

doi: 10.3788/gzxb20144307.0722003

# 用于目标跟踪/识别中红外 AOTF 光谱相机 光学系统的设计与优化

赵昭<sup>1</sup>, 安志勇<sup>1</sup>, 王劲松<sup>1</sup>, 高铎瑞<sup>1,2</sup>, 钟刘军<sup>1</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 长春理工大学 空间光电技术研究所, 长春 130022)

**摘 要:**为获得红外目标的空间信息和光谱信息,设计了一种用于中波红外声光可调谐光谱相机的光学系统.设计中引入折/衍射混合透镜,在用 6 片透镜的情况下达到了  $12\times$  变焦,在长焦处时能识别 2 000 m 远的目标.采用 ZEMAX 光学设计软件模拟声光晶体的衍射,在晶体出射面上优化设计了  $4^\circ$  的楔角,使 -1 级衍射光能共轴出射.该光学系统在空间频率 17 lp/mm 处调制传递函数值最大达到 0.7,能量集中度大于 90%,能够满足光谱相机用于识别/跟踪目标的要求.

**关键词:**光学设计;红外光学系统;光谱相机;变焦距光学系统;声光可调谐滤波器;目标识别

中图分类号:TH744.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)07-0722003-6

## Medium Infrared Optical System Optimized Design of AOTF Spectrum Camera for Target Tracking and Identifying

ZHAO Zhao<sup>1</sup>, AN Zhi-yong<sup>1</sup>, WANG Jin-song<sup>1</sup>, GAO Duo-rui<sup>1,2</sup>, ZHONG Liu-jun<sup>1</sup>

(1 School of optoelectronic engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Institute of space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A medium infrared optical system was designed for acousto-optic tunable filter spectra camera to obtain the spatial information and spectral information. By introducing a hybrid refractive/diffractive lens, there are six lens in the fore zoom optical system to achieve  $12\times$  zoom ratio, which can identify the object 2 000 m far at long focal length. ZEMAX software was used to simulate the diffraction of the crystal, a wedge with  $4^\circ$  is needed to certify that the -1 order diffraction beams exit coaxially. Results show that the maximum modulation transfer function at spatial frequency 14 lp/mm of the whole system is 0.7, the diffraction encircled energy was greater than 90%, which satisfy the image quality of the spectrum camera for target identifying and tracking.

**Key words:** Optical design; Infrared optical system; Spectrum camera; Zoom system; Acousto-Optic Tunable Filter; Target identify

**OCIS Codes:** 220.3620; 080.2740; 110.4234; 110.3080; 050.1380

## 0 引言

红外识别/跟踪系统是一类被动军用红外系统,能够探测、定位并连续跟踪红外背景辐射和其它干扰下发射红外线的物体和目标<sup>[1]</sup>.将光谱技术与红外成像技术相融合,可以在对目标成像的同时,得到相应的光

谱信息,这些光谱信息携带了物质的组成成分、结构特征以及能量分布等有用信息,可以帮助更加准确地识别目标.声光可调谐滤波器(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)光谱相机是一种新型光学成像仪器,以比较典型的可调谐滤光片作为分光器件<sup>[2-3]</sup>.与其它传统光谱仪相比,AOTF 光谱相机可以在扫描光谱范围

基金项目:国家科技攻关项目(No. 2007BA107A00-1)

第一作者:赵昭(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为光学系统设计及 AOTF 光谱相机. Email: zhaozhao\_cust@163.com

