

线性渐变滤光片型多光谱成像光谱仪设计

王颖^{1,2} 巩岩¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计了一种基于线性渐变滤光片(LVF)的多光谱成像光谱仪。针对工作波段为600~1100 nm的LVF,设计了一个宽光谱扫描型LVF多光谱成像光谱仪的成像物镜,总长不超过85 mm,畸变小于0.01%,全视场各波段Nyquist频率下调制传递函数优于0.7,空间角分辨率可达1.02'。该多光谱成像光谱仪可以通过扫描和图像重构获得目标的准单色图像以及反射光谱。实验结果表明,该多光谱成像光谱仪的光谱分辨率与LVF的光谱带宽相匹配,在600 nm处光谱分辨率可达9 nm。通过番茄成熟度辨别实验,验证了该多光谱成像光谱仪的成像性能。

关键词 光谱学; 多光谱成像光谱仪; 光学设计; 线性渐变滤光片

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.013003

Design of Multispectral Imaging Spectrometer Using Linear Variable Filter

Wang Ying^{1,2} Gong Yan¹

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract Based on the linear variable filter (LVF), a compact multispectral imaging spectrometer is designed. With a wide LVF working spectral range of 600~1100 nm, a wide spectral range scanning multispectral imaging spectrometer objective is designed, and the total length of the objective is shorter than 85 mm; its distortion is less than 0.01%; the modulation transfer function is better than 0.7 for the various wavebands in full field of view at the Nyquist frequency; the spatial angular resolution reaches 1.02'. The device can get a quasi-monochromatic image and the reflectance spectra of the target by scanning and image reconstruction. The experimental results show that the spectral resolution matches the spectral bandwidth of the LVF, indicating the resolution of 9 nm at 600 nm. By the tomato maturity identification experiments, the imaging performance of the spectrometer is verified.

Key words spectroscopy; multispectral imaging spectrometer; optical design; linear variable filter

OCIS codes 300.6180; 120.4820; 220.4830

1 引言

成像光谱技术将光谱技术与光学成像技术相结合,同时获取一维光谱信息与二维空间信息,在地面测绘、地质分析、目标识别、矿产勘探、自然灾害预警、医疗等方面有着广泛应用,是光学探测技术中的重要组成部分^[1-6]。

多光谱成像技术按照分光方式的不同,可以分为色散型、干涉型和滤光片型等^[7-8]。色散型成像光谱技术主要通过棱镜或光栅分光,再由成像系统将其成像在探测器上,干涉型成像光谱技术通过干涉仪探测目标的干涉图并利用傅里叶变换计算获得光谱信息^[9-12],滤光片型成像光谱技术是在成像系统中加入滤光片分光,与其相比色散型和干涉型成像光谱技术结构较复杂。滤光片型成像光谱技术可细分为多相机加滤光片

收稿日期: 2015-05-28; 收到修改稿日期: 2015-08-15; 网络出版日期: 2015-11-13

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20140203001GX)

作者简介: 王颖(1989—),女,硕士研究生,主要从事光学系统设计和成像光谱技术方面的研究。

E-mail: wyldm1314@163.com

导师简介: 巩岩(1968—),男,博士,研究员,主要从事短波光学、光学系统设计和成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: gongy@sklao.ac.cn

式、单相机加滤光片轮式、单面阵 CCD 加滤光片式等, 前两者由于多相机和滤光片轮的布置, 增加了整体系统的质量和体积。由文献[13]可知, 现有线性渐变滤光片(LVF)成像光谱仪光谱分辨率在 400~700 nm 工作波段可达 16 nm, 空间分辨率为 5.64'。但随着镀膜工艺的进步, 线性渐变滤光片的线性渐变系数逐渐提高, 光谱带宽减小, 从而使此类型光谱仪的光谱分辨率达不到线性渐变滤光片的光谱带宽。传统结构在提高光谱分辨率方面存在弊端。

本文选择 LVF 作为分光元件, 提出了减小光谱混叠、提高分辨率的新结构, 并基于此设计了多光谱成像光谱仪的成像物镜, 实验证明该 LVF 多光谱成像光谱仪充分利用 LVF 的光谱分辨率, 与同类型的多光谱成像光谱仪相比具有更高的空间分辨率和光谱分辨率。

