

## 折射/衍射混合长波红外连续变焦光学系统设计

王保华<sup>1,2</sup>, 刘英<sup>1</sup>, 孙强<sup>1</sup>, 王媛媛<sup>1,2</sup>, 张建忠<sup>1,2</sup>, 姜洋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了提高图像的分辨率, 提高红外系统的探测距离和探测精度, 满足多种条件下的使用要求, 基于最新的非制冷型 384×288 凝视型焦平面阵列探测器, 设计了折射/衍射混合长波红外连续变焦光学系统。系统工作波长为 8~12 μm, F 数 1.5, 变倍比 25:1。设计过程中, 系统引入衍射面构成折/衍射混合结构, 校正色差和高级像差, 减少了透镜的使用数量, 简化了系统结构。最后利用 CODE V 光学设计软件进行了优化设计和像质评价, 设计结果表明, 系统在探测器的 Nyquist 频率(20 lp/mm)处, 所有变焦距位置和视场的 MTF 值均大于 0.4, 接近系统的衍射极限。系统具有变倍比大、分辨率高、像质好、结构简单等特点, 可应用于众多光电探测领域。

**关键词:** 变焦距系统; 光学设计; 红外光学; 衍射光学

**中图分类号:** TB133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0148-06

## Optical design for refractive/diffractive long wavelength infrared continuous zoom system

Wang Baohua<sup>1,2</sup>, Liu Ying<sup>1</sup>, Sun Qiang<sup>1</sup>, Wang Yuanyuan<sup>1,2</sup>, Zhang Jianzhong<sup>1,2</sup>, Jiang Yang<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A refractive/diffractive long wavelength infrared continuous zoom system was designed based on the new staring focal plane array (384 pixel×288 pixels) in order to improve the resolution of image, detecting distance and accuracy of the infrared system and to satisfy multifarious situations. The operating wavelength of this system ranged from 8 μm to 12 μm, F number was 1.5 and the zoom ratio was 25:1. The binary surface was introduced to correct the lateral color and other high order aberrations and to modify the system. Moreover, detailed design and image quality were given by CODE V optical design software. When spatial frequency was 20 lp/mm, modulation transfer function (MTF) in the whole field of view exceeded 0.4', approaching diffraction limit. The final results show that this optical system has large zoom ratio, high resolution, small volume and excellent image quality. Thus, it can be applied in many kinds of optoelectronic detection fields.

**Key words:** continuous zoom system; optical design; infrared optics; diffractive optics

收稿日期: 2012-05-22; 修订日期: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(60977001)

作者简介: 王保华(1989-), 男, 硕士生, 主要从事红外成像和光学设计方面的研究。Email:wangbaohua-125@163.com

导师简介: 孙强(1973-), 男, 研究员, 主要从事红外光学系统方面的研究。Email:sunq@ciomp.an.cn

## 0 引言

红外热成像系统是一类功能明确的被动光学系统,通过探测红外背景和其他干扰下物体发射的红外辐射,对目标进行搜索、定位和跟踪。红外热成像技术的核心是红外探测技术,红外探测具有抗干扰能力强、环境适应性好和低空探测精度高等特点,具有透过烟、雾、尘、雪等限制以及识别伪装的能力,尤其适用于夜间及不良气象条件下对目标的全天候不间断搜索和跟踪,在军事上被广泛应用于红外夜视、红外侦察以及红外制导等方面<sup>[1-2]</sup>。

近年来,红外探测技术已经取得了长足的发展和进步,传统的定焦距红外系统已经不能满足现代军事侦察、目标跟踪等的要求,变焦距光学系统逐渐受到光学设计者的青睐。连续变焦光学系统可以在一定范围内连续改变系统的焦距,同时保证像面的稳定和成像质量良好,实现对目标不同分辨率像的要求,对于搜索和跟踪高速运动目标非常有利<sup>[3-4]</sup>。因此,设计适用于新型红外热成像系统的高性能红外连续变焦镜头具有重要的实际应用价值。

