

文章编号: 1672-8785(2014)06-0010-05

波长可调谐凝视型高光谱 成像技术研究

李 涛^{1,2} 葛明锋^{1,2} 肖功海¹ 亓洪兴^{1,3} 王义坤^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 上海市现场物证重点实验室, 上海 200043)

摘 要: 目前高光谱成像技术已经在遥感、探测等各个领域得到了广泛应用, 但是在医学、材料学和微电子学等新兴学科领域, 被动式成像方式自身却存在一些局限性和不适用性。探讨了一种波长可调谐的凝视型高光谱成像系统。使用波长可调谐的单色光实现了对被拍摄物体的快速光谱测量, 并利用光栅作为分光元件, 使该系统的兼容性和拓展性得到了极大提高。该研究对于类似成像系统的设计具有一定的参考和借鉴意义。

关键词: 波长可调谐; 高光谱成像; 凝视型; 光栅分光

中图分类号: TN2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.06.002

Research on Wavelength-tunable Staring Hyperspectral Imager Technology

LI Tao^{1,2}, GE Ming-feng^{1,2}, XIAO Gong-hai¹, QI Hong-xing^{1,3}, Wang Yi-kun^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

3. Shanghai Key Laboratory of Crime Science Evidence, Shanghai 200043, China)

Abstract: At present, the hyperspectral imaging technology is widely used in the fields of remote sensing and detection etc. However, in some emerging fields of medicine, material and microelectronics, the passive imaging method has its limitation and unsuitability. A wavelength-tunable staring hyperspectral imaging system is discussed. By using wavelength-tunable monochromatic light, the spectra of an object to be imaged is measured rapidly. In addition, because a grating is used as a light-splitting element, the compatibility and robustness of the system are improved greatly. This research is of reference value to the design of similar imaging systems.

Key words: wavelength tunable; hyperspectral imaging; staring type; grating light-splitting

0 引言

高光谱成像技术是一种将成像技术与光谱

技术相结合的新型遥感技术。经过多年的发展, 该技术目前已被广泛应用于地质探测和农牧林生产等多个领域^[1]。近年来, 高光谱成像技术

收稿日期: 2014-04-04

基金项目: 2012 上海市重点科技攻关项目 (11441901302)

作者简介: 李涛(1989-), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要研究方向为电路与系统设计。E-mail: leetao10@163.com

在生物医学领域的应用已经成为一个新的研究热点。在遥感领域, 传统的成像光谱仪使用光栅或棱镜作为分光元件, 该系统需要在镜头前端加装一个光机扫描结构才能完成光谱成像。而对于临床医学、生物学、材料学和微电子学等新兴学科领域, 这种高光谱成像方式由于其应用的特殊性而不再适用。近年来, 凝视型光谱仪的发展非常迅速, 基于液晶可调节滤光片和声光可调谐滤光片等的各式新型高光谱成像仪逐渐进入到人们的视野之中。本文探讨一种使用光栅分光器件的凝视型高光谱成像仪, 它具有成本低廉、使用方便、兼容性好以及集成度高等特点, 能够满足未来多元化的应用需求。

1 工作原理

传统的分光系统目前已经发展得较为成熟, 它们一般通过色散和衍射等方法将混合复合光分解成不同波长的单色光^[2]。分光方法有很多种。为了实现结构简单的整体系统, 本文选取光栅作为分光结构。光栅一般可以分为透射光栅和反射光栅两种。由于前者的能量不如后者的集中, 太过分散, 不利于测量, 所以我们选用反射光栅来搭建系统。

本文利用电机驱动反射光栅转动, 并通过控制不同的转动角来调节系统的输出波长。当光线以不同的角度入射时, 入射光与光栅法线形成一定的夹角而发生衍射, 形成不同波长的衍射光。一般认为, 衍射光的波长 λ 与入射角度 α 有关, 即

$$\lambda = \frac{2d}{k} \sin \beta \cos(\alpha - \beta) \quad (1)$$

其中, 衍射角 $\theta = 2\beta - \alpha$ 。

但在实际情况下, 本文系统所输出的光并非理论上的单色光, 而是具有一定带宽 $\Delta\lambda$ 的光。而且辐射功率密度呈高斯分布, 所以由高光谱成像仪测得的数据实际上是这段波长范围内的功率。假设该波长范围内的辐射功率密度为 $E'(\lambda)$, 则实际测得的结果为