2 LVF 多光谱成像系统设计

2.1 系统结构与原理

多光谱成像光谱仪由成像物镜, CCD 探测器以及分光元件构成, 其中分光元件采用 LVF, 将其置于物镜与探测器之间, 贴近探测靶处, 系统结构如图 1(a)所示, 目标经过物镜成像于 CCD 探测器处, 被 LVF 按波长分光得到目标的不同谱段信息, 通过扫描建立空间和光谱的三维数据立方。

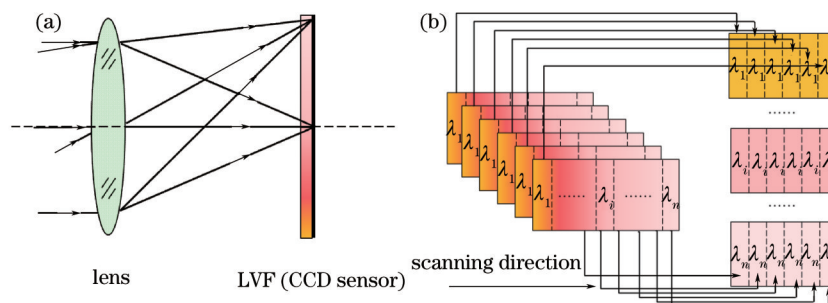


图 1 (a) LVF 多光谱成像技术系统图; (b) LVF 多光谱扫描成像原理图

Fig.1 (a) Schematic of multispectral imaging system using LVF; (b) principle of scanning imaging using LVF

图 1(b)为多光谱成像光谱仪的成像原理图, LVF 紧贴 CCD 探测器, CCD 的若干列像元对应 LVF 的某一光谱带, 则整个像面对应全部工作波段。每次拍摄能够获得目标的二维空间信息以及各视场对应的谱带信息。通过扫描(扫描方向与 LVF 渐变方向一致)获得目标的完整数据。最后通过数据处理可重构出该目标的准单色图像及其反射光谱。

光谱混叠是不同的谱段信息在探测靶上部分重叠的现象。CCD 上探测靶前保护玻璃的存在, 使 LVF 不能紧贴探测靶, 从而产生光谱混叠现象, 降低了光谱分辨率。图 2 为光谱混叠临界情况, 混叠区域大小 X 与 LVF 线性色散系数 L 、入瞳直径 D 、光谱带宽 $\Delta\lambda$ 、LVF 与 CCD 探测靶的距离 d 有关。

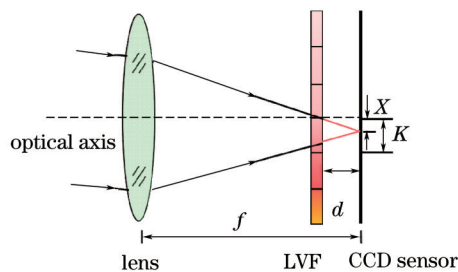


图 2 光谱混叠临界情况

Fig.2 Spectral aliasing

由图 2 几何关系可知

$$\frac{X}{D/2} = \frac{d}{f-d} \quad (1)$$

另外, 根据图像重构原则, 混叠区域不能超过每个谱带占据空间尺寸的一半, 即

$$X < \frac{\Delta\lambda}{2L} \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可得

$$d < F^{\#} \cdot K, \quad (3)$$

式中 $K = \Delta\lambda/L$, 表示滤光片上一个谱带占据的空间尺寸, 在光谱范围一定的情况下, K 值越小则光谱通道数越多, 对应的多光谱成像光谱仪分辨率越高。为达到与 LVF 带宽相匹配的光谱分辨率, 要求距离 d 小于 $F^{\#}$ 与 K 的乘积。采用文献[14]中提到的 LVF 数据, K 可达 0.016 mm, 则 d 为亚毫米量级, 实现难度较大。

如上分析, 传统光谱仪中, 由于滤光片和 CCD 之间距离 d 的存在, 将物 AB 成像于 CCD 的光束必然穿过滤光片的不同光谱区域, 导致光谱混叠的出现。为解决这一问题, 提出在光路中引入 $-1\times$ 中继镜, 置于滤光片和 CCD 之间, 如图 3 所示, 物面 AB 经过前物镜第一次成像于滤光片上, 再经过中继镜的二次成像作用, 成像于 CCD, 信息被采集和处理。此方案避免了距离 d 的困扰, 理论上完全不会有光谱混叠, 从而提高系统的光谱分辨本领。

