

超连续谱激光-单色仪在偏振遥感器定标中的影响因素分析

谢臣瑜¹, 翟文超², 郝小鹏¹, 谢琳琳¹, 刘 延¹, 李健军², 郑小兵^{2*}

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100029;

2. 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重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 偏振遥感器的相对光谱响应度和带内光谱响应非一致性是遥感器实验室定标的基本参数。文中利用新型的超连续谱激光作为单色仪的前置照明光源, 搭建了一套基于超连续谱激光-单色仪的细分光谱扫描定标装置, 可用于偏振遥感器的相对光谱响应度定标。实验中以 490、670、910 nm 三个偏振通道作为例, 分别在单色仪直接输出光和单色光导入积分球两种状态下, 得到通道式偏振遥感器的相对光谱响应度结果, 并对两种状态下定标光源的偏振特性进行了测量。实验结果表明, 单色仪直接输出光模式下, 光源存在明显的偏振度和偏振方位角变化, 三个偏振通道的带内光谱响应非一致性分别为 0.91%、4.25% 和 1.06%; 而在单色光导入积分球后, 光源的偏振度明显降低, 此时带内光谱响应非一致性结果分别为 0.15%、0.47% 和 0.57%, 说明消偏后的光源能有效适用偏振遥感器的光谱响应度定标, 基于超连续谱激光-单色仪的系统级定标装置在偏振遥感器的定标中具有广泛应用前景。

关键词: 偏振遥感器; 辐射定标; 光谱响应度; 超连续谱激光; 单色仪

中图分类号: O432.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200313

Influencing factors analysis of supercontinuum laser monochromator in calibration of polarization remote sensors

Xie Chenyu¹, Zhai Wenchao², Hao Xiaopeng¹, Xie Linlin¹, Liu Yan¹, Li Jianjun², Zheng Xiaobing^{2*}

(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

2. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Relative spectral responsivity and the in-band spectral response non-consistency of polarization remote sensors are the basic parameters for laboratory calibration. In this paper, a spectrally-resolved calibration facility was assembled for the calibration of relative spectral responsivity by using novel supercontinuum laser and monochromator. Taking three polarization channels of 490 nm, 670 nm and 910 nm as examples, the relative spectral responsivity of the channel polarization remote sensors was obtained under the two states of the monochromator output light directly and the monochromatic light steered into an integrating sphere respectively, and the polarization state of the calibrated light source was measured under the two states. The experimental results show that there are obvious changes in degree of linear polarization (DOLP) and polarization orientation angle in the mode of direct output light of monochromator, and the non-consistency of in-band spectral response of the three polarization channels were 0.91%, 4.25% and 1.06%, respectively. When the monochromatic light steered into the integrating sphere, the DOLP of the light source decreases significantly, and the non-consistency

收稿日期:2020-12-05; 修订日期:2021-01-18

基金项目:国家重点研发计划重点专项 (2018YFB0504602)

作者简介:谢臣瑜,男,博士,主要从事光学辐射定标方面的研究。

通讯作者:郑小兵,男,博士生导师,博士,主要从事光辐射精确测量和光学遥感定标技术等方面的研究

of in-band spectral response were 0.15%, 0.47% and 0.57%, respectively, which indicates that depolarized light source can be effectively applied to the spectral responsivity calibration of polarization remote sensors. And the system-level calibration facility based on supercontinuum laser and monochromator has wide application prospects in the calibration of polarization remote sensors.

Key words: polarization remote sensor; radiometric calibration; spectral responsivity; supercontinuum laser; monochromator

0 引言

近年来, 偏振遥感器在环境监测、大气气溶胶及云的微物理特性参数反演等科学应用方面发挥着越来越重要的作用, 如基于地基遥感平台的太阳辐射计 CE318 和基于天基遥感平台的大气校正仪等^[1-4]。对于偏振遥感器而言, 高精度的实验室定标是其获取目标光谱辐亮度、偏振度以及偏振方位角等多维度信息的基本前提, 而偏振遥感器的相对光谱响应度和带内光谱响应非一致性是实验室定标中的关键参数。针对偏振遥感器的相对光谱响应度定标, 目前最常用的方法仍是采用卤钨灯+单色仪的光谱比较装置^[5-6], 利用光栅单色仪进行分光, 连续输出的单色光以一定波长间隔进行全谱段扫描, 通过参考探测器与待定标遥感器之间的交替测量实现。但基于卤钨灯+单色仪的定标装置其输出单色光功率普遍较低 (nW~ μ W 级), 限制了偏振仪器的信噪比, 并且此类定标装置对于光路的对准要求较高, 尤其是针对光阑筒状结构的窄视场偏振仪器而言, 需要不断对光路进行微调直至达到最佳状态, 并且也容易受到光斑均匀性的影响。理想状态下, 将单色光导入合适尺寸的积分球得到均匀的单色面光源, 直接充满仪器的视场进行系统级的整机定标能够有效避免上述问题, 但卤钨灯+单色仪定标装置的光通量较弱, 无法满足这种系统级定标的需求。

随着激光技术的发展, 以超连续谱激光器作为单色仪的照明光源成为一种新选择, 该激光器是一种基于光子晶体光纤的新型宽波段激光器 (又称白光激光器), 采用 1 064 nm 激光泵浦光子晶体光纤, 种子激光在光子晶体光纤中产生非线性展宽, 最终实现宽波段输出。该激光器具有宽谱段输出 (410~2 500 nm)、高功率密度 (mW/nm) 等特点, 经过光栅分光后的单色光功率在几十~几百 μ W 之间, 能够有效提升系统信噪比, 且将单色光导入到积分球中, 也具有实现系统级定标的潜力, 可以满足遥感器高精度光谱响应度定标的需求。类似的装置在国内外许多计量机构得以

