

折射/衍射混合红外双焦光学系统设计^{*}

董科研^{1,2)} 孙 强^{1)†} 李永大³⁾ 张云翠¹⁾ 王 健¹⁾
葛振杰³⁾ 孙金霞¹⁾ 刘建卓¹⁾

1) 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

3) 长春理工大学研究生部, 长春 130022)

(2005 年 11 月 4 日收到, 2005 年 12 月 16 日收到修改稿)

利用二元光学元件消色差和对波面进行任意整形的特点, 将二元衍射面应用于红外双焦光学系统中, 对变焦方程的解进行了分析, 给出了具体的系统设计实例. 设计结果表明, 在仅使用 4 片锗透镜的情况下, 系统焦距为 80 mm, F 数为 0.8 时, 系统垂轴像差小于 $72\ \mu\text{m}$, 在 10 lp/mm 时光学传递函数大于 0.8; 系统焦距为 160 mm, F 数为 1.6 时, 系统垂轴像差小于 $35\ \mu\text{m}$, 在 10 lp/mm 时光学传递函数大于 0.7.

关键词: 红外变焦光学系统, 折射/衍射混合透镜, 光学设计

PACC: 4225F, 4215E

1. 引言

双焦光学系统与连续变焦光学系统相比, 结构简单, 仅通过改变系统中透镜组之间的间隔便可实现两个大、小视场间的切换, 且成像质量好、装调容易. 在现代军事中, 红外双焦光学系统发挥了不可替代的作用, 已被广泛应用于制导、监控、红外前视系统, 及目标探测和追踪等领域; 在民用方面, 红外双焦光学系统可用于照相、空间遥感等领域^[1], 具有广泛的应用前景和其他技术手段无法比拟的优势. 但是, 由于红外材料的限制及非制冷红外探测器对大相对孔径、高光通量红外光学系统的匹配要求, 传统的折射式红外变焦系统往往由 5 片以上的透镜单元构成, 导致系统质量大、体积大、成像质量差等诸多缺点, 因此研制轻、小、巧的红外成像系统成为当务之急^[2-4]. 衍射光学元件的出现, 使现行光学系统进一步革命性优化设计成为可能. 1988 年, Swanson 和 Veldkamp 等利用衍射元件的色散特性较好地校正了单透镜的轴上色差和球差, 研制了新型的二元光学透镜-多阶相位透镜^[5,6], Wood 在传统的 Petzval 物镜

的基础上, 设计了红外 3—5 μm 波段的折衍混合 Petzval 物镜, 设计结果表明, 系统的重量和体积减小了, 材料只用 ZnS, 系统的弧矢和子午像差接近^[7]. 上述实例显示了衍射光学元件在红外光学成像领域的巨大潜力和优势. 自此, 越来越多的光学设计者开始进行衍射光学在光学成像领域的应用研究工作^[8-11].

本文利用 DOE 独有的特性, 将二元衍射面引入红外双焦光学系统中, 从变焦光学系统理论及衍射元件消色差理论出发, 设计了只含有 4 片锗透镜, 应用于热红外波段的折射/衍射混合双焦光学系统, 并拟以 Sofradir 公司生产的 320×240 像元, 敏感元尺寸为 $45\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$ 非制冷探测器为接收器, 计算出系统所能探测的距离.

2. 变焦光学系统理论与衍射元件消色差理论

2.1. 变焦原理

变焦距系统的焦距是由组成这个系统的各透镜组的焦距及各透镜组之间的间隔所决定的, 而系统

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60507003), 云南省省院省校科技合作计划项目(批准号: 2004yx30), 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室开放基金(批准号: DA04Q03), 中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金, 中国科学院国防科技创新基金(批准号: CXJJ/99)资助的课题.

[†] E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

中各透镜组的焦距在变焦时是不改变的,所以系统焦距的改变要通过改变透镜组之间的间隔.透镜组之间间隔的改变是由透镜沿光轴移动来实现的,但在移动透镜组改变焦距时,总是要伴随着像面的移动,因此必须对像面的移动进行补偿^[12,13].补偿方式分为机械补偿和光学补偿两种,机械补偿就是指各运动组分按不同的运动规律作较复杂的移动,达到防止像面移动的目的.光学补偿是指在变焦过程中用几组透镜作变倍和补偿时,各透镜组的移动同向等速,本系统采用机械补偿形式.

