

超连续激光单色仪系统级光谱响应度定标比对验证

谢臣瑜^{1,2}, 翟文超^{1*}, 李健军¹, 高放^{1,2}, 李越^{1,2}, 吴浩宇¹, 郑小兵^{1*}

- (1. 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;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 细分光谱扫描定标技术是实现遥感器高精度光谱辐射定标的重要方式, 基于超连续激光单色仪的定标装置是实现遥感器细分扫描定标的新选择。为验证所建立的超连续激光单色仪装置的系统级定标能力, 利用硅辐亮度计和滤光片辐射计, 分别采用超连续激光单色仪定标装置和可调谐激光定标装置对其进行了系统级绝对光谱响应度定标比对验证。实验结果表明: 在所验证波段范围内, 两种定标装置获得的硅辐亮度计绝对光谱响应度系统级定标结果最大偏差为 0.6%。通道式滤光片辐射计的带内绝对光谱响应度定标结果最大偏差优于 0.4%, 带内积分响应度最大偏差约 0.1%。文中的研究验证了超连续激光单色仪定标装置具有良好的系统级定标能力, 能够获得较高的定标精度, 在遥感器的绝对光谱响应度定标中具有重要应用前景。

关键词: 超连续激光; 单色仪; 光谱辐亮度; 细分光谱

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0205005

System-level spectral responsivity calibration comparison and validation of supercontinuum laser and monochromator

Xie Chenyu^{1,2}, Zhai Wenchao^{1*}, Li Jianjun¹, Gao Fang^{1,2}, Li Yue^{1,2}, Wu Haoyu¹, Zheng Xiaobing^{1*}

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The spectrally-resolved scanning calibration is an important technique to satisfy the high accuracy spectral radiometric calibration of remote sensors. The calibration facility based on supercontinuum laser and monochromator (SCM) is a new choice to realize spectrally-resolved scanning calibration of remote sensors. To verify the system-level calibration capability of the SCM, the spectral radiance responsivity of the silicon radiometer and filter radiometer were measured by using the calibration facility based on the supercontinuum laser monochromator and the tunable laser, respectively. The experimental results showed that the maximum deviation of the calibration results for silicon

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-25

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2018YFB0504602); 国家自然科学基金(61505222)

作者简介: 谢臣瑜(1993-), 男, 博士生, 主要从事辐射定标方面的研究。Email: xcy1993@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郑小兵(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高精度光学遥感器辐射定标技术、光学遥感等方面的研究。

Email: xbzhang@aiofm.ac.cn

通讯作者: 翟文超(1985-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事遥感器光谱辐射定标、光学系统设计等方面的研究。Email: wczhai@aiofm.ac.cn

radiometer between supercontinuum laser monochromator and tunable laser was 0.6% within the validated band. And the maximum deviation of in-band absolute spectral responsivity calibration results of channel filter radiometer was better than 0.4%, and the maximum deviation of in-band integral responsivity was about 0.1%. The research in this paper verifies that the supercontinuum laser monochromator calibration facility has good system-level calibration capability, can obtain high calibration accuracy. It has important application prospects in the calibration of absolute spectral responsivity of remote sensors.

Key words: supercontinuum laser; monochromator; spectral radiance; spectrally-resolved

0 引言

高精度的光谱辐射定标是目前量化遥感的发展趋势,基于可调谐光源的细分光谱扫描定标技术是提高定标精度的有效手段之一^[1-2]。常用的可调谐光源为可调谐激光器和单色仪。基于可调谐激光器的细分光谱定标装置是将单色激光导入积分球实现,受益于激光器的高通量输出,结合积分球使用可形成空间均匀的单色光源,能够直接满足遥感器的系统级定标需求,配合多个可调谐激光光子系统,可应用紫外~中远红外范围内的光谱辐射定标。如美国国家标准技术研究院(NIST)建立的“使用均匀光源的光谱辐照度和辐亮度定标装置”(SIRCUS)系统^[3]和德国联邦技术物理研究院(PTB)建立的“光度计量可调谐激光装置”(TULIP)^[4]等。传统的基于单色仪的光谱细分扫描装置是以灯照明单色仪,通过单色仪内部的分光光栅实现单色光的连续输出,此类定标装置输出的单色光辐射通量水平普遍较低($nW \sim \mu W$),通常只适用于遥感器功率模式下的相对光谱响应度定标,无法实现仪器辐照度/辐亮度模式下的系统级定标需求。