建立, 如德国联邦物理技术研究院 (PTB) 的 L. Bünger 等人基于超连续谱激光单色仪对近红外通道辐射测温仪进行了绝对光谱响应度定标; 韩国计量院 (KRISS) 的 Yong Shim Yoo 等人基于超连续谱激光单色仪对可见通道的辐射测温仪进行光谱响应度定标; 日本国家计量院 (NIMJ) 的 Yu Yamaguchi 等人使用基于超连续谱激光单色仪系统照明积分球的方式, 对超光谱/多光谱地球观测成像仪的相对光谱响应和光谱特性进行了评估; 中国国家计量院 (NIM) 的徐楠等人基于超连续谱激光单色仪系统对硅陷阱探测器进行绝对光谱响应度定标^[7-11]。此类研究表明, 基于超连续谱激光-单色仪的定标装置在光学遥感器的光谱辐射定标领域具有较广泛的应用前景, 能适用于遥感器的系统级光谱定标需求。但国内外相关的研究多为辐射测温仪、光谱辐射计以及陷阱探测器的定标, 对于偏振遥感器的定标尚未有类似报道。

文中以实验室建立的超连续谱激光-单色仪定标装置为基础, 利用偏振片、滤光片和陷阱探测器组合模拟了典型通道式结构的偏振遥感器, 开展了基于超连续谱激光-单色仪装置的偏振遥感器相对光谱响应度定标, 实验中采用了传统的单色光直接输出定标和单色光导入积分球的系统级定标两种方式进行, 同时也利用光谱偏振分析仪对两种模式下定标光源的偏振特性进行测量, 并分析了偏振遥感器在光谱辐射定标中的影响因素。

1 偏振遥感器相对光谱定标

1.1 偏振遥感器系统组成

偏振遥感器的光谱辐射定标主要通过通过对 Stokes 参量的测量来确定偏振遥感器对不同偏振态入射光的响应。Stokes 矢量包括四个参量 (I 、 Q 、 U 、 V), I 代表辐射强度, Q 代表水平/垂直方向偏振、 U 代表 +45°/-45° 方向偏振, 以及 V 代表圆偏振度。由于地物反射的太阳光中的圆偏振分量很小, 绝大多数地物偏振遥感器在检测范围内很难测量, 故大多数偏振遥感

器认为 $V=0$, 使用 I 、 Q 、 U 三个参量表示即可, 偏振遥感器通常利用三个偏振通道实现波段的选择和遥感目标偏振态 Stokes 矢量 $S_i=[I_{\lambda,i}, Q_{\lambda,i}, U_{\lambda,i}]^T$ 的测量^[12], 基本原理如图 1 所示。每个偏振通道通常由滤光片和不同透过轴方向 (通常取 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$) 的检偏器组成。

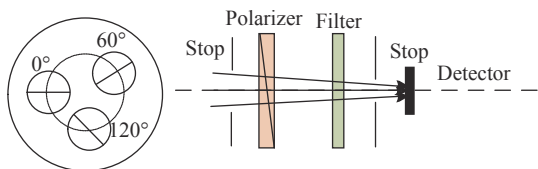


图 1 偏振遥感器系统组成

Fig.1 Composition of polarization remote sensors

对于通道式偏振遥感器来说, 其带内光谱响应的非一致性是影响偏振遥感器反演精度的关键参数之一。理想状态下, 同一波段的三个偏振通道其相对光谱响应度应是一致的, 带内光谱响应的非一致性是指偏振遥感器不同偏振通道对应的相同光谱通道有效中心波长差值与带宽均值的比值。

1.2 相对光谱定标装置

实验中建立的基于超连续谱激光-单色仪的相对光谱响应定标装置如图 2 所示, 以超连续谱激光 (型号: SC-450, 8 W) 作为单色仪的前置照明光源, 三片离轴抛物面镜将激光会聚至 Czerny-Turner 型结构单色仪的入口狭缝处, 其内部三块光栅的刻线密度分别为 1 200 lp/mm、600 lp/mm 和 300 lp/mm, 可满足 200~2 500 nm 范围内的单色光输出。单色仪的输出光经准直后在透镜 Lens1 的作用下会聚到滤光片转轮上用以消除高级次光谱。图中 Splitter1 和 Splitter2 为石英平板, 其中 Splitter1 反射的部分光束进入监视探测

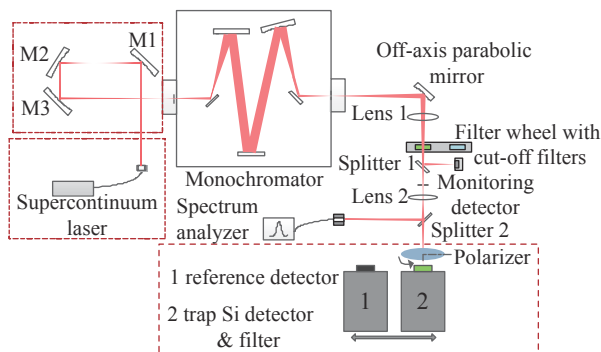


图 2 基于超连续谱激光单色仪的定标装置

Fig.2 Calibration facility based on supercontinuum laser monochromator

器, 用于监视光源的稳定性。Splitter2 反射的部分光束进入光谱分析仪, 用于测量单色仪的输出波长和带宽。其余部分光束进入仪器的光学入瞳处, 利用步进电机控制二维平移台实现参考探测器和待测偏振遥感器之间的交替测量。

1.3 相对光谱响应度

前文论述了偏振遥感器的每个偏振通道由滤光片和不同透过轴方向 (通常为 $0^\circ, 60^\circ$ 和 120°) 的检偏器组成。因此文中利用旋转偏振片、带通滤光片和硅陷阱探测器组合模拟了常见的通道式偏振遥感器。在通道的选择上, 参考大气校正仪的偏振通道波段^[13], 选择了中心波长为 490 nm、670 nm 和 910 nm, 带宽为 20 nm 的带通滤光片, 滤光片安装在硅陷阱探测器入瞳处, 旋转偏振片放置在探测器前端。搭建如图 2 所示的定标装置, 实验中分别在偏振片为 $0^\circ, 60^\circ$ 和 120° 三种状态下测量了每个通道探测器的输出电流值, 模拟偏振遥感器与参考探测器进行交替定标, 代入仪器的输出信号值计算得到三个偏振通道的相对光谱响应度, 计算公式如下:

$$R(\lambda)_{\text{Dut}} = \frac{I_{\text{Dut}}(\lambda)}{I_{\text{Std}}(\lambda)} R(\lambda)_{\text{Std}} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{Std}}(\lambda)$ 和 $I_{\text{Dut}}(\lambda)$ 分别为参考探测器和待定标偏振遥感器在波长为 λ 处的输出电流值; $R(\lambda)_{\text{Std}}$ 为参考探测器的相对光谱响应度; $R(\lambda)_{\text{L-Dut}}$ 为待定标仪器的相对光谱响应度, 其中参考探测器的相对光谱响应度溯源至国家计量院。

