

文章编号: 1672-8785(2017)05-0019-08

20 倍非制冷长波红外连续 变焦光学系统的设计

陶 郅¹ 王 敏¹ 肖维军²

(1 福建师范大学光电与信息工程学院福建省光子技术重点实验室

暨教育部医学光学重点实验室, 福建福州 350007;

2 福建福光股份有限公司, 福建福州 350007)

摘 要: 基于像元大小为 $25\ \mu\text{m}$ 的 384×288 非制冷型凝视焦平面阵列探测器, 设计了一种 20 倍非制冷长波红外连续变焦光学系统。该系统的工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, F 数为 1.3, 具有相对孔径大、变倍比大和变焦凸轮曲线平滑等优点。该系统共有 7 片镜片, 使用 2 种材料组组合, 其中多数透镜使用常用的锗材料, 以减少使用昂贵材料和便于加工。通过使用 1 片衍射面元件和 2 片非球面元件实现了紧凑的结构。该系统的奈奎斯特空间频率为 $20\ \text{lp/mm}$, 短焦、长焦的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 大于 0.4, 中焦 MTF 大于 0.58。MTF 值体现出该系统具有极好的像质特征。

关键词: 光学设计; 变焦; 长波红外; 大相对孔径

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.05.004

Design of a $20\times$ Uncooled Thermal Long Wavelength Infrared Continuous Zoom Optical System

TAO Zhi¹, WANG Min¹, XIAO Wei-jun²

(1 Fujian Provincial Key Laboratory of Photonic Technology and Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, College of Photonic and Electronic Engineering,

Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2 FuJian Forecam Incorporated Company, Fuzhou 350007, China)

Abstract: On the basis of a 384×288 uncooled staring focal plane array detector with pixel size of $25\ \mu\text{m}$, a 20-fold uncooled long wavelength infrared continuous zoom optical system is designed. The operation waveband of the system is $8\sim 12\ \mu\text{m}$ and its F number is 1.3. It has the advantages of larger relative aperture, higher zoom ratio and smooth zoom path etc. The system consists of seven lenses which are made from a combination of two kinds of materials. Most of the lenses are made from common germanium material so as to reduce the use of expensive materials and be easy for processing. By using one diffraction optical element and two aspheric elements, a compact structure of the system is realized. The system has its Nyquist spatial frequency of $20\ \text{lp/mm}$, Modulation Transfer Function (MTF) greater than 0.4 for short focus and long focus and MTF greater than 0.58 for middle focus. These MTF values show that the system has excellent image quality.

Key words: optical design; zoom; long wavelength infrared; large relative aperture

收稿日期: 2017-02-05

作者简介: 陶郅(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计, 光学仪器研究。 E-mail: taozhieu@163.com

0 引言

随着国内外对各大红外探测器的不断探索和研究, 红外非制冷探测器在近几年得到了飞速的发展, 探测器不断向大靶面、小像元的方向发展, 红外探测系统的分辨率不断提高。红外连续变焦镜头能在一定范围内改变系统的焦距, 视场的大小可随焦距的变化而变化, 大视场可用来搜索目标, 小视场可用来仔细观察目标, 其性能是固定视场和焦距的定焦镜头无法实现的, 在民用与军用领域有着良好的应用前景^[1]。由于红外成像技术只对红外热辐射成像, 能够透过雾、霾和墙体等进行成像, 所以其在医疗、工业、军事等众多领域有着广泛的应用。

随着长波红外变焦系统的不断发展, 变倍比为 20 倍的长波红外光学系统的技术要求也一直在提高。文献 [2] 设计了一种 8~160 mm 的 20 倍长波红外边角光学系统, 但该光学系统的像面尺寸小, 并没有发挥出短焦焦距短的优势, 其短焦视场角仍比较小, 而系统的体积和总长都比较大^[2]。

文献 [3] 设计的光学系统的焦距范围为 15~300 mm, 仅使用了 6 片镜片。该系统重量轻且便于装调, 但其相对孔径小, 衍射极限低, 像质也比较低。小相对孔径会使探测器的灵敏度大大降低, 从而使信噪比变差^[3]。

总结以上的设计并结合目前探测器大靶面小像元的发展趋势, 本文设计了一种焦距为 10~200 mm 的 20 倍长波红外连续变焦光学系统。该设计实现了更大的视场角和更短的系统长度。非制冷型探测器的灵敏度远低于制冷型探测器, 因此非制冷型探测器要求大相对孔径以满足高灵敏度的要求。本系统的相对孔径大, 能更好地匹配探测器使用。

