

## 基于宽带滤波调制的光谱成像技术实验研究

魏磊<sup>1</sup>, 杨林<sup>1</sup>, 王晓旭<sup>1\*</sup>, 徐拓奇<sup>1</sup>, 岳品良<sup>1</sup>, 王岩松<sup>1</sup>, 王夺<sup>2,3</sup><sup>1</sup>山东大学空间科学研究院山东大学前沿交叉科学研究院, 山东 青岛 266237;<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于宽带滤波调制的计算光谱成像技术是航空航天光谱成像遥感领域中一种极具应用潜力的新型计算光谱成像技术。目前该技术主要应用于光谱测量仪器的小型化领域, 缺少针对光谱成像遥感领域的相关研究。因此, 针对该技术应用于光谱成像遥感领域的可行性开展实验研究。首先简要介绍宽带滤波调制光谱成像技术的基本原理; 然后针对空间光学遥感工程的实际需求, 采用彩色玻璃滤光片结合工业相机搭建宽带滤波调制光谱成像的原理样机系统, 并对其进行光谱成像实验验证; 最后分析评价所获取的光谱图像, 研究影响该技术的测量精度及其主要影响因素。实验结果表明, 该技术的重建光谱准确度约为 23%, 获取的光谱图像边缘也较为清晰, 噪声约为 23 dB。

**关键词** 成像系统; 光谱成像; 宽带滤波; 光谱调制编码; 高通量; 光谱重建

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0211001

## Experimental Study of Spectral Imaging Technique Based on Broadband Filtering

Wei Lei<sup>1</sup>, Yang Lin<sup>1</sup>, Wang Xiaoxu<sup>1\*</sup>, Xu Tuochi<sup>1</sup>, Yue Pinliang<sup>1</sup>,  
Wang Yansong<sup>1</sup>, Wang Duo<sup>2,3</sup><sup>1</sup>*Institute of Space Sciences, Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;*<sup>2</sup>*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;*<sup>3</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** Computational spectral imaging based on broadband filtering modulation is a new type of computational spectral imaging technology with great application potential in aerospace spectral imaging remote sensing field. At present, this technology is mainly applied to the miniaturization of spectral measurement instruments, but there is a lack of relevant research in the field of spectral imaging remote sensing. Therefore, the feasibility of the application of this technology in the field of spectral imaging remote sensing is studied experimentally. First, the basic principle of broadband filtering modulated spectral imaging is briefly introduced. Then, aiming at the practical demand of space optical remote sensing engineering, the principle prototype system of broadband filtering modulation spectral imaging is built by using color glass filters and industrial camera, and its spectral imaging capability is verified experimentally. Finally, the obtained spectral images are analyzed and evaluated, and the main factors affecting the measurement accuracy of the technology are studied. Experimental results show that the accuracy of spectral reconstruction is about 23%, and the edge of spectral image obtained by this technique is clear, and the noise is about 23 dB.

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-07-26; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(41774180)、中国博士后科学基金面上项目(2020M672053)

通信作者: \*wangxiaoxu@sdu.edu.cn

**Key words** imaging systems; spectral imaging; broadband filter; spectral modulation encoding; high throughput; spectrum reconstruction

## 1 引言

光谱成像技术具有“图谱合一”的信息获取能力,在化学、生物医学与遥感探测等方面获得了广泛的关注与研究。特别是航空航天高光谱成像遥感技术在资源探测<sup>[1]</sup>、农林遥感<sup>[2]</sup>、灾害监测<sup>[3]</sup>及深空探测<sup>[4]</sup>等领域具有广泛的研究与应用价值,而且是国内外竞相发展的先进光学遥感技术之一,提高高光谱成像仪器的空间分辨率和光谱分辨率等性能指标对于其应用有着极为重要的现实意义<sup>[5]</sup>。