导师(通讯作者):安志勇(1943-),男,博士,教授,主要研究方向为光学系统设计、光电测控技术等. Email: an\_zhiyong@126.com

收稿日期:2014-03-07;录用日期:2014-05-06

<http://www.photon.ac.cn>

内,任意选定一组波长扫描,而不必进行全谱扫描,对于固定的对象光谱成像,可以大大节省测量时间。

目前将 AOTF 光谱相机应用于红外目标识别的报道比较少,中国科学院西安精密机械研究所 2010 年研制的工作波段在 400~900 nm,可以同时采集 o 光和 e 光的偏振光谱成像系统,实现了偏振、光谱和成像多种探测能力的集成<sup>[4-5]</sup>;在红外变焦成像方面,加拿大 Wescam 公司 Sinclair 设计的焦距范围是 20~400 mm 的变焦镜头,虽然成像质量达到衍射极限,但使用了 11 片透镜,两个二元面,系统结构复杂,透过率低。应用 AOTF 光谱相机进行中红外目标的跟踪与识别有两个难点与突破点:1) 如果要对红外超远距离目标进行观察和对微小目标的大倍率放大,需要高倍率、高分辨率的连续变焦光学系统,并解决由于镜片数目过多引起的透过率降低的问题,在设计中需引入折/衍射透镜;2) 用 AOTF 器件实现对中红外目标的光谱分析。AOTF 器件是一个衍射分光元件,光线在其出射面上会发生衍射,为了避免由于衍射光的漂移造成成像质量下降,要在晶体出射面上优化一个合适的楔角来补偿晶体的色散。

本文设计的光学系统工作波段为 3.2~5 μm,由前置变焦光学系统和后续成像模块组成。针对中波红外非制冷型 320×240 凝视焦平面阵列探测器,设计了变倍比为 12× 的中波红外连续变焦光学系统;后置成像系统是显微成像模块。该系统将成像技术与光谱技术相结合,在对目标物体成像的同时能对目标的物质组成成分、结构特征以及能量分布进行光谱学分析,帮助更准确的识别目标。

### 1 AOTF 光谱相机的工作原理

AOTF 光谱相机由前置光学系统、AOTF 器件、后置成像系统和探测器组成,如图 1。前置光学系统收集光能量送入 AOTF 中,在 AOTF 器件内部发生声光作用。满足动量匹配条件波长的衍射光将由后置成像系统成像到 CCD 探测器上,从而获取被测目标的光谱图像,AOTF 驱动器主要是通过调节超声波的频率来选择衍射光波长<sup>[6]</sup>。

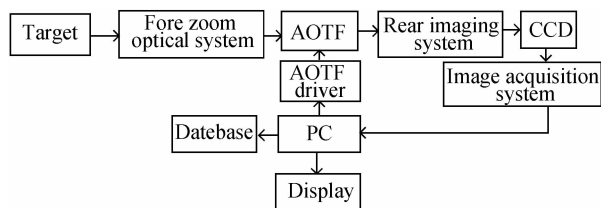


图 1 AOTF 光谱相机结构

Fig. 1 Structure chart of AOTF spectral camera

声光器件 AOTF 由声光介质、压电换能器和吸声体组成,其结构如图 2。当光束经过 AOTF 器件后,射

频电信号键合在 TeO<sub>2</sub> 晶体一端的换能器,将加载在晶体上,在表面转化成为相同频率的超声波。超声波的产生可以使晶体表面模拟成一个衍射光栅,发生布喇格衍射时 AOTF 的光波波长与其驱动器上的电信号频率相对应,所以通过改变射频电信号即可选择所需要的光波波长。当入射光为白光时,对任一射频都将有两束衍射光同时出现,一束为 +1 级衍射光,一束为 -1 级衍射光,分别位于零级光两侧,它们之间会偏离一定的角度出射。正负衍射光偏振态相互正交。在这套系统中,只接受 -1 级衍射光,用挡光光阑消除未发生衍射的零级光和 +1 级衍射光。

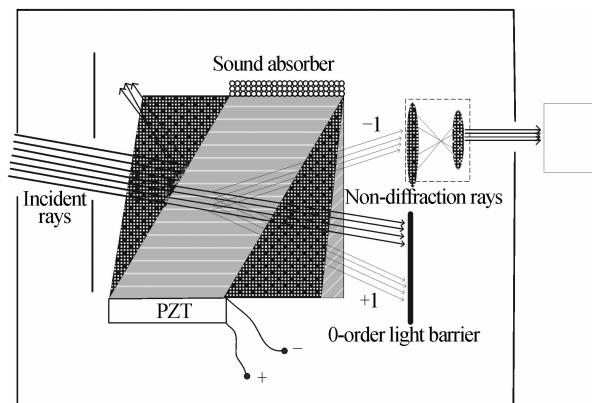


图 2 AOTF 声光器件结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of acousto-optic tunable filter