本设计主要用于红外摄像机, 应用于夜间和雨雾天气的河道监控和管理以及河道蓝藻、河道入海口赤潮的辅助监管, 也可用于安防及森林防火的监控。

1 设计思路及理论分析

1.1 衍射理论

衍射光学元件又称二元光学元件, 是根据光学元件的波前衍射理论在计算机仿真软件下设计, 通过超大规模集成电路制作, 在片基上(或传统光学器件表面)刻蚀产生多个台阶的浮雕结构或连续浮雕结构, 形成纯相位和同轴再现, 具有极高衍射效率的一类光学元件^[4,5]。衍射级次为 1 的二元衍射光学元件通常只对设计波长附近的波段有高透过率。但由于二元衍射光学元件具有不同于球面光学元件的负色散光学特性, 故可在折射光学系统中同时校正球差与色差。并且该元件具有简化光学结构的特点, 其中的常规折射元件的曲面能提供大部分聚焦功能, 其表面的浮雕相位波带结构能校正像差^[6]。

二元衍射光学元件的光焦度可以表示为

$$\varphi(\lambda) = \frac{1}{f(\lambda)} = [n(\lambda) - 1](c_1 - c_2) \quad (1)$$

式中, λ 表示某一波长, $n(\lambda)$ 表示此波长下透镜的折射率, c_1 、 c_2 分别为透镜的曲率半径。

其等效阿贝数表示为

$$V_0 = -\frac{\lambda_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2)$$

式中, λ_0 是中心波长, 例如在长波 8~12 μm 波段中, 取 $\lambda_0=10$, $\lambda_1=8$, $\lambda_2=12$, 则此时 $V_0 = -2.5$ 。

由式 2 可知, 二元衍射光学元件的色散只和元件所透过的波段有关系, 不受透镜材料本身性质的影响。因此, 把具有同样环带宽度和环带深度的二元衍射表面刻画在任意基底的光学材料上, 所得到的色散性质是相同的。二元衍射光学元件的光焦度随波长的增大而增大。通过对比二元衍射元件的阿贝数和传统光学元件的阿贝数可以发现, 其色散性质是相反的。此特性能很好地消除色差。衍射元件通常是按照第一衍射级设计的^[8]。

1.2 凸轮曲线运动的轨迹方程

由动态光学理论可知, 当变倍组合补偿组同时运动时, 若要改变系统焦距, 系统必须保持像面在同一位置, 变焦组元 q_1 和补偿组元 q_2 都

沿光轴上的直线移动。通常, 变焦组元 q_1 为线性运动, 则 q_1 、 q_2 的运动关系可以表示为

$$Aq_2^2 + Bq_2 + C = 0 \quad (3)$$

式中,

$$A = (f'_1 - \beta_1 q_1) \beta_2$$

$$B = \beta_1 \beta_2 q_1^2 + [f'_2(1 - \beta_2^2) \beta_1 - f'_1(1 - \beta_1^2) \beta_2] q_1 - f'_1 f'_2 (1 - \beta_2^2)$$