目前,在轨的光谱成像仪器主要可以分为基于狭缝与分光器件、基于滤光器件和基于干涉光谱成像原理三类。基于色散原理与窄带滤光片的高光谱成像仪器最为常见,其测量方式为分光直接测量,主要优点是测量原理简明直接、相关器件成熟和数据质量高,但在测量过程中需要将进入系统孔径的光在空间维与光谱维上分离后再分别测量,这会造成系统的光通量很低。因此提升仪器的空间分辨率和光谱分辨率必须极大地增加系统口径或积分时间,但这会造成系统复杂且成本高昂,因此由测量原理引起的低光通量特性限制了此类光谱成像仪器性能的提升。基于干涉光谱成像原理的高光谱成像仪<sup>[6]</sup>因其测量过程无需分光,所以此类仪器具有高光通量的优点。但是此类仪器对测量环境的振动异常敏感,在现有的航空航天平台技术条件下其空间分辨率等性能依然难以有效提升,同时此类技术还有精度要求高以及制造和数据处理难度大等特点。因此,亟待发展基于多通道测量体制的新型光谱成像技术以突破现有光谱成像遥感技术的性能瓶颈。

基于宽带滤波调制的计算光谱测量技术是一种新型光谱测量技术,其主要特征是采用宽带滤波器件在光谱维上直接对入射光进行编码调制并组合测量,然后根据编码的逆变换反求出真实的入射光谱。该技术最初由 Chang 等<sup>[7]</sup>提出,初衷是利用低成本和低性能的滤光膜阵列来实现低成本和微型化的光谱测量装置。后来 Chang 等<sup>[8]</sup>改进了原型样机以提高光谱分辨率,并对测量精度进行一系列探讨。Oliver 等<sup>[9]</sup>提出基于压缩感知理论的光谱编码方法,该方法可以采用较少的滤光片来恢复更多的光谱通道数。近年来,随着新材料与微纳制造技术的发展,基于量子点<sup>[10]</sup>、等离子超表面<sup>[11]</sup>及光子晶

体<sup>[12]</sup>等新型器件的光谱测量技术相继被提出,此类仪器都是基于相同的光谱测量原理,主要不同之处是光谱滤光编码器件及其排布方式。

若将相同的光谱测量原理应用在面阵探测器上,则同样可以实现基于宽带滤波调制的光谱成像。文献<sup>[13]</sup>基于量子点滤光片阵列设计了推扫式光谱成像仪并对其进行了仿真模拟,指出其适合航空航天领域的应用;文献<sup>[14]</sup>基于像素化微结构设计了快照式多光谱成像系统,同样也对其进行了仿真模拟。此外,未见更多针对基于宽带滤波调制的光谱成像技术相关研究。由此可知该技术主要都停留在理论分析研究阶段,尚缺乏实验结果的支持。

根据以上介绍可知,相比于目前较为成熟的色散型、滤光片型与干涉型光谱成像技术,基于宽带滤波调制的光谱成像技术具有光通量高、系统结构简单、重建算法简单快速和易于实现高分辨率等优势,因此在航空航天领域具有很大的应用潜力。鉴于现有实验研究存在的不足,本文针对该技术应用于在实际航空航天遥感工程的可行性开展研究。首先介绍基于宽带滤波调制的光谱成像技术的基本原理;然后采用常规的彩色玻璃滤光片来搭建原理验证样机,并对其测量精度进行实验验证;最后验证其光谱成像功能,为进一步研究奠定了基础。

## 2 基本原理

图 1 为基于宽带滤波调制的光谱成像技术的基本原理,其中  $R_t$  为第  $t$  组光谱调制响应, $\lambda$  为波长, $S_t$  为第  $t$  组光谱调制响应对应的探测器测量信号, $E_u$  为第  $u$  波段对应的重建光谱强度, $u$  为总的光谱波段数。通过在光谱维上对入射光进行调制编码和测量,并经过光谱重建计算可以获得各像素所对应的光谱信息,结合空间维图像信息可以完成高光谱成像数据的获取。

设  $S$  为探测器的输出信号, $\lambda_{\min}$  为系统的光谱响应下界, $\lambda_{\max}$  为系统的光谱响应上界, $E(\lambda)$  为入射光谱强度随波长的分布函数<sup>[7]</sup>,则有

$$S = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(\lambda)E(\lambda)d\lambda = \sum_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(\lambda_i)E(\lambda_i), \quad (1)$$

式中: $\lambda_i$  表示第  $i$  个光谱波段的名义中心波长。若对光谱响应  $R(\lambda)$  进行  $t$  次调制与测量,则可以得到

$$S_k = R_k(\lambda) \times E(\lambda), \quad (2)$$

式中:  $S_k$  表示一个  $t \times 1$  大小的列矩阵, 每一个元素代表探测器第  $k$  次的输出信号;  $R_k(\lambda)$  表示一个  $t \times t$  大小的矩阵, 行方向代表某一组光谱的调制响应