### 2 光学系统参数分配

AOTF 声光器件采用非共线 TeO<sub>2</sub> 晶体,在 0.35~5 μm 波段透明,晶体通光孔径为 Φ10 mm,晶体角孔径为 6°,为了使出射光束中 ±1 级衍射光和 0 级非衍射光完全分离,设计中要求光束到达 AOTF 表面上的光线入射角小于晶体可接收半孔径角 3°,同时在晶体出射面上优化一定的楔角,避免衍射光束的漂移,使其共轴出射的同时提高成像质量。

系统的工作波段为 3.2~5 μm,CCD 采用 320×240 中波红外非制凝视焦平面探测器,像元尺寸 35 μm×35 μm。对于整体光学系统的像质要求光学传递函数在探测器尼奎斯特频率 14 lp/mm 时,光学传递函数 MTF>0.6,弥散斑均方根直径小于一个像元。

对于 AOTF 光谱相机的前置光学系统,为了提高不同距离目标的成像探测率,采用变焦距光学系统设计。根据约翰逊判据,目标成像在 CCD 靶面上,发现目标尺寸应占 2×2 以上的像元,这是 CCD 分辨率的临界值;而识别目标的成像尺寸要占 8×8 以上的像元,而且所占像元越多分辨越清楚。要识别的目标高度为 2 m,作用距离为 2 km,可计算长焦时的焦距为

$$f' = \frac{h}{H}L = \frac{2 \cdot 4 \cdot 35 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 2000 = 280 \text{ mm} \quad (1)$$

发现目标和识别目标兼顾,选择焦距长一些,选择

长焦为 300 mm,短焦时的焦距为 25 mm.所以,前置光学系统的变焦范围为 25~300 mm.后置成像系统的作用是将 AOTF 后出射面衍射后的-1 级衍射光再次成像在 CCD 像面上. CCD 上的二次像高约为 7 mm,则后置光学系统的垂轴放大率  $\beta=h''/h'=-0.88$ . 根据式  $D/f'=2(u'-u)$ ,可得后置成像系统的数值孔径  $NA=0.3$ . 综上所述,AOTF 红外光谱相机的光学系统设计指标如表 1.

表 1 AOTF 红外光谱相机光学系统技术指标  
Table 1 Technical indicator of optical system of AOTF spectral camera

	Focal length /mm	F number (NA)	Height of image /mm
Fore zoom optical system	25~300	2	8
Rear imaging system	25	0.3	7
Whole optical system	-30~-302	2	7

### 3 光学系统设计

#### 3.1 前置变焦光学系统设计

根据像面补偿方式的不同,变焦距物镜大体上可

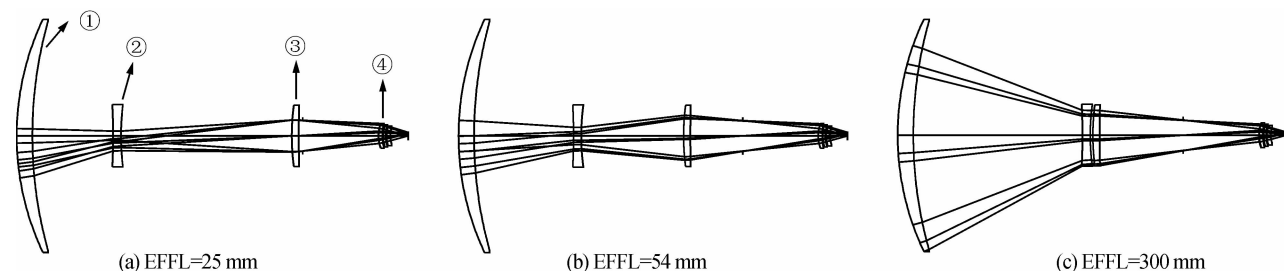


图 3 AOTF 光谱相机前置变焦光学系统结构  
Fig. 3 Schematic of continuous zoom optical system

前固定组在长焦时,轴上和轴外的光线高度均很高,相对孔径最大,球差、慧差、像散、畸变和轴外球差也很大;前固定组在短焦时,轴上光线高度低,相对孔径小,球差和慧差很小,而轴外光线高度高,产生较大像散和畸变,因此前固定组应使用正负透镜组合的结构,考虑到整个系统的性能,前固定组采用折衍射混合的结构来消像差.变倍组在长焦时,轴上光线高度高,相对孔径大.球差和慧差以及它们的高级量也较大,而轴外光线的高度不是很高,像散和畸变不是很大;变倍组在短焦时,轴上光线高度低,相对孔径小,球差和慧差很小,但在短焦时视场角最大,轴外光线高度高,高级正像散较大,利用变倍组和前固定组配合校正长焦距的轴外光束像差.补偿组在变倍补偿的过程中,在长焦距时补偿组前移靠近变倍组,轴上光线高度较高,相对孔径较大.而短焦距时轴上光线高度降低,相对孔径较小.重点校正球差和慧差,补偿组离光阑最近,像散和畸变在长短焦时差别不大.后固定组结构的设计要

