

doi:10.3788/gzxb20124112.1447

基于联合变换相关器的远红外变焦光学系统设计

徐春云,张肃,董家宁,王文生

(长春理工大学 现代光学测试实验室,长春 130022)

摘 要:为了提高联合变换相关器跟踪和识别目标的能力,且满足坦克瞄准镜的工作要求,针对 1 英寸红外 CCD 探测器,设计了 8~12 μm 波段折射式长波红外连续变焦系统.该系统采用机械补偿的方式,变焦过程中相对孔径不变, F 数为 2,变倍比为 4:1,在 50~200 mm 范围内可实现连续变焦,且变倍曲线和补偿曲线平滑,扩大了坦克瞄准镜的搜索范围.用 ZEMAX 光学设计软件对设计结果进行像质评价,结果表明,在 17 lp/mm 空间频率处,全焦距范围内调制传递函数均在 0.53 以上,接近衍射极限,像面稳定性良好,满足光学系统的设计要求.

关键词:光学设计;联合变换相关器;红外变焦系统;机械补偿

中图分类号:TN219

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)12-1447-5

0 引言

随着科学技术的飞速发展,应用光电混合联合变换相关器进行光学相关目标探测与识别^[1]是现代光学测试领域的前沿技术,具有实时、灵活、识别准确度高优点.国外红外技术的发展比较成熟,而且广泛地运用在军事、民用领域.美国 Hughes 航空公司的 A. Mann 设计了波长范围为 8~13 μm 用于探测导弹的红外变焦系统,其变倍比为 3:1,系统 F 数为 2.目前最能代表红外变焦系统发展状态的是 Wescan 公司的 R. L. Sinclair 设计的中波 3~5 μm , 20 倍变倍比的变焦镜头,该系统的焦距范围为 20~400 mm, F 数为 4.我国红外技术在 20 世纪 80 年代开始起步,与西方相比有很大的差距,而对红外变焦的研究就更加少了,目前只有科学院、兵器工业集团、中电集团的几个研究所具有设计、加工红外光学系统的能力.中科院长春光机所研制出了 750~3 000 mm 折反式大口径长波红外变焦光学系统;浙江大学光学工程系设计了一个工作在 8~12 μm 波段,变倍比为 3,变焦范围为 32~96 mm, F 数为 2 的扫描系统.

在坦克上将变焦距透镜作为其瞄准镜应用在联合变换相关器中可以实现在一定焦距范围内对目标的探测与识别,打破了只能对单一焦距、单一视场的目标探测^[2],扩大了搜索范围,实现了连续跟踪,提高了联合变换相关器对目标的探测和识别能力,并且红外波段适用于夜间作战在军事上有着广泛的应用.本文设计的远红外连续变焦光学系统采用机械式补偿

方式对像面漂移进行补偿,并给出了具体的设计参量、设计步骤、变倍曲线和补偿曲线,以及应用该系统所得到的实验结果,验证了系统应用的可行性.

1 联合变换相关器工作原理

联合变换相关器探测的基本原理^[3]是应用衍射原理和光学透镜的傅里叶变换功能实现输入图像的联合傅里叶变换.经 CCD₁ 实时摄取的目标图像与事先存贮在计算机中的参考图像一起输入到电寻址液晶 EALCD₁,联合图像经傅里叶变换透镜 FTL₁ 后,由平方律探测器 CCD₂ 进行探测,得到目标图像和参考图像的联合变换功率谱;输入到 PC₂ 的功率谱经空间光调制器的控制系统输入到电寻址液晶 EALCD₂ 中,经傅里叶变换透镜 FTL₂ 后,由 CCD₃ 摄取目标图像与参考图像的联合变换相关点,根据相关点的位置,可以确定目标及其方位.该方法不仅识别速度快,而且具有较高的探测准确度.联合变换相关器的结构如图 1.