值, 列方向代表第  $k$  组光谱的调制响应值;  $E(\lambda)$  表示一个  $t \times 1$  大小的列矩阵, 其中每一个元素代表与光谱调制响应波长对应的入射光谱强度。

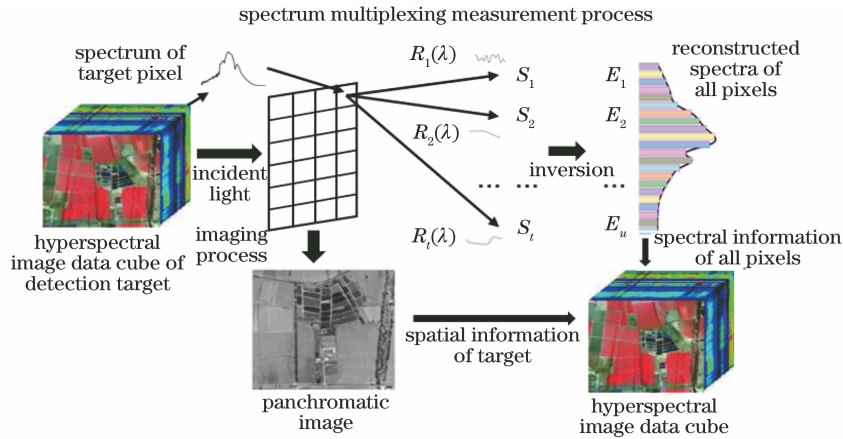


图 1 基于宽带滤波调制的光谱成像技术的基本原理

Fig. 1 Basic principles of spectral imaging technology based on broadband filtering modulation

若使用面阵探测器进行光谱成像, 则(2)式可改写为

$$S_{mnk} = R_{mnk}(\lambda) \times E_{mni}(\lambda), \quad (3)$$

式中:  $m$  和  $n$  分别表示面阵探测器中某一像元的行与列序号。

显然, 调制光谱响应参数矩阵  $R_{mnk}(\lambda)$  是由宽带光谱调制器件的光谱透过率、光学系统效率与探测器光谱响应共同作用决定的, 其是固定的系统参数。根据测量所得的  $R_{mnk}(\lambda)$  与探测目标的实际测量信号矩阵  $S_{mnk}$ , 即可反演计算出离散的入射光谱。

重建计算得到的光谱, 其最大光谱分辨率理论上是由目标光谱的区间以及测量方程的个数决定的。重建获得的光谱分辨率  $\Delta\lambda$  可表示为

$$\Delta\lambda = (\lambda_1 - \lambda_0) / u, \quad (4)$$

式中:  $\lambda_1$  和  $\lambda_0$  分别表示目标重建光谱波段的上界与下界。显然, 在香农采样定理的框架中, 系统的最大光谱分辨率  $\Delta\lambda_{\max} = (\lambda_1 - \lambda_0) / t$ , 即目标光谱的通道数不大于测量方程的个数, 否则(3)式欠定而没有特定解。重建光谱的分辨率示意图如图 2 所示。

在实际测量的过程中, 系统的调制光谱响应参数矩阵  $R_{mnk}(\lambda)$  以及测量信号矩阵  $S_{mnk}$  都是通过测量来获得的, 这不可避免地存在测量不确定度。由(3)式分析可知, 因其具有病态性, 所以在方程解算的过程中将会对输入参数  $R_{mnk}(\lambda)$  与  $S_{mnk}$  的测量不确定度起到放大作用, 从而造成重建光谱的准确度大大下降。因此, 方程的不适定性会造成光谱测量的准确度不佳, 这是该技术主要存在的问题之一。根据矩阵理论, 针对这一问题可以有 4 类有效的改

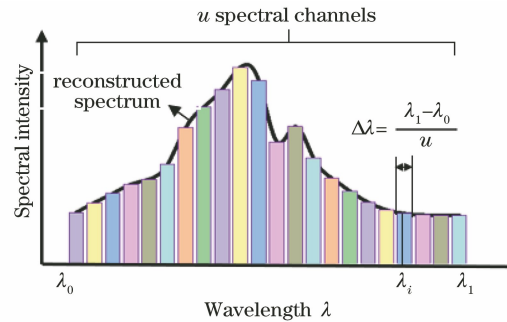


图 2 重建光谱及光谱分辨率的示意图

Fig. 2 Schematic of reconstructed spectrum and spectrum resolution

善方向。

1) 提高  $R_{mnk}(\lambda)$  与  $S_{mnk}$  的测量精度, 此方法受到器件性能和计量成本等因素的影响。

2) 增加测量方程的个数来构成超定方程组以改善解的精度, 这是现有研究常用的一种思路, 利用大量的低成本滤光片或新型光谱滤光器件对入射光进行调制, 接着从高维测量数据中恢复低维光谱通道信息以提高系统的鲁棒性。该方法会大量增加硬件与数据存储的处理成本, 使其在航空航天等领域应用受限, 同时过多的数据也可能引入新的误差。