以分为光学补偿和机械补偿两大类.机械补偿变焦光学系统的基本原理是利用系统中 2 个或 2 个以上透镜组的移动来改变系统组合焦距,同时保持像面位置不动,且在变焦过程中像质始终保持良好<sup>[7-10]</sup>.本次设计为实现 12 倍连续平滑变焦,变焦前组采用正组补偿的四组元变焦形式,由一个前固定组,一个变倍组、一个补偿组和一个后固定组组成,各组元焦距依次为正、负、正、正.根据高斯光学理论,合理分配各组元的光焦度,在 Matlab 中编写程序,合理分配焦距<sup>[11]</sup>,最后结果为  $f_1=257.32$  mm,  $f_2=-45.92$  mm,  $f_3=75.41$  mm,  $f_4=59.09$  mm.在红外系统中,合理搭配玻璃材料对于校正像差、减小温度敏感性、提高成像质量有很大的帮助.设计中,前固定组和补偿组选用高折射率、大色散系数的硅做为正透镜,变倍组用锗做为负透镜,后固定组用硒化锌和锗的混合透镜.光学系统要消像差,实现好的成像质量,就必须增加透镜数量,而红外材料种类稀少且价格昂贵,透镜数量增加的同时降低了系统透过率,不能达到探测器的响应强度.在 ZEMAX 软件中设计优化的前置变焦光学系统结构图如图 3.①是前固定组,②是变倍组,③是补偿组,④是后固定组.

综合考虑前三组元的像差,使其产生和前数量相同但符号相反的像差,对前几组进行像差补偿.由于后固定组要校正很多残留像差很困难,因此前面的像差不能过多保留.

#### 3.2 二元衍射元件设计

在前固定组中引入二元衍射元件,本文采用 ZEMAX 软件中的 Binary 2 表面,其相位分布函数是<sup>[12]</sup>

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(ar^2 + br^4 + cr^6 + \dots) \quad (2)$$

式中,  $a, b, c$  是相位系数,  $\lambda_0$  是波长,  $r$  是径向坐标.位相系数  $a$  与焦距  $f$  的关系为  $a = -1/2f$ ,符号表示位相相反,实现光学系统的消色差;  $b, c$  等为非球面相位系数,用于校正系统的单色像差.图 4 给出了经过优化后的二元面的位相及周期同径向距离的关系,从图中可以看出该衍射面的最大线频率为 0.267 Period/mm,对应最小周期线宽为 3.75 mm,每周期刻蚀 16 个台

阶,对应的最小特征尺寸为 266.7  $\mu\text{m}$ ,这样尺寸的衍射面完全可以用金刚石车削工艺加工次衍射面。

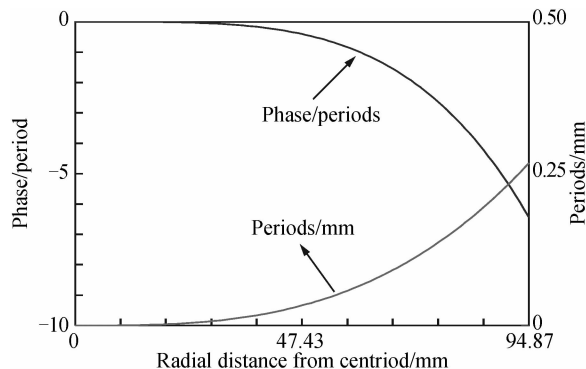


图4 二元面的位相及周期和径向距离的关系

Fig. 4 Relationship of phase and periods with radial distances of the Binary 2 surface

对于衍射元件来说,最重要的参数是衍射效率,对于特定级次上的衍射效率可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\eta_m = \frac{1}{N^2} \text{sinc}^2\left(\frac{m}{N}\right) \frac{\sin^2\left[\frac{\pi(\alpha-m)}{N}\right]}{\sin^2\left[\frac{\pi(\alpha-m)}{N}\right]} \quad (3)$$