随着激光技术的发展,超连续激光器的应用日益成熟,该激光器具有宽光谱范围(例如 450~2 400 nm)、高功率密度(mW/nm)等优点^[5],且目前商品化的超连续激光器功率可达 20 W 以上,将高功率的超连续激光作为单色仪的照明光源可以实现几十 μW 至几百 μW 的单色光功率输出,比卤钨灯照明单色仪高出 10^3 数量级,采用合适尺寸的积分球进行匀光,也可以实现遥感器的系统级定标。基于超连续激光单色仪的定标系统兼具超连续激光器高功率密度和单色仪调谐方便等优点,能够很便捷的实现单色光

的连续输出,既简化了辐射定标的流程,也具有良好的定标精度,类似的定标装置在许多国家计量院得以建立,如英国国家物理实验室、日本国家计量院和韩国国家计量院等^[6-8]。

文中介绍了实验室所建立的基于超连续激光单色仪定标装置(Supercontinuum laser and monochromator, SCM),重点对该装置的系统级定标能力进行了比对验证。以 Gershun 管形式的硅辐亮度计为例,分别以可调谐激光定标系统和本文所介绍的装置得到硅波段辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应度,并将定标结果进行比对。考虑到超连续激光器的激光属性(相干特性),文中将通道式辐亮度计的光谱响应度定标作为研究特例进行了比对研究,重点讨论了滤光片辐射计在激光光源定标中的干涉效应。

1 超连续激光单色仪装置

基于超连续激光单色仪的定标装置如图 1 所示,以超连续激光(SC-450, 8 W)作为单色仪的光源,可覆盖 450~2 400 nm 范围内的光谱输出。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、600 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 Splitter 1 和 Splitter 2 为石英平板,其中 Splitter 1 反射的部分光束进入监视探测器,用于监视光源的稳定性,Splitter 2 反射的部分光束进入光谱分析仪,用于测量单色仪输出波长和带宽。透镜 Lens2 的聚焦光束导入内径为 $\Phi=100$ mm、开口为 $\Phi=35$ mm 的积分球中,形成一个均匀的面光源,用于遥感器光谱辐亮度模式下的系统级定标。将参考

