

文章编号: 1672-8785(2017)10-0013-07

长波红外变焦光学系统设计

虞 翔 刘云芳 张友伟 张慧卿 郑列华 汤心溢

(中国科学院上海技术物理研究所公共技术室, 上海 200083)

摘 要: 针对像元尺寸为 $17\ \mu\text{m} \times 17\ \mu\text{m}$ 的非致冷型 640×480 元探测器, 基于补偿组兼顾调焦群作用的 Varifocal 结构, 仅用 4 片透镜就设计出了一种变倍比为 $6\times$ 的长波红外连续变焦光学系统。针对低成本、高透波率的指标要求, 通过理论计算得到了初始结构, 并用 CodeV 软件对其像差进行了优化, 最后针对设计结果进行了凸轮曲线求解和像质评价。结果表明, 当工作在 $8 \sim 12\ \mu\text{m}$ 波段时, 在相对孔径 $1.4:1$ 保持不变的条件下, 该系统实现了焦距从 20 mm 到 120 mm 的连续变焦, 而且空间频率 20 lp/mm 处的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值均大于 0.5。通过样机实测发现, 该系统具有变倍比大、结构紧凑和分辨率高等特点, 因而适用于红外监控设备。

关键词: 光学设计; 红外变焦; 变焦点; 长波红外

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.10.003

Design of High Ratio LWIR Varifocal System

YU Xiang, LIU Yun-fang, ZHANG You-wei, ZHANG Hui-qing, ZHEN Lie-hua, TANG Xin-yi

(Department of Public Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: According to a 640×480 uncooled detector with pixel size of $17\ \mu\text{m} \times 17\ \mu\text{m}$, a long wavelength infrared varifocal optical system with varifocal ratio of $6\times$ is designed with only 4 lenses. To meet the requirements of low cost and high transmission, an initial configuration is obtained through theoretical calculation. The aberration of the initial configuration is optimized by using the CodeV software. Finally, cam curve solution and image quality evaluation are carried out for the design result. The result shows that when the relative aperture of $1.4:1$ is kept, the optical system can realize continuous zooming from 20 mm to 120 mm in the 8 to $12\ \mu\text{m}$ waveband. The Modulation Transfer Function (MTF) at the spatial frequency of 20 lp/mm is greater than 0.5. It is found in the actual measurement of the prototype that the optical system has the features of large zooming ratio, compact configuration and high resolution. It is suitable for infrared monitoring systems.

Key words: optical design; infrared zoom system; varifocal; long wave infrared

0 引言

红外光学系统具有夜视效果好、气候适应性强等特点, 近年来在监控和车载领域得到了大量应用。由于兼顾大视场侦察和小视场瞄准

跟踪的技术特点, 变焦镜头已经成为了红外研究的重点。但是红外变焦镜头^[1-4]一般结构复杂、透镜数量多, 因而存在加工成本高、红外透波率小等问题。针对上述问题, Varifocal 系统^[5]虽然在变倍时焦平面有偏移而需重新调焦, 但

收稿日期: 2017-04-13

基金项目: 上海市浦江人才项目 (15PJ1409000)

作者简介: 虞翔 (1980-), 男, 上海人, 副研究员, 博士, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: yuxiang@mail.sitp.ac.cn

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>

INFRARED (MONTHLY)/VOL.38, No.10, OCT 2017

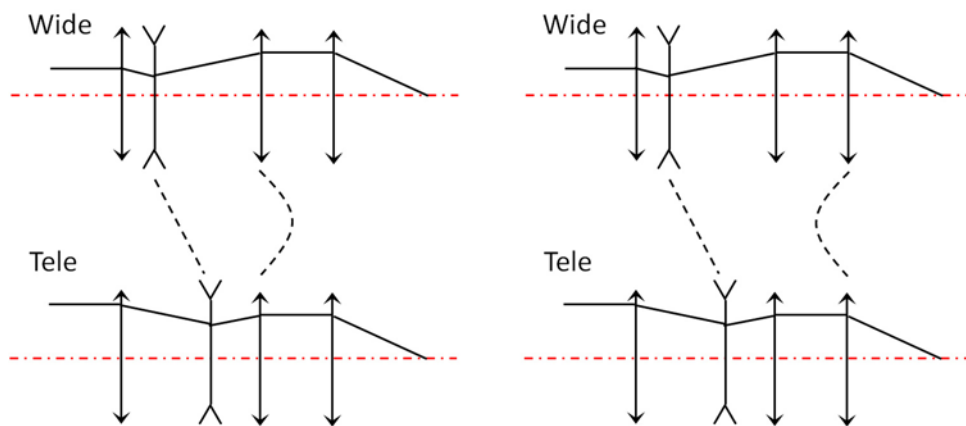


图 1 传统的 4 群变焦系统 (a) 与 Varifocal 系统 (b) 的区别

是与变焦系统相比,该系统具有移动机构简单、透镜数量少等特点,有利于实现光学系统的小型化和轻量化。特别是随着近年来自动对焦技术的日趋成熟,Varifocal 系统能够在变倍组移动的同时,根据算法通过图像处理实现快速目标调焦,以满足红外系统的快速跟踪和低成本要求。