$$C = \beta_2^2 f'_2 [\beta_1 q_1 - f'_1(1 - \beta_1^2)] q_1 \quad (4)$$

则

$$q_2 = \frac{-\beta \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5)$$

式中, β_1 为变焦组元的放大倍率, β_2 为补偿组元的放大倍率, f'_1 为变焦组元的焦距, f'_2 为补偿组元的放大倍率。

通过求解 q_2 可得到离散的补偿组移动位置, 再将所得的数据用 MATLAB 软件拟合成变焦组与补偿组的运动轨迹方程。

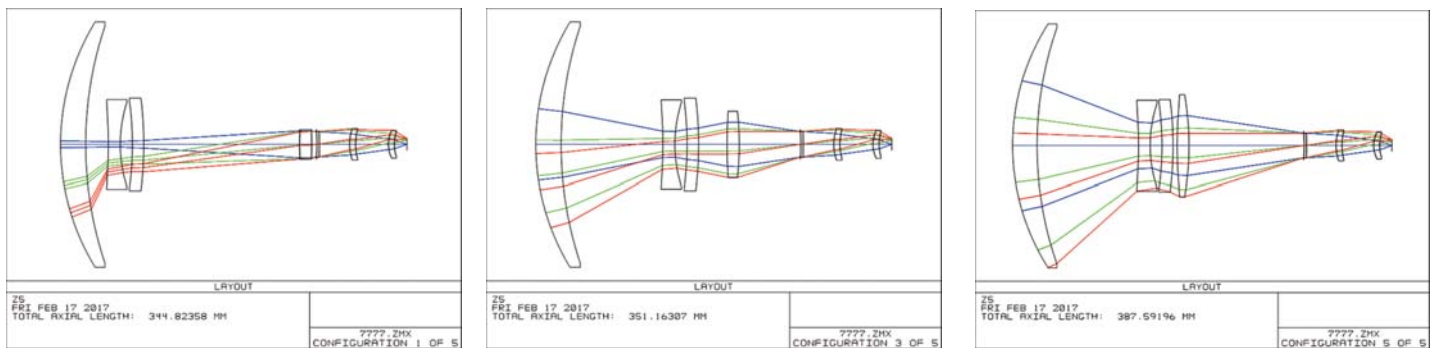
2 光学系统的设计

本系统采用法国 Sofradir 公司生产的长波非制冷探测器, 探测器的尺寸为 384×288 , 像元的大小为 $25 \mu\text{m}$ 。系统的设计指标见表 1。

表 1 系统的技术指标

Parameters	Value
Wavelength	8~12 μm
Zoom ratio	20
FOV/($^\circ$)	3.36 $^\circ$ (NFOV) 68.96 $^\circ$ (WFOV)
f	10~200 mm
F/#	1.3
MTF(short)	>0.4@20 lp/mm
MTF(long)	>0.5@20 lp/mm

根据设计指标查找专利, 选择合理的初始结构。在分配初始结构时, 尽量简化各组元, 借助各组元的结构形式降低整体的像差。系统的前固定组、变倍组、补偿组对系统整体像差的贡献量不同, 是由不同焦距段的相对位置不一致导致的。在优化过程中, 应当依据这三组在不同焦距段的像差贡献量改变走向, 调整系统, 校正到各组元在各个焦距段的像差接近。本文使用 ZEMAX 光学仿真软件对系统进行优化, 通过增加或减少镜片、更换材料、改变系统中各个元件的形状及各个元件间的间隔, 使系统达到设计指标。最后本系统由 2 种材料 7 片透镜组成。其中使用 1 片二元衍射元件和 2 个非球面, 系统的结构如图 1 所示。



(a)Short EFL

(b)middle EFL

(c)long EFL

图 1 变焦系统结构图

设计采用“+++”型正组机械补偿结构, 系统的前固定组为单片正光焦度的锗, 因前固定组在长焦时的口径大, 光线的高度高, 球差、

像散、高级球差的量级都很大, 使用大折射率的锗材料可以减小光线在单片上产生的像差。

变倍组使用负光焦度的负正分离结构。变倍

组在长焦位置时仍然具有大的口径和高光线。在短焦位置时,光线在镜片上的入射角度大,轴外光线的高度高,像散大。为校正像差,使用正负光焦度分离的锗—AMTIR 材料组合,通过增加折射率差和阿贝数差矫正高级球差,并且该材料的高折射率性能能减小高级像散的增大。在变倍组负光焦度透镜的第一面刻画二元衍射结构,利用其负色散的特性减小系统的整体色差。变倍组对其位置导程的距离有决定性作用,而且对前固定组焦距 f_1 也起重要作用。变倍组的导程随 f_2 变小而逐渐变小,使 f_1 变得更小。变倍组的焦距会直接影响整个系统的外形尺寸。因此,在像质允许的情况下尽量缩小变倍组焦距是缩短镜头外形尺寸的有效方法^[7]。