实验中每个待测通道的测量波长范围设为各通道理论带宽范围的 2 倍, 扫描间隔为 1 nm, 交替定标后计算得到三个通道的相对光谱响应度定标结果如图 3 所示。

图 3 中, A-1 (图 3(a))、A-2 (图 3(b))、A-3 (图 3(c)) 分别为偏振遥感器三个通道不同偏振态下的光谱响应度曲线, 归一化后的相对光谱响应度结果如 B-1 (图 3(d))、B-2 (图 3(e))、B-3 (图 3(f)) 所示。从三个通道的定标结果看出, $0^\circ, 60^\circ$ 和 120° 三种状态下相对光谱响应度曲线一致性较差, 490 nm、670 nm 和 910 nm 通道在三种偏振态的相对光谱响应度的最大偏差分别为 16.4%、38.5% 和 5.6%。理论上而言, 模拟三种偏振态时所使用的滤光片、陷阱探测器和偏振片都是相同的, 仅存在偏振片方位角的区别, 因此造成同一波段三种偏振状态相对光谱一致性较差的主要原因

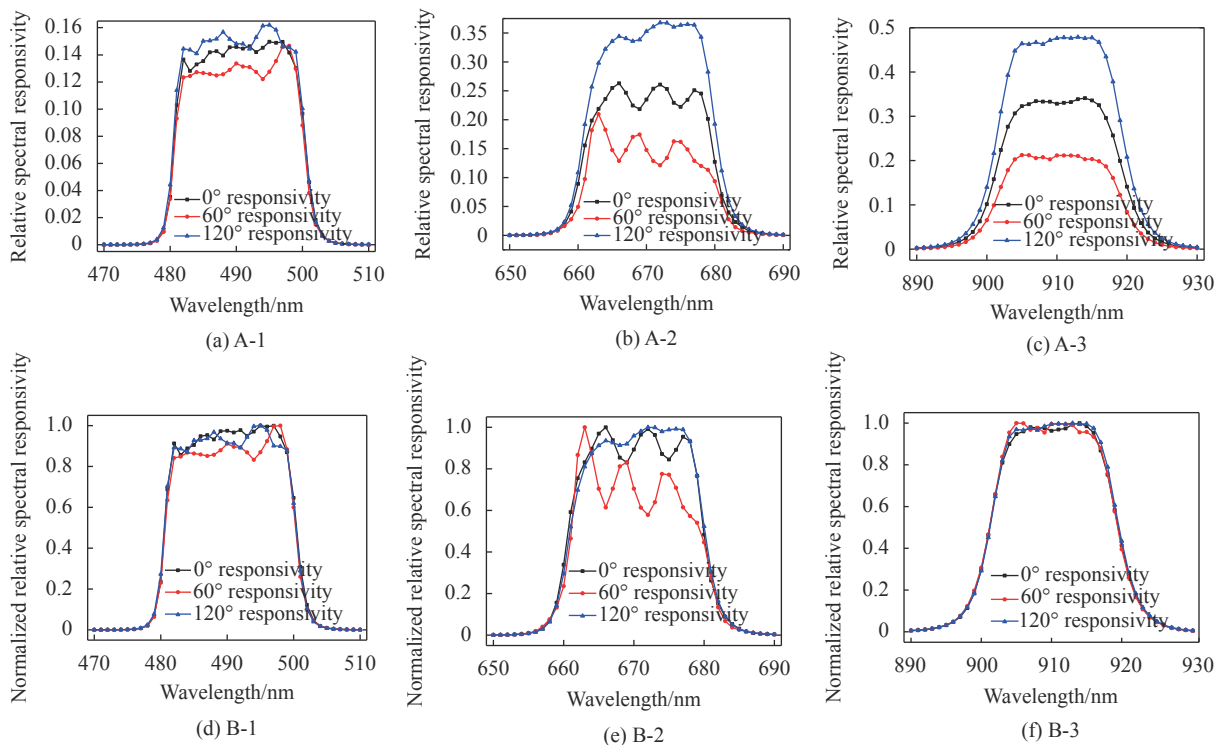


图 3 490 nm, 670 nm 和 910 nm 偏振通道相对光谱响应度

Fig.3 Relative spectral responsivity of 490 nm, 670 nm and 910 nm polarization channel

很可能是由于入射光为偏振光导致,且不同通道之间的偏差明显,如 670 nm 通道三种偏振状态的光谱响应度曲线偏差较大,而 910 nm 通道的三条光谱响应度曲线归一化后的结果较为一致,也说明光源的偏振态变化较大。

为进一步研究不同波长的单色光偏振度与偏振遥感器相对光谱定标之间的关系,实验中将带通滤光片去除,在 410~1100 nm 波段范围内以 5 nm 的间隔扫描,分别在 0°、60°和 120°三种状态下获取硅波段完整的相对光谱响应度曲线,其结果如图 4 所示。

从图 4 中的相对光谱响应度曲线可以看出在 410~

1100 nm 波段范围内,三个偏振方向上的相对光谱响应度各不一致,410~600 nm 波段范围内振幅较小,600~800 nm 波段范围内振幅较大,而 800~1100 nm 之间光谱响应度曲线却相对平滑,这与之前给出的三个通道式相对光谱响应度定标结果相吻合。因此可以推断,基于超连续谱激光-单色仪的输出光存在典型的偏振度,且偏振度随波长变化,导致偏振遥感器同一波段三种偏振状态下的相对光谱曲线不一致。为了进一步分析定标光源的偏振态对偏振遥感器光谱定标的影响,需要对超连续谱激光单色仪装置输出光的偏振度进行测量。