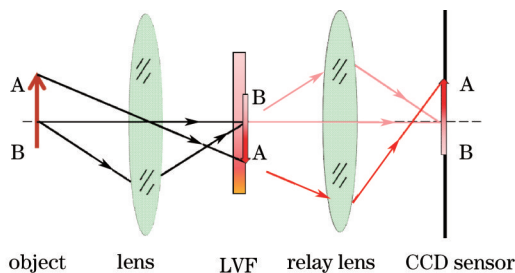


图 3 LVF 多光谱成像光谱仪新结构

Fig.3 New structure of multispectral imaging spectrometer

2.2 系统参数

不同于一般单色滤光片, LVF 的中心波长与位置成线性关系^[14], 是一种快速分光器件, 文中采用波长范围为 600~1100 nm 的线性渐变滤光片, 实物如图 4(a) 所示。图中彩色条纹部分为线性渐变区, 对应到二维空间为横坐标 0~20 mm, 纵坐标 58~44 mm 的区域, 由上向下对应透射波长范围为 600~1100 nm, 线性色散系数为 35.9 nm/mm。分别测量几个波长处的透射率, 以波长为横坐标、透射率为纵坐标绘制成图 4(b), 每个波带带宽为中心波长的 1.5%, 且中心波长的透射率均优于 60%。

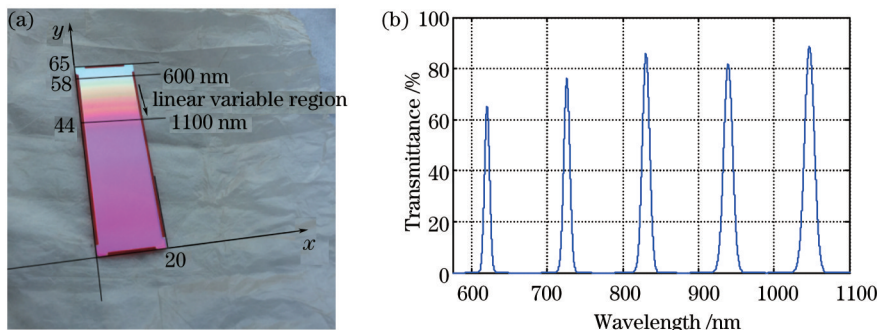


图 4 (a) 线性渐变滤光片; (b) 线性渐变滤光片透射率

Fig.4 (a) LVF; (b) transmittance of LVF

为与 LVF 相匹配, 选择尺寸为 4/3 inch (1 inch=2.54 cm) 的 CCD, 像面尺寸为 18 mm×13.5 mm, 像素尺寸为 14 μm×14 μm, 2×2 像素合并使用。结合 LVF 特性, 光谱仪主要技术指标如表 1 所示^[15]。

表 1 LVF 多光谱成像光谱仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of LVF multispectral imaging spectrometer optical system

Parameter	Value
Spectral range /nm	600~1100
Spatial resolution	1.02'
Spectral resolution /nm	9 (at 600 nm)
Overall length /nm	<150

2.3 物镜设计

为保证数据处理的精确性, 系统采集的图像需要有足够的信噪比。信噪比定义为目标辐射产生的信号电

子数与总随机噪声电子数的比值,成像光谱仪像面上单个像素接收到波长为 λ 的光辐射所产生的电子数为^[16]

$$N_e = \frac{\pi}{4} \frac{\Gamma(\lambda)L(\lambda)T_{\text{int}}A\Delta\lambda}{h\nu\eta(F^\#)^2}, \quad (4)$$

式中 $\Gamma(\lambda)$ 为系统的总透射率, $L(\lambda)$ 为物体表面漫反射亮度, $F^\#$ 为系统 F 数, T_{int} 为探测器积分时间, A 为单个像素面积, h 为普朗克常量, η 为探测器的量子效率, $\Delta\lambda$ 为通带带宽(以 600 nm 为例,则 $\Delta\lambda$ 为 9 nm)。经估算,当信噪比为 12 时足以保证系统采集图像的精确性,此时 $F^\#=2.0$ 。为满足小型化、结构紧凑的要求,取焦距为 50 mm,确定光学系统的各个光学参数如表 2 所示。

