

# 基于 AOTF 的光谱响应可编程成像光谱系统关键技术

刘济帆, 马艳华, 张雷, 舒嵘\*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 基于声光可调谐滤波器(Acousto-Optical Tunable Filter, AOTF)的多频工作模式,提出了一种成像光谱系统光谱响应可编程的技术.阐述了该技术的原理方法,介绍了光谱可编程的测试结果,包括对滤光波长、光谱分辨率及滤波通带形状的软件控制.在此基础上,研制了一套光谱可编程成像光谱系统的原理样机并进行了初步的成像实验.通过实验结果证明了该技术的工程可行性和技术优势,为提高成像光谱系统的效率和灵活性提供了一种新的途径.

**关键词:** AOTF; 成像光谱系统; 光谱可编程; 光谱分辨率

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

## Key techniques for spectrally programmable imaging spectrometer based on AOTF

LIU Ji-Fan, MA Yan-Hua, ZHANG Lei, SHU Rong\*

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

**Abstract:** Based on the multi-frequencies mode of Acousto-Optical Tunable Filter (AOTF), the technique of spectral programmability for imaging spectrometer has been proposed. The principles of this technique were presented, and the test results of spectral programmability were introduced, including controls on the filtered wavelength, spectral resolution and passband shape of AOTF via software. Then a prototype system of spectrally programmable imaging spectrometer was established. Primary imaging experiments was carried out to validate the engineering feasibility and technical advantages of the technique. A novel method was provided for increasing the efficiency and flexibility of imaging spectrometers.

**Key words:** AOTF; hyperspectral imaging system; spectrally programmable; spectral resolution

**PACS:** 07.07.Df

## 引言

现有绝大部分成像光谱系统只能按照固定的波段序列和光谱分辨率进行光谱扫描,没有考虑不同目标的光谱特征以及不同波段对光谱分辨率的不同需求.特别是在光谱分辨率不断提高的情况下,很容易造成原始数据量巨大、冗余度高、数据效率低等问题,给数据的压缩、传输、存储和处理都带来不便,即高光谱成像中的“维数灾难”问题.此外,光谱分辨率与系统复杂度、图像信噪比、积分时间等参数之间

存在着相互矛盾的关系,在所有的波段一味追求高光谱分辨率往往会影响到其它性能指标,达不到系统效能的最优化.因此,随着成像光谱技术的发展,越来越希望仪器的光谱响应能够实现可编程,以满足不同的应用需求.

目前,国内外对应用于成像光谱系统的光谱可编程技术均进行了相关研究,主要形成了两条技术路线.第一种方法是采用面阵探测器选择性读出及信号累加技术,具体的像元选择及信号累加电路可以有多种实现方式.例如,中国科学院上海技术物理

收稿日期:2012-06-08,修回日期:2013-02-08

基金项目:国家重点基础研究发展973计划(2009CB723902)

Foundation items: Supported by the National Basic Research 973 Program of China (2009CB723902)

作者简介(Biography): 刘济帆(1985-),男,安徽庐江人,博士研究生,主要从事成像光谱技术研究. EMAIL: liujifan@sina.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: shurong@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2012-06-08, revised date: 2013-02-08

研究所王建宇等给出了模拟迭加和数字迭加两种方案<sup>[1]</sup>;北京空间机电研究所忻刚等设计了一种以数据挑选逻辑单元为核心的波段可编程数据采集系统<sup>[2]</sup>.目前,投入使用的光谱可编程成像光谱系统主要采用这种方法,如加拿大的紧密型机载成像光谱仪(Compact Airborne Spectrographic Imager, CASI)<sup>[3]</sup>、欧洲航天局的紧密型高分辨率成像光谱仪(Compact High Resolution Imaging Spectrometer, CHRIS)<sup>[4]</sup>和中分辨率成像光谱仪(Medium Resolution Imaging Spectrometer, MERIS)<sup>[5]</sup>等.但是,这种方法在原理上类似于通过软件方法实现的波段挑选和累加,本质上只是在系统原有响应的基础上对信号进行重新组合,因此受到了诸多限制.另一种方法为采用电控可调谐滤光器,该方法直接对入射光信号进行编程选择,因此具有更大的灵活性,理论上可以实现波段数、波段位置、波段带宽、输出顺序的任意配置.电控可调谐滤光器主要包括声光可调谐滤波器(Acousto-Optical Tunable Filter, AOTF)和液晶可调谐滤光片(Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF).比较而言,AOTF具有更好的可调性、灵活性、可靠性和环境适应性,并具有更高的光学效率及更快的调谐速度,因此更加适合于成像光谱技术中的应用.俄罗斯科学仪器公司的 Boris S. Gurevich 等提出了电控调节 AOTF 滤光带宽的两种方法<sup>[6]</sup>;西班牙巴伦西亚大学 Joan Vila-Francés 等提出了另一种基于扫频技术的 AOTF 带宽控制方案<sup>[7]</sup>;美国华盛顿大学的 Hayden Smith 等研究了基于光谱可编程技术的光学差分成像法在行星观测中的应用<sup>[8]</sup>;美国陆军实验室进行过 AOTF 多波段合成采集实验,并分析了该技术在快速目标识别中的应用前景<sup>[9]</sup>.