3) 优化光谱重建算法是一种重要的解决手段, 其可以极大地改善重建计算精度。常见的各种用于求解病态性问题的算法有奇异值截断、正则化技术及各类迭代技术等, 这些算法都可以重建和计算光谱<sup>[15]</sup>, 但在一般情况下, 单纯依靠改善算法并不能获得足够高的光谱重建精度。

4) 为光谱调制编码矩阵  $R_{mnk}(\lambda)$  施加一定的约

束以改善系统的适定性,如文献[9,14]使用随机测量矩阵进行光谱透过率编码设计以提高光谱重建精度,此类方法在理论上可以极大地改善光谱重建计算精度,并可能获取更高的光谱分辨率,但缺点是编码设计通常较为复杂,从目前工程上常见的各类滤光片的制造能力来说,随机编码透过率难以在硬件层面上实现。

### 3 原理样机与实验验证

为了从实验角度来验证该技术应用于实际光谱成像遥感工程的可行性,采用彩色玻璃滤光片作为光谱调制器件来搭建宽带滤波调制光谱成像(BFSI)原理样机,并分别对标准光源与反射目标进

行成像测试以获取光谱成像数据,将获取的成像数据与商业光谱仪的测试数据进行对比,用来验证基于宽带滤波调制的光谱成像技术的有效性。

#### 3.1 原理样机设计与标定

原理样机的结构如图 3(a)所示。镜头与探测器是焦距为 50 mm 的定焦镜头及全色 CMOS 工业相机,宽带带通滤光片用于限定系统的目标光谱测量区间,光谱调制宽带滤光片组由 16 片彩色玻璃滤光片组成。光谱成像数据的采集需依次分别使用具有不同光谱透过率的彩色滤光片对同一目标进行成像,然后经光谱重建计算即可获得目标的光谱成像数据。所采用的滤光片的光谱透过率由分光光度计测得,结果如图 3(b)所示。

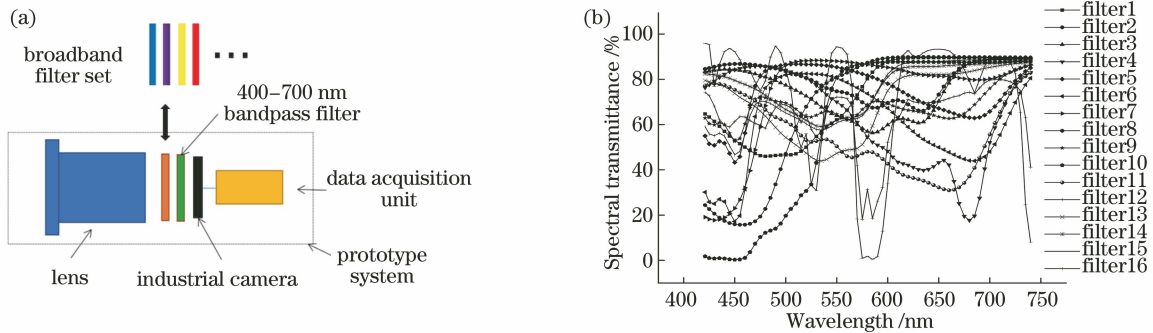


图 3 宽带滤波调制光谱成像的样机结构和滤光片组的光谱透过率。(a)样机结构;(b)光谱透过率

Fig. 3 Prototype structure of broadband filtering-based spectral imaging and spectral transmittance of filter set.