表 2 光学系统参数

Table 2 Optical parameters

Parameter	Value
Spectral range /nm	600~1100
Field of view /($^\circ$)	25.64
Focal length /mm	50
F number	2.0
Pixel size / μm	6.45
CCD size	4/3'

因多光谱成像光谱仪谱段较宽,不但要满足一般的消色差要求,还要校正二级光谱。综合上述参数,选择 Orthometar 与双高斯结构相结合作为镜头的初始结构,用光学设计软件 Code V 进行优化设计,图 5 是经优化后得到的光学系统设计结果,物镜总长为 84 mm,全视场各波段 Nyquist 频率下调制传递函数(MTF)优于 0.7,点列图均方根(RMS)半径小于 1 pixel,畸变小于 0.01%。

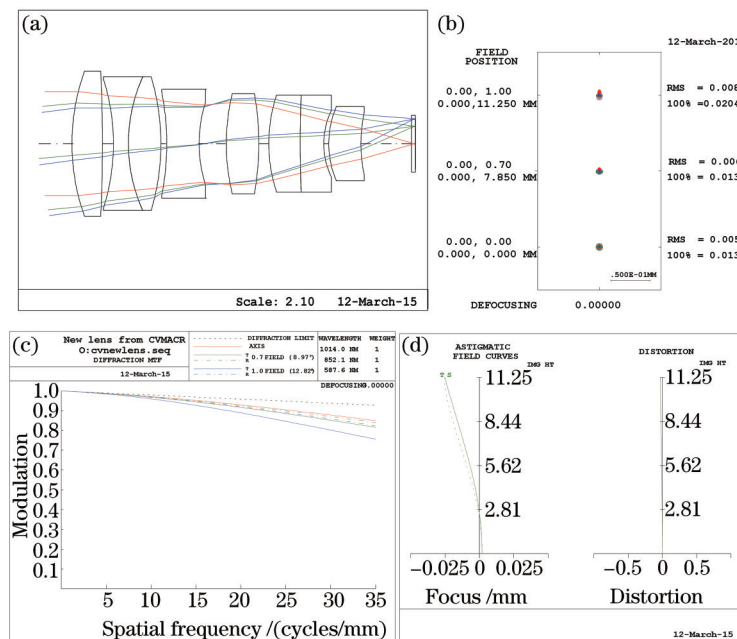


图 5 系统光学结构与性能

Fig.5 Optical structure and performance

通过查阅成都光明玻璃库在 600~1100 nm 波长范围内 10 mm 样品的透射率参数,全波段在所有材料上透射率均在 0.994 以上,而 9 块透镜的厚度均在 10 mm 以下,所有波段透射率均优于 0.994,系统整体(9 块透镜)透射率大于 94%,能够保证足够的光强信息被 CCD 接收。光学系统结构采用透射形式,使用 9 个球面透镜,通过公差分析确定加工难度低,便于装调。

3 实验及结果分析

3.1 谱线弯曲与分辨率

受实验条件的限制,选择现有 CCD 相机进行实验,CCD 选用 IMI 公司的 IMx-7018G CCD,像素大小为

6.45 μm , 像素数为 1388×1040 , 采用 2×2 像素合并模式, 可用面积为 $8.93 \text{ mm} \times 6.66 \text{ mm}$ 。物镜由作者自主设计并完成加工和装配, 中继镜选择 $1 \times$ 成像物镜, LVF 采用图 4(a) 所示滤光片, 搭建图 6 所示光路, 由于 CCD 探测靶面积小于 LVF 面积, 因此可以分两个波段测量, 最后通过图像拼接得到完整的光谱图像。

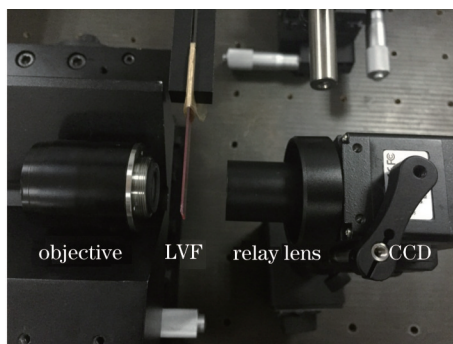


图 6 实验装置实物图

Fig. 6 Photograph of the experimental device

在暗室条件下, 用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器测定谱线弯曲情况, 结果如图 7 所示。