本文先从结构上分析了传统变焦系统与 Varifocal 系统的不同点,然后详述了 6 倍变焦光学系统的设计指标、设计过程和结果评估。结果表明,该系统具有相对孔径大、成像质量高、变倍比大、结构简单等优点,符合红外变焦产品的发展方向,因此对红外监控设备的普及具有重要意义。

1 变焦系统的原理

1.1 Varifocal 系统的特点

红外变焦光学系统的变焦原理与可见光变焦系统基本一致,只是在工作波段和玻璃材料等方面有所不同。所谓变焦系统^[6-8]需要满足以下三点:(1)具有可连续变倍率;(2)在变倍率过程中,像面位置不变;(3)变焦范围内任意焦距的成像性能满足设计要求。如图 1(a)所示,传统的变焦系统采用“正负正正”4 群结构。其中,第 1 群为对焦群,第 2 群为变倍群,第 3 群为补偿群,第 4 群为固定群。第 3 群不产生倍率变化,只起到将第 2 群的出射光转换成平行光的作用。在对近距离目标进行对焦时,通过第 1 群的位置前移可以实现入射光线角度不变,从而

使各群倍率不变。因此,在任意的物距范围内,第 2 群至第 4 群的位置固定。但是由于工作环境一般要求红外系统的第 1 群固定不动,所以传统的 4 群变焦结构并不适合红外变焦系统。

如图 1(b)所示,Varifocal 系统同样采用“正负正正”4 群结构。第 2 群变倍时所产生的像面移动由第 4 群补偿。在对近距离目标进行对焦时,由于第 1 群至第 3 群的横向倍率与 INF 状态有较大变化,所以在不同的焦距位置上,第 4 群的移动量也不相同。但由于 Varifocal 结构中第 1 群和第 3 群都固定不动,只需移动第 2 群和第 4 群,因此具有结构紧凑、镜片数量少等特点。

2 光学设计

2.1 设计指标

我们采用常规的非制冷型长波红外探测器对光学系统进行了优化设计。该探测器的像元数为 640×512 ,像元尺寸为 $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ 。表 1 列出了本文系统的具体光学技术指标。

表 1 长波红外变焦系统的设计指标

参数	数值
工作波段 (μm)	8 ~ 12
F 数	1.4
变倍比	10
焦距 (mm)	20 ~ 120
像高 (mm)	14.0
广角端视场角 (deg)	41.0
望远端视场角 (deg)	7.0

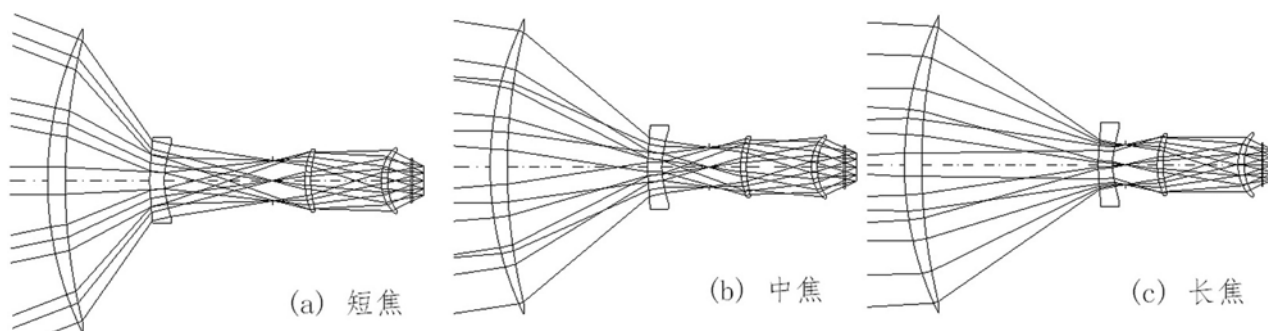


图 2 不同焦距位置上的变焦系统结构图

2.2 系统结构图

基于前面介绍的 Varifocal 理论和高斯公式, 根据所设的变倍比以及长焦端第 2 群与第 3 群镜片之间的最小间隔可以计算得到该光学系统的初始结构。然后合理地限定透镜参数 (如空气间隔、透镜厚度和表面曲率等), 并利用 CodeV 光学设计软件进行像差校正和系统优化。图 2 所示为优化结果。其中, 图 2(a)、图 2(b) 和图 2(c) 分别为短焦 20 mm、中焦 50 mm 和长焦 120 mm 三种情况下的外形构造图。