目前,国内外红外连续变焦光学系统不断涌现,但是变倍比普遍不高,相对孔径较小,系统结构复杂,不能满足高分辨率、大视场范围和高成像质量的要求,例如,白瑜<sup>[5]</sup>设计的长波红外连续变焦镜头变倍比仅为 4 倍,却使用了 10 片透镜,结构比较复杂;张良<sup>[6]</sup>设计的非制冷变焦镜头变倍比为 10 倍,F 数为 2.5,相对孔径较小。文中设计的折/衍射混合长波红外连续变焦光学系统仅使用了 6 片透镜,变倍比 25:1,F 数为 1.5,视场为 $\pm 36.87^\circ \sim \pm 1.72^\circ$ ,在探测器的 Nyquist 频率 20 lp/mm 处,MTF 接近衍射极限,成像质量良好。

## 1 变焦距光学系统设计原理

光学系统的焦距由组成该系统的各组元透镜及其间隔所决定,根据高斯光学理论,对于一个由  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  两个组元构成的系统,其总的光焦度为:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1 \cdot \varphi_2 \quad (1)$$

由于组元  $\varphi_1$  和组元  $\varphi_2$  的焦距不能改变,要改变系统的总光焦度  $\varphi$ ,只能通过改变两组元的间隔来实现。因此光学系统焦距的连续变化,取决于各组元透镜组轴向的连续移动,变倍组的移动实现系统

焦距的连续变化,补偿组移动实现像面补偿。

变焦距系统的像差平衡方法基本上与定焦系统一致,为了在全视场和全孔径内获得满意的像质,需尽可能降低高级像差,包括各变焦位置轴上点与轴外点的像差,细光束与宽光束的像差以及各种色差,因此,变焦距系统的设计比定焦系统的设计难度要大<sup>[4-6]</sup>。

## 2 连续变焦光学系统设计

### 2.1 光学设计指标

目前的红外热成像系统通常采用电子扫描系统,以凝视的方式获取大场景的红外图像,这就要求红外光学系统要有足够大的视场和焦距范围。文中系统焦距为 8~200 mm,对 5 m 大小的物体的探测距离可以达到 10 km,视场为 $\pm 36.87^\circ \sim \pm 1.72^\circ$ ,增大了对目标的搜索范围,能够满足复杂条件下的使用要求。

采用较新型的 384×288 非制冷型探测器,像元大小为 25  $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ ,图像分辨率更高。F 数选 1.5,可以有效降低非制冷热成像系统的噪声等效温差 (NETD),提高了测量灵敏度。

光学系统具体设计指标如表 1 所示。

表 1 设计指标  
Tab.1 Design requirements

Item	Value
Wavelength/ $\mu\text{m}$	8-12
Height of image(diagonal)/mm	12
Zoom ration	25:1
F number	1.5
Focal length/mm	8-200
Field of view(FOV)/(°)	$\pm 1.72$ (NFOV) $\pm 36.87$ (WFOV)

### 2.2 光学系统初始结构

按补偿方式变焦镜头可分为光学补偿和机械补偿两种,而光学补偿在高变倍比时,存在像面漂移,采用机械补偿方式的变焦,像面位移可以通过高斯光学计算完全补偿<sup>[7]</sup>。根据表 1 的设计指标,文中设计的红外变焦光学系统使用“+--+”的机械补偿方式,由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组 4 部分组成,通过高斯光学计算得到系统的初始结构。

### 2.2.1 正组补偿高斯光学计算

正组补偿系统的总焦距是由前固定组的焦距经变倍组、补偿组和后固定组轴向放大后的值,即:

$$f' = f'_1 m_2 m_3 m_4 \quad (2)$$

其中,  $f'_1$  和  $m_4$  是固定值, 因此  $m_2$  和  $m_3$  的变化引起系统焦距的连续变化, 取二者之积为  $m_{23}$ , 即:

$$m_{23} = m_2 \cdot m_3 \quad (3)$$

$m_{23}$  就是系统焦距的变化倍率。

如图 1 所示, 无限远物体发出的平行光线 ( $u=0$ ), 经过前固定组成像在焦点  $m_{23}$ , 点  $m_{23}$  经变倍补偿组合系统成像在点  $m'_{23}$ , 点  $m'_{23}$  和点  $m_{23}$  之间的距离  $L$  由公式 (4) 表示, 其在系统焦距变化过程中始终保持不变。