总体来说,基于 AOTF 的光谱可编程成像光谱系统目前还处于研究起步阶段,相关研究仍然集中在关键技术攻关及原理验证系统的研制,目前国内外还鲜有成功的工程化应用案例.因此,研究基于 AOTF 的光谱可编程成像光谱系统具有重要的理论意义和应用价值.

## 1 AOTF 及多频声光效应

AOTF 基于声光效应的原理,当一束复色光通过一个高频振动的具有光学弹性的晶体时,某一波长的单色光将会在晶体内部产生衍射,以一定角度从晶体中透射出来.当晶体振动频率改变时,衍射单色光的波长也相应改变.实际应用中,通过固定在晶体表面的压电换能器将射频驱动信号转换为晶体内

部的超声波.

AOTF 主要分为共线型 AOTF 和非共线型 AOTF,由于非共线型 AOTF 具有较大的口径和视场角,同时衍射光和未衍射光有一定的分离角,在空间上实现了分离,因此更适用于成像光谱技术.在非共线型 AOTF 中,入射光进入晶体后被分解为正交偏振的两束光,按两种模式传播.一种模式,折射系数与传播方向有关,称为 e 光;另一种模式,折射系数与传播方向无关,称为 o 光,如图 1 所示.

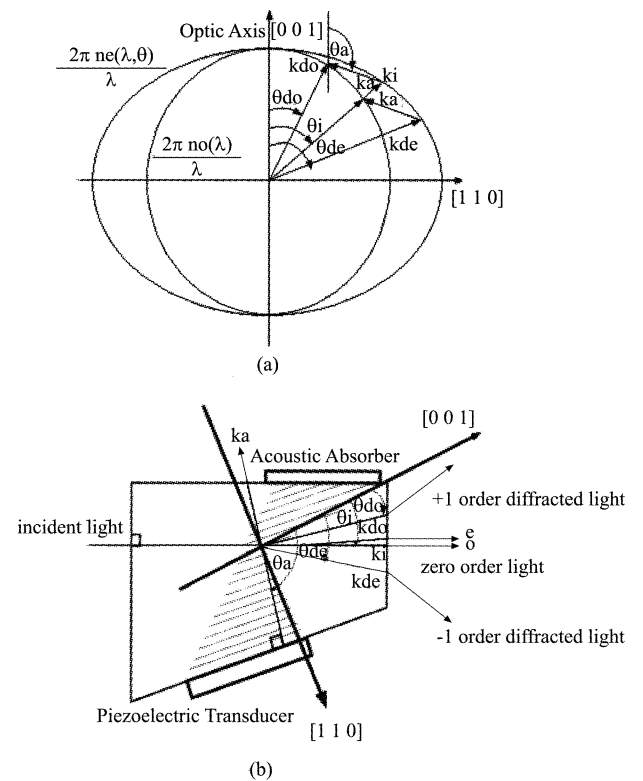


图 1 非共线型 AOTF 工作原理

Fig. 1 Working principles of a non-collinear AOTF

图 1 中,入射光为一束准直复色光, $k_a$  为超声波矢量.入射光中与  $k_a$  满足动量匹配条件的特定波长的光波矢  $k_{ie}$  和  $k_{io}$  将按式(1)分别与  $k_a$  发生耦合,形成衍射光  $k_{do}$  和  $k_{de}$ <sup>[10]</sup>.耦合过程中,入射光的偏振状态发生了改变,入射 e 光衍射后变成了 o 光,入射 o 光衍射后变成了 e 光.

