基于 LCTF 的大幅面高分辨率多光谱仪光学系统设计

李 珂,张康伟,罗 淼

(华中光电技术研究所 武汉光电国家实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:将液晶可调滤光片(LCTF)应用到真彩色多光谱图像采集中,设计了一款大面阵、高分辨率、轻小型的多光谱成像系统。系统利用 LCTF 空间分辨率和光谱分辨率高、波长选择灵活、调谐时间短等特点,可实现幅面大小约 210 mm×148 mm,分辨率达到 350 ppi 的多光谱图像采集,工作谱段为 420~720 nm,光谱分辨率为 10 nm。结果表明,该成像系统在空间频率为 91 lp/mm 时,31 个波段处轴上 0 视场和轴外 1.0 视场的传递函数均≥0.30,全视场畸变≤0.1%,成像质量良好,可用于大面阵、高分辨率多光谱图像的采集与分析。

关键词:光学设计; 液晶可调滤光片; 多光谱成像

中图分类号:TP73 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)03-0675-05

Design on optical system of large plane array and high resolution multi-spectral imager based on LCTF

Li Ke, Zhang Kangwei, Luo Miao

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430074, China)

Abstract: A large plane array, high resolution and small volume multi-spectral imaging optical system was designed based on the application of the liquid crystal tunable filter (LCTF). The LCTF has advantage of high spatial resolution, high spectral resolution, flexible wavelength and short tuning time. Using LCTF, a multi-spectral image whose size was about 210 mm×148 mm with resolution of 350 ppi could be realized. The spectral range of this multi-spectral imaging system was from 420 nm to 720 nm and the spectral resolution of which was 10 nm. The results show that when the spatial resolution is 91 lp/mm, the on-axis 0 field and off-axis 1.0 field MTF at 31 wavebands are not less than 0.30, and the distortion of TFOV is less than 0.1%. Therefore, this system has good imaging quality and can be used to acquire and analyze the large plane array and high resolution spectral image.

Key words: optical design; lquid crystal tunable filter(LCTF); multi-spectral imaging

收稿日期:2012-07-08; **修订日期**:2012-08-12

基金项目:国家自然科学基金(40905011)

作者简介:李珂(1986-),男,助理工程师,硕士,主要从事光学设计与光学装调技术方面的研究。Email:hzgd_like@163.com

0 引 言

多光谱成像技术是一种集光谱信息和图像信息于一体的前沿技术。通过多光谱成像仪所获取的图像，在获取目标空间二维图像的同时还能得到目标的光谱成份信息,形成一种多光谱图像数据立方体,具有采集波段多、光谱分辨率高的特点,已经广泛应用于地球遥感、医疗诊断、环境监测、生命科学、色彩信息处理、精细农业等方面[1]。

目前,多光谱立体图像的获取主要有色散型、干涉型和滤光片型等几种方式。通过推扫或摆扫方式获取目标三维信息的色散型、干涉型多光谱成像仪,对平台的稳定性要求较高,能量分散,且是以牺牲空间分辨率来获取高的光谱分辨率为代价。而传统滤光片型多光谱相机由于采用机械转轮切换多个滤光片的方式进行分光,耗时长、波段数量受限、空间分辨率高而光谱分辨率低，对结构的稳定性要求也较高,而且无法获得连续光谱[2-3]。近年来,液晶可调滤光片(LCTF)的产生和发展,为多光谱成像提供了新的手段。LCTF 的成像光谱范围覆盖了从可见光到近红外波段,光谱带宽分辨率从 5~20 nm 可选。相比于传统的滤光片,它用电调谐代替机械滤光片转轮,无需机械扫描装置即可实现工作波长范围内任意波段的快速调谐。同时,LCTF 具有较高的空间分辨率和光谱分辨率,且体积小、重量轻、功耗低、结构简单、无运动部件、对平台稳定性要求低,只需将其置于普通成像镜头上就可以得到多光谱图像。可以看出,新型液晶可调滤光片 LCTF 的引入，突破了传统分光型多光谱仪器获取图像的局限性，使得多光谱设备正在向着小型轻量、结构简单、大面阵、高分辨率的方向发展。