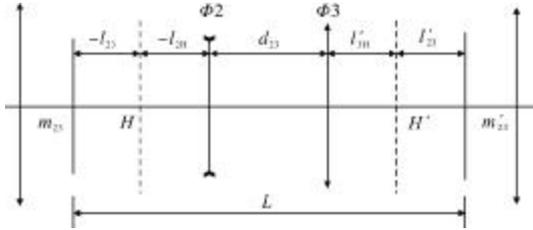


图 1 变倍补偿组合系统

Fig.1 Zoom-compensated system

$$L = -l_{23} - l_{2H} + d_{23} + l_{3H'} + l_{23} \quad (4)$$

其中,  $l_{23}$ 、 $l'_{23}$  分别为变倍补偿组合系统的物距和像距;  $l_{2H}$ 、 $l_{3H'}$  分别为变倍补偿组合系统的主平面与变倍组和补偿组之间的距离;  $d_{23}$  为变倍组和补偿组之间的间隔, 其表达式如下:

$$f'_{23} = \frac{f'_2 f'_3}{f'_2 + f'_3 - d_{23}} \quad (5)$$

$$l_{2H} = \frac{d_{23} \cdot f'_2}{f'_2 + f'_3 - d_{23}} \quad (6)$$

$$l_{3H'} = \frac{d_{23} \cdot f'_3}{f'_2 + f'_3 - d_{23}} \quad (7)$$

$$l_2 = f'_{23} \left( \frac{1}{m_{23}} - 1 \right) \quad (8)$$

$$l_3 = f'_{23} (1 - m_{23}) \quad (9)$$

将公式 (5)~(9) 带入公式 (4) 得:

$$L = \frac{(m_{23} - 1)^2}{m_{23}^2} \frac{f'_2 \cdot f'_3 + d_{23}^2}{f'_2 + f'_3 - d_{23}} \quad (10)$$

其中,  $f'_2$  表示变倍组的焦距;  $f'_3$  表示补偿组的焦距;  $f'_{23}$  表示变倍补偿组合系统的焦距。

当变倍组和补偿组沿光轴移动后, 变倍组和补偿组之间的距离变为  $d_{23}^*$ , 变倍补偿组合系统的垂轴放大倍率变为  $m_{23}^*$ 。由于  $L$  在变倍组和补偿组的移动过程中保持不变, 根据公式 (10) 得:

$$L = \frac{(m_{23}^* - 1)^2}{m_{23}^{*2}} \frac{f'_2 \cdot f'_3 + d_{23}^{*2}}{f'_2 + f'_3 - d_{23}^*} \quad (11)$$

由公式 (11) 解得:

$$d_{23}^* = \frac{L \pm \sqrt{L^2 - 4C}}{2} \quad (12)$$

其中,

$$C = \frac{(m_{23}^* - 1)^2}{m_{23}^*} \cdot f'_2 \cdot f'_3 + L(f'_2 \cdot f'_3) \quad (13)$$

### 2.2.2 连续变焦光学系统设计

#### (1) 光学系统初始结构设计

为了在变焦过程中实现所要求的大变倍比, 保证补偿曲线平滑, 即要求补偿组在变倍过程中位移增大, 应将变倍组和补偿组的间距  $d_{23}$  以及补偿组焦距  $f_3$  取值加大。该系统选定初始结构各组元的参数分别为: 前固定组焦距  $f_1 = 280$  mm, 变倍组焦距  $f_2 = -50$  mm, 补偿组焦距  $f_3 = 90$  mm, 后固定组焦距  $f_4 = 60$  mm。系统在中焦时,  $m_2 = -1$ ,  $m_3 = -1$ , 各组元间隔  $d_{12} = 40$  mm,  $d_{23} = 120$  mm,  $d_{34} = 20$  mm。由公式 (4)~(12) 计算系统高斯结构, 根据初级像差理论合理分配各组元的光焦度, 得到系统初始结构数据。

#### (2) 光学系统优化设计

用 CODE V 光学设计软件对初始数据 (见表 2) 进行优化设计, 设计过程中变倍组和补偿组各引入一个衍射面构成折射/衍射混合结构校正系统高级像差<sup>[8]</sup>, 同时去掉变倍组、补偿组和后固定组各一片透镜, 简化系统结构, 控制好各组元透镜之间的参数, 实现系统变焦和像面稳定的同时, 保证变焦曲线平滑, 最后得到了比较理想的变焦系统。该系统通过光焦度为正的前固定组降低第一辅助光线和第二辅助光线在变倍组的入射高度, 变倍组和补偿组折射/衍射混合结构校正系统的色差、色球差和高级像差, 后固定组校正系统残余像差, 具体结构参数如表 3 所示。