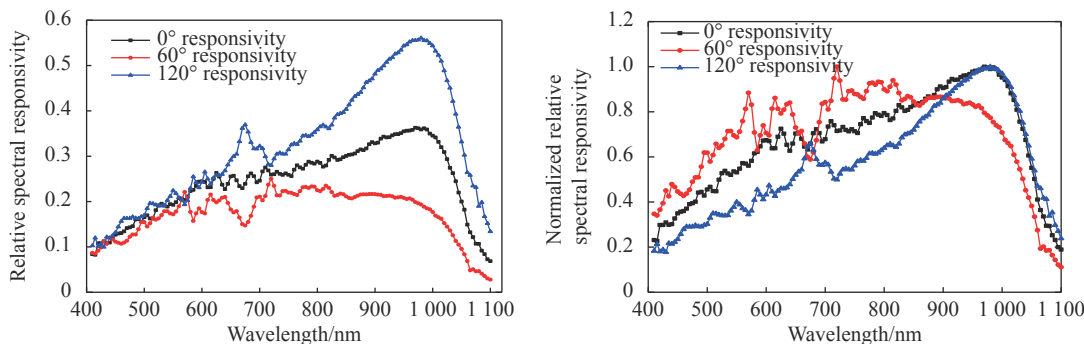


图 4 宽波段偏振遥感器相对光谱响应度

Fig.4 Relative spectral responsivity of broadband polarization remote sensor

1.4 偏振特性测试及分析

为了检测输出单色光源的偏振特性, 实验中采用基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪 (Spectro-Polarimetric Analyzer) SPOLA, 其偏振度测量的不确定度为 0.15%^[14], 通过内部的陷阱探测器和旋转偏振片测量不同角度下的光源强度变化, 进而获得斯托克斯分量中的 I 、 Q 、 U 分量 (V 分量通常忽略), 利用 I 、 Q 和 U 分量可以计算得到光源的线偏振度和偏振角, 如公式 (2)、(3) 所示:

$$P_{\lambda} = \sqrt{(Q_{\lambda}^2 + U_{\lambda}^2)} / I_{\lambda} \quad (2)$$

$$\beta_{\lambda} = \arctan(U_{\lambda} / Q_{\lambda}) / 2 \quad (3)$$

式中: P_{λ} 为目标辐射光束 λ 的线偏振度; I_{λ} 为辐射强度, Q_{λ} 为水平/垂直方向的偏振; U_{λ} 为 +45°/-45° 方向的偏振; β_{λ} 为偏振角。

实验中, 将单色仪分光后的单色光正入射至光谱偏振分析仪的入瞳处, 以 50 nm 的间隔测量了光栅 1 在 450~1 100 nm 波段范围内的光源偏振态信息, 结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 在 450~1 100 nm 波段范围内单色仪输出光的线偏振度 P_{λ} 在 0.066~0.696 区间内变化, 偏振角 β_{λ} 在 -33.82°~30.86° 区间内变化。根据 SPOLA 测量的结果绘制出单色光的偏振特性、线偏振度及偏振角随波长变化的曲线如图 5 所示。

表 1 单色仪输出光偏振特性测量结果

Tab.1 Measurement results of monochromator output polarization

Wavelength/nm	I_{λ}	Q_{λ}	U_{λ}	P_{λ}	β_{λ}
450	125.09	-6.41	15.59	0.135	-33.82
500	142.38	5.51	10.24	0.082	30.86
550	141.17	-8.01	17.63	0.137	-32.78
600	86.3	33.43	6.43	0.394	5.44
650	61.14	7.42	7.14	0.168	21.95
700	51.35	2.43	-2.33	0.066	-21.90
750	67.58	18.03	5.71	0.280	8.79
800	44.25	11.01	-3.11	0.259	-7.89
850	42.16	14.25	-0.90	0.339	-1.81
900	46.98	21.36	-2.15	0.457	-2.87
950	55.13	29.61	-2.23	0.539	-2.15
1000	45.34	27.07	-2.04	0.599	-2.15
1050	37.23	24.32	-2.09	0.656	-2.46
1100	15.08	10.5	-0.24	0.696	-0.65

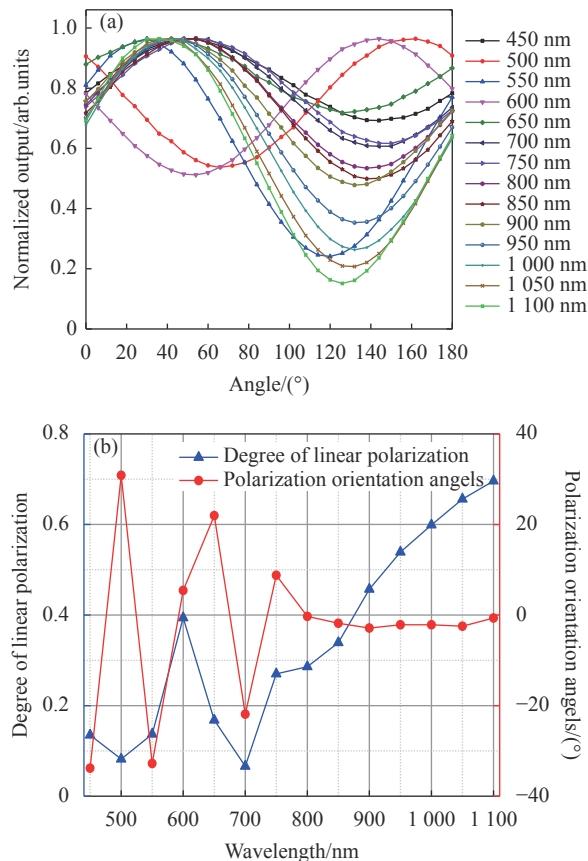


图 5 定标光源偏振态曲线

Fig.5 Polarization state curves of calibration source

图 5(a) 为利用 SPOLA 测量不同波长下的光源偏振度结果, 图 5(b) 中左侧纵坐标为线偏振度, 右侧纵坐标为偏振角, 从测量结果可以看出, 光源在 490~670 nm 波段范围内存在较大的线偏振度和偏振角的变化, 导致其光谱响应度曲线呈剧烈波动; 而从 850 nm 开始, 光源线偏振度呈近似线性变化且偏振角变化区间较小, 因此 910 nm 通道的光谱响应度曲线相对平滑。

2 系统级相对光谱响应度定标

通过前文的研究表明, 基于超连续谱激光-单色仪定标装置的直接输出光具有较明显的线偏振度和偏振角的变化, 在偏振遥感器光谱定标过程中, 传统的输出光直接测量方式不再适用。因此, 文中采用系统级的定标方案, 主要是将光栅分光后的单色光导入内径为 100 mm、开口为 35 mm 积分球内部, 得到一个空间均匀的单色面光源, 可直接覆盖待测偏振遥感器的视场实现整机定标, 实验中将待测仪器和参考探