针对 LCTF 作为分光器件所具有的特点，文中将其引入到真彩色多光谱图像采集平台，设计了前端扩束、LCTF 置中、后端成像的光谱仪光学系统。该系统在 420~720 nm 工作波段范围内,可以实现大幅面、高分辨率的多光谱图像采集，同时成像结构简单,能够充分接收来自目标的反射光线,提高光能利用率；而且成像质量良好，在空间频率为 91 lp/mm 时,系统在 31 个波段处轴上 0 视场和轴外 1.0 视场的传递函数均达到 0.30,全视场畸变小于 0.1%,适合实验室及野外等多种多光谱图像采集与分析的场合。

1 系统参数与结构

1.1 系统参数

基于 LCTF 的大幅面高分辨率多光谱成像系统主要由光学镜头、LCTF 和高分辨率 CCD 相机组成。其中 LCTF 是根据液晶的电控双折射效应和偏振光的干涉原理制成的新型分光器件，此次设计中采用的 LCTF 是来自美国 CRi 公司的 Varispec VIS-10-35 型液晶可调滤光片，由液晶材料造成的相位差通过电压进行调节，施加不同的电压可以使不同波长的光发生干涉,从而实现分光的功能,其参数如表 1 所示。图 1 是 LCTF 在 400~720 nm 波段每隔 5 nm 的透过率曲线,可以看出每条曲线的形状都近似高斯型,峰值透过率随着波长的增加呈上升趋势，透过率范围为 3%~58%之间。CCD 选用德国 SVS-VISTEK 的 cameralink 接口单色面阵 CCD 相机,其参数如表2 所示。该相机最大帧频可达 27 帧/s，即对一个波长的图像采集可以在 37 ms 内完成,考虑到 LCTF 对任一波长调谐的最长时间为 50 ms，因此该相机在 1 s 内可完成 20 个波长的图像采集。

表 1 VIS-10-35 型 LCTF 参数

Tab.1 Parameters of VIS-10-35 LCTF

Parameter	Value
Wavelength range/nm	400-720
Bandwidth FWHM/nm	10
Working aperture/mm	35
Angle-of-acceptance(half-angle)/(°)	7.5
Spatial resolution	4 000×4 000
Spectrum resolution/nm	0.5
Optics response time/ms	50

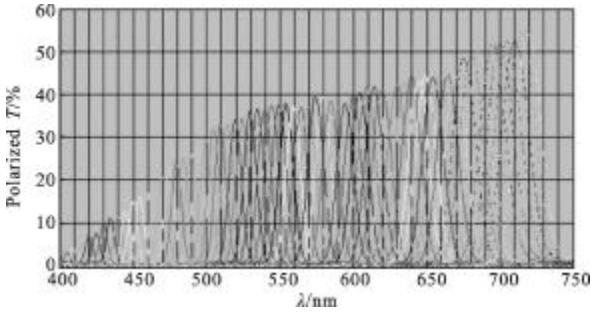


图 1 VIS-10-35 型 LCTF 透过率曲线

Fig.1 Transmittance of the VIS-10-35 LCTF

表 2 Evo8050 CCD 参数

Tab.2 Parameters of Evo8050 CCD

Parameter	Value
Maximum resolution/pixel	3 320×2 496
Pixel size/μm	5.5×5.5
Sensor format/mm	22.66
fps	27
Interface	C-Mount
Data interface	Cameralink

镜头设计需综合考虑采集目标、LCTF 和 CCD 的参数,而且受系统整体尺寸要求的限制,表 3 给出了图像采集系统的设计参数。由于 VIS-10-35 型 LCTF 在 400~420 nm 处的透过率过低, 对于系统成像已无实际意义,因此将系统成像波段定义为 420~720 nm。在工作状态下,LCTF 以 10 nm 波长为间隔,系统经 LCTF 调谐滤波后将透射一定波长的准单色光,在 CCD 的靶面上形成一幅准单色光图像,每隔 50 ms 再次曝光时,LCTF 由计算机控制改变透射的中心波长,形成另一幅准单色光图像,如此循环,直至完成 31 个通道的图像采集。