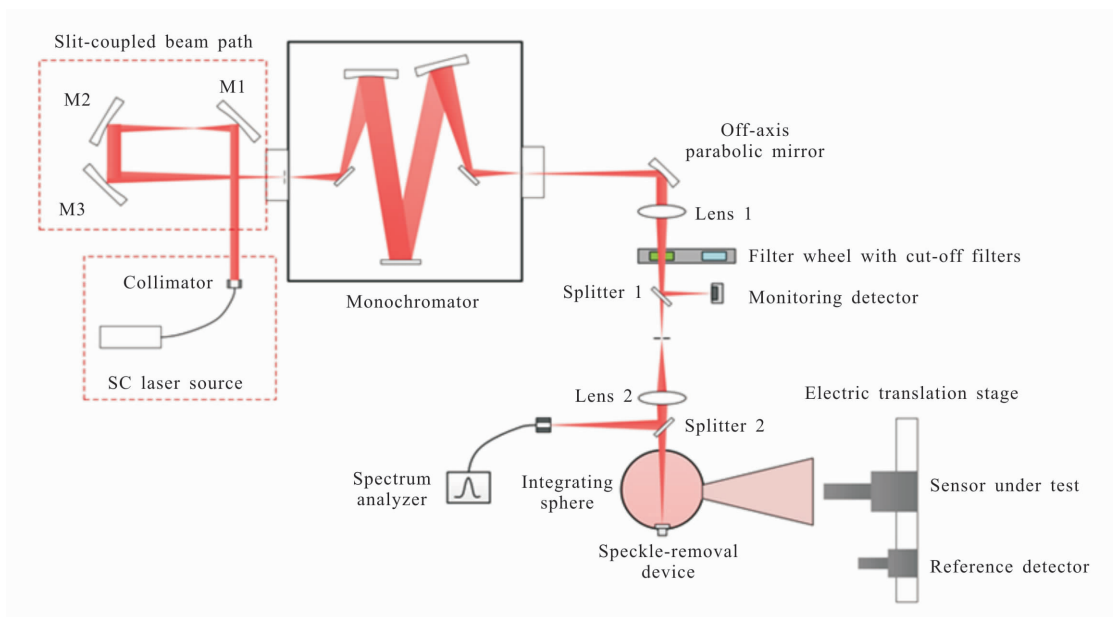


图 1 基于超连续光源和单色仪的光谱定标系统

Fig.1 Layout of the spectral calibration system based on supercontinuum laser and monochromator(SCM)

辐亮度计和待测仪器放置于积分球出口的电动平移台处，利用步进电机控制交替测量得到待测仪器的绝对光谱辐亮度响应度。

2 系统级光谱辐亮度响应度定标原理

系统级光谱辐亮度响应度定标是通过交替测量实现的，参考辐亮度计和待测仪器分别放置于积分球出口的几何中心进行交替测量，利用量值传递的方法得到待测仪器的绝对光谱辐亮度响应度：

$$I_{L-Std}(\lambda) = I(\lambda)R(\lambda)_{L-Std}$$

$$I_{L-Dut}(\lambda) = I(\lambda)R(\lambda)_{L-Dut} \quad (1)$$

式中： $I_{L-Std}(\lambda)$ 和 $I_{L-Dut}(\lambda)$ 分别为参考辐亮度计和待测仪器在波长为 λ 处的输出电流值； $I(\lambda)$ 为积分球光源的辐亮度； $R(\lambda)_{L-Std}$ 为参考辐亮度的光谱辐亮度响应度； $R(\lambda)_{L-Dut}$ 为待标辐亮度的光谱辐亮度响应度。根据公式(1)可以得到待测仪器的绝对光谱辐亮度响应度为：

$$R(\lambda)_{L-Dut} = \frac{I_{L-Dut}(\lambda)}{I_{L-Std}(\lambda)} R(\lambda)_{L-Std} \quad (2)$$

针对通道式的滤光片辐射计，可以对光谱响应度带内进行积分得到滤光片辐射计 λ_0 通道的通道响应度 $R_L(\lambda_0)$ ，即通道内的定标系数：

$$R_L(\lambda_0) = \int R(\lambda)_{L-Dut} d\lambda \quad (3)$$

此外，利用滤光片辐射计带内相对光谱响应度结果，还可以得到滤光片辐射计的通道中心波长和带宽。

$$\lambda_0 = \frac{\int \lambda R_{FR}(\lambda) d\lambda}{\int R_{FR}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

$$\Delta\lambda = \int R_{FR}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

式中： $R_{FR}(\lambda)$ 为滤光片辐射计通道相对光谱响应度； $\Delta\lambda$ 为滤光片辐射计的通道带宽。

3 硅辐亮度计响应度定标及比对

3.1 基于 SCM 的系统级及定标结果

利用如图 1 所示的定标装置对参考辐亮度计和待测辐亮度计进行交替测量，待测辐亮度计是以硅光电二极管(Hamamatsu S1337)作为探测单元，采用三片反射式陷阱结构和 Gershun 管的设计形式^[9]，通过视场光阑和孔径光阑组成的光学系统限制其入射孔径以及立体角，其视场角约为 2° 。实验中测量的光谱范围为 450~900 nm，测量间隔为 5 nm，使用静电计(Keithley 6517B)采集辐亮度计输出的电流信号值，通过公式(1)计算得到待测硅辐亮度计的辐亮度响应度，结果如图 2 所示。