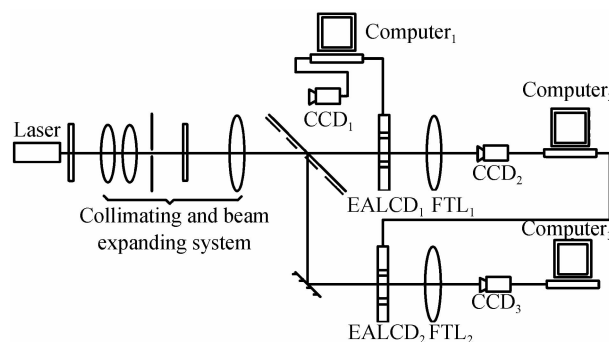


图 1 联合变换相关器的结构
Fig. 1 Configuration of joint transform correlator

基金项目:总装备部预研局“十一五”预研基金(No. 513105)资助

第一作者:徐春云(1989-),女,硕士,主要研究方向为光学设计. Email:kdxuchunyun@163.com

导师(通讯作者):王文生(1944-),男,教授,主要研究方向为光学设计及现代光学测试. Email:wwsciom@163.com

收稿日期:2012-05-21;修回日期:2012-08-29

2 变焦距光学系统

变焦光学系统装配在坦克瞄准镜位置,其视频信号输入到联合变换相关器,即图 1 中的 CCD₁,使坦克既可以在大视场(短焦)时捕获目标,又可以在小视场(长焦)时对目标进行观察瞄准,从而实现联合变换相关器对不同远近距离的目标进行探测和识别.当需要自动变焦时,需由 CCD₁ 摄取的图像信息驱动变倍组和补偿组按图 6 变焦曲线运动.两档或多档变倍的光学系统在视场切换时会出现目标丢失,而连续变倍光学系统可以解决这个问题.连续变焦光学系统可以在一定范围内连续改变焦距从而得到视场角大小不同、影像大小和范围不同的景像,并且其使用方便,在光学领域中得到了越来越广泛的应用.变焦光学系统只解决物像大小变化问题,目标的旋转问题可由综合识别函数方法解决^[4-5].

变焦距系统是通过改变变倍组和补偿组之间的空气间隔来实现焦距的连续变化,同时保持像面稳定,相对孔径基本不变^[6],在均匀改变焦距的同时保证有良好的成像质量.系统组元间在改变间隔的过程中像面会发生漂移,为了实现像面的稳定,需要通过不同类型补偿方式的运动来抵消系统各组元在移动过程中产生的像面漂移.将镜头中的若干透镜或组元用机械方法连在一起同步移动,这是光学补偿的系统模式.光学补偿变焦距系统各透镜组必须移动到某些特殊的位置,才能得到稳定清晰的像面,而且在高变倍比时,像面漂移量较大,在使用中受到了许多限制.系统间各组元遵循一定的规律作复杂的机械移动,最终实现像面完全稳定,这是机械补偿的系统模式.在机械补偿模式中需要用通过高准确度的凸轮^[7]来控制各组元做有规律的运动,使各组元的移动规律精准无误,从而有效地克服了像面漂移.基于像面稳定的特点,以及高效的机械制造工艺技术,机械补偿的系统模式相对其它补偿模式优势明显.目前,机械补偿变焦系统已成功覆盖了大多数变焦系统的应用领域.

对于机械补偿形式的变焦距系统,由于要连续的改变焦距,所以对系统在变焦过程中的要求^[8]为:1) 系统的焦距在一定范围内连续变化;2) 在变焦过程中像面必须稳定;3) 系统的相对孔径保持不变;4) 任意焦距位置系统的成像质量达到要求.

3 变焦光学系统的设计

3.1 光学设计参量及结构

红外变焦距光学系统在系统初始结构建立及系

统变焦原理上与可见光变焦距系统不存在差异,只是所用材料和透光波段等有所不同^[9].一般情况下,坦克瞄准镜的焦距为 120 mm,探测距离约为 3 km.为了扩大坦克对目标的搜索范围,增加探测距离,将变焦镜头的焦距定为 50~200 mm,系统采用 1" CCD 红外探测器,像素尺寸为 30 μm×30 μm,由此确定该系统的截止频率为 17 lp/mm.红外连续变焦光学系统设计指标如表 1.

表 1 光学设计参量

Table 1 Parameters of optical system	
Parameter	Value
Wavelength range/μm	8~12
Zoom ratio	4×
Focal length/mm	50~200
Image size (diagonal)/mm	16
F-number	2.0
Field of view/(°)	18 (short EFL) 4.6 (long EFL)