表 3 成像系统参数

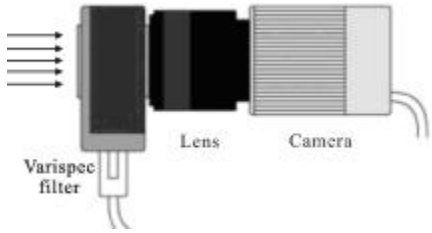
Tab.3 Parameters of imaging system

Parameter	Value
Wavelength range/nm	420-720
Object size/mm	210×148
Object resolution/ppi	350
Maximum field(half-angle)/(°)	23
Total length/mm	<200

1.2 光学结构

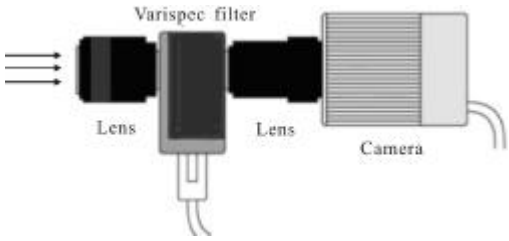
LCTF 与光学镜头的连接方式通常分为两种,一种是 LCTF 置于镜头前的平行光路中,另一种是置于镜头的前组与后组或镜头与 CCD 之间[4-6],如图 2 所示。

图 2(a)中 LCTF 与镜头通过一个连接环连接,镜头可以直接选用现有的商业镜头,结构简单,便于装调实现。但 LCTF 的有效口径和可接受的视场角太小,无法充分利用镜头的光圈和有效视场,容易造成渐晕。另外,VIS-10-35 型 LCTF 的自重达 460 g,也会导致系统重心前移,造成光机系统设计的困难。图 2(b)LCTF 置于镜头前组与后组之间的会聚光路中,能够最大限度地利用 LCTF 的性能,充分接受目标反射的光线,提高系统光能利用率,而且重心位于系统中部,结构紧凑[7-10]。但该型 LCTF 本身的物理尺寸为 49.968 mm,采用标准 C 卡口的 CCD 相机法兰距为 17.526 mm,则与 C 口 CCD 连接的镜头法兰距至少应为 67.494 mm,而一般商业镜头的法兰距都小于该值,难以满足要求。若采用商业镜头对目标先一次成像, 然后加入 LCTF 和中继系统再二次成像的方式, 虽可以进行图像采集, 但造成光机结构复杂,系统透过率低。另外,LCTF 本身是由几种具有不同折射率的材料组成的液晶双折射元件, 将其与商业镜头直接相连会出现球差、彗差、色差等像差的不均衡,可能严重影响采集图像的质量。因此,现有的商业镜头不能满足大幅面、高分辨率的图像采集要求,必须设计一款光学镜头,既满足系统成像质量的要求,又符合体积小、重量轻、结构简单的设计目标。



(a) LCTF 置前结构

(a) Front-of-lens configuration



(b) LCTF 置中结构

(b) Between-lens-and-camera configuration

图 2 LCTF 与镜头连接示意图

Fig.2 Structure diagram of LCTF and lens

2 成像系统设计

受多光谱图像采集平台上目标大小与分辨力,LCTF 有效口径、可接受视场角及本身长度等参数的限制,将 LCTF 置于镜头前组与后组之间,设计了前端扩束、LCTF 置中、后端成像的光学结构。该结构示意图如图 3 所示。考虑到 LCTF 可以接受的最大半视场角为 7.5°,最大有效口径为 35 mm,扩束系统则需要将入射到光学系统前组的半视场角由 23°减少到小于 7.5°,有效光束口径减少到小于 35 mm。另外,多光谱图像需要采集 420~720 nm 范围内共 31 个波段的图

像,为保证每个波段图像采集的质量,便于后续光谱图像的处理及分析,设计过程中应尽可能保证每一个波段处的图像像质均较好。图 4(a)~(h)分别给出了系统在 420~720 nm、450 nm、520 nm、590 nm、620 nm、700 nm 处的点列图、传递函数和畸变曲线。可知该系统在 0 视场的 RMS 半径为 6.99 μm,0.7 视场的 RMS 半径为 7.13 μm,1.0 视场的 7.08 μm,各个视场的弥散圆分布较为均匀。在空间频率 91 lp/mm 时,420~720 nm 波段范围内系统每个波段处轴上 0 视场和轴外 1.0 视场的传递函数均≥0.30,全视场畸变均≤0.1%。整个系统成像质量良好。