(a) Prototype structure; (b) spectral transmittance

采用宽带滤光片作为光谱调制器件,调制后原理样机系统的光谱响应可表示为

$$\mathbf{R}_{mkk}(\lambda) = T_k(\lambda)\mathbf{R}_{mm}(\lambda), \quad (5)$$

式中: $T_k(\lambda)$ 为第  $k$  个滤光片的光谱透过率。

光谱响应的标定过程如图 4 所示。首先将超连续激光作为基础光源,光经过冷滤光片后滤除红外光,剩余光扩束后再经过柱面镜导入单色仪中,单色仪输出的光通过光导后进入积分球中,从而构成一个

准单色面光源。然后采用标准辐射计作为传递标准来标定该单色光源的光谱辐亮度,即可获得一个标准的单色面光源。最后使用该光源来标定原理样机,即可获得原理样机的光谱响应。将其与所有 16 片滤光片所对应的光谱透过率相乘并进行离散化处理,即可获得系统的光谱调制编码矩阵 $\mathbf{R}_{mkk}(\lambda)$ 。镜头、宽带带通滤光片与探测器的综合光谱响应如图 5(a)所示,搭建完成的原理样机实物如图 5(b)所示。

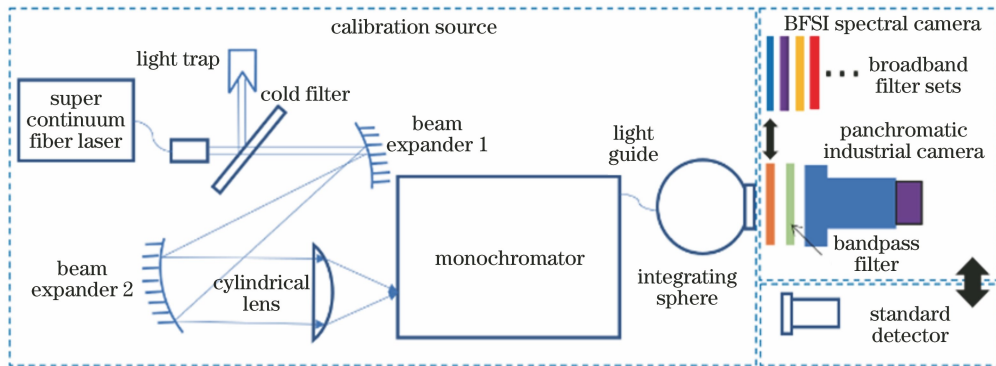


图 4 原理样机定标光源与定标过程

Fig. 4 Calibration light source and calibration process of principle prototype

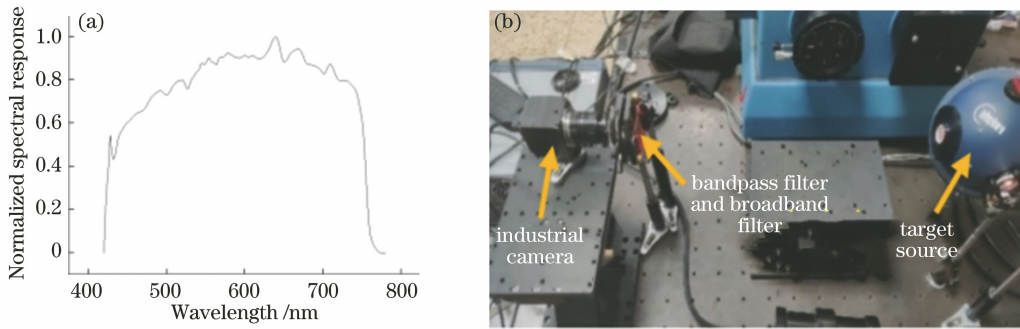


图 5 原理样机的光谱响应及原理样机的实物。(a)光谱响应;(b)原理样机装置  
Fig. 5 Spectral response of principle prototype and physical object of principle prototype.

(a) Spectral response; (b) principle prototype device

### 3.2 标准光源成像

为了测试原理样机所获取的光谱成像数据的准确性,使用原理样机对标准宽带光源进行成像,以重建光谱与标准光源光谱之间的相对偏差来表征重建光谱的准确性。标准光源成像的实验过程如图 6 所示,其中左边虚线框是搭建的定标积分球光源,右下角虚线框是搭建的原理样机系统。标准宽带积分球光源系统以

超连续激光作为基础光源,光经过扩束后导入积分球中,从而形成稳定的面光源。采用标定过的标准光谱仪来测量该积分球光源,得到准确光谱后该积分球光源即可作为标准参考光源使用。利用原理样机对该标准光源进行成像并获取重建光谱,将重建光谱与光源标准光谱进行对比以评估其测量精度。由于地物目标反射光谱一般都是连续谱,此处只对连续光源进行研究。