根据设计参量,通过在专利结构基础上进行修改,得到了如图 2 的变焦系统初始结构图.该结构由九片透镜构成,其中前固定组、补偿组和变倍组均为一片透镜,后固定组由六片透镜组成,最后一片为一平行平板,其作用是作为 CCD 探测器的保护玻璃.前固定组是正光焦度组元,用于聚焦近距离的物体;变倍组是负光焦度组元,通过移动改变系统的焦距;补偿组是负光焦度组元,通过凸轮移动来保持像面稳定,即使像面固定在后焦平面;后固定组是正光焦度组元,它承担系统的大部分光焦度,因为变焦系统补偿组的光焦度为负,所以该系统为负组补偿系统.为满足红外波段的需要,可选择材料非常有限,锗(Ge)、硫化锌(ZnS)和硒化锌(ZnSe)等材料常用于 8~12 μm 光谱带^[10].在此初始结构中,选取 Ge 为变焦透镜的材料.该结构采用机械补偿方式补偿在变焦过程中引起的像面漂移,在设计过程中要注意保证系统的后截距基本保持不变以保证像面稳定.系统初始结构总长度为 465 mm,应用 ZEMAX 设计软件中的多重结构命令,选取短焦(50 mm)、中焦(100 mm)、长焦(200 mm)三个状态作为评判标准,用来评价系统的像质,实现连续变焦.

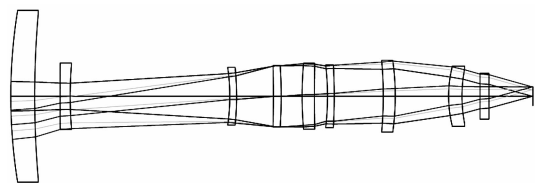


图 2 变焦系统初始结构

Fig. 2 The initial structure of zoom

表 2 给出了初始结构在不同焦距时,各组元之间的间距值,即系统第 2 面,第 4 面,第 6 面到其下一面的距离,焦距不同它们之间的距离也不同,在设计过程中要使三个间距之和保持不变,以保证像面稳定。

表 2 不同焦距时各组元的间距值

Active;1/3	Config1	Config2	Config3	
1: THIC	2	22.699	105.463	164.443
2: THIC	4	142.526	58.899	23.965
3: THIC	6	32.904	31.759	8.999

3.2 设计结果

经优化规划后得到的远红外连续变焦光学系统的二维结构如图 3 所示。(a)~(c)图分别为短焦、中

焦和长焦 3 种情况下的结构.经优化缩短系统总长度后,该系统在三个焦距下的结构总长均为 369.99 mm,满足了像面稳定的需求.分析系统像差情况,此系统第 2、3 面畸变较大,第 10、11、14 面球差较大,适当选取曲率半径和空气间隔作为变量对系进行多次优化设计,对像差进行校正,而采用单一的 Ge 材料,系统的色差一直较大,像质改善不明显,因此在原有的结构基础上更换玻璃材料,将第 5 片和第 7 片镜子的材料变成 ZnSe,将最后一面平行平板向后移动,减小其厚度保持在像面前 1 mm 处作为 CCD 保护玻璃,整个系统没有采用非球面,便于加工及装调,经规划后系统达到了满意的成像质量.在整个变焦过程中,相对孔径保持不变, F 数为 2.

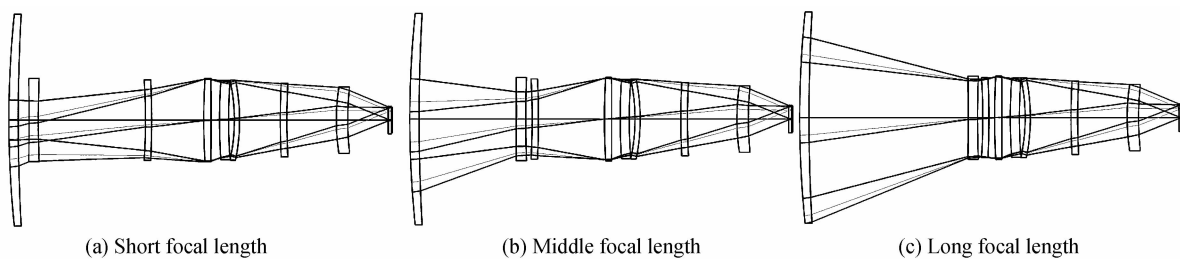


图 3 优化后变焦光学系统的结构图

Fig. 3 The optimized structure of zoom

表 3 给出了设计后系统焦距分别为 50 mm, 100 mm 和 200 mm 时各组元的间距值.通过计算可以看出不同焦距下三个间隔之和不变,均为

表 3 不同焦距时各组元的间距值

Active;1/3	Config1	Config2	Config3	
1: THIC	2	10.44	99.96	153.58
2: THIC	4	103.3	6.27	5
3: THIC	6	50.26	63.77	5.42