如图 2 所示, 由于每群只用 1 片镜片, 本文系统共由 4 片透镜组成, 因而具有镜片数量少、质量轻等特点; 该系统的总长度为 190 mm, 其望远比达到 1.58, 因而具有结构紧凑的特点。在变焦过程中, 第 1 群和第 3 群固定不动, 第 2 群和第 4 群通过前后移动分别实现变倍和像面补偿的功能。考虑到红外材料的透波率和吸收性, 为了既实现镜片数量少又达到高变倍比的目标, 光学材料全部选用折射率较高的锗。在对焦过程中, 第 1 群至第 3 群固定, 然后通过第 4 群前后移动实现系统的对焦功能。

另一方面, 考虑到变倍过程中由第 2 群产生的像差和二级光谱难以校正, 为了有效地校正色差和平衡像差, 除了使用非球面之外, 还在变倍群中引入了衍射面, 以图在镜片数尽可能少的条件下提高系统的成像质量。

2.3 变焦曲线

如图 3 所示, 在光学系统由短焦端至长焦端的变焦过程中, 变倍组的最大移动范围为 50 mm; 补偿组呈 U 型移动, 其移动范围为 -1.1 ~

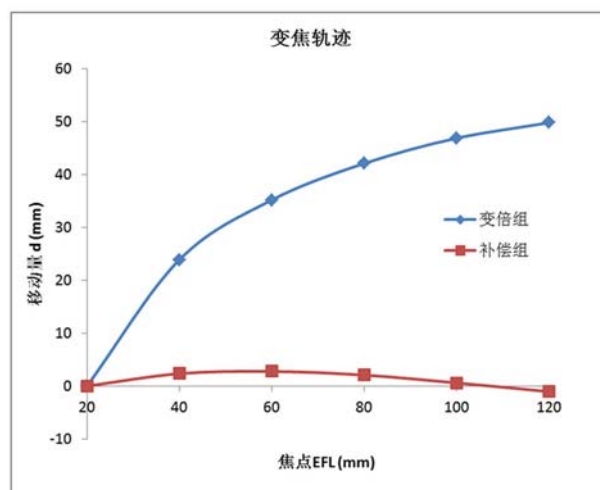


图 3 变倍组和补偿组的运动曲线

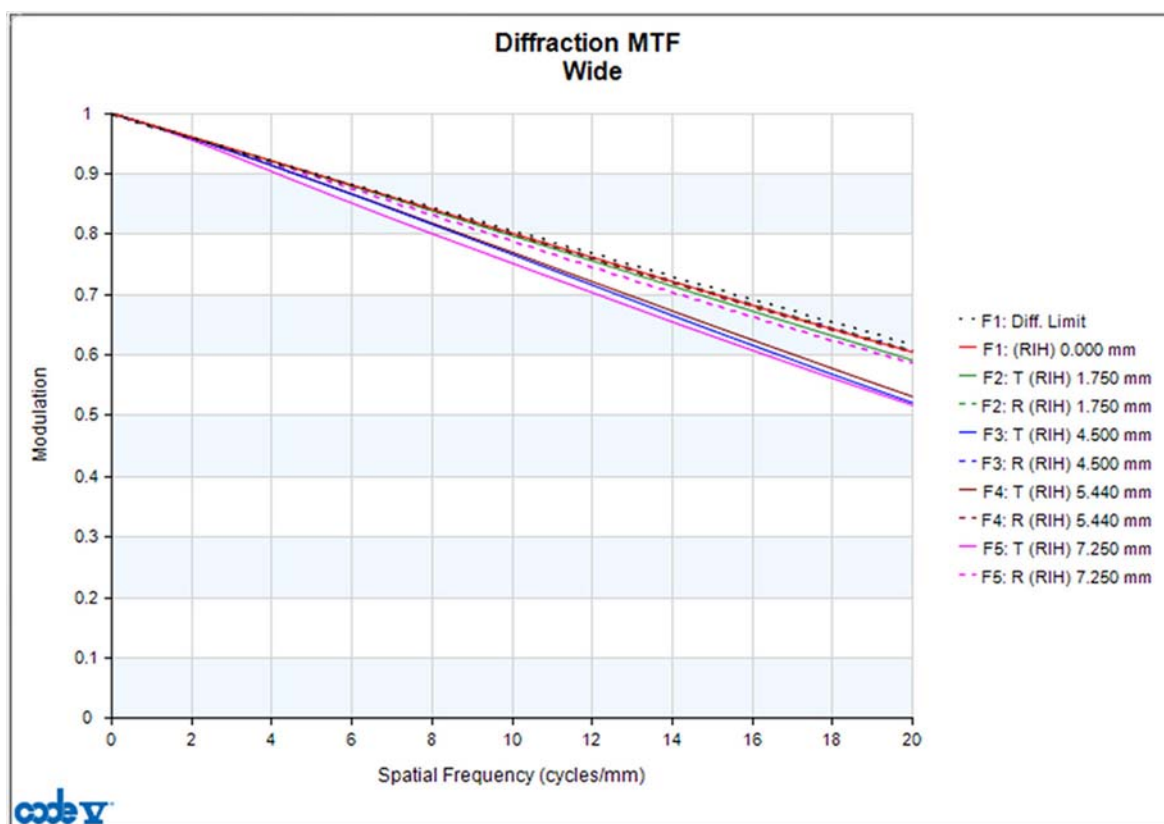
3 mm; 变焦曲线光滑, 满足凸轮加工要求。

2.4 系统像质的评价

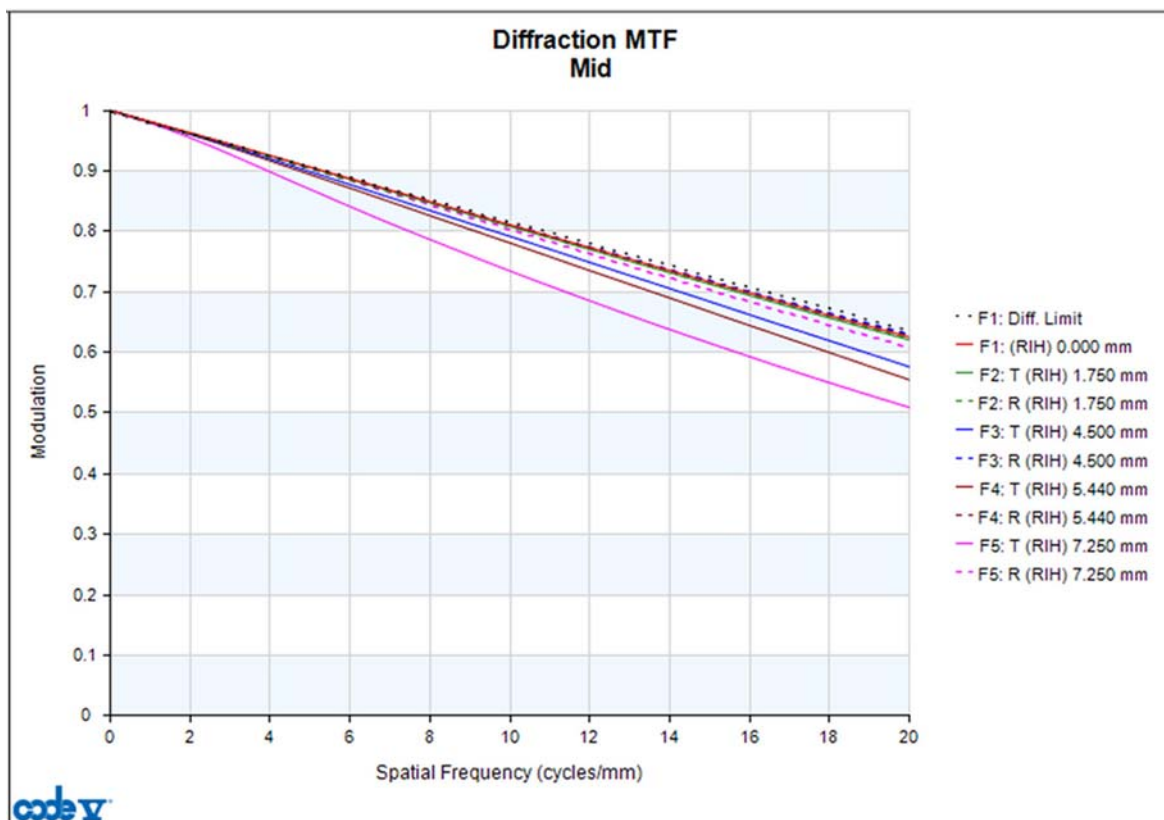
如图 4 所示, 本文系统的短焦、中焦和长焦三种状态在空间频率 20 lp/mm 处的 MTF 值都大于 0.5, 说明系统在整个焦距范围内都有较高的像质, 满足长波红外变焦系统的高成像质量要求。

图 5 为本文系统在短焦、中焦和长焦位置上的点列图。探测器的像元大小为 $17\ \mu\text{m} \times 17\ \mu\text{m}$, 均方根半径大小分别为 $13\ \mu\text{m}$ 、 $19\ \mu\text{m}$ 和 $18\ \mu\text{m}$, 满足设计要求。结果表明, 光线经过系统后能量较为集中, 成像质量较好。