2.2. 变焦方程解分析

本系统属于单变倍组、单补偿组变焦形式,其高斯光学参数求解如下:

变焦前后系统的变倍比为

$$\tau = f' / f'_s, \tag{1}$$

其中

$$f' = f'_1 \beta_2^* \beta_3^*, \tag{2}$$
$$f'_s = f'_1 \beta_2 \beta_3, \tag{3}$$

则有

$$\tau = \frac{\beta_2^* \beta_3^*}{\beta_2 \beta_3} = \frac{B}{\beta_2 \beta_3}, \tag{4}$$

式中 f'_s, f' 为系统最初的焦距和变倍比为 τ 时的焦距; f'_1 为前固定组焦距; $\beta_2, \beta_2^*, \beta_3, \beta_3^*$ 分别为变倍组和补偿组变焦前后的垂轴放大率.

欲满足在变焦的过程中像面位置不变,必须使物面到像面的距离 D 为常量,即

$$D = l'_2 - l_2 + l'_3 - l_3, \tag{5}$$

式中 l_2, l'_2, l_3, l'_3 分别为变倍组和补偿组的物距和像距.

由几何光学可得

$$l = f \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right), \tag{6}$$

$$l' = f'(1 - \beta).$$

将上述关系代入(5)式,得

$$D = f'_2 \left(-\beta_2 + 2 - \frac{1}{\beta_2} \right) + f'_3 \left(-\beta_3 + 2 - \frac{1}{\beta_3} \right). \tag{7}$$

实现变焦后

$$D = f'_2 \left(-\beta_2^* + 2 - \frac{1}{\beta_2^*} \right) + f'_3 \left(-\beta_3^* + 2 - \frac{1}{\beta_3^*} \right). \tag{8}$$

利用(4)式和上式,可得

$$\beta_2^* = \frac{-[D - 2(f'_2 + f'_3)] \pm \sqrt{[D - 2(f'_2 + f'_3)]^2 - 4(f'_2 + f'_3/B)(f'_2 + f'_3/B)}}{2(f'_2 + f'_3/B)}. \tag{9}$$

由(4)式,可得

$$\beta_3^* = B / \beta_2^*, \tag{10}$$

式中 f'_2 和 f'_3 分别为变倍组和补偿组的焦距.

初始状态位置的 β_2, β_3 可由三个焦距 f'_1, f'_2 和 f'_3 以及它们之间初始状态的间隔 d_{s12} 和 d_{s23} 来确定.由高斯光学物像公式可得

$$\beta_2 = \frac{f'_2}{f'_2 + f'_1 - d_{s12}}, \tag{11}$$

$$\beta_3 = \frac{f'_3}{f'_3 + f'_2(1 - \beta_2) - d_{s23}}. \tag{12}$$

变倍组的位移

$$x = f'_2 \left(\frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_2^*} \right). \tag{13}$$

补偿组的位移

$$y = f'_3(\beta_3^* - \beta_3). \tag{14}$$

变焦后前固定组与变倍组之间的间隔

$$d_{s12}^* = d_{s12} + x. \tag{15}$$

变倍后变倍组和补偿组之间的间隔

$$d_{s23}^* = d_{s23} - x + y. \tag{16}$$

依据上述关系式可计算出双焦光学系统的基本参数.

2.3. 衍射元件消色差理论

衍射元件与传统的折射元件不同,其等效阿贝数 $\nu_{\lambda_1, \lambda_2}$ 与所用基底材料无关,而只与所使用的波段有关,即

$$\nu_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, \tag{17}$$

式中 λ_2 是所用波段的中心波长, λ_1 和 λ_3 是波段两端波长,通常有 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$.在热红外波段,衍射元件的阿贝数为 $\nu_{\lambda_1, \lambda_2} = -2.5$.衍射元件的这种特性对于变焦光学系统消色差很有好处.从消色差角度

看,衍射元件的引入为光学设计增添了一种特殊的像差优化参量.