164 mm,达到了保证像面稳定的作用。

3.3 像质评价

调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)是评价光学系统的主要方法.图 4 为连续变焦光学系统的调制传递函数曲线,三条曲线表明该系统的调制传递函数均接近衍射极限,且在 17 lp/mm 处 MTF 值均在 0.53 以上,说明该系统在各个变焦位置都取得了较好的成像质量。

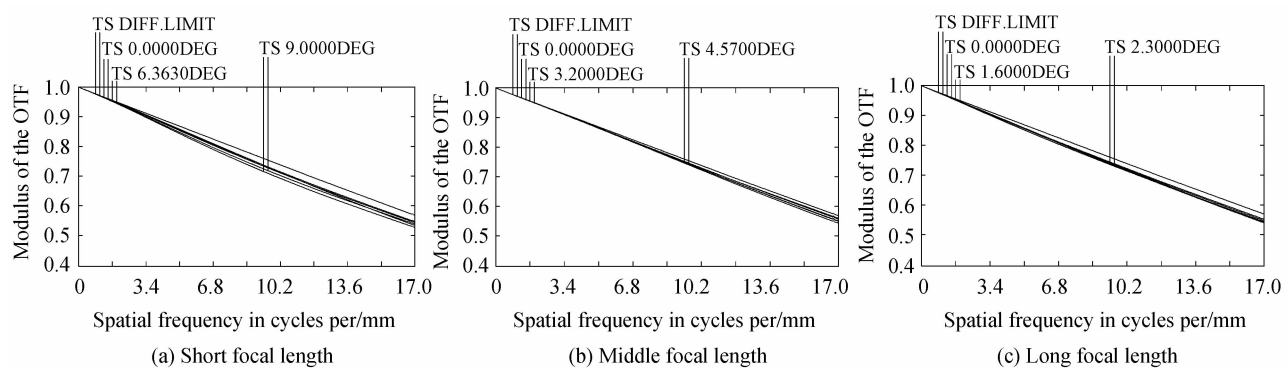


图 4 变焦光学系统的调制传递函数

Fig. 4 Modulate transfer function of zoom

点列图也是评价光学系统像质的一种方法,可以利用点的疏密程度来衡量系统的质量优劣,由图 5 可知,变焦系统短焦、中焦、长焦的各视场的最大

均方根弥散斑半径分别为 14.351、6.598、23.724 μm ,由此可以看出长焦的弥散斑半径最大,但也远小于探测器单个像元 30 μm ,完全符合系统成像要求。