式中, $N$ 是台阶数, $m$ 是衍射级次, $\alpha = \lambda_0 [n(\lambda) - 1] / \{ \lambda [n(\lambda_0) - 1] \}$ 是波长匹配因子。

当  $\lambda_0 = 2\lambda_s \lambda_l / (\lambda_s + \lambda_l)$  时,  $\lambda_s$  为短波长,  $\lambda_l$  为长波长,衍射效率可以达到 98% 以上,选择中心波长对于衍射元件的衍射效率很重要,所以在设计衍射元件时,中心波长一般按式(3)选取<sup>[14]</sup>。系统一级衍射效率如图 5,在中心波长处的衍射效率最高,将近 100%,在其余波长处的衍射效率均达到 93% 以上。

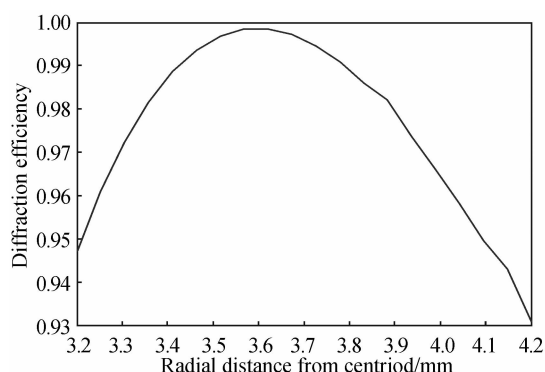


图5 衍射元件的衍射效率和波长的关系

Fig. 5 Diffraction efficiency as a function of wavelength

### 3.3 总体设计结果

在设计出的前置变焦光学系统和后置成像光学系统中加入 AOTF 器件,选择合适的优化函数在 ZEMAX 中进行优化. 本文设计的前置变焦光学系统的相对孔径过大不能够满足 AOTF 入射孔径角的要求,在优化的过程中,添加相应的优化函数控制入射到 AOTF 表面上的孔径角小于 3°. 为了减小衍射光的漂移带来成像质量的下降<sup>[15-16]</sup>,在 ZEMAX 软件中通过坐标断点的方式,在晶体的出射面上优化了 4° 的楔角. 经过优化后的光路图如图 6,透镜组①表示前置变焦透镜的前固定组,②是变焦物镜的变倍组,③为补偿组,④为后固定组,⑤为 AOTF 器件,⑥为二次成像系统. 光线经过前置变焦系统成像在 AOTF 器件的后表面,此处为一次成像的位置,再由后置的显微系统成像到 CCD 探测器上。

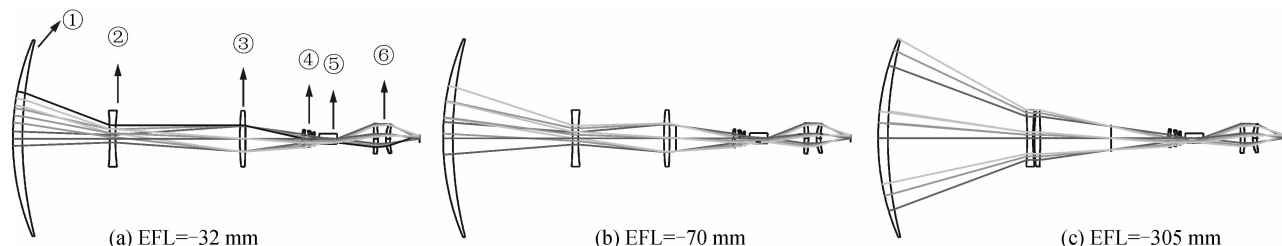


图6 AOTF 光谱相机光学系统结构

Fig. 6 Schematic of continuous zoom optical system

## 4 像质评价

AOTF 光谱相机成像系统是红外成像技术和光谱技术的结合. AOTF 分光器件具有调谐快,可以任意选择波长的特点,这就要求该系统具有高的光谱分辨率和良好的成像质量,在各个波长处的成像质量均要满足成像要求. 图 7 分别为短焦、中焦和长焦三个焦距位置处的调制传递函数曲线(MTF). 在 CCD 探测器尼奎斯特空间频率 17 lp/mm 处,变焦系统在短焦时,  $\text{MTF} > 0.6$ ; 中焦时,  $\text{MTF} > 0.7$ ; 长焦时,  $\text{MTF} > 0.5$ ,