3. 具体设计实例与分析

3.1. 变焦系统的设计

拟采用像元数 320×240 ,敏感元尺寸为 $45\mu\text{m} \times 45\mu\text{m}$ 非制冷探测器为接收器,设计光学变倍比为 2 的红外双焦光学系统.根据上述参数,结合第 2 节中变焦光学理论,确定了仅含有 4 片锩透镜的变焦初始结构,此结构采用 $+ - + +$ 正组补偿形式.我们使用美国 Focus 公司研制的 ZEMAX 光学辅助设计软件,对此系统进行优化.在优化过程中,应特别注意系统中变倍负透镜及补偿正透镜的轴向移动位置,不能出现负距离或重叠相交.图 1 是折射/衍射混合光学系统的平面结构图,其中第 6 个面为衍射面.当光线通过光焦度为正的前固定组时,主要产生了球差、色差、彗差等一系列像差.通过光焦度为负的变倍组时光线发散校正了大部分的色差和色球差.当通过折射/衍射混合补偿组时,则进一步消除了系统的色差、色球差,而与衍射面共面的二次曲面基本上消除了球差和彗差,后固定组则起到调整像面、进一步校正像差的作用.具体的系统参数为:总长 240mm,口径 100mm,焦距分别为 80mm,160mm,在长焦距时全视场角 7.2° , F 数为 1.6,短焦距时视场角为 14.4° , F 数为 0.8,折射/衍射混合双焦光学系统变焦位置如表 1 所示.

表 1 折射/衍射混合红外双焦光学系统变焦位置

透镜距离	短焦	长焦
前固定组与变倍组距离/mm	9	97
变倍组与补偿组距离/mm	128	89
补偿组与后固定组距离/mm	56	7

本系统光学传递函数(MTF)曲线如图 2 所示.从图中可以看出,长、短焦距下在 10 线对的 MTF 均接近衍射极限.图 3 为本系统的垂轴像差曲线,系统在长焦时系统垂轴像差小于 $35\mu\text{m}$,短焦时最大垂轴像差小于 $72\mu\text{m}$.图 4 为此系统在接收半径为 $22.5\mu\text{m}$ 的探测器敏感元内的衍射能量曲线,在长焦距时,系统能量大于 81%,短焦距时系统能量大于 88%,均满足红外非制冷探测器能量大于 80% 的基本需求.图 5 为轴向色差图,系统在长焦距、短焦距状态时,系统轴向色差均小于 0.1mm,满足系统要求.在图 6 中给出了此衍射面的位相及周期同径向

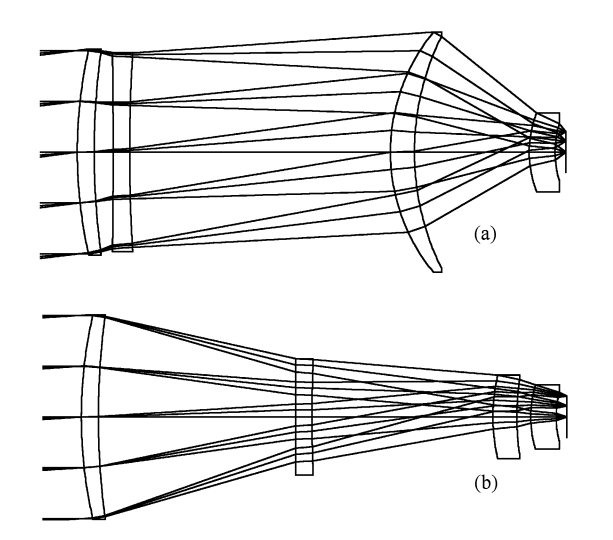


图 1 折/衍混合红外双焦光学系统平面结构图 (a)宽视场;(b)窄视场

距离的关系,当台阶数为 8 时,最小特征尺寸为 $62.5\mu\text{m}$,完全可以用“金刚石切削工艺”加工此衍射面.