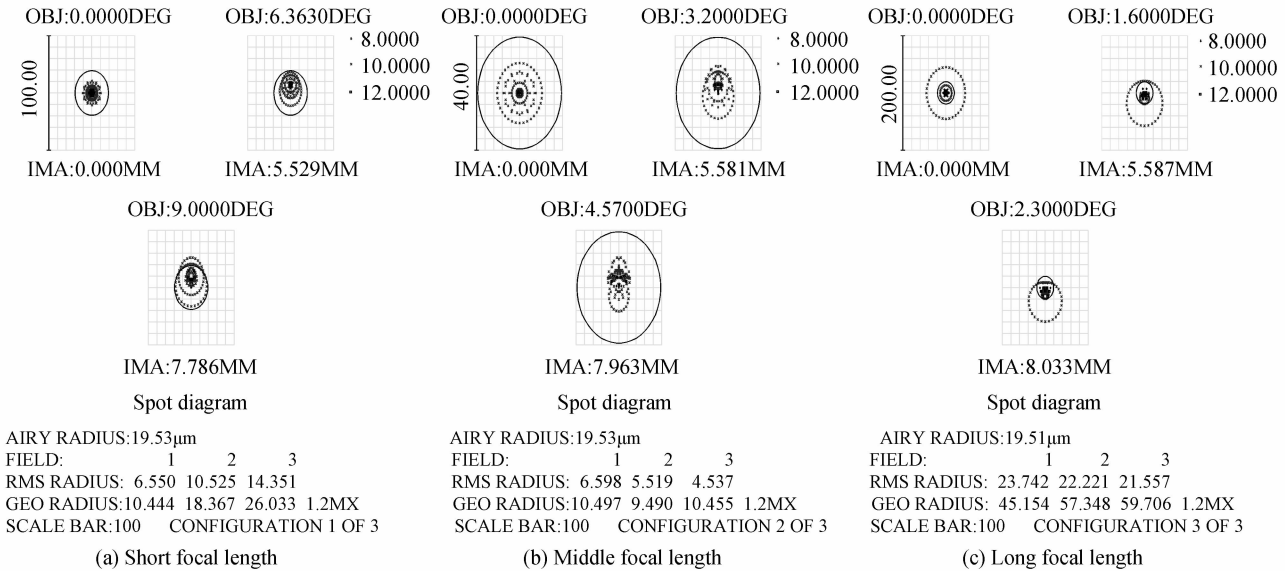


图5 变焦光学系统的点列图
Fig. 5 Spot diagram of zoom

3.4 变焦曲线模拟

在高斯光学公式基础上绘制出的变焦曲线,是基于理想的成像条件下计算出来的,在这种情况下绘制的变焦曲线与实际曲线不相吻合.因此对于实际变焦曲线^[11]模拟,在 ZEMAX 设计软件中采用多次插值的方法^[12],运用 MATLAB 进行变焦曲线拟合,就可得出实际的变焦系统的变倍及补偿曲线.如图 6 所示,该图纵轴代表焦距,横轴分别代表变倍组和补偿组距离前固定组的距离.

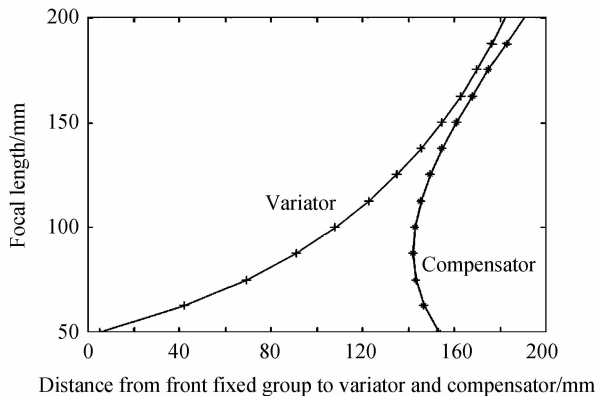


图6 变焦曲线
Fig. 6 Zoom curve

4 实验结果

将所设计的变焦透镜放置在坦克瞄准镜位置,其视频信号输入到联合变换相关器中,即输入到图 1 的 CCD₁ 中.图 7 是基于图 1 原理研制的小型联合变换相关器.作为实验,图 8 为变焦系统所拍摄的一幅红外汽车的实际图像与参考图像,该图像经过一次傅里叶变换后得到如图 9 所示的联合变换功率

谱,将所得功率谱经过第二次傅里叶变换,得到如图 10 所示的相关峰.根据变焦光学系统的焦距和相关峰相对于坐标的位置,可确定目标的方位角和俯仰角.输入给坦克火控跟踪系统,可实现目标的实时探测和跟踪.

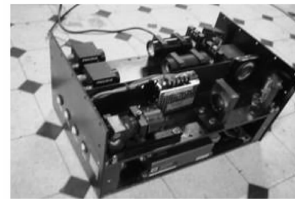


图7 小型联合变换相关器
Fig.7 Miniaturized joint transform correlator



图8 目标与参考图像
Fig.8 Target and reference

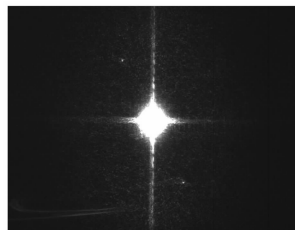


图9 联合变换功率谱
Fig.9 Joint transform power spectrum

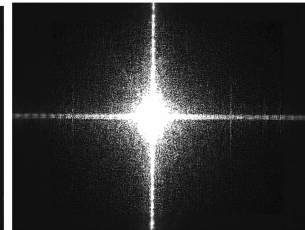


图10 相关峰
Fig.10 Correlation peaks

5 结论

本文针对 1 英寸 CCD 尺寸设计出一个适用于 8~12 μm 红外波段的 4 倍变焦光学系统.该系统采用机械补偿的补偿方式,变焦过程中相对孔径不变,在 50~200 mm 焦距范围内实现连续变焦,扩大了坦克瞄准镜的焦距范围,增加了坦克对目标的探测距离,并且该结构具有体积小,未采用非球面等特点,便于实际加工及应用.用 ZEMAX 光学设计软

件对系统进行了像质评价,结果表明,在空间频率 17 lp/mm 处,各个变焦位置均满足系统要求,像质较好.最后运用 MATLAB 软件对变焦曲线进行模拟,得到平滑的变倍组与补偿组的曲线,实现了连续变焦.将所设计的变焦透镜应用在坦克上作为其瞄准镜在联合变换相关器中使用,进行模拟实验得到了较好的结果,提高了联合变换相关器对目标的识别与跟踪能力.