$$k_i \pm k_a = k_d \quad (1)$$

当 AOTF 加工完成后,衍射波长仅受射频驱动频率的控制,改变射频驱动频率即可得到对应的衍射波长.衍射波长的切换速度由超声波在晶体内的渡越时间决定,一般为  $\mu\text{s}$  量级.因此,AOTF 可以实现电控、快速的光谱扫描,无需任何机械扫描结构.

AOTF 中的多频声光效应类似于多功能声光器件,已得到了广泛的实验证实<sup>[6-9]</sup>. 对 AOTF 同时施加  $n$  个不同的驱动频率  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , 将在晶体内部产生  $n$  个不同大小的超声波矢量  $k_{am}$  ( $m = 1, \dots, n$ ). 理论上,入射光中应有  $n$  个满足动量匹配条件的光波矢  $k_{im}$  分别与  $k_{am}$  发生耦合,形成  $n$  个不同的衍射波长,如式(2)所示.

$$k_{im} \pm k_{am} = k_{dm} \quad m = 1, \dots, n \quad (2)$$

事实上,由于 Bragg 带宽的存在,各驱动频率对应的衍射光并不是单波长的光波矢,而是具有一定的衍射带宽,通常用全高半宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)表示,并且每一个衍射通带的光谱响应均符合式(3)的分布<sup>[11]</sup>:

$$\eta(\lambda) = \eta_0 \text{sinc}^2\left(0.886 \frac{\lambda - \lambda_0}{\text{FWHM}}\right) \quad (3)$$

式中,  $\lambda_0$  为衍射中心波长,  $\eta_0$  为峰值衍射效率. 在多频驱动模式下, AOTF 器件总的衍射光谱响应为:

$$\eta(\lambda) = \sum_{i=1}^n \eta_i(\lambda) \quad (4)$$

## 2 光谱可编程的实现原理

如果对 AOTF 同时施加的  $n$  个射频驱动频率频差很小,使各衍射中心波长的间隔小于 FWHM,则各衍射波段将发生部分重叠,合并为一个连续的、较宽的衍射波段. 图 2 为两波段合成的原理图, (a) 为射频驱动信号功率谱, (b) 为相应的衍射效率曲线. 按照这种方法,可以通过改变射频驱动频率的个数以及频差调整和控制 AOTF 器件总的响应带宽,即系统光谱分辨率.

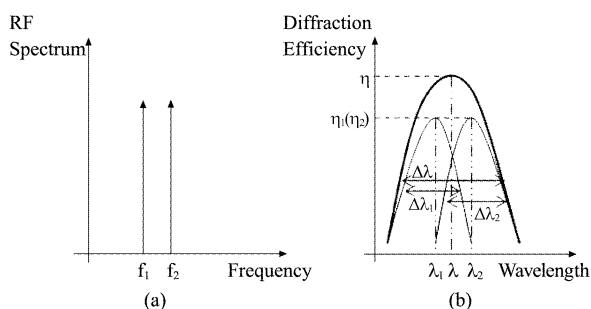


图 2 两波段合成 (a) 射频驱动信号功率谱 (b) 衍射效率曲线

Fig. 2 Spectrum of RF driving signal (a) and diffraction efficiency curve (b) for the combination of two bands

同时,各通带的衍射效率受到对应驱动频率的功率控制,而合成衍射通带的光谱响应形状由各通带的衍射效率及中心波长间隔决定. 因此,通过控制

各射频驱动频率的功率和频差,还可以实现 AOTF 衍射通带形状的调节和控制. 图 3、图 4 给出了通带形状控制的基本原理:对 AOTF 同时施加 5 个同样频率的驱动信号,通过不同的驱动功率配置,就可以分别得到矩形和高斯形的通带形状.