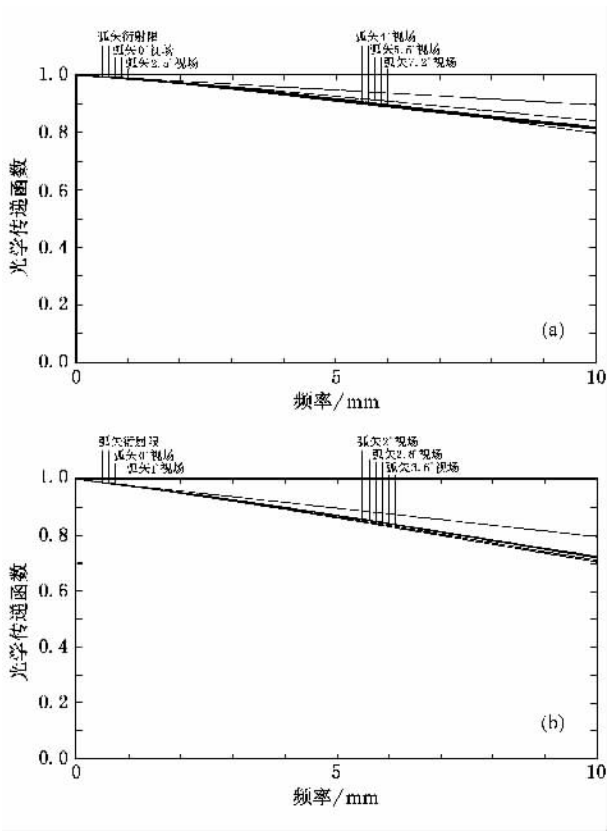


图 2 系统光学传递函数曲线 (a)宽视场 (b)窄视场

3.2. 具体应用

将此折/衍混合红外双焦光学系统应用于目标

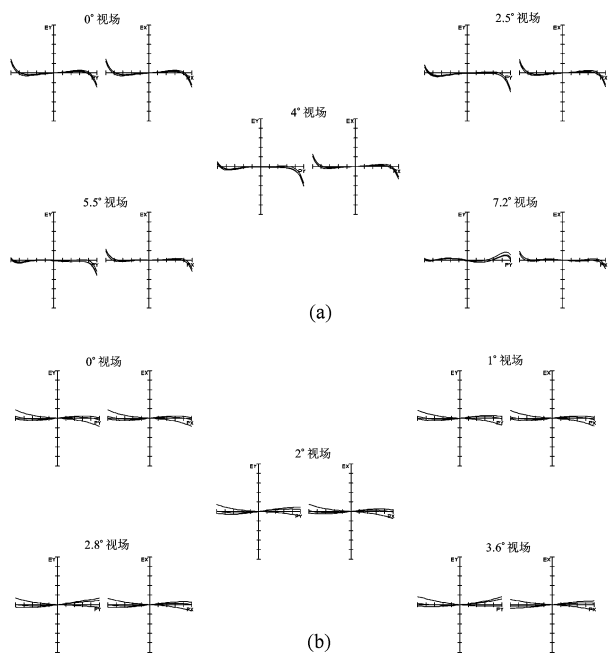


图3 系统垂轴像差曲线 (a)宽视场 (b)窄视场

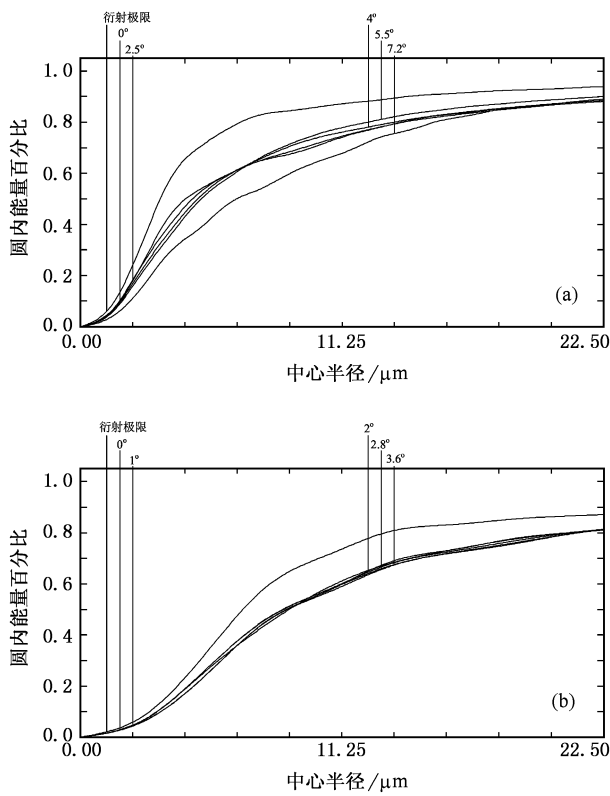


图4 系统衍射能量曲线 (a)宽视场 (b)窄视场

探测,假定探测目标温度为700 K,探测面积为2 m²,处于温度为300 K的均匀背景中.热成像系统的最远探测距离为^[14]