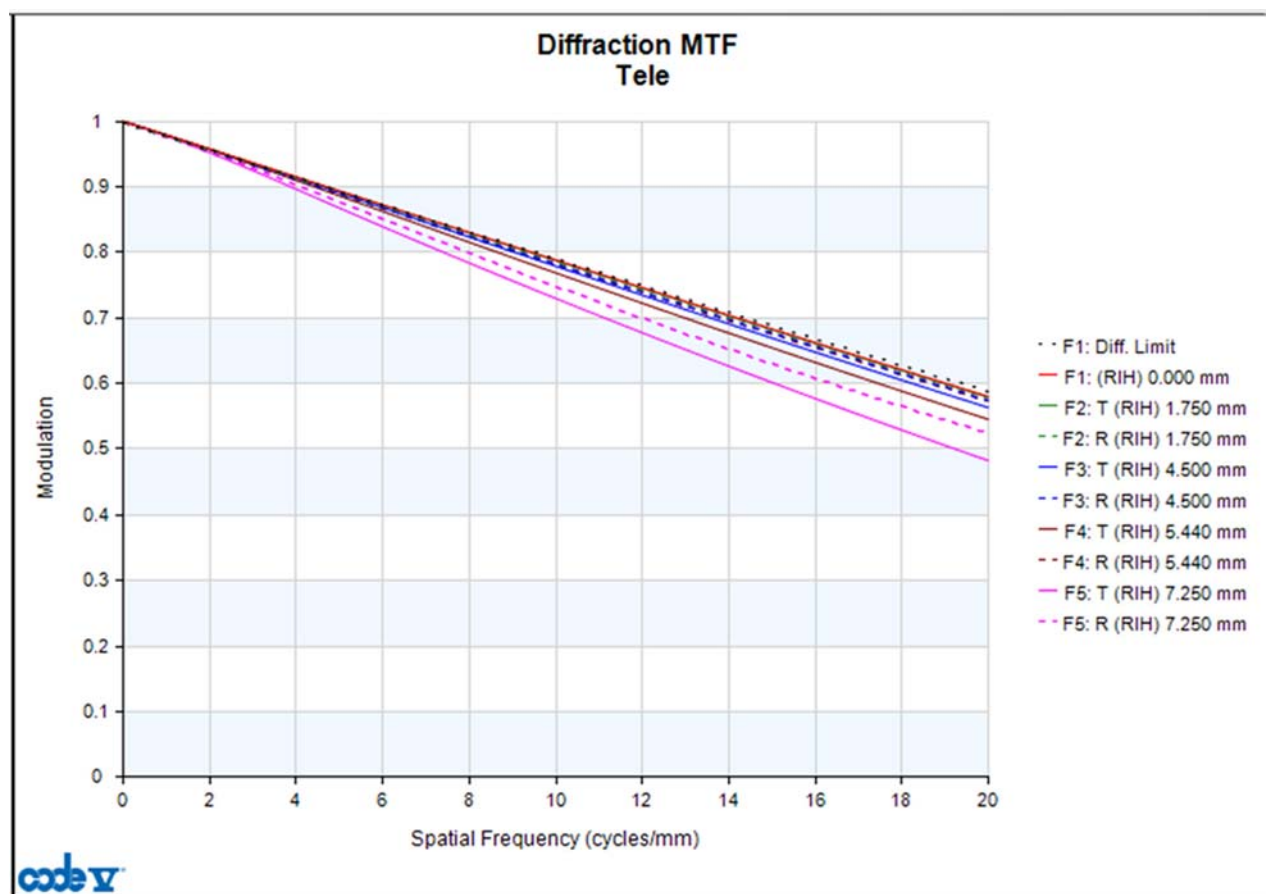
图 6 所示为本文系统的能量集中度曲线。可以看出, 在短焦、中焦、长焦端, 75% 的能量都集中在 $34\ \mu\text{m}$ 以内。考虑到系统特点是镜片少、结构简单, 能量集中在 2 个像素内, 基本满足性能要求。