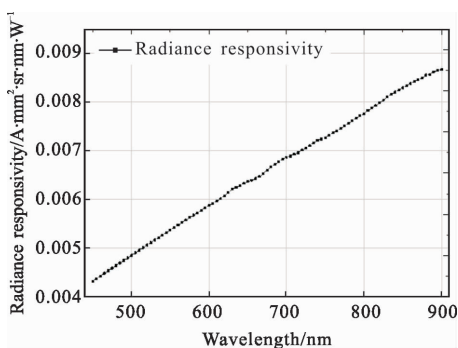


图 2 待测硅辐亮度计响应度曲线

Fig.2 Radiance responsivity curve of Si radiometer under the test

3.2 基于可调谐激光的系统级定标及结果

基于可调谐激光(Tunable Laser, TUL)的定标装置如图 3 所示,利用 532 nm 的激光器作为钛宝石模块泵浦光,可产生 700~1 000 nm 波段范围内的连续可调谐激光,单色激光经过偏振片起偏后进入激光功率控制器(Laser power controller LPC)进行功率稳定,平板玻璃将部分光反射到激光波长计中实时测量单色光的波长值,激光波长计的波长测量精度可达 0.001 nm。其余部分的光束通过反射镜导入积分球内部的旋转漫射板上,利用电机带动漫射板旋转可以有效抑制激光空间相干效应产生的散斑^[10],最

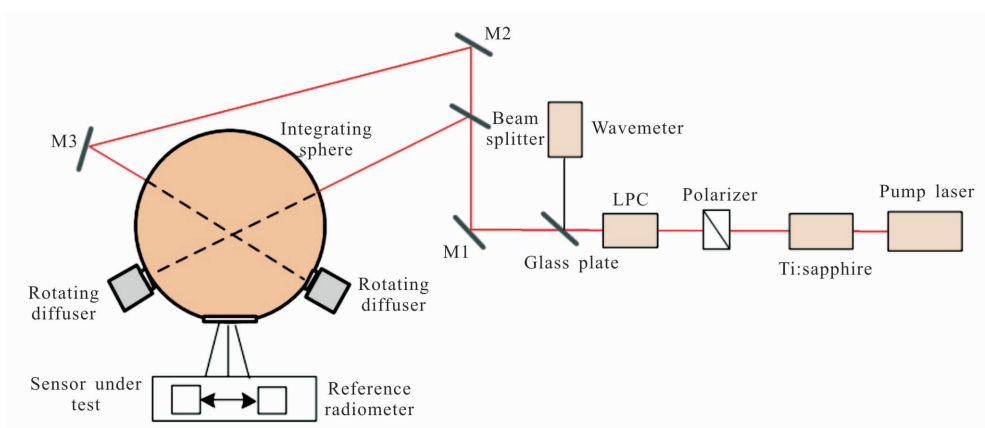


图 3 基于可调谐激光器的辐射定标系统

Fig.3 Layout of the spectral calibration system based on tunable laser

终在积分球出口处形成均匀的单色面光源,可用于辐亮度计的系统级定标。基于可调谐激光的定标装置具有较高的光功率、光谱带宽极窄和极低的波长不确定度等优点,并且在激光功率稳定器的作用下可以将光功率的非稳定性控制在 0.05% 以下,能够实现 10^{-3} 量级的光谱辐亮度系统级定标^[11]。

定标前分别调节参考辐亮度计和待测仪器的位置,使其对准积分球光源的几何中心。在每个测量波长点下,通过电动平移台控制两台仪器的来回移动实现交替测量,利用静电计记录辐亮度计在每个波长点下的电流信号值,由此计算得到待测辐亮度计的绝对光谱辐亮度响应度。根据目前可调谐激光器的出光范围,实验中获取了待测仪器在 720~900 nm 之间共计 132 个波长点下的辐亮度响应度,其结果如图 4 所示。