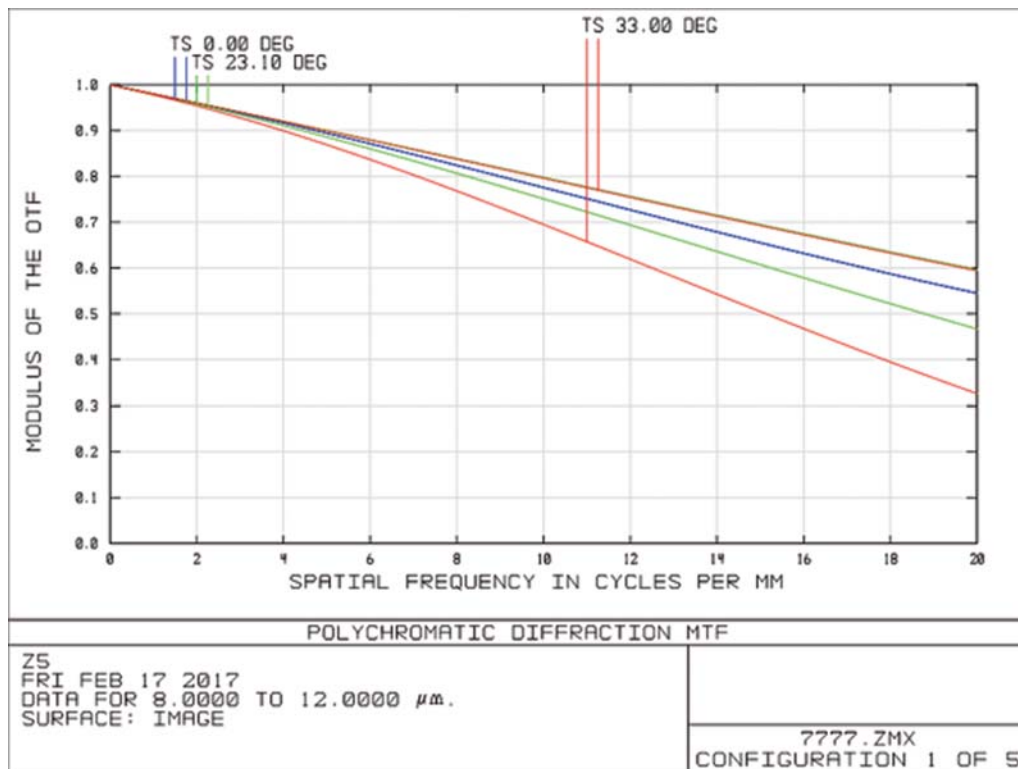
本系统补偿组采用正光焦度补偿,由于补偿组产生的像散和畸变小,且与前组和变倍组光线相比也比较低,故使用高折射率单片锗材料来减小像差。后固定组可视为前后两部分;前组部分采用锗和 AMTIR1 材料的组合,以减小自

身产生的像差;后组部分在第一面使用非球面平衡前组所产生的剩余像差。从整体上看,后固定组控制了系统的后工作距和光学筒长,在校正自身像差的前提下,还可以平衡前固定组、变倍组和补偿组的残余像差。

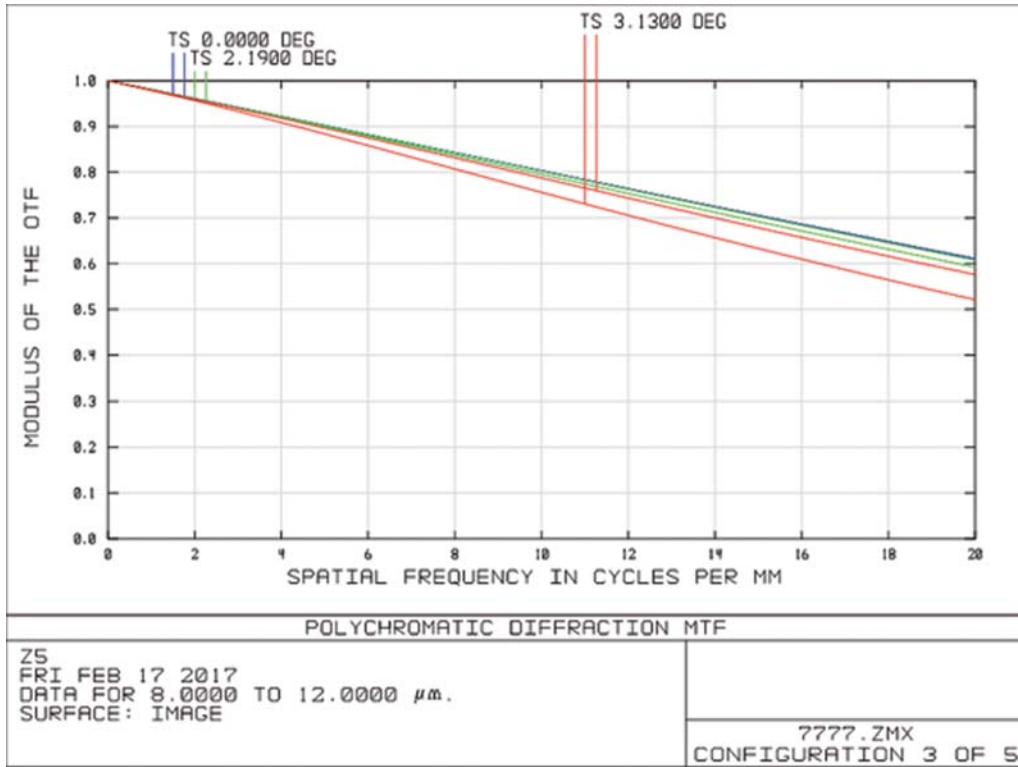
系统的总长度小于 330 mm,后工作距离大于 15 mm,系统在设计过程中保持后工作距不变以保证像面稳定^[9]。