$$P'_{\lambda_i}(\lambda) = \int \tau_0(\lambda) E'(\lambda) S'(\lambda - \lambda_i) d\lambda$$

$$= [\tau_0(\lambda) E'(\lambda)] * S'(\lambda) \quad (2)$$

式中, $\tau_0(\lambda)$ 为单色光的带宽, 在近似条件下可以认为是个常数。

本文系统主要通过测量不同波长的光谱响应, 然后根据时间叠加求出所摄图像的光谱分辨率。一般认为, 光谱响应呈高斯分布, 可以用式 (3) 表示:

$$P(\lambda) = \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中, $P(\lambda)$ 为辐射功率密度; λ_i 为每个波段所对应的中心波长; 光谱分辨率则为 $2\sqrt{2\ln 2}\sigma$ 。

2 系统设计

本文系统的设计涉及光学、电子学、软件以及机械结构等多个学科领域的知识, 因此需要综合考虑各个组件的性能在组成系统之后能否达到原来的设计指标。该系统的性能指标如下: 光谱范围为 400 ~ 750 nm, 波段数可调, 最小光谱波段间隔为 2 nm; 卤素灯的功率为 100 W, 波长精度 ≤ 2.0 nm, 输出功率 ≤ 1 mW, 输出接口为光纤。

为了带动光栅作精密旋转, 我们选取了定位精度较高、每一步误差不会累积且具有优良启停和反转响应的步进电机。本文选用日本东方马达公司生产的两相步进电机, 其在没有细分的情况下每步为 0.9° 。步进电机被连接在与光栅同轴的齿轮盘上, 以控制光栅的转动。

步进电机的转速和运行位置取决于脉冲信号的频率和数量, 而不会因负载变化而产生影响^[3]。与传统的直流电机和交流电机不同, 步进电机需要使用专门的驱动芯片来提供脉冲信号。本文选用美国德州仪器公司生产的 DRV8825 型驱动芯片来完成电机控制。

在综合考虑多个因素^[4]之后, 我们选择了一片尺寸为 68 mm 的可见光闪耀光栅, 其输出波长范围的理论值为 450 ~ 850 nm。在通过入射狭缝之后, 入射光由准直镜转换成平行光并被反射到光栅上。最后使用转接头变为光纤输出。本文选用美国 Thorlabs 公司生产的 SMA-SMA 光纤, 其数值孔径为 0.22。光通过光纤照射在被测

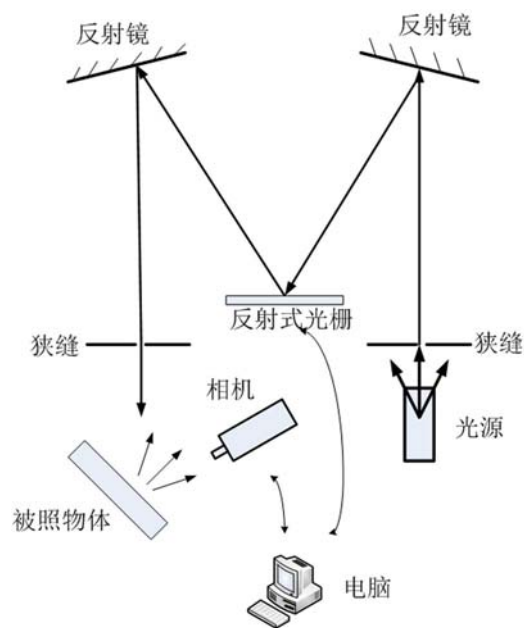


图 1 系统结构的示意图

物体上。我们在暗室环境中使用黑白 CCD 相机进行成像。图 1 为本文系统的结构示意图。

我们采用美国 Cypress 公司生产的 CY7C68013A 芯片进行整体控制, 并将 USB 总线用于系统设计之中。CY7C68013A 芯片的内部具有一个增强型 8051 编程模块, 其外部存储则使用一块 128 K 的 E2PROM 芯片^[5]。本文自行设计了一块用于将电源电路、信号电路、USB 控制芯片、电机驱动芯片以及输入输出接口整合在一起的四层 PCB 板, 并提供了丰富的硬件调试接口, 从而带来了极佳的兼容性和拓展性。另外, 本文在控制中还加入了光耦元件。在光栅基准零位下输出一个高电平, 经过反相器之后输入 CY7C68013A 的 INT0, 形成一个外部触发。为了便于控制, 本文通过自己编写用于驱动调用底层的固件函数来实现各种系统功能^[6]。最终这些函数会被上位机程序调用, 直接受用户控制。

