W L, Esaias W E, *et al.* Prelaunch acceptance for the sea WiFS radiometer[R/OL]. [2016-03-15] http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/TECH_REPORTS/PreLPDF/PreLVol22.pdf.
- 6 Kulkarny V, Hauss B, Jackson J, *et al.* The impact of VIIRS polarization sensitivity on ocean color[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010: 220-223.
- 7 Wang Shurong, Li Futian, Song Kefei, *et al.* Ultraviolet ozone vertical profile probe for FY-3A meteorological satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2590-2593.
王淑荣, 李福田, 宋克非, 等. FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2590-2593.
- 8 Li Zhanfeng, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.* Research on high-accuracy in-flight spectral calibration of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228002.
李占峰, 王淑荣, 黄煜, 等. 紫外臭氧垂直探测仪高精度在轨光谱定标方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228002.
- 9 Lin Guanyu, Wang Shurong, Cao Diansheng. Study for method polarization correction on ultraviolet atmospheric spectral radiation based on Stokes vector[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0813001.
林冠宇, 王淑荣, 曹佃生. 基于 Stokes 向量大气紫外光谱辐射的偏振修正研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0813001.
- 10 He X Q, Pan D, Bai Y, *et al.* A practical method for on-orbit estimation of polarization response of satellite ocean color sensor[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(4): 1967-1976.
- 11 何贤强, 潘德炉. 海洋-大气耦合矢量辐射传输模型及其遥感应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 161-169.
- 12 Knight E J. Effect of polarization on the application of radiometric calibration coefficients to infrared earth scenes[C]. SPIE, 1996, 2815: 84-95.
- 13 Cui Yi, Wei Jun, Tang Yuyu, *et al.* A method for smear removal of push-broom imaging spectrometers[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1990-1994.
崔毅, 危峻, 汤瑜瑜, 等. 适用于推扫式成像光谱仪的 CCD 拖尾扣除方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1990-1994.