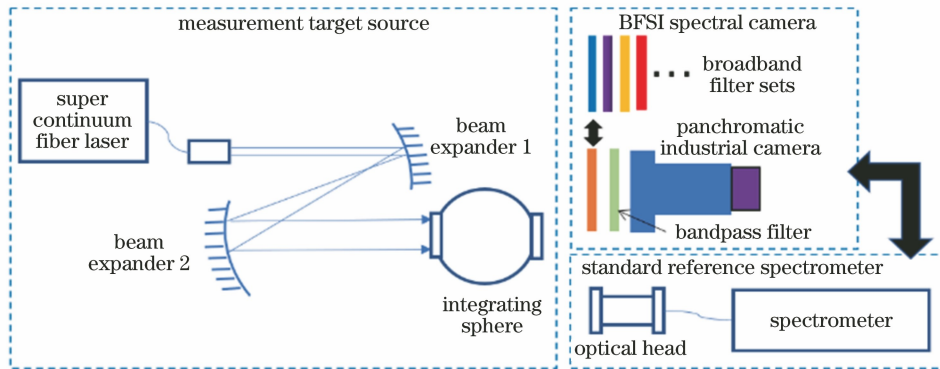


图 6 原理样机的标准光源成像实验过程

Fig. 6 Imaging experiment process of standard light source with principle prototype

实验过程中,标准不确定度的分析结果如表 1 所示。采用基于高斯核与自适应 Tikhonov 正则化算法<sup>[8,15]</sup>来重建计算获得光谱,将其与光源标准光谱进行比较,结果如图 7(a)所示,二者相对偏差如图 7(b)所示。从图 7 可以看到,忽略第一波段的相对偏差(参考光谱值接近 0,导致相对偏差过大),重建光谱与标准参考光谱的相对偏差约为±23%。对比表 1 中理论分析得到的实验标准不确定度,可以看出重建光谱将系统所输入的合成不确定度放大了约 2 倍,重建光谱的准确度明显下降。事实上,分析原理样机系统的调制光谱响应参数矩阵  $R_{mnk}(\lambda)$  可

知,其条件数等于 13531,这意味着系统的不适定性较高,反演计算的误差较大。

分析实验结果可知,采用任意宽带滤光片进行光谱编码获取的重建光谱准确度不佳。由于阵列探测器的测量噪声比单像元探测器大很多,而且成像数据量也多很多,采用大量任意的透过率进行过采样,准确恢复较少光谱波段的方式会造成硬件与数据的大量冗余,并不适合应用于航空航天光谱成像遥感领域。因此,为了提高光谱图像重建的准确度,对光谱编码矩阵  $R_{mnk}(\lambda)$  进行一定约束以降低系统的不适定性几乎是必然的选择。

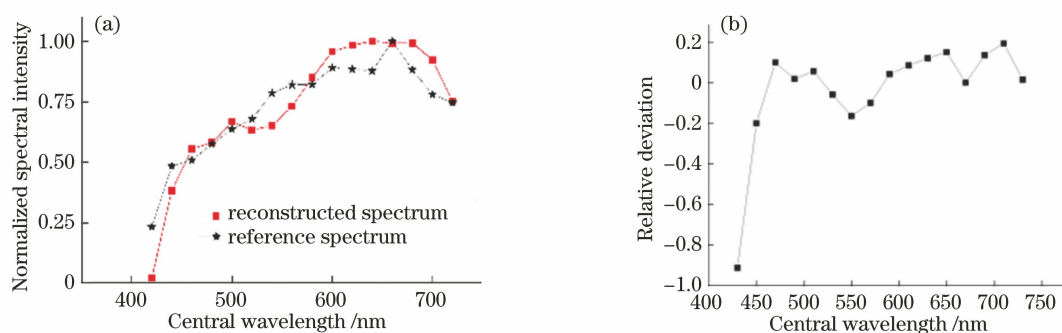


图 7 重建光谱与标准光谱的对比及二者相对偏差。(a)重建光谱与标准光谱的对比;(b)相对偏差  
Fig. 7 Comparison between reconstructed spectrum and standard spectrum and their relative deviation.