在长焦处的边缘视场的 MTF 有所下降,但在允许范围内,通过分析 MTF 可以看出这个光学系统完全满足光谱相机像质要求。

图 8 分别为短焦、中焦和长焦三个焦距位置处的圈入能量分布图,这是圈入总能量的百分比. 由图 8 可以看出该系统在短焦和中焦距处将近 90% 能量集中在探测器的一个面元内,而长焦距处能量集中度有所下降,将近 80% 的能量集中在探测器的一个面元内,这满足红外探测的使用要求,同时满足指标要求。

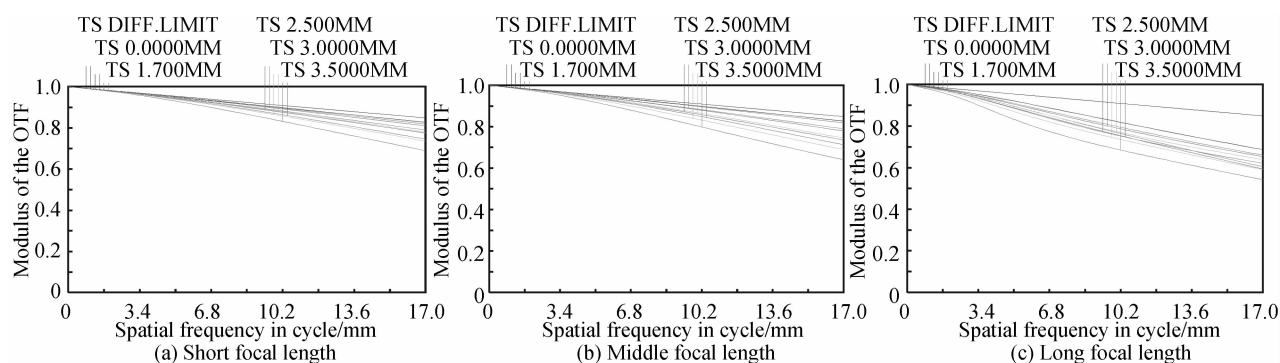


图7 AOTF 光谱相机在各变焦位置的 MTF 曲线

Fig.7 MTF at different zoom ratios of AOTF spectrum camera

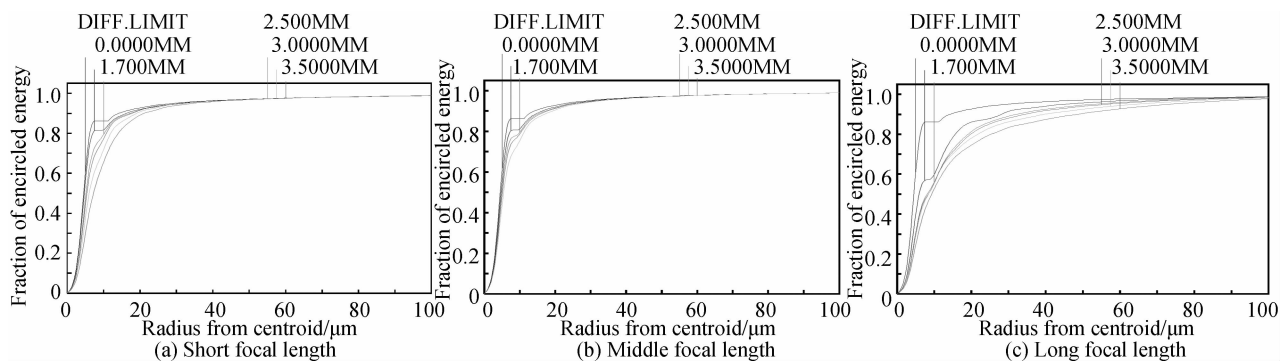


图8 各焦距位置的能量分布曲线图

Fig.8 Encircled energy at different focal length

## 5 结论

本文设计了用于红外目标识别/跟踪变焦的 AOTF 光谱相机光学系统,根据当前先进的声光可调谐滤波技术,给出前置变焦系统和后置成像系统的设计原理、设计方法、设计结果,对整体光学系统进行了像质评价.该套系统在对红外目标成像的同时能够快速获取目标的光谱信息,为准确地识别红外目标的结构、成分等提供了有力的依据.设计时在变焦系统中添加二元面,在使用 6 片透镜的情况下满足了成像要求,充分发挥了折衍射混合系统在红外成像方面的优势.该系统结构简单紧凑,成像质量良好,适用于红外目标的识别与跟踪.