3 技术分析

我们需要随时对光线出口的狭缝宽度进行调整, 以获得最佳的出光性能。为了计算理想的狭缝宽度, 假设光是完全非相干的, 即每一点均为独立的点光源, 由衍射理论和相关实验可知,

谱线的半宽度约为

$$a_n = 0.8 \frac{\lambda f}{D} \quad (4)$$

式中, λ 为光的波长; f 为等效会聚透镜的焦距; D 为光栅的宽度。图 2 所示为光谱线的强度 I 与光谱分辨率 R 的变化关系。

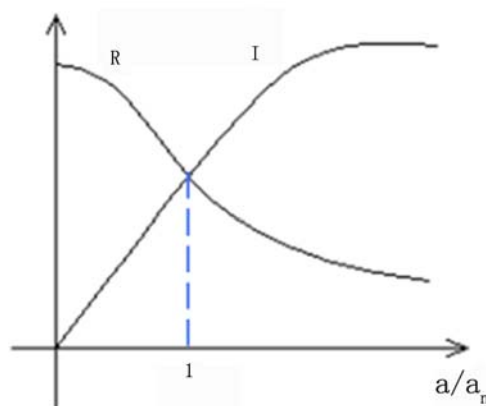


图 2 光谱分辨率的变化图

从图 2 中可以看出, 当狭缝宽度增大时, 光谱分辨率下降; 当狭缝宽度减小时, 得到的光强减弱。为了在出射光线的分辨率与光强之间取得较好折衷, 一般取 $a = a_n$ 。

一般说来, 单色光的带宽越宽, 测量值与理论值之间的误差越大^[7]。此外, 由于输出光线来自输出狭缝, 为了使输出的单色光能够以一个合理的角度照射, 需要在单色仪的出射狭缝后加装准直透镜。另外考虑到便携性以及调试的方便, 我们确定利用光纤作为传导光的通道。为了达到最大的耦合效率, 使单色光的能量得到充分利用, 必须考虑一个关键参数——数值孔径 N_A , 即

$$N_A = n \sin \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

式中, α 为孔径角, 即物镜光轴上的物体点与物镜前透镜的有效直径所形成的角度。光通量与孔径角成正比。物镜的有效直径越大, 孔径角越大; 焦点距离越长, 孔径角越小。对于光纤而言, 入射到光纤端面的光只有在某个角度范围内才能全部被光纤传输。这个角度 β 的正弦值就称为光纤的数值孔径, 即

$$N_A = \sin \beta \quad (6)$$

多模光纤的数值孔径一般在 0.18 ~ 0.23 之间。若用折射率表示光纤的数值孔径, 则

$$N_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (7)$$

式中, n_1 为纤芯的折射率; n_2 为包层的折射率。式 (7) 是在纤芯区域的折射率被认为是均匀的条件下推导出来的^[3]。对应于式 (7) 的数值孔径称为最大理论数值孔径 $N_{A\tau}$, 而在实际中却最常使用强度有效数值孔径 N_{Ae} , 两者之间的关系为

$$N_{A\tau} = 1.05 N_{Ae} \quad (8)$$

从物理上来看, 光纤的数值孔径表示光纤接收入射光的能力^[8]。若要增加所用光纤的光功率, 则可增加其数值孔径 N_A 。但是随着 N_A 的不断增大, 光纤的模畸变会加大, 光纤的带宽也会变小。因此, 一般选取比较合适的数值孔径, 而且在匹配透镜时也会尽量采取相同的数值孔径以达到最佳的使用效果。

4 实验方法及结果

本文使用一个宽光谱范围的光源。考虑到光源强度及使用寿命, 我们选用 100W-L 型高功率卤钨灯泡, 其灯丝发光体外具有熔石英外壳。该光源的光谱范围为 300 ~ 2600 nm (光谱曲线见图 3), 工作电压为 12 V, 功率为 100 W, 出光光强为 2000 lm, 色温为 3000 K。