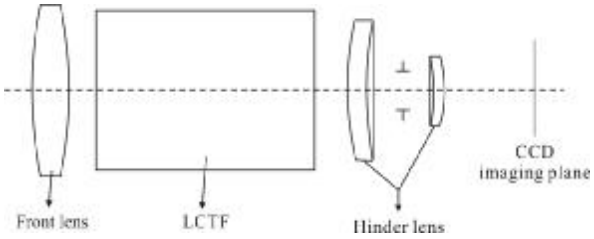
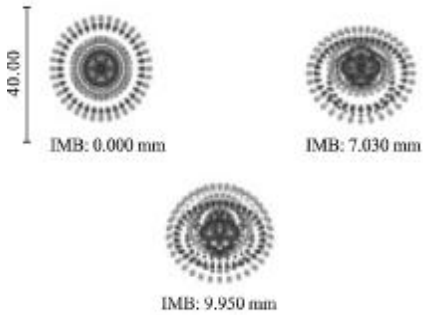
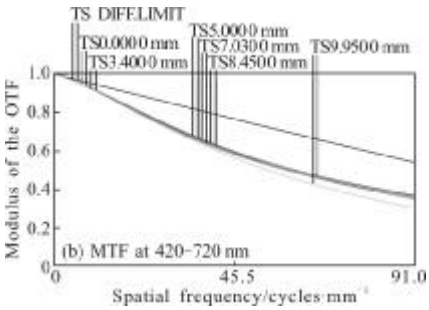


图 3 光学系统示意图

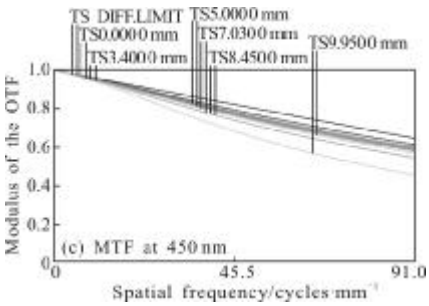
Fig.3 Schematic diagram of optical system