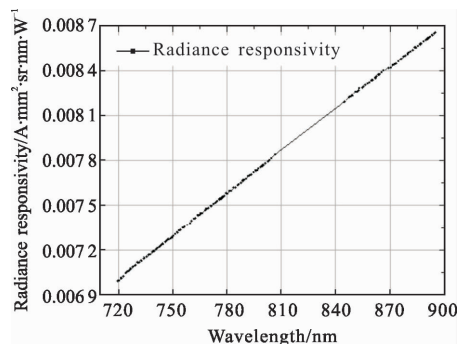


图 4 基于可调谐激光器的硅辐亮度响应度定标结果

Fig.4 Radiance responsivity of Si radiometer based on tunable laser

3.3 硅辐亮度计定标结果比较

实验中,分别利用基于超连续激光单色仪定标系统以及可调谐激光定标系统得到待测辐射计的光谱辐亮度响应度,为了验证超连续激光单色仪的系

统级定标能力, 将辐亮度响应度定标的结果进行对比分析, 结果如图 5 所示。

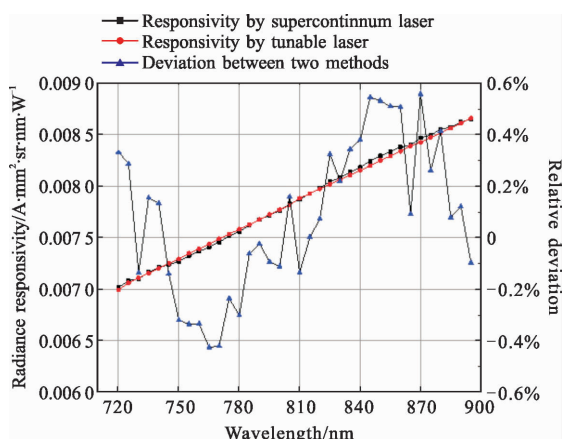


图 5 超连续激光-单色仪和可调谐激光器定标系统的对比结果

Fig.5 Comparison of radiance responsivities by supercontinuum laser monochromator and tunable laser

图 5 中右侧纵坐标为不同定标方法之间的相对偏差, 从图中可以看出在 720~900 nm 波段范围内, 超连续激光单色仪系统与可调谐激光定标系统之间的偏差优于 0.6%, 说明两种定标方式获得的结果具有良好的-一致性, 超连续激光单色仪定标装置具有-遥感器系统级定标能力。

4 滤光片辐射计响应度定标及比对

4.1 滤光片辐射计 760 nm 通道定标结果比较

滤光片辐射计主要是在前述硅辐亮度计光阑筒上加装插拔式带通滤光片实现, 文中以中心波长为 760 nm, 带宽为 10 nm 的滤光片辐亮度计通道作为-比对验证对象, 分别利用可调谐激光器和单色仪定标系统对其进行辐亮度响应度定标。定标结果如图 6 所示。

从图 6(a)中的可以看出, 760 nm 通道滤光片辐亮度计在可调谐激光器定标装置和超连续激光-单色仪定标装置获得的绝对辐亮度响应度结果在通道-两翼处呈现较好的一致性, 但在中心波长附近, 两者定标的绝对辐亮度响应度曲线存在较大的偏差, 主要原因在于可调谐激光器在定标滤光片辐亮度计的过程中出现了明显的干涉效应, 干涉效应引入的最大偏差达到了 4.8%, 如图 6(b)所示。

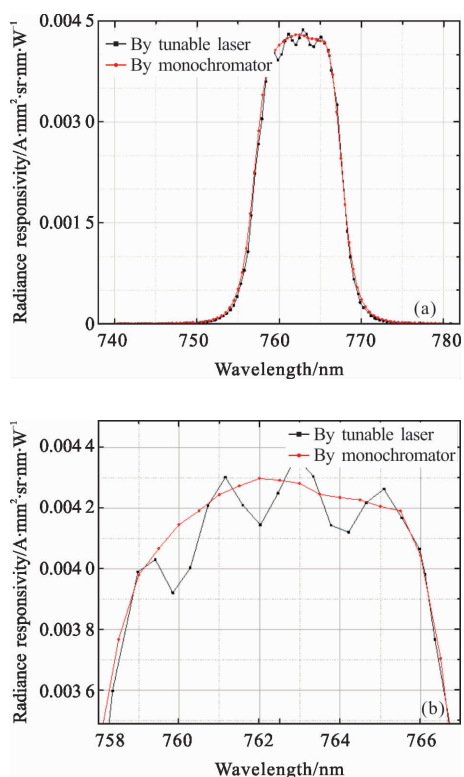


图 6 760 nm 通道滤光片辐亮度计定标结果比较

Fig.6 Responsivity comparison of 760 nm channel filter radiometer

可调谐激光器由于其出射的单色光本身带宽极窄, 所以定标光源自身固有的时间/空间相干性是引入干涉现象的一个主要因素, 干涉效应产生的另一个因素是所使用的滤光片为玻璃平板式滤光片, 该滤光片通道内透过率较低, 其中心波长附近最高的透过率约为 55% (型号为 #67777 Edmund), 即滤光片通道内透过率较低导致响应度曲线中干涉影响明显。