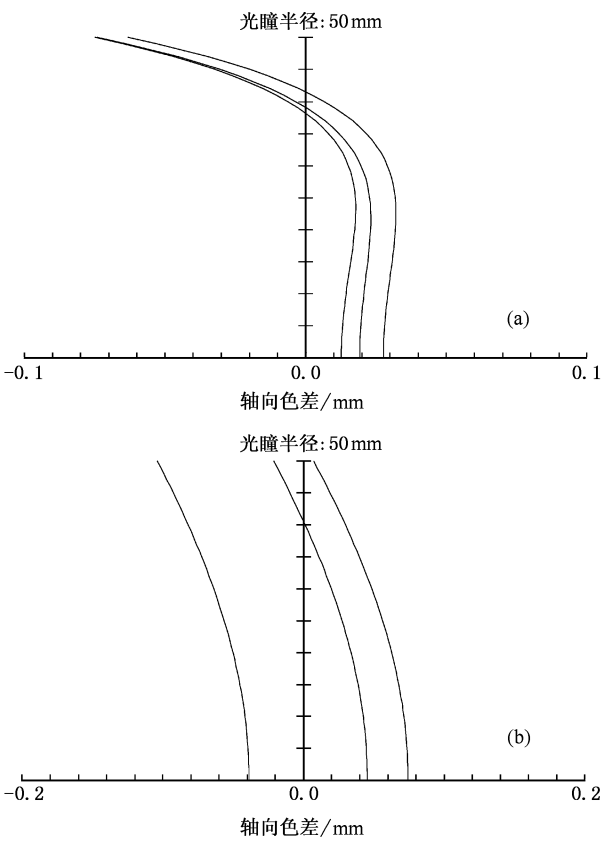


图5 系统轴向色差 (a)宽视场 (b)窄视场

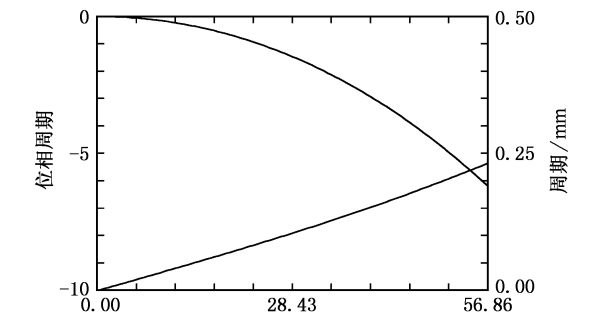


图6 DOE的位相及周期和径向距离的关系

$$L^2 \exp(-\alpha L) = \frac{I_{\lambda_1 - \lambda_2} \tau_0 A_0 D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2} (U_s / U_n)}, \quad (18)$$

式中 L 为探测距离; $I_{\lambda_1 - \lambda_2} = 298 \text{ W/Sr}$; $A_0 = 78.5 \text{ cm}^2$,为入瞳面积; $A_\pi = 2.025 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$,为接受器灵敏面的面积; $D^* = 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,为探测器探测率; $\tau_0 = 0.8$,为光学系统透过率; $\alpha = 0.2 \text{ km}^{-1}$,为所研究情况的大气平均衰减系数; $\Delta f = 2.8 \times 10^4 \text{ Hz}$,为系统带宽(U_s / U_n)=1,为探测所需信噪比.经过计算,本系统在 F 数为0.8和1.6时,所能探测距离

均大于 4.5 km,结果表明,该系统完全能够满足特定需求.

4. 结 论

根据红外非制冷系统对大相对孔径、小 F 数红外光学双焦系统的实际要求,利用 DOE 元件独特的负色散特性,设计了一种应用于热红外波段的折射/衍射混合型双焦光学系统.此系统在焦距为 160 mm, F 数为 1.6 时,系统垂轴像差小于 $35\ \mu\text{m}$,系统接收

能量大于 81%,在 10 lp/mm 时光学传递函数大于 0.7,焦距为 80 mm, F 数为 0.8 时,系统垂轴像差小于 $72\ \mu\text{m}$,短焦距时系统接收能量大于 88%,在 10 lp/mm 时光学传递函数大于 0.8;并根据配备的 Sofradir 公司生产的非制冷探测器计算出此系统最大探测距离大于 4.5 km.该折射/衍射混合系统具有结构简单、体积小、光通量大等优点,突破了传统纯折射式光学设计中的诸多局限,使二元光学元件在变焦系统中的应用得到扩展,将在军用、民用方面,特别是对目标的跟踪及识别系统中得到广泛应用.