测器放置在积分球出光口处进行交替测量,利用量值传递的方法重新获得的通道式和宽波段模拟偏振传感器的相对光谱响应度结果,定标装置如图 6 所示。

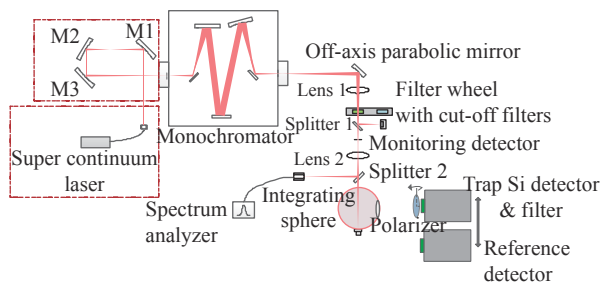


图 6 系统级相对光谱响应度定标装置

Fig.6 System-level calibration facility for relative spectral responsivity

2.1 偏振传感器相对光谱定标结果

通过系统级定标装置重新获取三个偏振通道的相对光谱响应度结果,图 7 给出了三个偏振通道归一化前后的相对光谱响应度曲线,可以看出同一通道三种偏振状态的相对光谱响应度曲线一致性较好,0°、60°和 120°三种状态下的光谱曲线仅在幅值上存在较小差异,说明导入积分球后的光源偏振度明显降低,但仍有偏振态残余,归一化后的曲线几乎一致说明导入积分球后光源残余的偏振度对偏振传感器相对光谱响应度定标的结果影响较小。同时也对取出滤光片后的陷阱探测器在三种偏振状态下进行了相对光谱响应度测量,测量结果如图 8 所示。

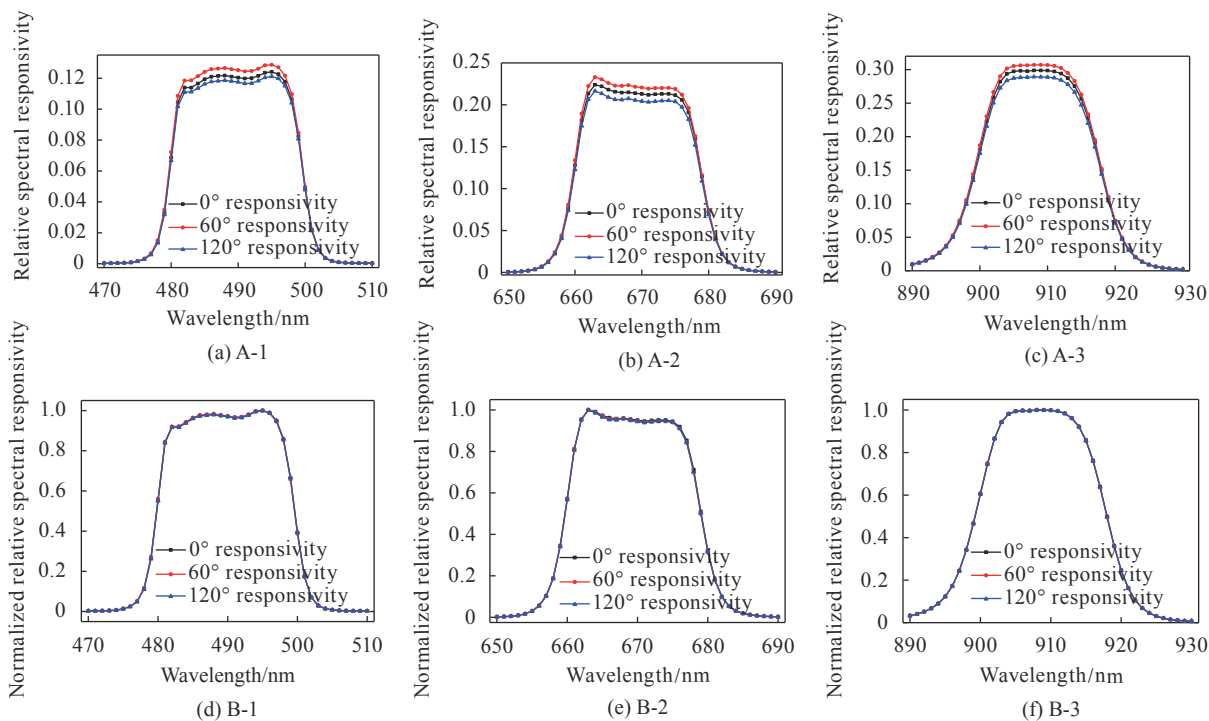


图 7 490 nm, 670 nm 和 910 nm 偏振通道相对光谱响应度

Fig.7 Relative spectral responsivity of 490 nm, 670 nm and 910 nm polarization channel

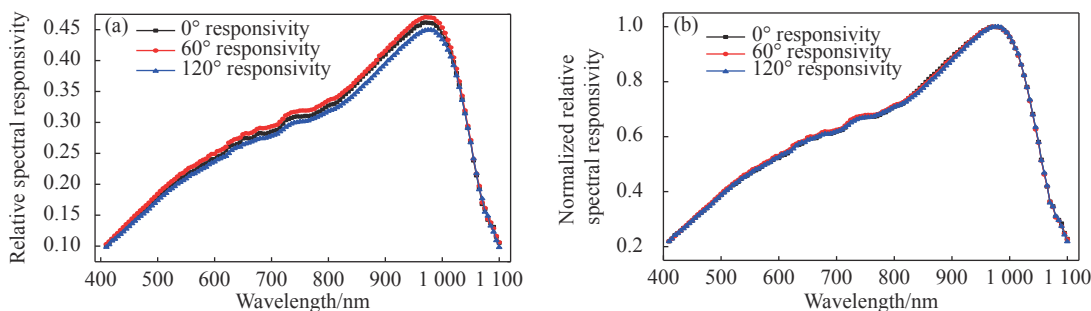


图 8 宽波段偏振传感器相对光谱响应度

Fig.8 Relative spectral responsivity of broadband polarization remote sensor

从图 8 中可以看出, 410~1 100 nm 波段范围内, 0°、60°和 120°三种状态下的模拟偏振遥感器的归一化相对光谱曲线也是一致的, 表明在宽波段范围内光源的偏振特性得到了较好的抑制。