### 参考文献

- [1] CHEN Jin-jin, ZHAO Jin-song. A compact MWIR objective for infrared search/tracking system[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(5):279-282.  
陈津津, 赵劲松. 一种紧凑型折射式红外搜索/跟踪光学系统设计[J]. *红外技术*, 2008, **30**(5):279-282.
- [2] JIANG Qing-hui, QIU Yue-hong, WEN Yan, *et al.* Design of data acquisition system for AOTF polarization spectral imaging instrument[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(1): 218-221.  
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):218-221.
- [3] SONG Yu-long, LIU Zhi-ying, CUI Cheng-jun. Optical design of the fore hyperspectral imaging zoom system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11):1302-1303.

- 宋玉龙, 刘志颖, 崔成君. 前置超光谱成像变焦系统的设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11):1302-1303.
- [4] CHANG Ling-ying, ZHAO Bao-chang, QIU Yue-hong, *et al.* Optical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10):3021-3022.  
常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪. 声光可调谐滤波器成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10):3021-3022.
- [5] GIEOR G, GEORGIE V, *et al.* Spectral characterization of acousto-optic filters used in imaging spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(1):209-217.
- [6] SUHRE D R. White light imaging by use of a multiple pass band acousto-optic tunable filter[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(22):4494-4501.
- [7] TIAN Hai-xia, YANG Jian-feng, MA Xiao-long, *et al.* Design for visible video zoom optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9):1797-1799.  
田海霞, 杨建峰, 马小龙等. 可见光变焦距电视光学系统设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9):1797-1799.
- [8] TAO Chun-kan. Zoom focus optics system design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. **8**, 102-106.  
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988. **8**, 102-106.
- [9] GAO Tian-yuan, HOU Zhen-yuan. Comparison and research of zoom curve fitting methods[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1):94-97.  
高天元, 侯振岩. 变焦曲线拟合方法的比较与研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1):94-97.
- [10] MAX J, RIED L. Optical design fundamentals for infrared systems [M]. Washington USA: SPIE PRESS.
- [11] GAO Duo-rui, ZHONG Liu-jun, ZHAO Zhao, *et al.* Zoom optical system design based on matlab[J]. *Chinese Journal of*

- Lasers*, 2014, **41**(4): 0416002.
- 高铎瑞, 钟刘军, 赵昭, 等. 基于 Matlab 的变焦光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, **41**(4): 0416002.
- [12] YAN Shu-hua. Design of diffractive Micro-optics [M]. National Defense Industry Press, 2011. **4**, 138-140.
- 颜树华. 衍射微光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. 4, 138-140.
- [13] E M 沃伦科娃, 格列楚什尼科夫. 红外光学材料手册[M]. 北京玻璃研究所技术情报组译. 天津:《国外红外与激光》编辑部, 1973: 225-232.
- [14] ZHANG Xin-ting, AN Zhi-yong. Design of infrared athermal system with double-layer harmonic diffractive element [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1524-1525.
- 张欣婷, 安志勇. 双层谐衍射红外消热差光学系统设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(12): 1524-1525.
- [15] REN Yu, CAI Hong-xing, TAN Jian-yao, et al. Imaging drift of acousto-optic modulator spectral camera [J]. *Chinese optics*, 2013, **6**(2), 179-186.
- 任玉, 蔡红星, 谭见瑶等. 声光调制光谱相机的成像漂移[J]. *中国光学*. 2013, **6**(2), 179-186.
- [16] ZHAO Zhao, AN Zhi-yong, GAO Duo-rui, et al. De-Dispersion Design of Acousto-Optic Tunable Filter Based on TeO<sub>2</sub> [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(6): 062301.
- 赵昭, 安志勇, 高铎瑞, 等. 基于 TeO<sub>2</sub> 晶体的声光可调谐滤波器消色散设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, **51**(6): 062301.