3 设计评价

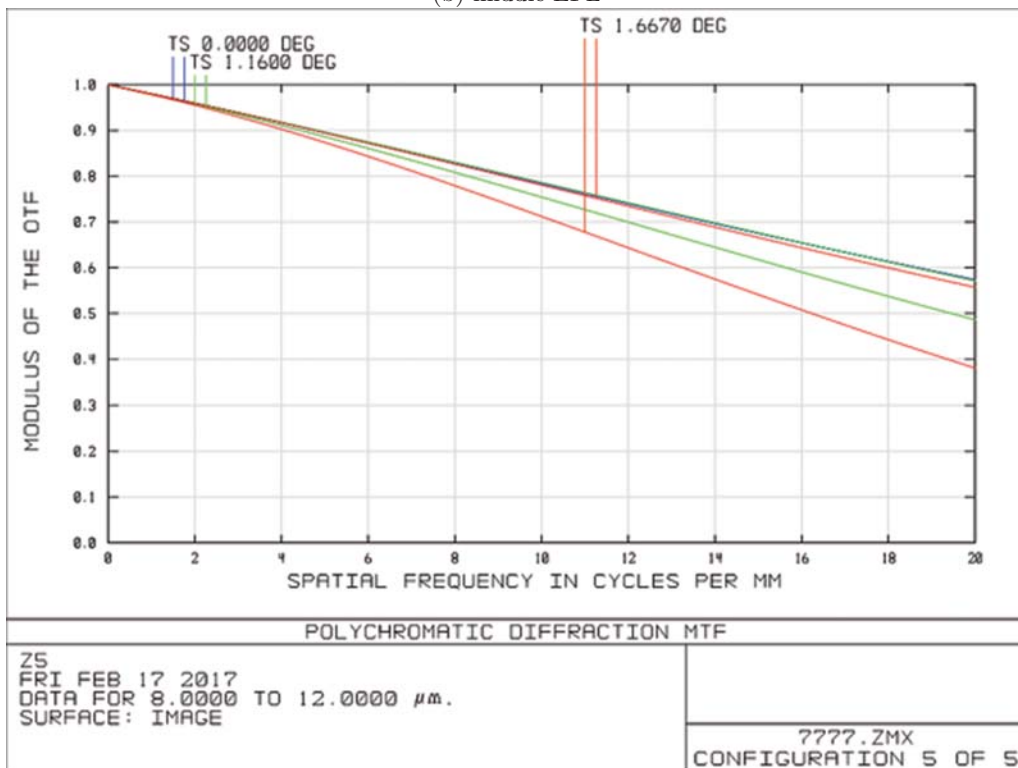
该系统的传递函数曲线图如图 2 所示。接近衍射极限时,系统的奈奎斯特空间频率为 20 lp/mm,此时短焦 MTF 大于 0.4,中焦 MTF 大于 0.58,长焦 MTF 大于 0.47,说明在短焦、中焦、长焦范围内系统都具有良好的像质。系统的点列图如图 3 所示,在各个焦距处弥散斑的均方根(Root Mean Square, RMS)均小于像元(25 μm),从而符合探测器的使用要求。