4.2 滤光片辐亮度计 766 nm 通道定标结果比较

为进一步验证辐射计中滤光片的透过率对产生的干涉效应是否有直接影响, 实验中将硅辐亮度计的插拔式滤光片更换为中心波长为 766 nm、带宽为 10 nm 的另一种带通滤光片 (型号为 #65116, Edmund), 其通道内中心波长附近透过率大于 96%, 分别利用可调谐激光器和单色仪定标系统对其进行响应度定标, 其结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出, 766 nm 通道滤光片辐亮度计在两种系统级定标装置中的光谱辐亮度响应度定标结果一致, 通道内没有发现明显的干涉效应, 说明使用高透过率的滤光片可以有效降低滤光片辐射计在激光器定标过程中的干涉影响。

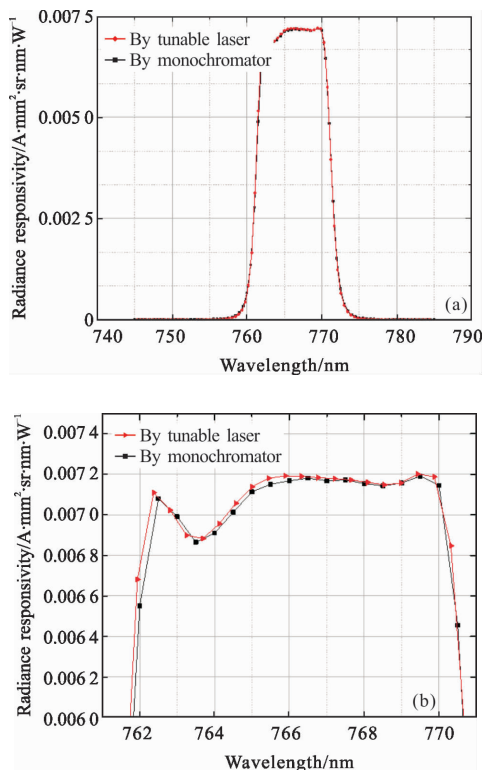


图 7 766 nm 通道滤光片辐亮度计定标结果比较

Fig.7 Responsivity comparison of 766nm channel of filter radiometer

表 1 所示为滤光片辐射计两个通道在不同定标装置下的光谱辐亮度响应度定标结果,包括通带内光谱辐亮度响应度和通带积分响应度(见公式(3))的

表 1 滤光片辐亮度计定标系数比较

Tab.1 Calibration coefficient comparison of filter radiometer

Channel /nm	Calibration coefficient by the SCM /A·mm²·sr·W ⁻¹	Calibration coefficient by the TUL /A·mm²·sr·W ⁻¹	Relative deviation of spectral responsivity in bandpass	Relative deviation of the bandpass integration responsivity
760	0.047 77	0.046 55	4.8%	2.6%
766	0.074 24	0.074 16	0.4%	0.1%

相对差异。由结果可知,存在干涉效应时,基于可调谐激光器和基于超连续激光单色仪定标技术的光谱辐亮度响应度之间的相对偏差达到了 4.8%,通道内的积分辐亮度响应度偏差为 2.6%左右(主要原因在于可调谐激光器极窄带宽引入的干涉效应)。无干涉效应时,两种定标技术的辐亮度响应度和通道内积

分辐亮度的相对偏差分别为 0.4%和 0.1%,表现出良好的一致性。表 2 给出了两种定标技术获得的滤光片辐射计 766 nm 通道中心波长和带宽的测量结果,可见中心波长和带宽差异分别小于 0.02 和 0.03 nm。760 nm 通道由于存在已知的干涉效应影响,此处不再进行计算比较。

表 2 滤光片辐亮度计通道中心波长和带宽测量结果(766 nm)

Tab.2 Calibration results of center wavelength and bandwidth of filter radiometer(766 nm)