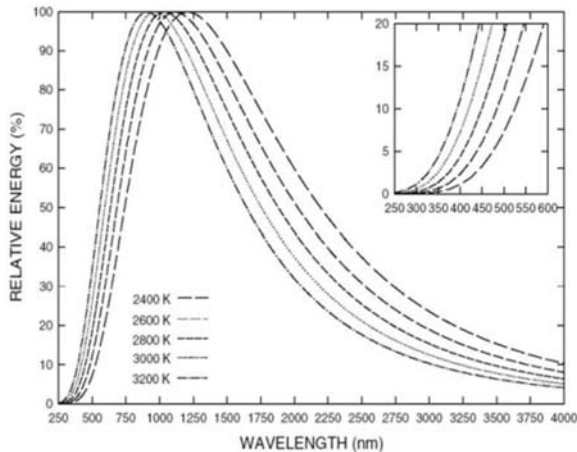


图 3 光源的光谱曲线

上电之后, 本文系统在可见光波段可以输出理论波长为 450 ~ 850 nm 的单色光。狭缝宽度为 0.6 mm。图 4 和图 5 所示分别为 550 nm 和 600 nm 单色光的光谱曲线。

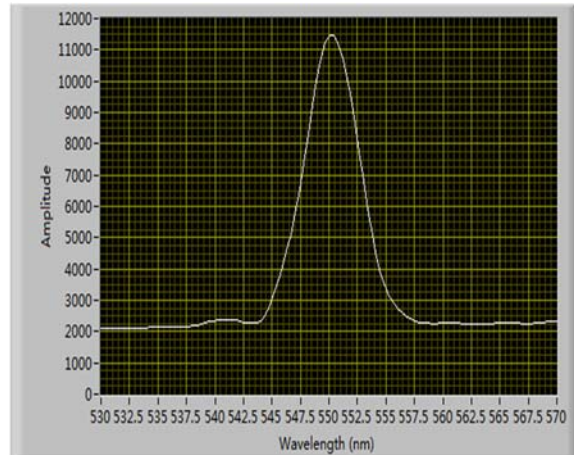


图 4 光谱曲线 (波长为 550.65 nm、半波宽为 5.1 nm)

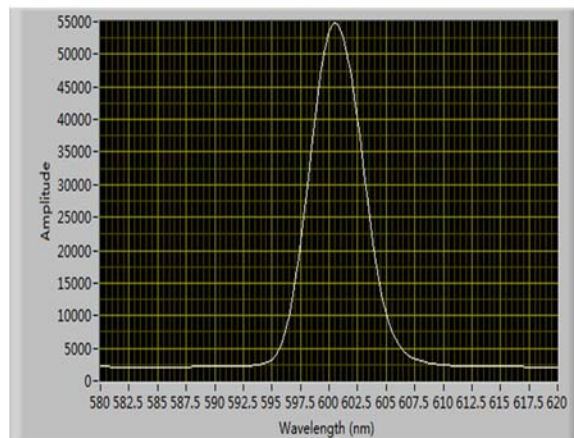


图 5 光谱曲线 (波长为 600.57 nm、半波宽为 4.9 nm)

本文利用真实树叶与人造树叶在自然光条件下颜色相同但光谱特性不同的特点来验证本试验平台的功能特性。图 6 所示为叶绿素的吸收谱线^[9]。

从图 6 中可以看出, 叶绿素 a (实线) 与叶绿素 b (虚线) 在 450 ~ 500 nm 和 620 ~ 680 nm 范围内具有两个吸收峰。本文选取第二个吸收峰区域与 520 nm 的区域进行对比试验。我们使用左右两片新鲜的树叶与中间一片人造叶子作为对比试验组 (见图 7)。整个拍摄区域为 15 cm × 15 cm, 焦距为 18 cm, 曝光时间为 800 ms。连续拍