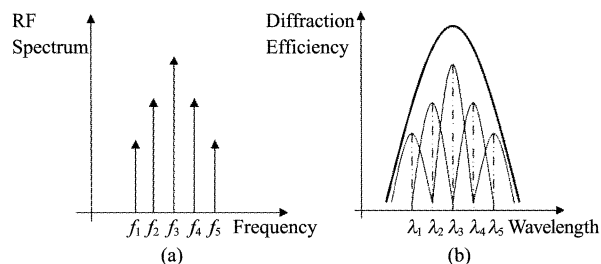


图 3 高斯形滤波通带 (a) 射频驱动信号功率谱 (b) 衍射效率曲线

Fig. 3 Gaussian-shape passband (a) Spectrum of RF driving signal (b) Diffraction efficiency curve

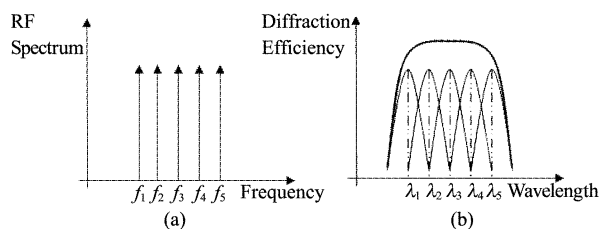


图 4 矩形滤波通带 (a) 射频驱动信号功率谱 (b) 衍射效率曲线

Fig. 4 Rectangular-shape passband (a) Spectrum of RF driving signal (b) Diffraction efficiency curve

## 3 实验结果分析

### 3.1 光谱可编程性能测试

图 5 和图 6 均为 700 nm 处三波段合成的情况. (a) ~ (c) 分别为单独施加一个驱动频率时的 AOTF 衍射曲线, (d) 为同时施加 3 个驱动频率时的 AOTF 衍射曲线. 通过波段合并,系统总的光谱带宽获得了展宽. 其中,图 5 的合成光谱近似为高斯形,图 6 的合成光谱近似为矩形. 虚线为按式(3)及式(4)计算得到的理论模型.

实验证明,矩形光谱合成可以获得更大的光谱分辨率调节范围. 同时,矩形合成光谱更接近理想的带通滤波器,有利于系统的定标、分析和信息传递建模. 图 7 为多频率驱动时,700 nm 波段光谱分辨率的变化. 施加的射频驱动频率数分别为 1 个、4 个、8 个、12 个.

更多的实验结果表明,在 AOTF 的大部分工作波段,都可以实现光谱分辨率 1 ~ 10 倍可调,并且通

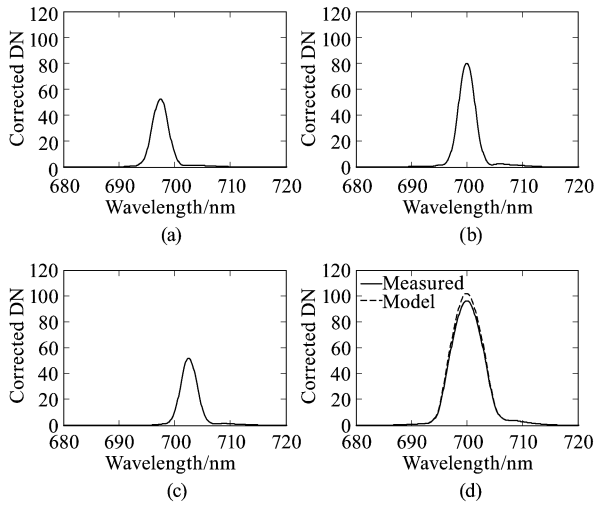


图5 高斯形光谱合成 (a) 衍射波段 1 (b) 衍射波段 2 (c) 衍射波段 3 (d) 合成衍射波段  
 Fig. 5 Gaussian-shape spectrum combination (a) Diffraction band1 (b) Diffraction band2 (c) Diffraction band3 (d) Combined diffraction band