表 2 光学系统初始结构参数

Tab.2 Parameters of initial system configuration

Surface	Surface type	Y radius	Thickness	Glass	Y semi - aperture
Object	Sphere	INFINITY	INFINITY		
1	Sphere	265.212 58	15.000 000	SCGERMLW	142.529 88
2	Sphere	362.848 74	22.341 125		141.507 59
3	Sphere	267.460 48	16.000 000	SCGERMLW	125.924 95
4	Sphere	259.726 95	147.049 40		118.618 41
5	Sphere	193.785 00	10.000 000	ZnSe	42.855 932
6	Sphere	81.768 58	8.286 584		34.326 380
7	Sphere	650.80163	10.000 000	ZnSe	34.522 025
8	Sphere	78.722 88	2.688 057		29.869 518
9	Sphere	119.592 69	12.000 000	ZnSe	28.282 795
10	Sphere	730.645 30	3.447 998		28.115 399
11	Sphere	63.164 13	12.000000	ZnSe	27.058 625
12	Sphere	147.36420	32.527 958		24.554 640
STOP	Sphere	INFINITY	2.000 000		7.847 936
14	Sphere	95.575 23	7.000 000	ZnSe	7.870 152
15	Sphere	616.929 73	21.488 887		8.293 443
16	Sphere	74.725 74	7.000 000	ZnSe	11.905 41
17	Sphere	45.822 07	2.000 000		11.686 62
18	Sphere	19.218 78	7.000 000	SCGERMLW	13.774 13
19	Sphere	23.425 87	8.275 316		11.180 97
IMA	Sphere	INFINITY	0.000 000		6

表 3 优化系统结构参数

Tab.3 Parameters of optimized system configuration

Surface	Surface type	Y radius	Thickness	Glass	Refract mode	Y semi - aperture
Object	Sphere	Infinity	Infinity	Air**	Refract	
1	Sphere	272.100 0	15.000 0	SCGERMLW	Refract	131.650 7
2	Sphere	331.890 0	15.000 0	Air**	Refract	128.758 6
3	Sphere	225.380 0	16.000 0	SCGERMLW	Refract	119.750 3
4	Sphere	239.930 0	152.260 0	Air**	Refract	113.940 3
5	Sphere	-131.770 0	10.000 0	ZnSe	Refract	39.685 5
6	Sphere	119.000 0	2.500 0	Air**	Refract	39.291 3
7	Sphere	135.230 0	12.000 0	ZnSe	Refract	40.412 4
8	Sphere	-247.000 0	61.240 0	Air**	Refract	40.419 9
Stop	Sphere	Infinity	2.002 0	Air**	Refract	11.718 5
10	Sphere	17.000 0	7.000 0	ZnSe	Refract	15.908 1
11	Sphere	12.500 0	25.000 0	Air**	Refract	11.536 4
12	Sphere	30.860 0	7.000 0	SCGERMLW	Refract	10.713 9
13	Sphere	54.140 0	6.730 0	Air**	Refract	9.230 7
Image	Sphere	Infinity	0.000 0		Refract	6.000 0

End of data

### 3 系统设计结果及像质评价

最终设计得到的系统由 6 片透镜组成, 总长 325 mm, 第 6 面和第 8 面是衍射面, 在短焦(8 mm)、中焦(90 mm)和长焦(200 mm)时系统结构如图 2(a)~2(c)所示, 各变焦位置透镜组之间的间隔如表 4 所示。