2.2 偏振特性测试及分析

为进一步获取单色光导入积分球后的光源偏振态, 将光谱偏振分析仪正对积分球光源的出光口, 得到光栅 1 在 450~1 100 nm 范围内的光源偏振度信息, 如表 2 所示。

表 2 积分球光源偏振特性测量结果
Tab.2 Measurement results of integrating sphere source polarization

Wavelength/nm	I_λ	Q_λ	U_λ	P_λ	β_λ
450	4.39	-0.11	-0.03	0.026	7.63
500	7.50	-0.15	-0.04	0.021	7.47
550	8.15	-0.20	-0.05	0.025	7.02
600	8.37	-0.19	-0.05	0.023	7.37
650	16.34	-0.4	-0.12	0.026	8.35
700	19.29	-0.48	-0.13	0.026	7.58
750	24.24	-0.54	-0.14	0.023	7.27
800	17.95	-0.36	-0.09	0.021	7.02
850	15.17	-0.35	-0.09	0.024	7.21
900	12.83	-0.31	-0.08	0.025	7.24
950	15.22	-0.23	-0.06	0.016	7.31
1000	11.5	-0.22	-0.06	0.020	7.63
1050	7.76	-0.07	-0.02	0.009	7.97
1100	2.86	0.04	0.01	0.014	7.02

表 2 中 I_λ 为辐射强度, 对比表 1 中的 I_λ 值, 其结果明显减小, 说明积分球对入射的单色光源强度进行了衰减, 但同时光源的线偏振度也从单色光直接输出时的 0.696 降为 0.026, 且消偏后的偏振度较为稳定, 相应的偏振角也仅在 7.02°~8.35°区间内变化。根据光谱偏振分析仪测量积分球光源的输出结果绘制的不同波长点下的光源偏振态曲线如图 9(a) 所示, 图 9(b) 为有/无积分球时光源偏振度随波长变化的趋势。

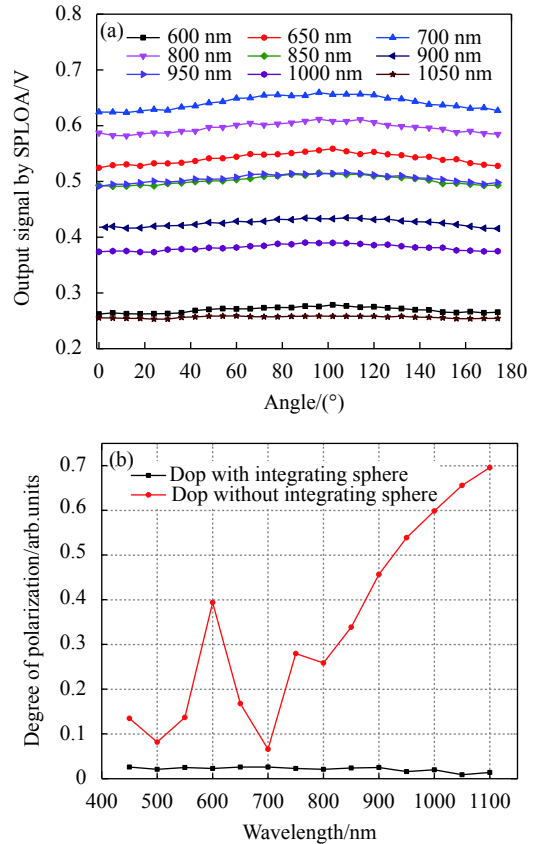


图 9 积分球光源偏振态曲线

Fig.9 Polarization state curves of integrating sphere source

3 定标实验及分析

前文论述了在两种模式下偏振遥感器相对光谱响应度定标的结果, 实验结果表明: 在偏振仪器的相对光谱响应度定标过程中, 定标装置其自身的偏振特性不可忽略, 当定标光源的偏振度和偏振方位角存在较大变化时, 会影响偏振通道的带内非一致性结果。为了获取光源偏振态与偏振遥感器相对光谱定标之间的定量关系, 需要从理论上推导偏振遥感器的光谱响应度定标模型。

对于偏振遥感器而言, 其偏振通道探测器的输出偏振态 Stokes 矢量 $S_0^k = [I_{\lambda,0}^k, Q_{\lambda,0}^k, U_{\lambda,0}^k]^T$, 可用偏振遥感器入瞳处的入射偏振态 Stokes 参量 $S_{\lambda,i} = [I_{\lambda,i}, Q_{\lambda,i}, U_{\lambda,i}]^T$ 以及偏振片和滤光片的 Mueller 矩阵表示^[15], 如公式 (4) 所示:

$$\begin{bmatrix} I_{\lambda,0}^k \\ Q_{\lambda,0}^k \\ U_{\lambda,0}^k \end{bmatrix} = A(\alpha + k\pi/3)N^kA(-\alpha - k\pi/3)I_\lambda \begin{bmatrix} 1 \\ P_\lambda \cos 2\beta_\lambda \\ P_\lambda \sin 2\beta_\lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,

$$A(\alpha+k\pi/3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2(\alpha+k\pi/3) & \sin 2(\alpha+k\pi/3) \\ 0 & -\sin 2(\alpha+k\pi/3) & \cos 2(\alpha+k\pi/3) \end{bmatrix}$$

$$N^k = \frac{t_\lambda^k}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1-2/e_\lambda^k & 0 \\ 1-2/e_\lambda^k & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{t_\lambda^k/e_\lambda^k} \end{bmatrix}$$

式中: $\alpha+k\pi/3(k=0,1,2)$ 为检偏器的相对透过轴方向与参考坐标系 x 轴的夹角; $A(\alpha+k\pi/3)$ 为旋转矩阵; N^k 为偏振遥感器各偏振通道检偏器 x 轴方向放置时的 Mueller 矩阵; t_λ^k 为偏振通道检偏器的透过率; e_λ^k 为偏振通道检偏器消光比。

经过矩阵运算后, 到达偏振通道探测器的输出偏振态 Stokes 矢量 S_0^k 的第一行表示光强度 $I_{\lambda,0}^k$, 表示为公式 (5):

$$I_{\lambda,0}^k = \frac{t_\lambda^k I_\lambda^k}{2} [1 + P_\lambda (1 - 2/e_\lambda^k) \cos 2(\alpha + k\pi/3 - \beta_\lambda)] \quad (5)$$