-
- [1] Fonti S, Solazzo S, Blanco A *et al* 2000 *Planetary and Space Science* **48** 523
 - [2] Liu Zh H, Pan Z X 2004 *Infrared* p10 (in Chinese) [刘朝华、潘兆鑫 2004 红外月刊第 10 页]
 - [3] Muhammad N A, Muhammad H A 2002 *Proc. SPIE.* **4832** 328
 - [4] Sinclair R L, Martin H, Vladimir S 1999 *Proc. SPIE.* **3698** 848
 - [5] Leger J R, Swanson G J, Veldkamp W B 1987 *Appl. Opt.* **26** 4391
 - [6] Jamieson T H 1984 *Opt Eng.* **23** 111
 - [7] Wood A P 1992 *Appl. Opt.* **31** 2253
 - [8] Sun Q, Yu B, Lu Z W *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 756 (in Chinese) [孙 强、于 斌、卢振武等 2004 物理学报 **53** 756]
 - [9] Liu Y J, Yang J L, Zhang J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 863 (in Chinese) [李英俊、杨建伦、张 杰 2000 物理学报 **49** 863]
 - [10] Sun Q, Li F Y 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 830 (in Chinese) [孙 强、李凤友 2004 光学学报 **24** 830]
 - [11] Liu Y L, Lu Z W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1782 (in Chinese) [刘玉玲、卢振武 2004 物理学报 **53** 1782]
 - [12] Tao C K 1988 *Design of zoom optical system* (Beijing: the Defense Industry Publishing house) p1 (in Chinese) [陶纯堪 1988 变焦距光学系统设计(北京:国防工业出版社)第 1 页]
 - [13] Li L, Wang Y T, Zhang L Q 2003 *Transactions of Beijing institute of technology* **23** 424 (in Chinese) [李 林、王涌天、张丽琴 2003 北京理工大学学报 **23** 424]
 - [14] Shi X G, Wang B, Yang J H 2005 *Infrared System* (Beijing: the Weapon Industry Publishing house) p93 (in Chinese) [石晓光、王彬、杨进华 2005 红外系统(北京:兵器工业出版社)第 93 页]

Design of a refractive/diffractive hybrid infrared bifocal optical system^{*}

Dong Ke-Yan^{1,2)} Sun Qiang^{1)†} Li Yong-Da³⁾ Zhang Yun-Cui¹⁾

Wang Jian¹⁾ Ge Zhen-Jie³⁾ Sun Jin-Xia¹⁾ Liu Jian-Zhuo¹⁾

1) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

2) (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Department of Graduate, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(Received 4 November 2005; revised manuscript received 16 December 2005)

Abstract

The application of diffractive surface in the bifocal optical system is investigated by taking the advantage of the negative dispersion and the arbitrary phase modulation characteristics of binary elements, an analysis on the zoom equation is made and a sample design is presented. It is shown that good imaging quality can be achieved with the implementation of only four Germanium lenses. When the focal length of the system is 80 mm and the F -number is 0.8, the longitudinal aberration is less than $72\text{ }\mu\text{m}$, the modulation transfer function (MTF) of 10 lp/mm is greater than 0.8, when the focal length is 160 mm and the F -number is 1.6, the longitudinal aberration is less than $35\text{ }\mu\text{m}$, MTF of 10 lp/mm is greater than 0.7.

Keywords: infrared zoom optical system, refractive/diffractive hybrid lens, optical design

PACC: 4225F, 4215E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60507003), the Collaboration Project Foundation of Yunnan Province with Chinese Academy of Sciences and Universities (Grant No. 2004yx30), the Foundation of State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. DA04Q03), Wang Kuan-Cheng Postdoctoral Foundation of Chinese Academy of Sciences, and the National Defence Foundation for Science Technology and Innovation of CAS (Grant No. CXJJ/99).

[†] E-mail: sunq@ciomp.ac.cn