(a) Short EFL

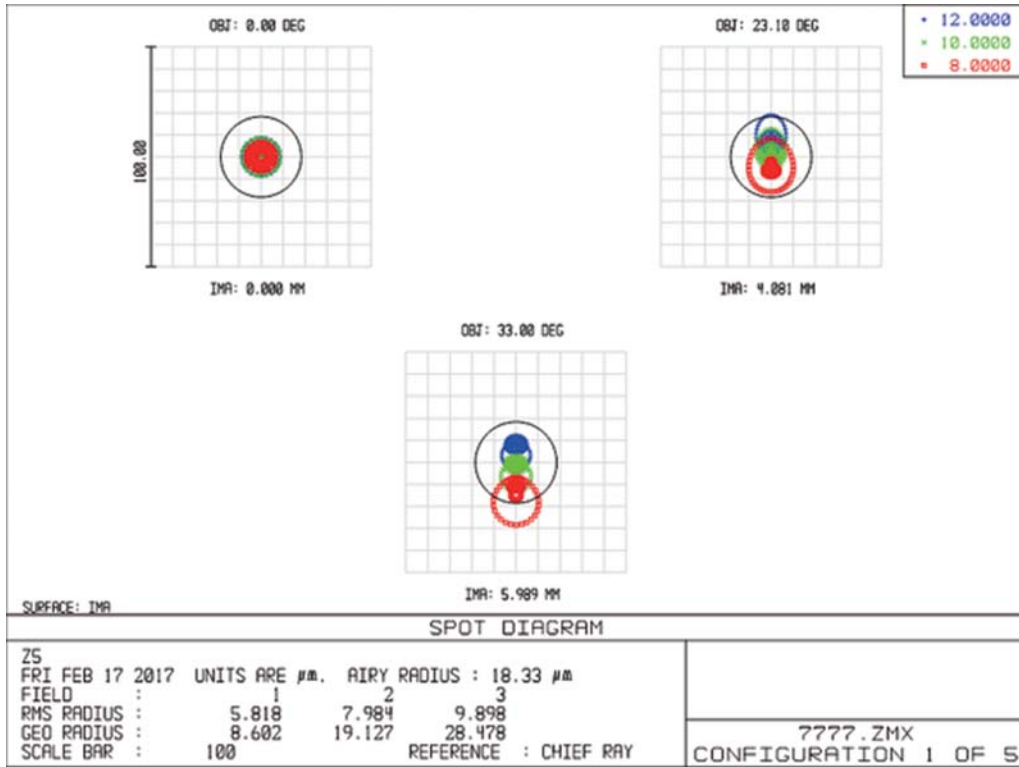


(b) middle EFL

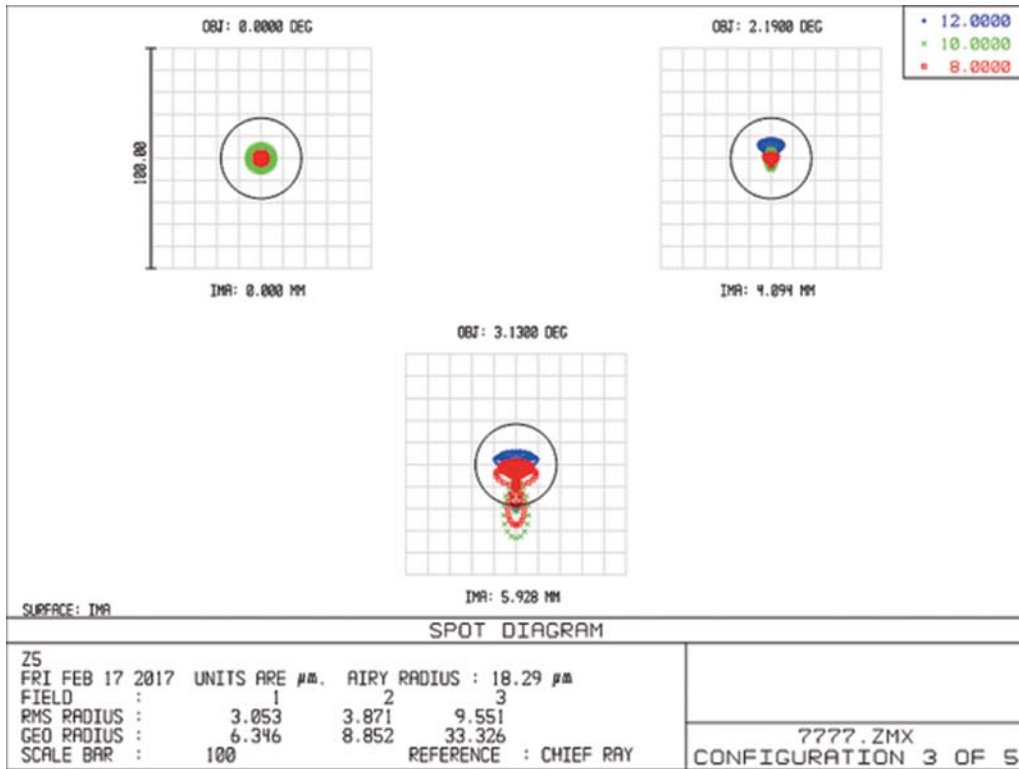


(c) long EFL

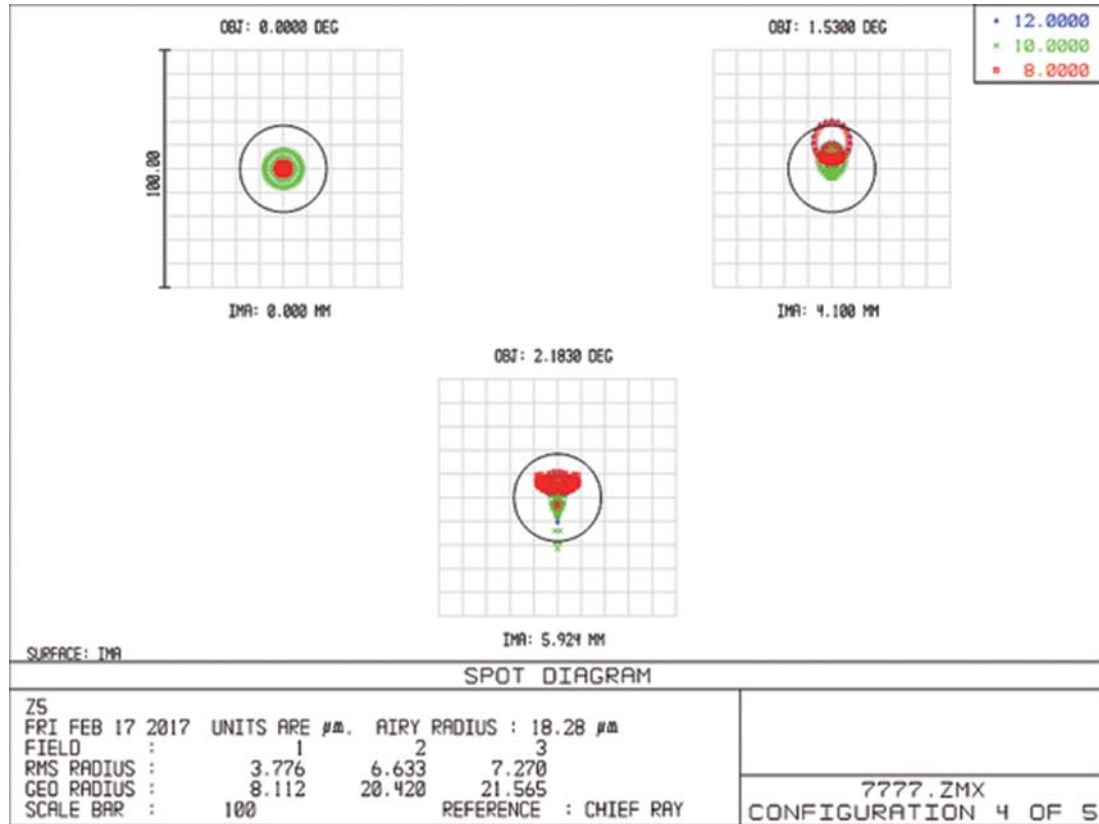
图 2 系统 MTF 曲线图



(a) Short EFL



(b) middle EFL



(c) long EFL

图 3 系统点列图

根据凸轮曲线运动的轨迹方程, 由 ZEMAX 宏导数得到该光学系统的变焦轨迹曲线, 如图 4 所示, 变倍组做线性运动, 补偿组做非线性运动, 曲线平滑顺畅。

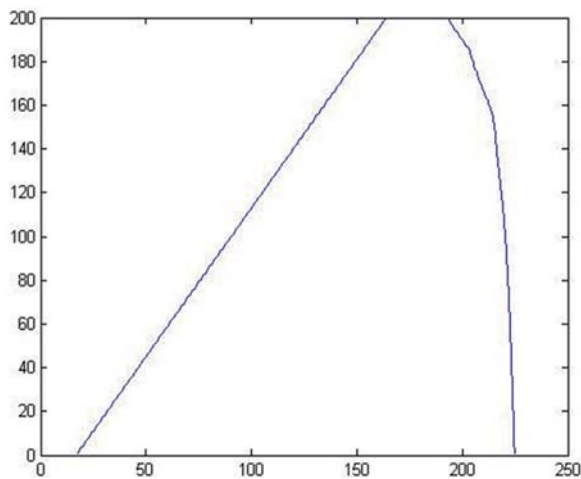


图 4 变倍组与补偿组的变焦轨迹曲线

该光学系统可用于红外长波摄像机。如果配合像元大小为 $25\ \mu\text{m}$ 的 384×288 非制冷红外探测器, 则还可用于夜间和雨雾天气的河道监控和管理以及河道蓝藻、河道入海口赤潮的辅助监管。

选择短焦结构作公差分析。对于零件表面特性, 目前国内对红外材料仍以传统光学零件冷加工的方法加工。故选择半径公差变化为 $0.2\ \text{mm}$, 厚度公差变化为 $30\ \mu\text{m}$ 。根据目前国内定心磨边机常用加工定心的精度, 确定偏心公差变化为 $30\ \mu\text{m}$, 倾斜公差变化为 $1.2'$ 。对于大口径的红外光学变焦系统, 目前多以人工装配调试安装。因此, 光学元件的偏心公差变化为 $30\ \mu\text{m}$, 倾斜公差变化为 $1.2'$ 。分析最敏感公差的结果见表 1, 其余公差的偏差值均小于 0.006 , 蒙特卡罗公差分析结果见表 2。实际拍摄结果如图 3 所示, 各焦距段的成像均能达到实际使用要求, 图像特征清晰。