(a) Comparison between reconstructed and standard spectra; (b) relative deviation

表 1 标定及测试环节的合成不确定度

Table 1 Combined uncertainty of calibration and measurement process

Parameter	Uncertainty source	Uncertainty magnitude /%
Calibration process	Stability of laser source	1.0
	Uniformity of integrating sphere	3.8
	Uncertainty of standard detector	0.4
	Noise of spectral camera detector	7.5
Measurement process	Stability of laser source	1.0
	Uniformity of integrating sphere	3.0
	Noise of spectral camera detector	6.9
Reference uncertainty	Calibration uncertainty of reference spectrometer	1.4
Combined uncertainty		11.7

### 3.3 反射目标成像

为了验证宽带滤波调制光谱成像技术对反射目标进行光谱成像测量的能力,采用搭建的原理样机对一张多色卡片进行成像测试。图 8 为使用普通彩色相机获得的卡片彩色图像,以及采用原理样机获取部分区域的重建光谱曲线与商业光谱仪测得的标准

准参考光谱曲线对比。从图 8 可以看到,各波段的相对光谱强度偏差均值均约为 20.1%,这与标准积分球光源的光谱成像实验结果较为接近;重建获取两个区域的光谱具有比较明显的区别,而且重建光谱与商业光谱仪测得的标准参考光谱较为接近,验证了该光谱成像技术的可行性。

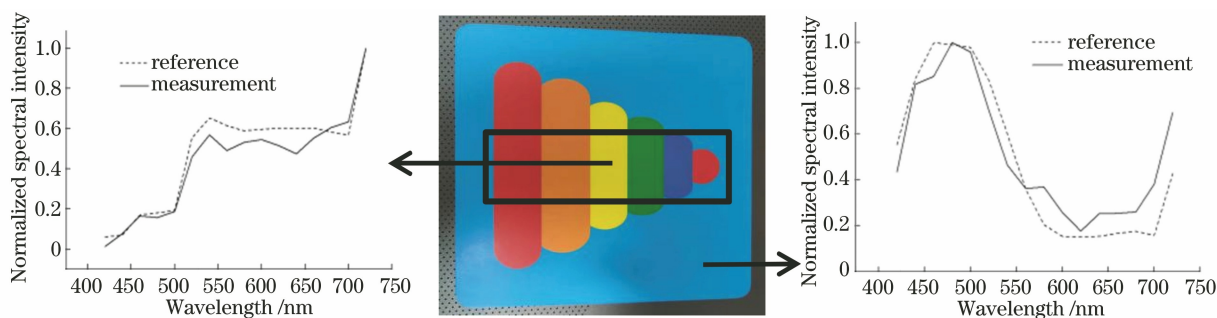


图 8 目标色卡的 RGB 图像与部分区域的重建光谱

Fig. 8 RGB image of target color card and reconstructed spectra of partial regions

图 9 为图 8 实线框内在两波段下的重建光谱图像。从图 9 可以看到,光谱图像的不同颜色区域边缘比较清晰,具有较好的空间分辨能力;但同时也可以看到,图像噪声极为明显;对各波段光谱图像的均匀区域进行信噪比分析,可知平均信噪比约为

23 dB,噪声很高。

系统噪声的主要产生原因:1)实验过程中未控制图像的曝光程度,由于原理样机每次曝光时间固定,而某些宽带滤光片所对应的系统总体透过率偏低,造成其对应的原始图像欠曝光,噪声偏大,而这

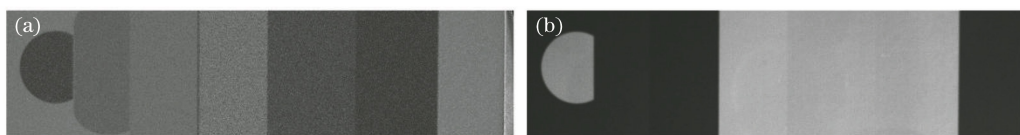


图 9 目标色卡部分在不同波段下重建的光谱图像。(a) 600 nm;(b) 720 nm

Fig. 9 Reconstructed spectral images of target color card in different bands. (a) 600 nm; (b) 720 nm

些噪声通过光谱重建过程最终也传递到了重建光谱图像中;2)原理样机系统未设置遮光罩,而且多色卡成像实验并非在较好的暗场环境中进行,造成系统中的杂散光较为严重,影响了最终获取的光谱图像质量。