根据公式 (5) 可建立偏振遥感器各通道输出的 DN 值与偏振遥感器绝对光谱辐亮度响应度 $R(\lambda)$ 及定标光源辐亮度 $L_{\lambda,0}^k$ 之间的关系, 如公式 (6) 所示:

$$DN^k = L_{\lambda,0}^k R(\lambda) [1 + P_\lambda (1 - 2/e_\lambda^k) \cos 2(\alpha + k\pi/3 - \beta_\lambda)] \quad (6)$$

公式 (6) 中, 当检偏器的消光比 $e_\lambda^k (>10^4)$ 非常高时, 可简化为:

$$DN^k = L_{\lambda,0}^k R(\lambda) [1 + P_\lambda \cos 2(\alpha + k\pi/3 - \beta_\lambda)] \quad (7)$$

如公式 (7) 所示, 在偏振遥感器的相对光谱响应度定标过程中, 对于同一个偏振通道下的三种不同偏振状态, 其定标光源的辐亮度 $L_{\lambda,0}^k$ 可认为是一致的, 因此定标得到的光谱响应度可表示为:

$$R(\lambda)^* = \frac{DN^k}{L_{\lambda,0}^k} = R(\lambda) [1 + P_\lambda \cos 2(\alpha + k\pi/3 - \beta_\lambda)] \quad (8)$$

公式 (8) 中, $R(\lambda)^*$ 为偏振遥感器在定标过程中实际得到的通道内光谱响应度。从公式中可以看出, 偏振遥感器 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 三种偏振状态下的光谱响应度定标结果与定标光源的偏振态及偏振相位角密切相关, 当定标光源为非偏光时 ($P_\lambda=0$), 理论上的光谱响应度 $R(\lambda)$ 和实际定标结果一致; 而当定标光源为偏振光, 且光源的偏振相位角也发生变化时, 会造成同一个偏振通道下的三种不同偏振状态其通道内光谱响

应度不一致。

对于公式 (8) 而言, 光源的线偏振度 P_λ 在 $0 \sim 1$ 区间内变化, 偏振角 β_λ 在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 之间变化, $\alpha+k\pi/3 (k=0,1,2)$ 为检偏器的相对透过轴方向与参考坐标系 x 轴的夹角, 由于公式中余弦函数呈周期性变化, 因此文中分别以 $k=0,1,2$ 为例, 模拟偏振遥感器的输出 DN 值随偏振度以及偏振方位角变化的关系曲线, 如图 10 所示。

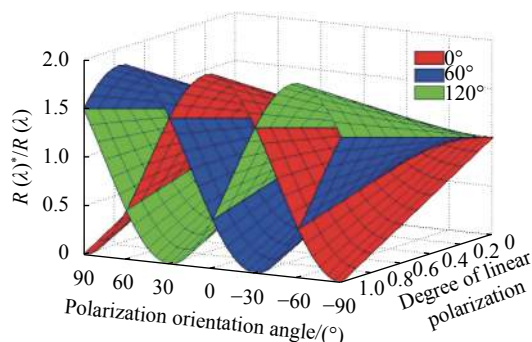


图 10 不同偏振态下遥感器的输出线偏振度及偏振角的变化

Fig.10 Variation of remote sensor output with degree of linear polarization and phase angle under different polarization states

从图 10 中可以看出, 光源线偏振度的变化对三个偏振方向光谱响应度的影响主要表现在幅值上的差异, 而偏振角的变化则会导致仪器的光谱响应度呈现明显波动的特征。以前文 1.3 节给出的三个偏振通道相对光谱响应度的结果为例, 490 nm 波段范围内光源的线偏振度较小, 因此三个偏振通道归一化前的相对光谱响应度结果主要受偏振角变化的影响, 相对偏差为 19.9% ; 670 nm 波段范围内, 光源的偏振角变化较大, 导致三个偏振方向的相对光谱曲线呈现周期性的波动状态, 相对偏差达到 38.6% ; 910 nm 波段范围内, 光源的线偏振度较大, 而偏振角的变化并不明显, 导致三个偏振通道的相对光谱响应度在幅值上差异明显, 而曲线的形状却较为相似, 因此, 归一化后的曲线较为吻合, 相对偏差最大为 5.3% 。导入积分球后, 由于光源的线偏振度普遍较低 ($P_\lambda < 0.026$), 并且光源偏振角的变化区间较小, 因此, 从定标结果可以看出, 同一通道的三种偏振状态其相对光谱曲线一致性较好, 这也与理论分析相符。

4 结果与讨论

利用偏振通道带内的相对光谱响应度定标结果, 计算得到偏振通道三个偏振方向相对光谱曲线的中心波长 λ_0 和带宽 $\Delta\lambda$, 如公式 (9)、(10) 所示:

$$\lambda_0 = \frac{\int \lambda R_{FR}(\lambda) d\lambda}{\int R_{FR}(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

$$\Delta\lambda = \int \hat{R}_{FR}(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

公式中, $R_{FR}(\lambda)$ 为归一化相对光谱响应度, 同时根据偏振传感器带内非一致性的定义, 计算出偏振通道的带内非一致性 ρ , 由公式 (11) 所示:

$$\rho = |\lambda_0^k - \lambda_0^r| / \Delta\lambda \quad (11)$$

式中: $\lambda_0^k - \lambda_0^r$ 为中心波长的极差值; $\Delta\lambda$ 为带宽均值, 计算得到在两种定标模式下三个通道的光谱定标结果如表 3 所示。

表 3 有/无积分球时通道式光谱响应度定标结果

Tab.3 Calibration results of channel spectral responsivity with or without integrating sphere

	0°			60°		120°		Non-uniformity ρ
	Channel/nm	Center wavelength /nm	Bandwidth /nm	Center wavelength /nm	Bandwidth /nm	Center wavelength /nm	Bandwidth /nm	
Without integrating sphere	490	490.64	19.21	490.72	17.95	490.55	18.85	0.91%
	670	670.48	18.48	670.03	14.94	670.77	18.87	4.25%
	910	910.39	18.69	910.27	18.83	910.47	19.02	1.06%
With integrating sphere	490	489.71	19.62	489.69	19.60	489.68	19.55	0.15%
	670	669.48	19.31	669.41	19.22	669.39	19.19	0.47%
	910	908.53	19.44	908.64	19.43	908.57	19.43	0.57%