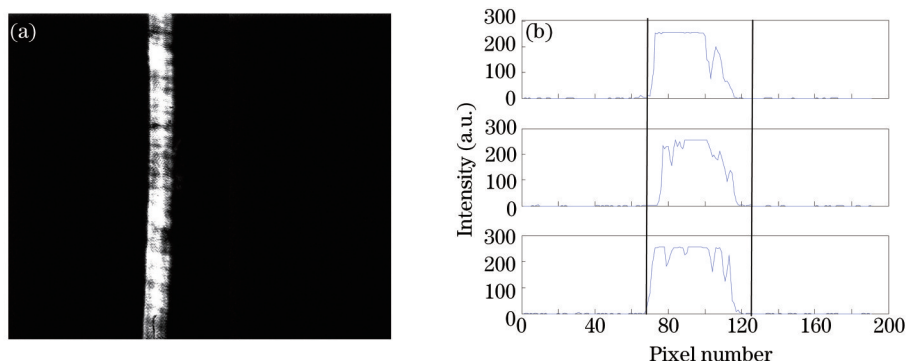


图 7 谱线弯曲情况

Fig.7 Spectral curvature of LVF

图 7(a) 为激光器经扩束后照到 CCD 相机上的准单色图像, 图中亮条纹表示 632.8 nm 的谱线, 由此看出该多光谱成像光谱仪存在一定的谱线弯曲; 图 7(b) 是对图 7(a) 进行数据提取后获得的, 选择图像矩阵的 400~600 列, 第 100, 500, 900 行的灰度值进行作图, 横坐标代表像素数, 纵坐标代表对应的灰度值。由图 7(b) 可知, 存在 5 pixel 的谱线弯曲, 多光谱成像光谱仪的光谱分辨率为各谱段带宽, 即谱线透射率半峰全宽 (FWHM)^[17], 计算得到 632.8 nm 处光谱分辨率为 9.5 nm 。为消除谱线弯曲的影响, 在图像重构时可以选取谱段中心部分的像素数据, 即以图 7(b) 中 80~94 的 15 pixel 作为 632.8 nm 波段的成像区域来重构图像。

用具有特征谱线的高压汞灯作为光源, 测量多光谱成像光谱仪的光谱分辨率, 通过测量得到汞灯的光谱特征曲线如图 8 所示, 横坐标为波长, 纵坐标为灰度值。由图 8 可知, 汞灯在 672 nm 和 691 nm 处存在两个特征峰, 其距离大于该光谱仪的分辨率, 因此可以分辨。 672 nm 处的 FWHM 为 10.2 nm , 691 nm 处的 FWHM 为 10.5 nm , 综合上述三个波段, 可知多光谱成像光谱仪的分辨率接近中心波长的 1.5%, 600 nm 处光

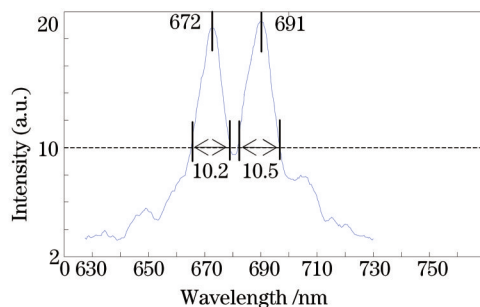


图 8 汞灯部分光谱图

Fig.8 Spectra of Hg lamp measured by imaging spectrometer

谱分辨率可达 9 nm, 1100 nm 处光谱分辨率为 16.5 nm。

光谱仪空间角分辨率定义为

$$R = \frac{l}{d}, \quad (5)$$

式中 R 为空间角分辨率, l 为刚好可分辨的物体空间几何长度, d 为物距。为获取光谱仪的空间分辨本领, 以白纸上距离 0.5 mm 的黑色条纹为参考物, 沿光轴移动参考物, 当置于镜头前 1.3 m 处时, CCD 上刚好可以分辨, 计算可得光谱仪的空间角分辨率为 0.022° , 即为 $1.2'$ 。