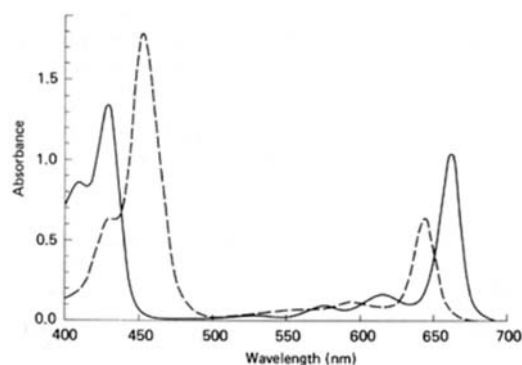


图 6 叶绿素的吸收光谱

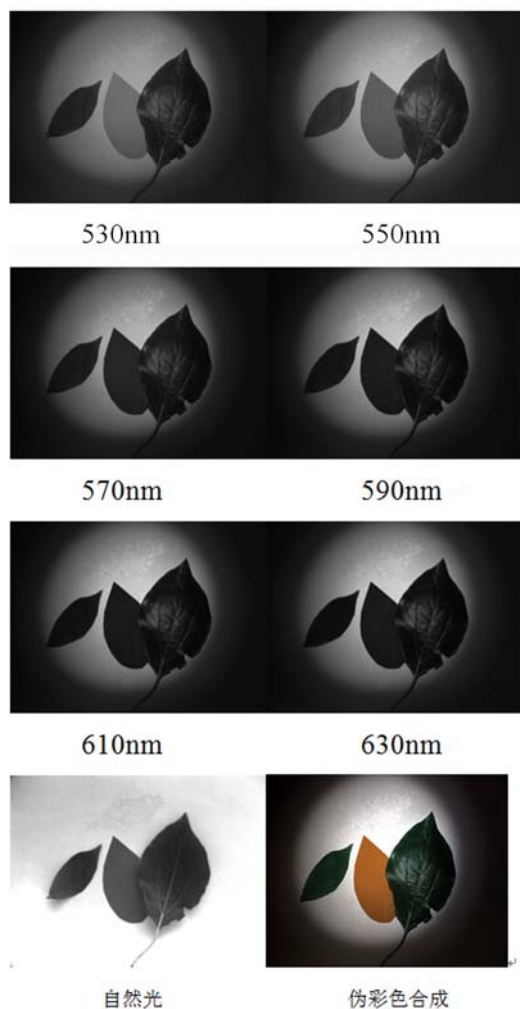


图 7 不同波段的高光谱图像

摄多张图像, 最终有代表性地选取自然光、530

nm、550 nm、570 nm、590 nm、610 nm 和 630 nm 的图像 (见图 7)。

从伪彩色合成结果^[9]中可以看出, 图像非常清晰, 真实树叶显示绿色, 而人造树叶则显示黄色。我们可以简洁、直观地对真假树叶进行区分, 说明本文系统的功能性得到了明确验证。

5 结束语

本文利用 USB 总线控制研制了一种波长可调谐的高光谱成像系统, 并取得了良好的试验结果。该研究为波长可调谐的凝视型光谱技术在新兴领域的探测应用提供了一条新思路, 因此具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 杨哲海, 韩建峰, 宫大鹏, 等. 高光谱遥感技术的发展与应用 [J]. 海洋测绘, 2003, 23(6): 55-58.
- [2] Takahashi I, Noguchi T. A New Quick-response and High-efficiency Control Strategy of an Induction Motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1986, 5: 820-827.
- [3] Liao L B, Jarecke P J, Gleichauf D A, et al. Performance Characterization of the Hyperion Imaging Spectrometer Instrument [C]. SPIE, 2000, 4135: 494253.
- [4] 周黎, 杨世洪, 高晓东. 步进电机控制系统建模及运行曲线仿真 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(1): 20-25.
- [5] 肖功海, 舒嵘, 薛永祺. 显微高光谱成像系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 367-372.
- [6] 李涛, 曾攀, 肖功海. 基于 ADPCM 的数字语音存储与回放系统 [J]. 现代电子技术, 2013, 36(13): 49-52.
- [7] 亓洪兴, 陈木旺. 短波红外 Hadmard 变换高光谱成像技术研究 [J]. 红外技术, 2005, 27(6): 463-468.
- [8] 丁鹏. 提高大功率半导体激光阵列光束质量的实验和理论研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [9] 刘堂友, 匡定波, 尹球. 湖泊藻类叶绿素-a 和悬浮物浓度的高光谱定量遥感模型研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(1): 11-15.
- [10] 杨哲海, 冯猛, 张燕燕. 高光谱影像处理方法的改进 [J]. 海洋测绘, 2004, 24(4): 13-16.