参考文献

- [1] WANG Wen-sheng. Moving-objet detection and recognition by using Joint transform correlator[C]. *SPIE*, 2002, **4929**: 527-531.
- [2] ZHANG Liang, LIU Hong-xia. Optical design of uncooled high zoom ratio continuous-zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(2): 250-254.
张良,刘红霞.非制冷高变倍比连续变焦光学系统的设计[J]. *应用光学*, 2012, **33**(2): 250-254.
- [3] WANG Wen-Sheng, CHEN Yu, LIANG Cui-ping, *et al.* Hybrid optoelectronic joint transform correlator for recognition of target in cluttered scenes[C]. *SPIE*, 2005, **5642**: 204-212.
- [4] ZOU Xin, LANG Qi, WANG Wen-sheng. Research on distortion invariant target recognition technology in joint transform correlator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(10): 2045-2050.
邹昕,郎琪,王文生.畸变不变联合变换相关器目标识别技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(10): 2045-2050.
- [5] SHANG Ji-yang, ZHANG Yu, WANG Wen-sheng. Application of maximum average correlation height filter algorithm in distorted target recognition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1231-1237.
尚吉扬,张宇,王文生.最大平均相关高度滤波算法在畸变目标识别中的应用[J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1231-1237.
- [6] HAN Ying, WANG Zhao-qi, WU Huan-bao, *et al.* Diffractive/ refractive two-position step-zoom optical system in 8~12 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 886-889.
韩莹,王肇圻,吴环宝,等.紧凑型 8~12 μm 波段折/衍混合双位置两档变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 886-889.
- [7] YAN Lei, JIA Ping, HONG Yong-feng, *et al.* Selection of cam curve for zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(6): 876-882.
晏蕾,贾平,洪永丰,等.变焦距镜头凸轮曲线形式的选择[J]. *应用光学*, 2010, **31**(6): 876-882.
- [8] WANG Qi, WANG Guang-yu, CHENG Xue-min, *et al.* Gauss optics of zoom lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 983-988.
王琦,王光宇,程雪岷,等.变焦距镜头光高斯光学设计的新方法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 983-988.
- [9] BAI Yu, YANG Jian-feng, RUAN Ping. Design of long wavelength infrared continuous zoom optical system [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, **23**(5): 15-17.
白瑜,杨建峰,阮萍.长波红外连续变焦光学系统设计[J]. *光电技术应用*, 2008, **23**(5): 15-17.
- [10] 余怀之.红外光学材料[M].北京:国防工业出版社,2007:3-5.
- [11] WANG Chun-yan, WANG Zhi-jian, ZHOU Qing-cai. Solving the cam curve of the compensating group about zoom lens using dynamic optical theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 891-894.
王春艳,王志坚,周庆才.应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮曲线[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 891-894.
- [12] FAN Zhe-yuan, CAO Jian-zhong, QU En-shi, *et al.* Design of an 8 times ratio visible zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 101-104.
范哲源,曹剑中,屈恩世,等.一种 8 倍可见光变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 101-104.

Far Infrared Zoom Lens Design Used in Joint Transform Correlator

XU Chun-yun, ZHANG Su, DONG Jia-ning, WANG Wen-sheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to meet the requirement of tank sight and improve the ability of joint transform correlator in target tracking and recognition, an infrared continuous refractive zoom optical system for 8~12 μm wave-band is designed for 1 inch infrared CCD detector. The zoom system uses mechanical compensation. The relative aperture is invariant during the zoom process. The F number of the system is 2, and the zoom ratio is 4 : 1. The focal length from 50 mm to 200 mm could be changed continuously. Variable magnification curve and compensation curve are smooth. The range of tank sight searching targets was expanded. The optical system image quality is evaluated with ZEMAX optical design software. The results have shown when spatial frequency is 17lp/mm, the MTF curve in the whole range of focal length are all above 0.55 which is closed to the diffraction limited curve. The stability of the image plane is well. The result of this system meets the requirement of technical specification.

Key words: Optical design; Joint transform correlator; Infrared zoom optical system; Mechanical compensation