3.2 成像实例

使用步进电机驱动该成像光谱仪, 对成熟程度不同的三个番茄进行扫描成像, 得到一系列光谱图像, 再经过重构即得到各个波段的准单色图像以及不同位置的光谱图像。图 9 为番茄的实物图以及多光谱成像光谱仪测得的三个不同位置的光谱曲线。图 9(b) 是选取图 9(a) 中 A, B, C 三个位置, 以波长为横坐标, 灰度值为纵坐标的反射光谱图, 可以看出在 C 点的反射光中 650 nm 左右光谱较少, 由于在果实的成熟过程中, 叶绿素酶的含量逐渐增多, 叶绿素被分解而含量减少, 叶绿素的吸收光谱波段为 640~660 nm^[17-18]。C 点在 650 nm 处反射光较少, 说明叶绿素含量高, 叶绿素酶含量低, 因此可以判定 C 点不够成熟。

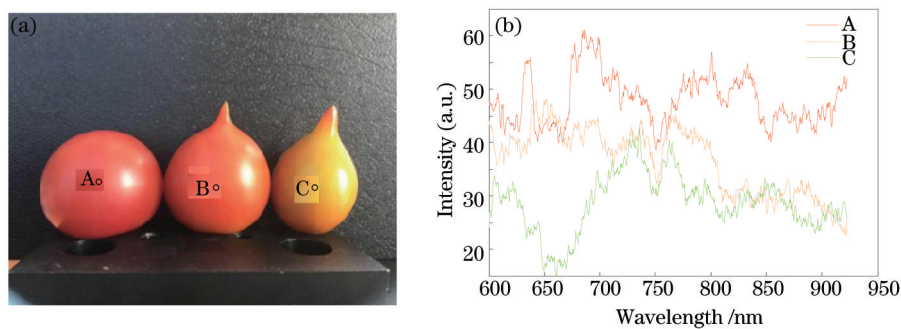


图 9 (a) 番茄实物图; (b) 三个不同位置的反射光谱

Fig.9 (a) Photograph of tomatoes; (b) reflectance spectra at three positions

图 10(a) 所示为重构出的波长为 650 nm 的准单色图像, 为了更明显地分辨出未成熟的番茄, 以图 10(a) 各点减去一定灰度值, 并转化为三维灰度图, 即得图 10(b)。

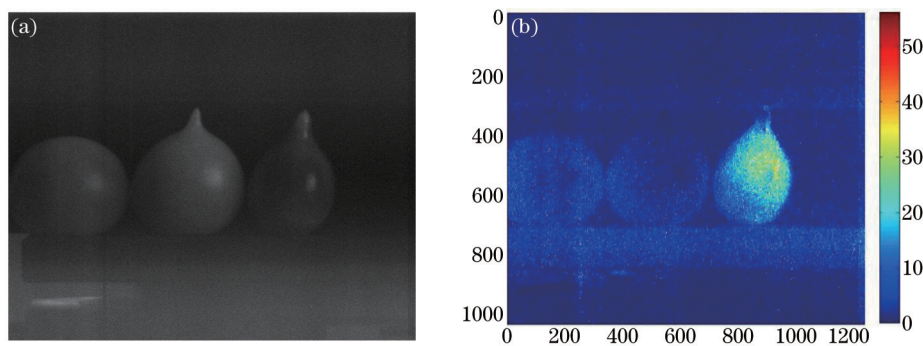


图 10 (a) 650 nm 处番茄单色图; (b) 处理后的三维灰度图

Fig.10 (a) Monochromatic image at 650 nm; (b) three-dimensional gray image after processing

图 10(b) 中的高亮部分为不成熟番茄, 与实物图对比, 结果一致。若设定高亮部分大于某一数值时, 即可筛选出不成熟水果, 该多光谱成像光谱仪可应用于自动化果实成熟度辨别。

4 结 论

LVF 型多光谱成像光谱仪具有结构紧凑、简单, 易于标定等优点^[19-20], 分析了 LVF 与 CCD 探测靶间距离 d 导致的光谱混叠问题, 提出解决光谱混叠、提高光谱分辨率的新结构, 并设计了一个宽光谱、窄线宽, 可用于果实成熟度检验的多光谱成像光谱仪, 与现有同类型 LVF 多光谱成像光谱仪相比具有空间和光谱分辨率高等优点。实验结果表明, 该多光谱成像光谱仪的空间角分辨率为 $1.2'$, 光谱分辨率在 600 nm 处可达 9 nm, 并能够准确辨识不成熟果实。