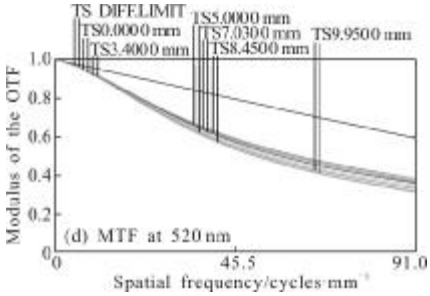
(a) Spot diagram



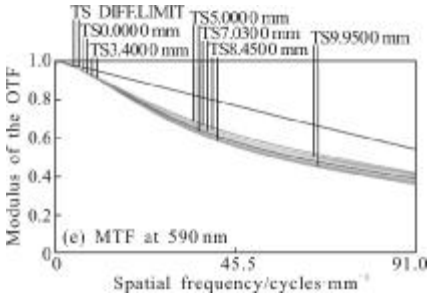
(b) MTF at 420~720 nm



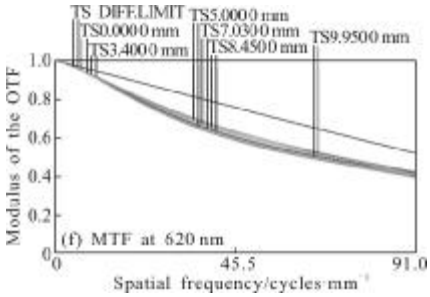
(c) MTF at 450 nm



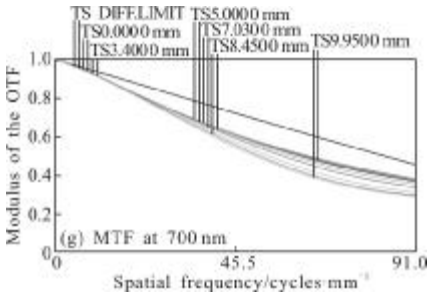
(d) MTF at 520 nm



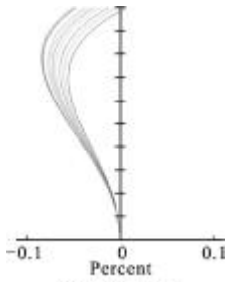
(e) MTF at 590 nm



(f) MTF at 620 nm



(g) MTF at 700 nm



(h) Distortion

图 4 多光谱图像采集系统特性图

Fig.4 Diagram of multispectral imaging acquisition system

3 结 论

文中通过对基于液晶电控双折射效应的 LCTF

分光器件特性的分析，将其应用到真彩色多光谱图像采集平台上,设计了一款多光谱仪光学系统。系统采用前端扩束、LCTF 置中、后端成像的光学结构,克服了 LCTF 自身有效口径和视场角的限制，实现了大面阵、高分辨率的图像采集。设计结果表明,在 420~720 nm 范围,每隔 10 nm 采集到 31 个波段图像成像质量良好,适用于大面阵、高分辨率多光谱图像采集与分析应用的场合。

参考文献:

[1] Du Lili, Yi Weining, Zhang Dongying, et al. Radiometric calibration of LCTF-based multi-spectral area CCD camera[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(1): 272-276. (in Chinese)
杜丽丽, 易维宁, 张冬英, 等. 基于 LCTF 的多光谱面阵 CCD 相机的辐射定标 [J]. 光谱与光谱学, 2011, 31(1): 272-276.

[2] Zhang Dongying, Hong Jin, Tang Weiping, et al. Design of hyperspectral imaging system based on LCTF [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10): 2455-2458. (in Chinese)
张冬英, 洪津, 汤伟平, 等. 基于 LCTF 调谐的高光谱成像系统设计[J]. 光谱与光谱学, 2008, 28(10): 2455-2458.

[3] Zhao Jing, Pang Qichang, Ma Ji, et al. Design of a continuous spectrum imaging apparatus based on LCTFs[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 37(4): 758-761. (in Chinese)
赵静, 庞其昌, 马骥, 等. 基于液晶滤光器的连续光谱成像测试装置[J]. 光学学报, 2008, 37(4): 758-761.

[4] Wang Xinquan, Huang Min, Gao Xiaohui, et al. Portable multispectral imager based on LCTF [J]. Acta Photoanica Sinica, 2010, 39(1): 71-75. (in Chinese)
王新全, 黄旻, 高晓慧, 等. 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.

[5] Xing Hui, Zhao Huijie, Cheng Xuan, et al. Radiometric calibration of hyperspectral imaging spectrometer based on AOTF [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 206-209. (in Chinese)
邢辉, 赵慧洁, 程宣, 等. AOTF 的高光谱成像光谱仪的辐射定标技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 206-209.

[6] Fu Qiang, Huang Min, Jing Juanjuan, et al. Relay lens design for an LCTF multi-spectral imager [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1022002-1-1022002-6. (in Chinese)
付强, 黄旻, 景娟娟, 等. 用于液晶可调谐滤光片型多光谱成像仪的中继成像系统设计 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1022002-1-1022002-6.

[7] VariSpec Liquid Crystal Tunable Filters User's Manual, 2011, 74.

[8] Du Lili, Yi Weining, Zhang Dongying, et al. Multispectral image acquisition system based on liquid crystal tunable filter [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 187-191. (in Chinese)
杜丽丽, 易维宁, 张冬英, 等. 基于液晶可调谐滤光片的多光谱图像采集系统[J]. 光子学报, 2009, 29(1): 187-191.

[9] Jiang Qinghui, Qiu Yuehong, Wen Yan, et al. Design of data acquisition system for AOTF polarization spectral imaging instrument [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 219-222. (in Chinese)
姜庆辉, 邱跃洪, 文延, 等. AOTF 偏振光谱成像数据采集系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 219-222.

[10] Li Zilei, Wang Lin, Pang Qichang, et al. Panax quinquefolium's active ingredients detecting method based on LCTF spectrograph [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 30(12): 3622-3626. (in Chinese)
李子雷, 王琳, 庞其昌, 等. 基于液晶光谱仪的西洋参品质光检测方法[J]. 光学学报, 2012, 30(12): 3622-3626.