## 4 结 论

基于宽带滤波调制的计算光谱成像技术具有光通量高、结构简单以及适合高分辨率应用等优势,因此在航空航天高光谱成像遥感技术领域有着很大的应用潜力。然而,目前有关该技术的主要研究方向是基于各种新型光谱滤波器件的光谱仪小型化,鲜有针对空间光谱成像遥感工程应用的相关实验研究报道。因此,本文针对宽带滤波调制光谱成像技术应用于空间光学遥感技术的可行性开展实验研究。首先介绍基于宽带滤波调制的光谱成像技术的原理;然后基于有色光学玻璃滤光片搭建原理验证样机,并利用其对标准光源与常规反射目标进行成像,用来分析研究该技术的性能。实验结果表明,采用基于有色玻璃宽带滤光片搭建的原理样机能够完成光谱成像的功能。对标准积分球光源成像的光谱准确度进行重建的实验结果表明,获取的测量光谱准确度约为 23%,相比于实验过程的不确定度,光谱重建计算将输入不确定度放大了约 2 倍。对实际反射体目标进行光谱成像的实验结果表明,获取的光谱图像各像素重建光谱准确度约为 20.1%,而且光谱图像边缘较为清晰,对目标颜色具有较好的分辨能力,但图像的信噪比较低,平均信噪比约为 23 dB。

本文从实验角度验证了宽带滤波调制光谱成像技术应用于实际光谱成像遥感领域的可行性,搭建原理样机并分析研究其测量精度,指出影响光谱图像性能的一些主要因素,为后续推扫型光谱成像仪器的研制奠定了基础。

## 参 考 文 献

- [1] Maathuis B H P, Genderen J L V. A review of satellite and airborne sensors for remote sensing based detection of minefields and landmines [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25 (23): 5201-5245.
- [2] Zhang Q Y, Middleton E M, Cheng Y B, et al. Integrating chlorophyll fAPAR and nadir photochemical reflectance index from EO-1/Hyperion to predict cornfield daily gross primary production [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 311-321.
- [3] Xue Q S, Tian Z T, Hao X J, et al. Snapshot hyperspectral analysis of spilled oil thickness based on wavelet analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (17): 1730001.  
薛庆生, 田中天, 郝锡杰, 等. 基于小波分析的快照式高光谱海面溢油厚度分析 [J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1730001.
- [4] Yang F Z, Chen X H, Zhao Z C, et al. Visible-infrared imaging spectrometer for the exploration of asteroids [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (7): 0722002.  
杨福臻, 陈新华, 赵知诚, 等. 面向小行星探测的可见-红外光谱成像光学系统 [J]. *光学学报*, 2020, 40 (7): 0722002.
- [5] Zhang C M, Mu T K, Yan T Y, et al. Overview of hyperspectral remote sensing technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39 (3): 104-114.  
张淳民, 穆廷魁, 颜廷昱, 等. 高光谱遥感技术发展展望 [J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(3): 104-114.
- [6] Xiangli B, Lü Q B, Cai Q S, et al. Fourier transform imaging spectroscopy [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(10): 1462-1474.  
相里斌, 吕群波, 才啟胜, 等. Fourier 变换成像光谱技术 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(10): 1462-1474.
- [7] Chang C C, Lee H N. On the estimation of target spectrum for filter-array based spectrometers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1056-1061.
- [8] Chang C C, Lin N T, Kurokawa U, et al. Spectrum reconstruction for filter-array spectrum sensor from sparse template selection [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 114402.
- [9] Oliver J, Lee W, Park S, et al. Improving resolution

- of miniature spectrometers by exploiting sparse nature of signals[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2613-2625.
- [10] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer[J]. *Nature*, 2015, 523(7558): 67-70.
- [11] Craig B, Shrestha V R, Meng J, et al. Experimental demonstration of infrared spectral reconstruction using plasmonic metasurfaces [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4481-4484.
- [12] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1020.
- [13] Wang Y J, Zhou J S, Wei L D, et al. Reconstruction simulation with quantum dots spectral imaging technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 869-876.
- 王英俊, 周锦松, 魏立冬, 等. 量子点光谱成像技术与重建仿真 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(3): 869-876.
- [14] Wu X L, Gao D H, Chen Q, et al. Multispectral imaging via nanostructured random broadband filtering [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 4859-4875.
- [15] Wang D, Chen Z, Zhang X X, et al. A high optical throughput spectral imaging technique using broadband filters [J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4387.