表2 最敏感公差结果

Type	Surface	Tolerance	Charge
surface irregularity	8	1	-0.02514443
surface irregularity	10	1	-0.01667293
surface irregularity	11	1	-0.01580429
radius	14	0.2 mm	-0.00666506

表3 蒙特卡罗公差分析结果

Monte Carlo analysis	MTF value
90%	0.49342366
80%	0.50552938
50%	0.51818301
10%	0.52751512



(a) 长焦



(b) 中焦



(c) 短焦

图5 光学系统实拍图

4 结论

总结了20倍长波红外连续变焦光学系统设计过程中的难点。针对探测器靶面小、系统总长度长、结构大、F数要求小以及短焦视场角小等突出的问题,设计了一种7片式20倍长波红外连续变焦光学系统。该系统使用了像元大小为 $25\ \mu\text{m}$ 的 384×288 非制冷型焦平面阵列探测器,仅使用了2种常用的红外材料、1片衍射面和2个非球面的正组补偿结构,像质良好。该系统能被广泛应用于森林防火、雾霾等特殊天气监控等领域。

参考文献

- [1] 刘荣刚, 刘琳, 张兴德, 等. 用于 160×120 元非制冷热像仪的红外连续变焦镜头[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(4): 275-277.
- [2] 刘峰, 徐熙平, 段洁, 等. $20\times$ 非制冷型红外变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 866-870.
- [3] 杜玉楠, 牟达, 刘莹莹, 等. $20\times$ 长波红外变焦光学系统设计[J]. *红外技术*, 2013, **35**(10): 607-611.
- [4] Wang H, Bai Y, Luo J J. Hybrid Refractive/diffractive Optical System Design for Light and Compact Uncooled Longwave Infrared Imager[C]. *SPIE*, 2012, **8416**: 84162N-1.
- [5] Oikawa M, Misawa S, Banno J, et al. Stacked Planar Optics: an Application of the Planar Microlens[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**: 3456-3460.
- [6] 刘瑞奇, 陈星明, 赵佳琪衍射光学元件在红外成像光学系统中的应用[J]. *红外技术*, 2009, **31**(6): 327-330.
- [7] 徐亮, 张国玉, 高玉军, 等. 8倍非制冷型红外折/衍射连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 478-481.
- [8] 白瑜, 杨建峰, 薛彬, 等. 非制冷热成像长波红外两档变焦光学系统[J]. *红外技术*, 2009, **31**(3): 156-159.
- [9] 徐春云, 张肃, 董家宁, 等. 基于联合变换相关器的远红外变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1447-1451.