参考文献

- 1 N Gata, S Subramaniana, S Rossa, *et al.*. Thermal infrared imaging spectrometer (TIRIS) status report[C]. SPIE, 1997, 3061: 284–291.
- 2 J G P W Clevers. The use of imaging spectrometry for agricultural applications[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(5): 299–304.
- 3 Li Youping, Yu Bingxi, Han Changyuan. Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 974–979.
李幼平, 禹秉熙, 韩昌元. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 974–979.
- 4 Yang Tao, Xu Chao, Zhou Xinhui, *et al.*. Design and simulation of bubble scattering micro-spectrometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s115004.
杨涛, 许超, 周馨慧, 等. 气泡散射型微型光谱仪的设计与仿真研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s115004.
- 5 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316003.
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- 6 Ren Zhong, Liu Guodong, Huang Zhen. A spectrometer splitting-light system based on volume phase holographic transmission grating[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0608004.
任重, 刘国栋, 黄振. 一种体相位全息透射式光栅的光谱仪分光系统[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608004.
- 7 R G Sellar, G D Boreman, L E Kirkland. Comparison of signal collection abilities of different classes of imaging spectrometers [C]. SPIE, 2002, 4816: 389–395.
- 8 R G Sellar, G D Boreman. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications[J]. Instrumentation, Measurement, and Metrology, 2005, 44(1): 013602.
- 9 Zhao Shuaiqun, Liu Gang, Ou Quanhong, *et al.*. Study of different tree peony varieties by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s115002.
赵帅群, 刘刚, 欧全宏, 等. 不同品种牡丹花的傅里叶变换红外光谱研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s115002.
- 10 Li Weixing, Zhao Xingxiang, Liu Gang, *et al.*. Study of *Capsicum frutescens* L by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s115001.
李伟星, 赵兴祥, 刘刚, 等. 辣椒的傅里叶变换红外光谱研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s115001.
- 11 Wang Xinquan, Huang min, Gao Xiaohui. Portable multispectral image based on LCTF[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(1): 71–75.
王新全, 黄旻, 高晓慧. 基于液晶可调谐滤光片的便携式多光谱成像仪[J]. 光子学报, 2010, 39(1): 71–75.
- 12 M J Persky. A review of spaceborne Fourier transform spectrometers for remote sensing[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(10): 4763–4797.
- 13 Xu Xiaoxuan, Lin Haibo, Yu Gang, *et al.*. Research of image spectrometer using linear variable interference filter[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2002, 22(5): 713–717.
徐晓轩, 林海波, 俞钢, 等. 小型线形可变滤光片分光的可见成像光谱仪及其特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(5): 713–717.
- 14 A Piegari, J Bulir. Variable narrowband transmission filters with a wide rejection band for spectrometry[J]. Applied Optics, 2006, 45(16): 3768–3773.
- 15 Liu Yujuan, Tang Yuguo, Cui Jicheng. Small imaging spectrometer for the inspection of fruit quality[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(1): 283–286.
刘玉娟, 唐玉国, 崔继承. 用于水果品质检测的小型成像光谱仪[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 283–286.
- 16 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Analysis and experimental validation of signal-to-noise for limb imaging spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1697–1701.
薛庆生, 王淑荣, 李福田. 临边成像光谱仪信噪比分析及实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1697–1701.
- 17 G Polder, G W A M van der Heijden, I T Young. Spectral of image analysis for measuring ripeness of tomato[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(4): 1155–1161.
- 18 G Polder. Tomato sorting using independent component analysis on spectral images[J]. Real-Time Imaging, 2003, 9(4): 253–259.
- 19 T Skauli, H E Torkildsen, S Nicolas, *et al.*. Compact camera for multispectral and conventional imaging based on patterned filters[J]. Applied Optics, 2014, 53(13): C64–C71.
- 20 A Piegari, A Sytchkova, J Bulir, *et al.*. Compact imaging spectrometer with visible-infrared variable filters for earth and planet observation[C]. SPIE, 2011, 8172: 81721B.