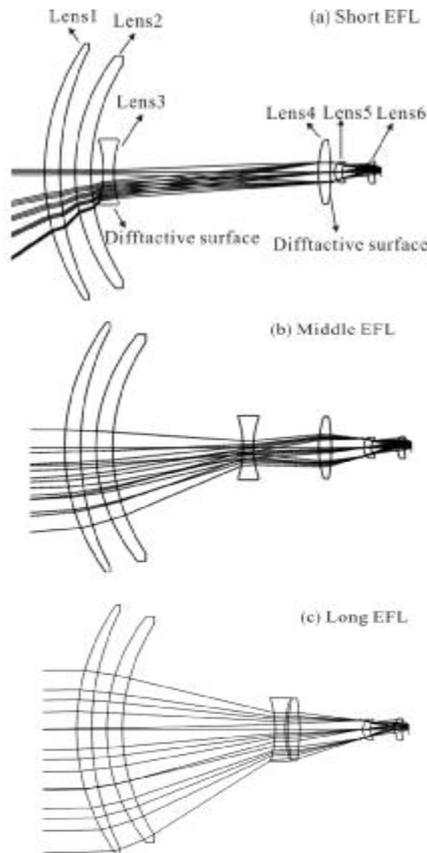


图 2 连续变焦系统结构

Fig.2 Zoom system configurations

表 4 透镜组间隔

Tab.4 Distances between lens groups

	18 mm	18 mm	36 mm	90 mm	150 mm	200 mm
$d_{12}$	10.23	71.7	105	135	147.3	152.26
$d_{23}$	202	134.23	90.2	42	17	2.5
$d_{34}$	2.77	10.07	19.8	38	51.7	61.24

#### 3.1 系统变焦运动曲线

根据光学系统连续变焦过程中, 变倍组和补偿组与前固定组的相对位置关系, 拟合出变倍组和补偿组的运动轨迹曲线, 如图 3 所示, 其中横坐标代表变倍组和补偿组与前固定的距离, 纵坐标代表系统的焦距。由图 3

可以看出, 在整个变焦过程中, 变倍组和补偿组的运动轨迹简单, 曲率变化平缓, 有利于凸轮曲线的加工。

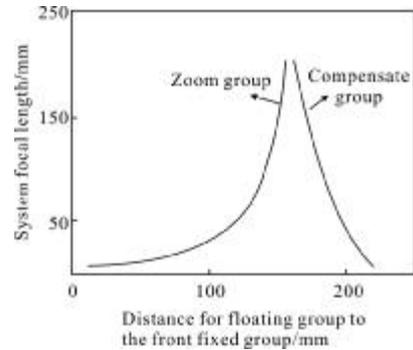


图 3 系统变焦运动曲线

Fig.3 Zoom curves of the system

#### 3.2 像质评价

##### 3.2.1 光学传递函数

MTF 能够全面地评价出光学系统的成像质量, 不但能够反映系统的分辨率, 还可以反映出系统的对比度。图 4 为所连续变焦光学系统在短焦、中焦

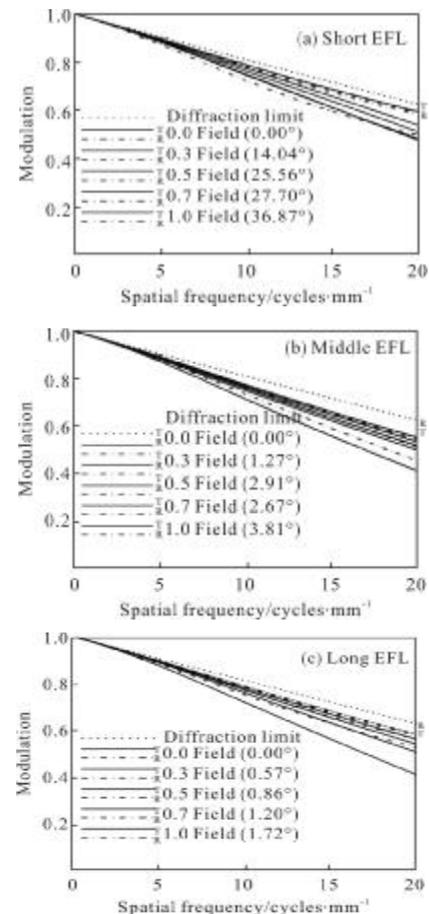


图 4 系统的传递函数曲线

Fig.4 MTF curves of the system

和长焦 3 个位置的调制传递函数(MTF)曲线。由图 4 可以看出,衍射面的引入使系统的成像质量明显改善,探测器乃奎斯特频率 20 lp/mm 处,系统各个视场的 MTF 都高于 0.4,接近衍射极限,达到使用要求。

### 3.2.2 点列图

系统的点列图如图 5 所示,各焦距位置弥散斑直径的均方根值见表 5。由图 5 和表 5 可以看到,系统各焦距所有视场的弥散斑均方根尺寸都小于 25  $\mu\text{m}$ ,在探测器的一个像元内,成像质量良好。