Methodology	Center wavelength (CW)/nm	Bandwidth (BW)/nm	CW deviation /nm	BW deviation /nm
SCM	766.28	10.33		
TUL	766.26	10.30	0.02	0.03

5 激光干涉效应的影响分析

从图 6 和图 7 给出的实验结果可以看出,在使用超连续激光器-单色仪定标装置对 760、766 nm 两个通道式滤光片辐射计的定标过程中,其获取的绝对辐亮度响应度曲线并没有呈现出明显的干涉效应,原因可能在于定标光源的带宽设置较宽 ($\delta\lambda=0.5$ nm,约 1/20 通道带宽)。

为了进一步验证干涉效应和光源带宽之间的依赖关系,以超连续激光-单色仪定标系统为基础,实验中通过设置单色仪的狭缝宽度得到一系列光谱带宽不同的单色光源,在不同带宽下对 760 nm(通道内透过率约 55%) 通道辐亮度计中心波长附近的一段光谱区间(759~761 nm)进行了相对光谱响应度扫描测量。考虑到在窄带宽模式下,单色光的输出光通量水平较低,会直接影响测量过程中的信噪比,因此采用功率模式测量,即将原本导入积分球的单色光直接正入射至辐亮度计的入瞳处,测量结果如图 8 所示。

图 8 中给出了滤光片辐射计在不同光源带宽下的相对光谱响应度曲线,其中光源的光谱带宽分别为 0.05、0.08、0.1、0.2 nm。测量时扫描间隔为 0.01 nm。从测量结果可以看出,在基于超连续激光-单色仪的定标系统中,当单色光的带宽设置为 0.05、0.08、0.1 nm 时同样存在明显的干涉效应,光谱带宽在

0.2 nm 时干涉效应显著降低。

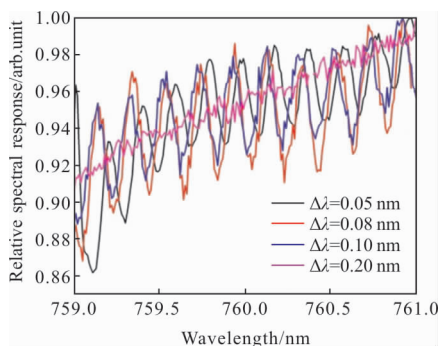


图 8 不同带宽下的相干特性

Fig.8 Coherence characteristics under different bandwidths

可调谐激光器定标方式在滤光片辐射计定标过程中所引入的明显干涉影响可通过算法进行校正,但必须在滤光片辐射计的通道内进行精细扫描测量(例如扫描间隔为 0.03 nm),获得干涉效应的精细结构才能实现^[3-4]。这从侧面反映出,通过针对性调节超连续激光-单色仪的输出带宽,可以有效避免干涉效应的影响,在使用过程中更具灵活性和通用性。

6 不确定度评估

根据通用的不确定度评估与表述规范^[12],对超连续激光-单色仪和可调谐激光器的系统级定标装置进行不确定度分析,结果如表 3。

由表 3 的不确定度分析可以看出,超连续激光单色仪定标系统和可调谐激光器定标系统对硅辐亮度计定标的扩展不确定度分别为 1.8% 和 0.53% ($k=2$)。在不确定度的贡献中,波长精度的测量都溯源至波长计,波长计的精度达到 pm 量级,因此由波长精度引起的不确定度可以忽略。由于滤光片辐射计为硅辐亮度计中增加插拔式滤光片实现,因此其特性参数引入的不确定度相同,定标过程中的主要不确定度差异为测量过程中的测量采样数据的相对标准偏差。同时考虑到实验过程中超连续激光-单色仪定标装置带宽设置较小(<0.5 nm),远小于定标通道带宽的 1/10,因此,不确定度评估中忽略了光谱带宽引入的不确定度^[13]。从表 3 可知,在超连续激光单色仪定标装置中,定标光源引入的不确定度为 0.86%(包括光源非稳定性和非均匀性),为主要不确定度来源,该不确定度水平尚有较大优化空间。