从表 3 的结果可以看出, 在定标装置直接输出单色光模式下定标的三个偏振通道非一致性结果分别为 0.91%、4.25% 和 1.06%; 而在单色光导入积分球后系统级定标的非一致性结果分别为 0.15%、0.47% 和 0.57%, 偏振通道非一致性的结果明显降低, 说明基于超连续谱激光-单色仪定标装置的系统级定标方法能有效适用于偏振遥感器的光谱响应度定标。

对于偏振非敏感的传感器而言, 由于传感器自身对定标光源的偏振态并不敏感, 因此文中也以三片反射式的硅陷阱探测器为例, 在单色仪直接输出光的模式下定标了 410~1100 nm 光谱范围内硅陷阱探测器的相对光谱响应度, 并将该结果与光学计量机构出具的校准证书结果进行比对, 比对结果如图 11 所示。

图 11 中, 以基于超连续谱激光-单色仪定标装置得到的结果和校准证书给出的相对光谱响应度最大偏差为 1.12%, 该项偏差在比对不确定度范围内。因此, 针对偏振非敏感类的传感器, 光源偏振度和偏振角的变化并不影响其光谱响应度定标的结果。

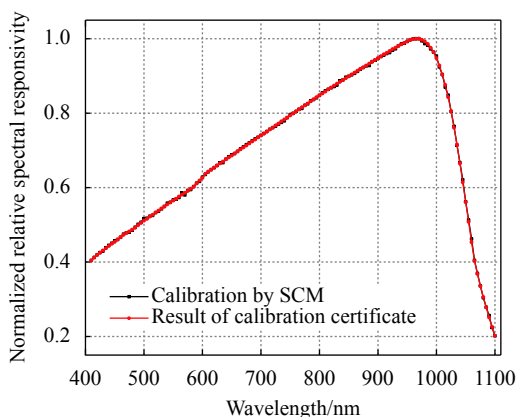


图 11 硅陷阱探测器相对光谱响应度

Fig.11 Relative spectral responsivity of silicon trap detector

5 结论

文中建立了一套基于超连续谱激光-单色仪的细分光谱扫描定标装置, 并以滤光片、旋转偏振片和硅探测器组合模拟典型的通道式偏振辐射计, 分别在单色仪直接输出光状态下和导入积分球后的系统级模式下开展了通道式偏振遥感器的相对光谱响应度定标工作。

针对通道式的偏振遥感器而言,由于在单色仪直接输出光的模式下,光源存在典型的偏振度,同时光源的偏振度和偏振方位角变化较大,导致同一通道的三种不同偏振态其相对光谱响应度曲线一致性较差。在单色光导入积分球后的,光源的偏振度得到了较好的抑制,因此在系统级模式下得到的相对光谱曲线展现出良好的一致性。

通过文中的研究表明,基于超连续谱激光-单色仪的系统级定标装置适用于偏振遥感器的相对光谱定标,虽然文中只给出了可见通道的定标结果,但相关的定标方法和原理具有通用性,利用相应的参考探测器,也有望实现近红外~短波红外范围内偏振遥感器的光谱响应度定标。同时对于文中的系统级装置,积分球光源为一均匀的单色面光源,适用于遥感器辐亮度模式下的定标,借助合适的标准传递辐亮度计,有望实现偏振遥感器的绝对光谱辐亮度响应度定标。

参考文献:

- [1] Li Hailong, Zhang Zili, Li Zhengquan, et al. Aerosol optical properties in Hangzhou based on CE318 data [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2018, 34(6): 46-53. (in Chinese)
- [2] Liu Zhenhai, Luo Donggen, Zhang Yunjie, et al. Cosine error influence of ground-based solar spectral irradiance meter and its correction method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 1012003. (in Chinese)
- [3] Li Zhengqiang, Cheng Xingfeng, Ma Yan, et al. An overview of atmospheric correction for optical remote sensing satellites [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 10(1): 6-15. (in Chinese)
- [4] Li Zhengqiang, Xie Yisong, Hong Jin, et al. Polarimetric satellites sensors for earth observation and applications in atmospheric remote sensing [J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2019, 14(1): 2-17. (in Chinese)
- [5] Kang Qing, Yuan Yinlin, Li Jianjun, et al. Polarization calibration methods of channel-type polarization remote sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2015, 10(4): 343-349. (in Chinese)
- [6] Zhu Bingqing, Yuan Yinlin, Kang Qing, et al. Research on calibration method of in-band relative spectral responsivity of polarization remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0712005. (in Chinese)
- [7] Büngerl L, Taubertl R D, Gutschwager B. Absolute radiation thermometry in the NIR [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38: 61.
- [8] Yoo Y S, Kim G J, Park S. Spectral responsivity calibration of the reference radiation thermometer at KRISS by using a supercontinuum laser-based high-accuracy monochromatic source [J]. *Metrologia*, 2016, 53(6): 1354.
- [9] Yamaguchi Y, Yamada Y, Isshii J. Supercontinuum source-based system for pre-launch calibration of the hyperspectral sensor[C]//Proc SPIE, 2012, 8533: 85331K-1.
- [10] Yamaguchi Y, Yamada Y, Ishii J, et al. Supercontinuum-source-based facility for absolute calibration of radiation thermometers [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36: 1825.
- [11] Xu Nan, Lin Yandong, Gao Haiyong, et al. Spectral responsivity calibration of silicon photodetectors using monochromator-based cryogenic radiometer[C]//Proc SPIE, 2016, 10155: 1015513.
- [12] Chen Ligang. Study of laboratory calibration of the airborne polarization CCD camera with wide field of view[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [13] Kang Qing, Yuan Yinlin, Li Jianjun, et al. Filtration and precision verification of optical filters on atmospheric synchronous corrector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0312003. (in Chinese)
- [14] Yuan Yinlin, Zheng Xiaobin, Wu Haoyu, et al. A intensity modulated spectro-polarimetric analyzer based on Fourier transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1223001. (in Chinese)
- [15] Kang Qing. Research on system-level radiometric and polarized calibration methods in laboratory of polarization remote sensors[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)