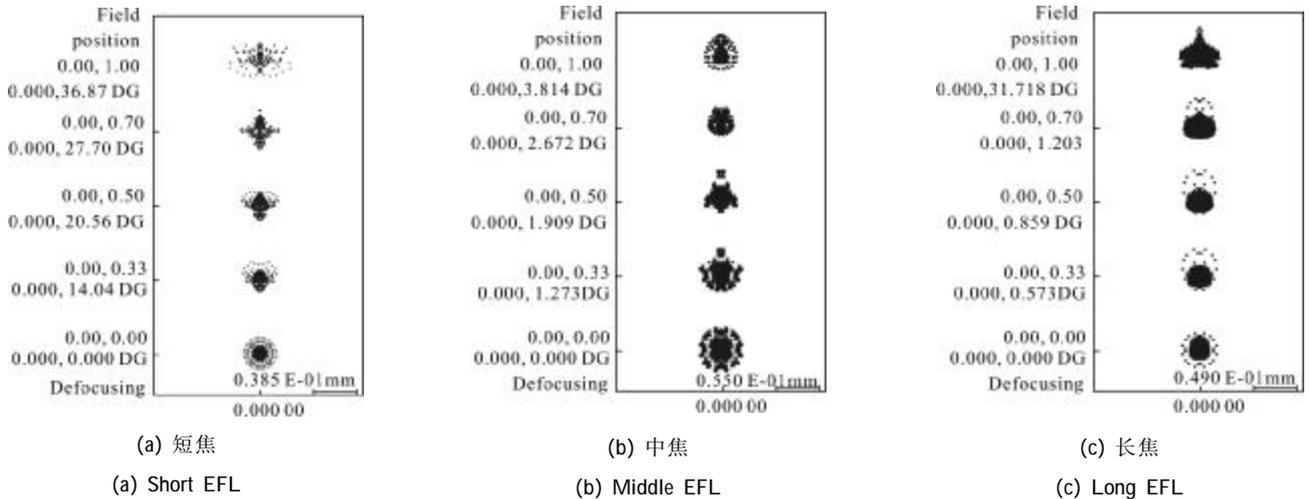


图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

表 5 弥散斑直径的均方根值

Tab.5 RMS spot diameter

EFL/mm	FOV	RMS spot diameter/mm	EFL/mm	FOV	RMS spot diameter/mm	EFL/mm	FOV	RMS spot diameter/mm
8	0	0.161 45E-01	9	0	0.242 95E-01	200	0	0.153 43E-01
	0.5	0.186 27E-01		0.5	0.203 86E-01		0.5	0.159 25E-01
	0.7	0.200 62E-01		0.7	0.188 49E-01		0.7	0.182 93E-01
	1	0.245 53E-01		1	0.222 91E-01		1	0.243 38E-01

## 4 结论

文中设计了一款折射/衍射混合长波红外连续变焦光学系统,给出了变焦系统设计原理、设计指标、设计结果和像质评价。系统采用折射/衍射混合结构,仅使用了 6 片透镜,结构简单紧凑,体积小,变焦曲线平滑,成像质量接近衍射极限。系统具有相对孔径大、视场范围宽和变倍比大的特点,满足未来红外系统的使用要求,适用于搜索、跟踪和导航等红外设备,尤其适用于手持式和单兵轻武器热像仪。

### 参考文献:

[1] Ried M J. Optical Design Fundamentals for Infrared Systems [M]. Washington: SPIE Press, 2001.  
 [2] Xu Zhaodong, Liu Xin, Dong Tao. Design of airborne high resolution and continuous magnification IR thermal imager [J].

Infrared and Laser Engineering, 2007, 36 (5): 619-621. (in Chinese)

[3] Zhang Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. Applied Optics, 2006, 27(1): 32-35. (in Chinese)  
 [4] Chen Lvji, Li Ping, Ma Lin. Compact MWIR zoom system [J]. Infrared Technology, 2010, 32(10): 562-566. (in Chinese)  
 [5] Bai Yu, Yang Jianfeng, Ruan Ping. Design of long wavelength infrared continuous zoom optical system [J]. Electro-Optic Technology Application, 2008, 23(5): 15-21. (in Chinese)  
 [6] Zhang Liang, Liu Hongxia. Optical design for long infrared continuous zoom system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1279-1281. (in Chinese)  
 [7] Tao Chuncan. Zoom System Design [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1988. (in Chinese)  
 [8] Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)