(a) 短焦



(b) 中焦



(c) 长焦

图 4 不同焦距位置上的 MTF 曲线

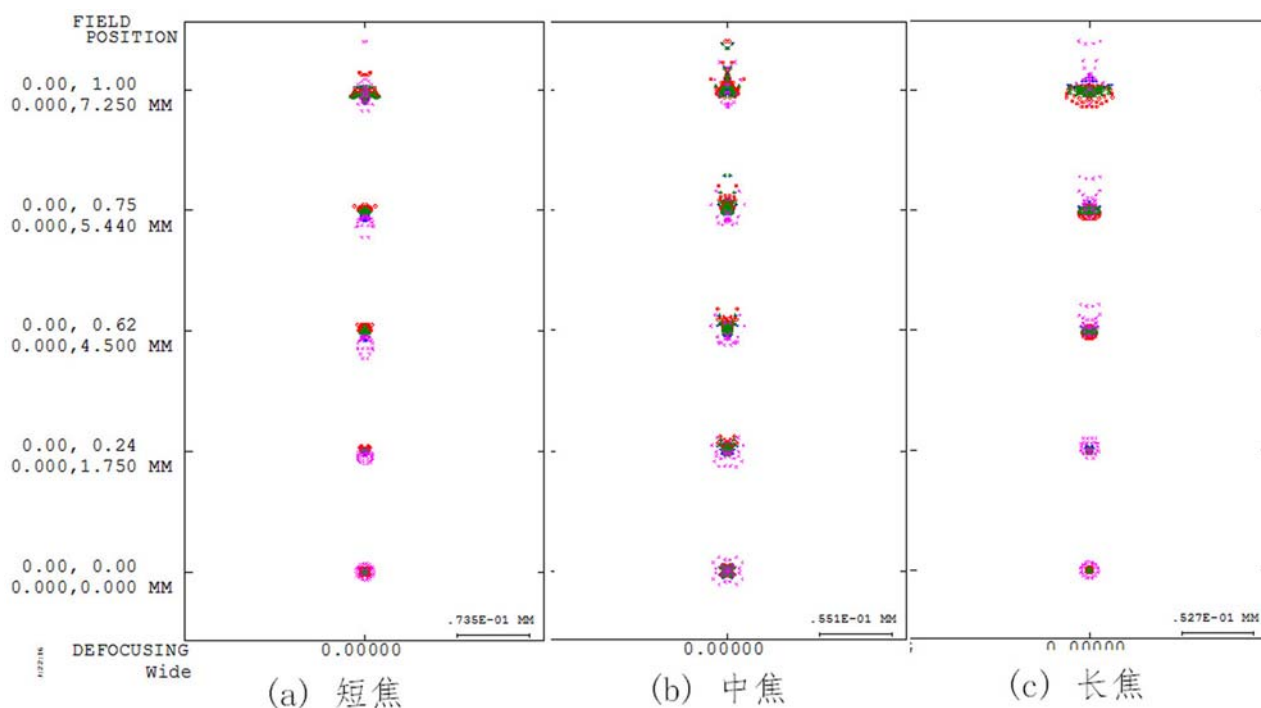