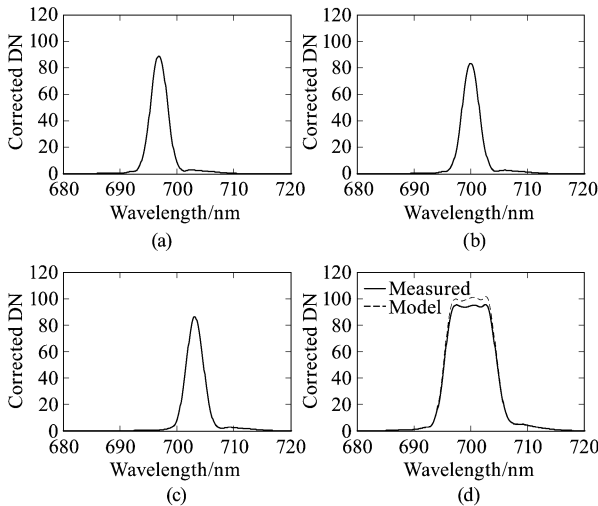


图6 矩形光谱合成 (a) 衍射波段 1 (b) 衍射波段 2 (c) 衍射波段 3 (d) 合成衍射波段  
 Fig. 6 Rectangular-shape spectrum combination (a) Diffraction band1 (b) Diffraction band2 (c) Diffraction band3 (d) Combined diffraction band

过调整各频点的相对功率大小,保证矩形光谱通带的平坦度优于 5%。表 1 为多频驱动模式下部分波段光谱分辨率的变化情况。

表 1 部分测试波段光谱分辨率变化情况  
 Table 1 Changes of diffraction bandwidths at different wavelengths

中心波长	单频驱动	4 频率驱动	8 频率驱动	12 频率驱动
700 nm	3.4 nm	12.6 nm	24.9 nm	36.6 nm
900 nm	8.1 nm	28.8 nm	57.0 nm	78.9 nm
1 100 nm	13.8 nm	48.7 nm	89.1 nm	121.5 nm

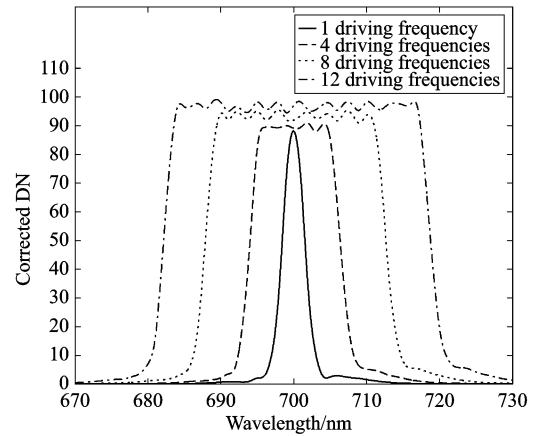


图 7 多频模式下 700nm 波段光谱分辨率的变化  
 Fig. 7 Different diffraction bandwidths at 700nm in multi-frequencies mode

需要指出的是,表 1 所列数据均为室温环境下 20 组测试结果的平均值。更详细的实验数据表明,在相近的温度环境下进行多次测量时,合成光谱通带带宽和衍射效率的变化率均低于 2%。因此,根据目前的实验结果,该技术在一定的环境条件下具有较好的可重复性和稳定性。

### 3.2 外场植被观测实验

在原理研究的基础上,本文还研制了基于 AOTF 的光谱可编程成像光谱系统的原理样机,样机工作于 500 ~ 900 nm 波段,最高光谱分辨率 3 ~ 8 nm,视场角约为 8.1° × 6.5°,有效像元数 1 000 × 800。外场成像实验的对象为成熟期的植物叶片,在样机工作光谱范围内,包含了“绿峰”、“红边”等重要的植被光谱特征。

#### 3.2.1 实验方法

实验时,要求太阳高度角大于 60°,天气为无云或少云并且大气状况良好。在这种情况下,系统完成全波段扫描的用时小于 2 分钟,包括积分时间、CCD 读出时间、数据存储时间,因此受太阳高度角及大气状况变化的影响较小。

在均匀稳定的光照条件下,可以认为探测器响应和地表反射率之间近似存在如下的线性关系:

$$R_i = A_i \cdot DN_i \quad (5)$$

式中,  $DN$  为图像灰度值,  $R$  为地物反射率,  $i$  为波段序号。实验采用植被、白板准同步观测的方法,即植被观测前、后各观测一次白板,白板的光谱反射率  $R$  为已知,将两次白板观测的平均值代入式(5),分波段逐像素地求解  $A_i(m, n)$ ,  $(m, n)$  为像元坐标。解算出各波段的线性系数  $A_i$  后,即可根据植被的观测值  $DN$  反演出植被反射率信息。

由于“绿峰”和“红边”波段包含了植被的重要光谱特征,且光谱曲线的一阶导数较大,因此应使用较高的光谱分辨率.而在 850nm 附近的近红外波段,大多数植被的反射光谱变化平缓,很少有重要的光谱细节,一般只需关注平均反射率的大小,因此不需要太高的光谱分辨率,较低的光谱分辨率不但可以提供同样有效的光谱信息,还可以提高图像信噪比、缩短数据采集时间、降低数据存储和处理的压力.