表 3 绝对光谱辐亮度响应度定标不确定度评估

Tab.3 Uncertainty of absolute radiance responsivity calibration

Components of uncertainty			SCM	TUL
			Contributions	Contributions
Source's characterizations	Wavelength accuracy		-	-
	Instability		0.50%	0.074%
	Planar uniformity		0.4%	0.12%
	Angular uniformity		0.57%	0.085%
Reference radiance meter	Characterizations		0.18%	0.18%
	Relative standard deviation characterizations		0.15%	0.05%
Device under test	Relative standard deviation	Radiance meter	0.13%	0.058%
		Filter radiometer	0.08%	0.05%
		Radiance meter	0.9%	0.27%
Combined uncertainty			0.9%	0.26%
Expanded uncertainty ($k=2$)	Radiance meter		1.8%	0.53%
	Filter radiometer		1.8%	0.52%

7 结论

文中开展了超连续激光单色仪定标装置的系统级定标能力比对验证工作,以硅辐亮度计和滤光片辐射计作为待测仪器,分别利用可调谐激光器定标装置和超连续激光单色仪装置对其进行系统级绝对光谱响应度定标,定标结果展现出良好的一致性,充分验证了超连续激光单色仪装置的系统级定标能力。

在滤光片辐射计的比对验证中,由于可调谐激光固有的相干性,定标结果具有明显的干涉效应,实验发现利用高透过率滤光片可以有效降低干涉效应带来的影响。比对验证过程中的不确定度分析结果表明,超连续激光单色仪定标装置不确定度的最大来源受限于超连续激光光源的稳定性和积分球匀光器的性能,通过提高超连续激光器的稳定性水平,如

采用PID控制算法进行光反馈调节^[14],有望进一步降低由光源非稳定性引入的不确定度。此外,优化积分球匀光器的性能(如开口比和挡板位置的优化),也可进一步降低系统级定标的不确定度,这也是本论文下一步的工作重点,未来有望将其不确定度水平降低至接近可调谐激光器装置的水平。虽然目前超连续激光单色仪的定标精度与可调谐激光器装置相比略有不足,但其具有光谱带宽可调、使用、维护更为便捷等优点,在太阳反射波段遥感的系统级光谱辐射定标领域具有广泛应用前景。

参考文献:

- [1] Fan Bin, Chen Xu, Li Bicen, et al. Technical innovation of optical remote sensing payloads onboard GF-5 satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0102002. (in Chinese)
- [2] Zheng Xiaobing. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 36-43. (in Chinese)
- [3] Brown S W, Eppeldauer G P, Lykke K R, et al. Facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using uniform sources [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(32): 8218.
- [4] Schuster M, Nevas S, Sperling A, et al. Spectral calibration of radiometric detectors using tunable laser sources [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 1950.
- [5] Zhao Lei, Li Chao, Li Yue, et al. Hundred-watt-level supercontinuum spectrum generation based on photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201018. (in Chinese)
- [6] Levick A P, Greenwell C L, Ireland J, et al. Spectral radiance source based on supercontinuum laser and wavelength tunable bandpass filter: the spectrally tunable absolute irradiance and radiance source [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(16): 3508.
- [7] Yamaguchi Y, Yamada Y, Isshii J, et al. Supercontinuum source-based system for pre-launch calibration of the hyperspectral sensor [C]// SPIE, 2012, 8533: 85331K-1.
- [8] Yoo Y, Kim G, Park S, et al. Spectral responsivity calibration of the reference radiation thermometer at KRISS by using a super-continuum laser-based high-accuracy monochromatic source[J]. *Metrologia*, 2016, 53: 1354.
- [9] Wang Xiaoxun, Li Zhigang. Design and performance test of gershun tube spectral radiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0612002. (in Chinese)
- [10] Xu Qiuyun, Li Yanan, Zhai Wencao, et al. Quantitative analysis of laser speckle removal [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(5): 32-36. (in Chinese)
- [11] Zhang Yanna, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, et al. Research on system level calibration method of multi-band filter radiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812004. (in Chinese)
- [12] JJF 1059.1-2012 Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement [S]. 2012.
- [13] Louis-Philippe Boivin. Study of bandwidth effects in monochromator-based spectral responsivity measurements [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(10): 1929-1935.
- [14] 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.