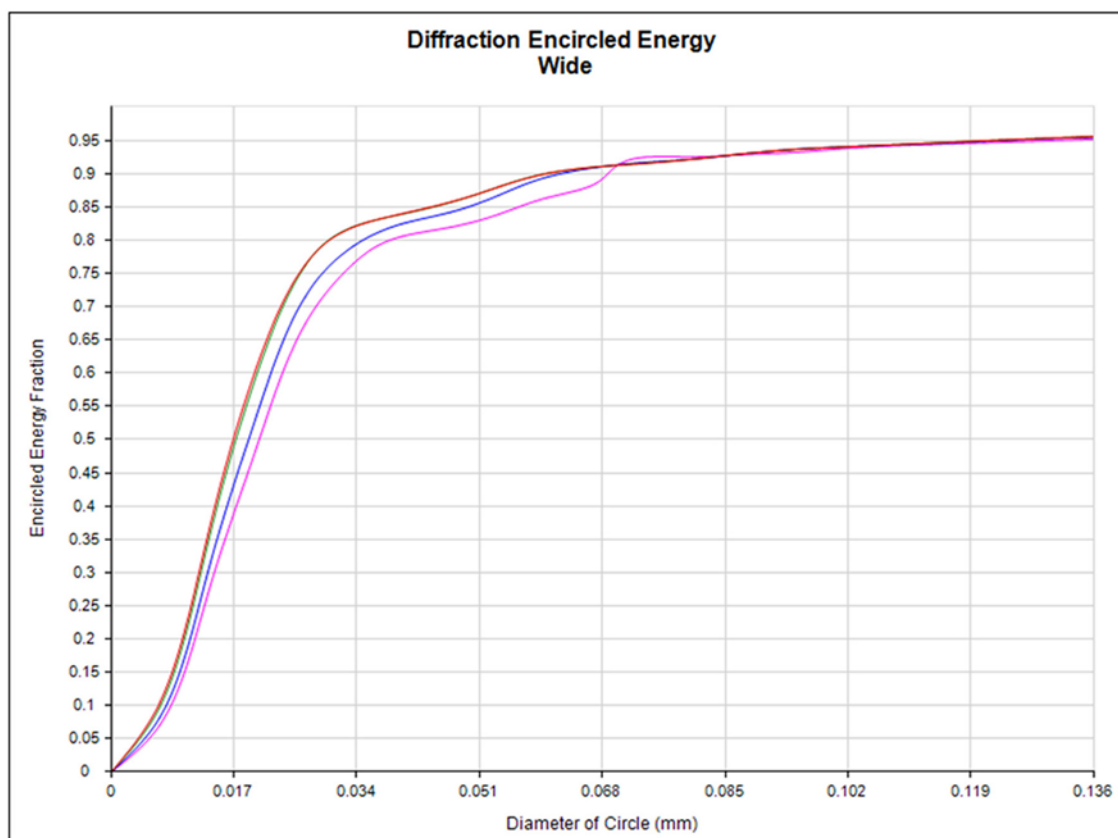
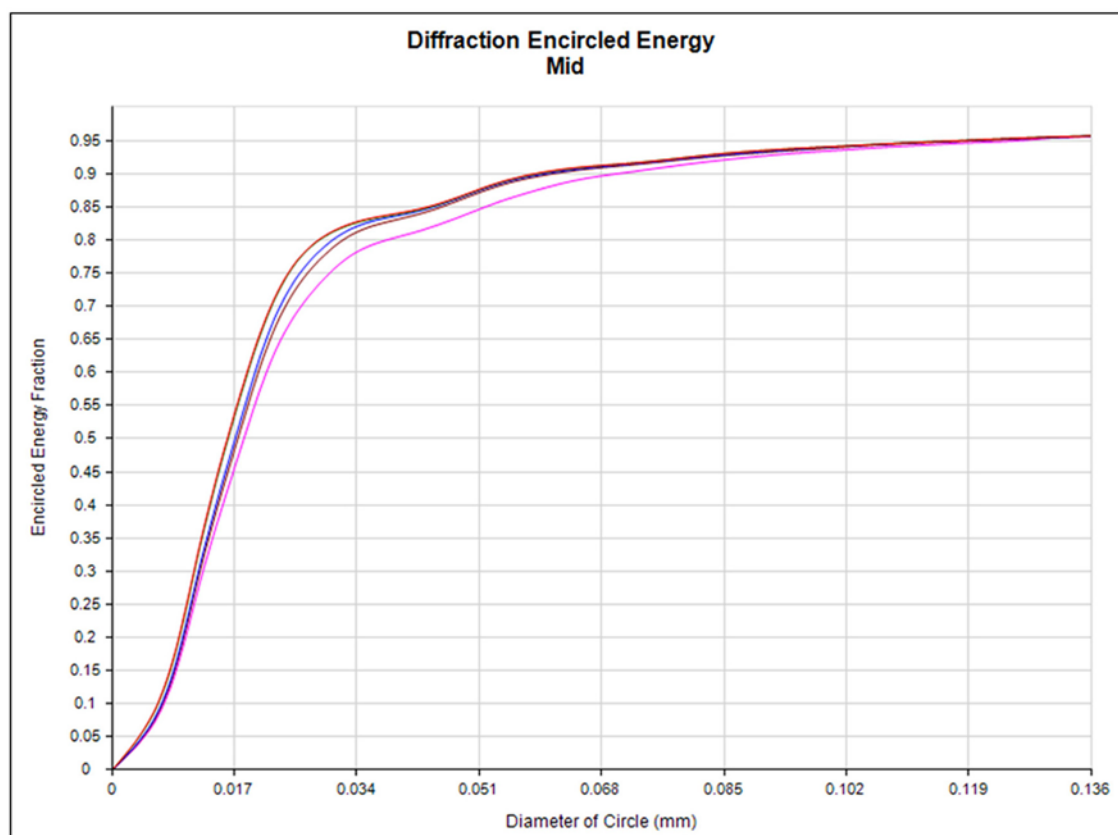