在植被观测实验中,采用了 4 种不同的光谱扫描模式,区别在于 850 nm 波段的光谱分辨率以及近红外区间的扫描波长序列不同,如表 2 所示.从模式 A 到模式 D,850 nm 波段的带宽逐步增大,相应的近红外区间的扫描波段数逐步减少.

表 2 植被观测中的四种光谱扫描模式

Table 2 Four spectral scan modes in the observation of vegetation

模式	850 nm 波段带宽	820 ~ 880 nm 光谱区间的扫描波段数
A	6.1 nm	13
B	22.1 nm	9
C	43.2 nm	5
D	62.0 nm	1

### 3.2.2 实验结果

按照表 2 所示的 4 种模式分别对系统进行光谱响应配置和成像光谱扫描.选择部分叶面区域(图 8),对不同扫描模式下得到的植被反射光谱进行分析,如图 9(a)~(d)所示.由图可知,当 850 nm 波段的光谱分辨率降低时,对“绿峰”、“红边”、近红外平均反射率等主要光谱特征的提取和分析没有产生任何不利影响.相反,由于系统在 850nm 以上的辐射响应能力较低,因此采用高光谱分辨率时近红外波段的光谱噪声较大(图 9(a)),而随着光谱分辨率的降低,光谱曲线变得更加平滑,并且图像信噪比也得到了提高.同时,在 850nm 波段采用较低的光谱分辨率缩短了光谱扫描时间,减少了原始数据量,降低了数据冗余,提高了成像光谱系统的效率.

## 4 结论

通过该研究,解决了基于 AOTF 的光谱可编程成像光谱系统的关键技术.与传统成像光谱方法相比,该技术具有光谱响应可编程的突出优势,包括滤光波长任意可选、光谱分辨率可调、滤光通带形状可调等.理论和实验结果证明,该技术有利于降低高光谱成像中原始数据的冗余度,提高成像光谱系统的

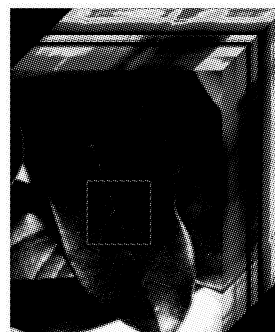


图 8 植被图像立方体  
Fig. 8 Image cube of vegetation

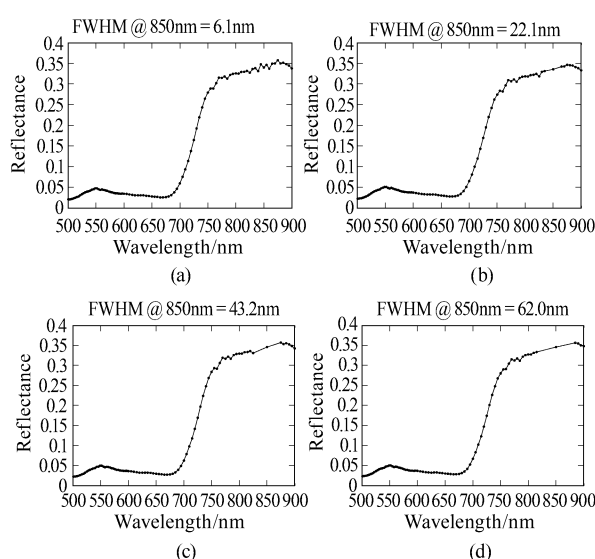


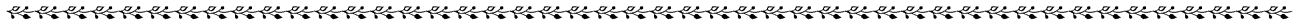
图 9 不同扫描模式下得到的植被反射光谱 (a)模式 A (b)模式 B (c)模式 C (d)模式 D  
Fig. 9 Reflectance spectra of vegetation collected by different scanning modes (a) Mode A (b) Mode B (c) Mode C (d) Mode D

工作效率和智能化水平,并具有良好的工程可行性,在地物调查、遥感辅助测量、深空探测、快速目标识别、光谱差分成像等领域具有重要的应用价值.该研究成果不但为实现成像光谱技术的智能化提供了理论和技术支撑,也为解决很多实际问题提供了一种途径.