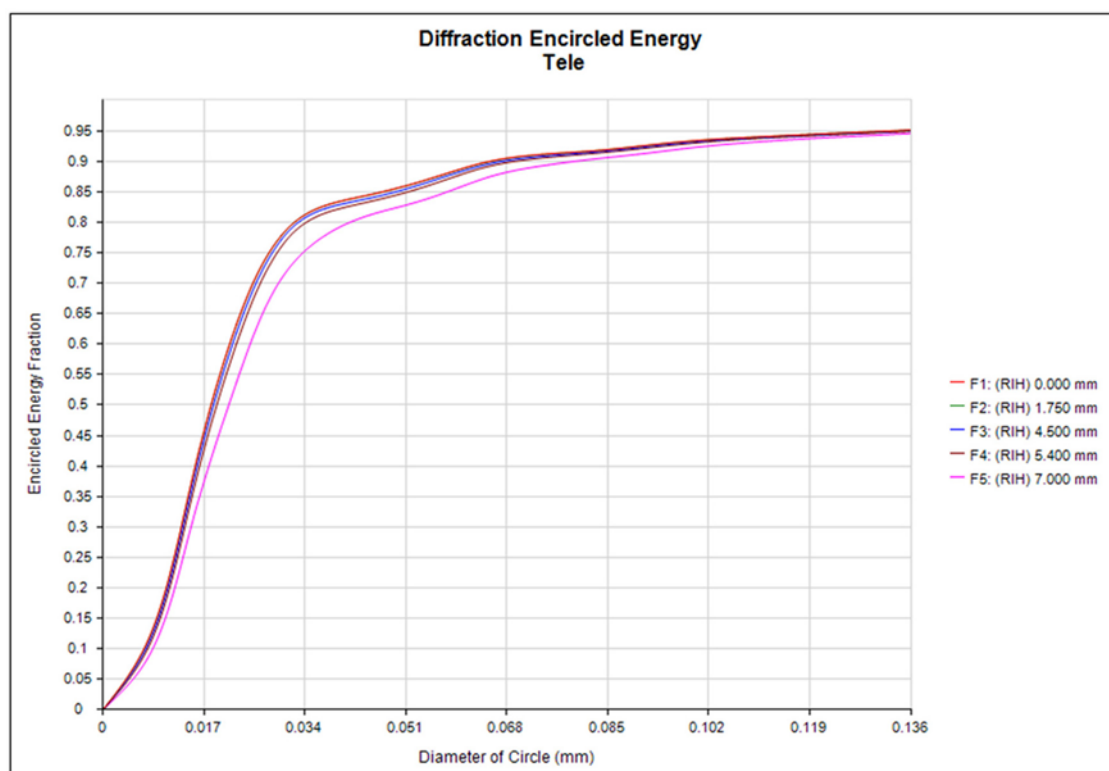
图 5 不同焦距位置上的点列图



(a) 短焦

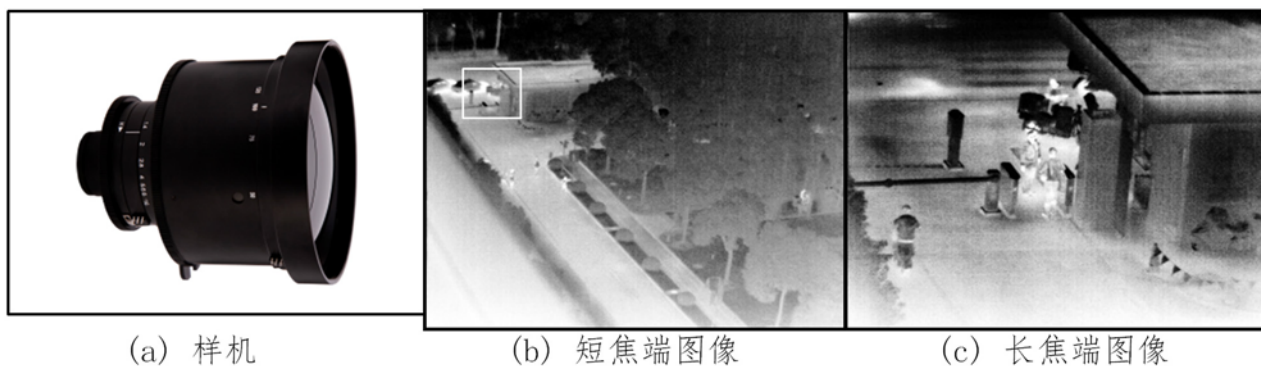


(b) 中焦



(c) 长焦

图 6 能量集中度曲线



(a) 样机

(b) 短焦端图像

(c) 长焦端图像

图 7 样机图以及短焦端和长焦端实拍图像

3 样机及实拍性能

如图 7(a) 所示, 高变倍长波红外变焦镜头已研制完成并进入样机制造阶段。图 7(b) 和图 7(c) 分别为短焦端和长焦端长波红外镜头的实拍图像。可以看出, 长波红外变焦系统的短焦端和长焦端都能清晰拍摄图像, 满足红外监控的技术要求。

4 结束语

本文针对非制冷型 640×512 元焦平面探测

器, 设计了一种工作在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的折射式红外连续变焦光学系统。针对传统变焦系统另需调焦群的问题, 基于 Varifocal 系统, 仅用 4 片透镜就实现了 6 倍连续变焦系统的设计和研制。从样机的实拍图像来看, 该系统不仅突破了传统变焦系统结构复杂、镜片数量多的局限, 而且还实现了大视场角、高分辨率的清晰成像, 因而将会在军民两用方面特别是在红外监控领域得到广泛应用。

(下转第 47 页)