目前,基于 AOTF 的成像光谱系统还普遍存在着一些亟待解决的问题,例如边缘波段光学效率较低、有效视场角较小等.此外,本文所介绍的光谱可编程技术增加了系统变量参数,给系统的量化带来一定困难.因此,下一步工作主要关注的内容包括:针对边缘波段采用增透设计,提高边缘波段的光学效率和成像信噪比;改善边缘视场渐晕,增大系统

(下转第 253 页)

- [3] Parish W J, Woolaway J T. Low Cost  $160 \times 128$  uncooled infrared sensor array[J]. *Proc. SPIE*, 1998, 3360: 111 - 119.
- [4] Fraenkel A, Mizrahi U, Bykov L, *et al.* Advanced features of SCD's uncooled detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2006, 14(1): 47 - 54.
- [5] Michael A. Dem'yanenko. Improved bias equalization method for suppression temperature-induced errors in microbolometer FPA over 20 K substrate temperature change [J], *Proc. SPIE*, 2007, 6542: 654222\_1- 654222\_9.
- [6] Parish W J. Microbolometer focal plane array methods and circuitry Methods and circuitry [P], United States Patent, 2004, NO. 6812465B2.



(上接 241 页)

的有效视场角;针对光谱响应可编程的特点,设计特殊的光谱定标和辐射定标方法,通过更加精确完善的定标测试提高系统的定量化水平。

### REFERENCES

- [1] WANG Jian-Yu, XUE Yong-Qi. Discussion about multi-spectral scanner with programmable spectral bands [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王建宇, 薛永祺. 光谱波段可编程多光谱扫描仪探讨. *红外与毫米波学报*), 1989, 8(4): 263 - 269.
- [2] XIN Gang, YU Yu-Ming. Study on data acquisition system of imaging spectrometer with programmable bands [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing* (忻刚, 于豫民. 成像光谱仪编程选择波段数据采集系统的研究. *航天返回与遥感*), 1997, 18(3): 24 - 27.
- [3] BABEY S K, ANGER C D. A compact airborne spectrographic imager (CASI) [C]. Proceedings of IGARSS 89 and Canadian Symposium on Remote Sensing Vol. 2, 1989: 1028 - 1031.
- [4] CUTTER MIKE A, LOBB DAN R. Design of the compact high-resolution IMAGING spectrometer (CHRIS), and future developments [C]. Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics, 2004: 41 - 47.
- [5] BEZY J L, DELWART S, RAST M. MERIS - A new generation of ocean-colour sensor onboard Envisat [R]. ESA, 2000, bulletin 103: 48 - 56.
- [6] BORIS S G, SERGEY V A, ANDREY V B, *et al.* Acousto-optic tunable filter with variable spectral selectivity [C]. Proc. of SPIE Vol. 5828, 2005: 53 - 59.
- [7] JOAN V F, EMILIO R G, CRISTINA I L, *et al.* Configurable-bandwidth imaging spectrometer based on an acousto-optic tunable filter [C]. Proc. of SPIE Vol. 5953, 2005: 1 - 12.
- [8] HAYDEN SMITH. Spectral differential imaging detection of planets about nearby stars [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 1987, 99: 1344 - 1353.
- [9] GUPTA N, DALNNARN R. Multispectral and hyperspectral imaging with AOTF for object recognition [C]. Proc. of SPIE Vol. 3584, 1999: 128 - 135.
- [10] GEORGIEV G, GLENAR D A, HILLMAN J J. Spectral characterization of acousto-optic filters used in imaging spectroscopy [J]. *Applied optics*, 2002, 41(1): 209 - 217.
- [11] GLENAR D A, HILLMAN J J, SAIF B, *et al.* Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(31): 7412 - 7424.