

· 光学设计 ·

拼接式全景头盔红外夜视仪系统设计

白瑜^{1,2,3}, 程习敏^{1,3}, 冯成⁴, 邢廷文¹, 林妩媚¹, 蒋亚东²

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国南玻集团成都南玻玻璃有限公司, 四川 成都 610200)

摘要:大视场、轻量化、小型化成像系统是目前各类光电探测设备的发展方向,提出了一种采用4路小口径红外镜头拼接实现全景成像的红外夜视仪设计方案,给出了该全景头盔式红外夜视仪的实现原理。系统由红外物镜系统、图像拼接处理器、OLED微显示器、红外目镜系统组成,确定了全景头盔式红外夜视仪的设计参数,并给出了一个视场可达150°的超大视场红外夜视仪成像系统设计实例。

关键词:红外夜视仪; 拼接; 全景成像; 头盔系统

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-01-0026-06

Design of Segmented Panoramic Helmet-mounted Infrared Night Vision

BAI Yu^{1,2,3}, CHENG Xi-min^{1,2,3}, FENG Cheng⁴, XING Ting-wen¹, LIN Wu-mei¹, JIANG Ya-dong²

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Chengdu South Glass Limited Company of China South Glass Group, Chengdu 610200, China)

Abstract: The imaging system with large field of view, lightweight and small size is a developing direction of modern electro-optic detection equipments. A panoramic infrared night vision segmented by the four pathways and small diameter infrared lens is proposed. The implementation principle of the instrument is introduced. The system is consisted of infrared objective lens, image segmented processor, organic light-emitting diode (OLED) micro-display and infrared eye lens. Design parameters of the instrument are confirmed and a design example with 150° super-large field of view is presented.

Key words: infrared night vision; segmented; panoramic imaging; helmet-mounted system

由于红外探测系统具有隐蔽性好、环境适应性强等诸多优点,所以被广泛应用于军事领域和民用工程。随着红外探测器和数字图像处理技术的发展,越来越多的领域不仅需要高分辨率的图像,而且需要全景成像,全景成像技术因能给使用者带来真实现场感和交互式感受,因此在机器人、计算机视觉和虚拟现实等诸多领域有着广泛的应用,如远距离目标探测跟踪领域可实现更大范围的探测,在智能

监视系统中可有效扩大监视区域。

微光夜视仪是一种在夜间或极低照度下($10^{-1} \sim 10^{-5}$ Lx)利用微弱的月光、星光、大气辉光等光线通过放大后转变成人眼可清晰观察的图像,从而实现在夜间对目标进行观察的一种仪器^[1-2]。与微光夜视仪相比,红外夜视仪可实现全天候、穿透烟、雾、霾、雪等恶劣条件的限制并识别目标背景的伪装,特别适用于夜间及不良气象条件下对目标的探测。对于佩

收稿日期: 2013-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(10874181)

作者简介: 白瑜(1982-),男,山西原平人,博士研究生,助理研究员,主要从事目标探测识别、计算机视觉、光电信息处理研究。

戴在头盔上的红外夜视仪,为了提高红外夜视仪的搜索范围,希望红外夜视仪有更大的视场,同时为了减小佩戴人员的不适,希望红外夜视仪具有质量轻、体积小、成本低的优点。对于大视场微光夜视仪系统,目前报道文献中其视场角都小于 80° ,且多为折射/衍射混合系统,系统中含有衍射元件,增加了加工检测难度^[3-8]。提出了一种全景头盔式红外夜视仪的设计方案,给出了红外物镜和红外目镜的设计结构,利用Code-v软件进行了性能评价。结果表明,全景头盔式红外夜视仪具有良好的成像性能。

1 全景头盔红外夜视仪原理

如图1所示,头盔全景红外夜视仪由红外物镜系统、图像拼接处理器、OLED微显示器、红外目镜系统组成,其中红外物镜成像系统由4路红外物镜和红外探测器构成,用以扩大视场,4路红外物镜系统使用相同的光学系统和红外探测器,4路红外图像经图像拼接处理器进行图像拼接后,显示在OLED微显示器上,然后再经过红外目镜系统成像后到达人眼位置。

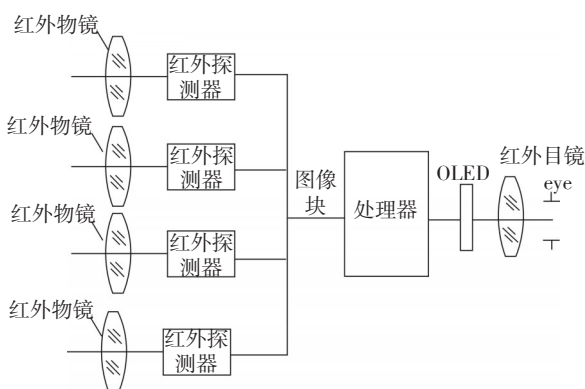


图1 头盔全景红外夜视仪组成示意图

全景头盔红外夜视仪中4路图像拼接成一幅图像,而后显示在OLED微显示器上。多镜头全景图像拼接法的实质是利用空间分布多个镜头分别捕捉不同角度空间场景,实现分割视场,最终再将分割的视场图像信息实现无缝拼接。该全景成像方法实现的基本步骤是:(1)使用多镜头全景相机采集不同视场角方向上的图像信息,将各个镜头中采集到的同步帧频信息一一对应起来;(2)对各个同步帧频信息分别进行图像预处理;(3)利用图像处理中相关算法计算出各帧频的拼接参数,应用到各镜头的每帧帧频中,并将同步的一组帧频进行全景拼接。

2 设计考虑及指标确定

图像拼接技术是利用小视场图像拼接大视场图像的过程,它是生成全景图像最重要的技术,图像拼接的概念是指将多幅来自同一场景的具有部分重叠区域的小视场图像或视频图像,合成为一幅超宽视场的全景图像,拼接好的图像不仅反映场景的全部信息,还保留了原始小视场图像中的细节信息,因此每路小视场图像之间必须有重叠,对于视场角为 150° 的4路头盔全景红外夜视仪,按照等分原则每路的视场应为 37.5° ,但考虑到每路小视场图像之间必须有重叠,设定4路头盔全景红外夜视仪视场重叠 1.25° ,因此4路头盔全景红外夜视仪每路的视场应按照 38.75° 来设计。

该全景头盔红外夜视仪采用非制冷红外焦平面探测器,非制冷红外焦平面探测器主要包括微测辐射热计、热电探测器和热电堆探测器。其中微测辐射热计和热电红外探测器生产量所占市场份额较大,而前者比后者的灵敏度高很多。目前市面上的非制冷红外焦平面探测器主要为微测辐射热计,该产品按照敏感材料划分主要有两种,氧化钒和多晶硅两种类型,系统选用非制冷多晶硅焦平面红外探测器。目前非制冷多晶硅焦平面长波红外探测器的像素规格主要有 160×120 、 384×288 、 640×480 几种规格。

对于前视红外成像系统,其最小可辨温差 $MRTD$ 计算表达式为

$$MRTD = k_2 \cdot NETD / MTF_{\text{系统}} \quad (1)$$

其中, k_2 为比例常数,根据系统设计的不同在 $0.3 \sim 0.7$ 范围内变化, $MTF_{\text{系统}}$ 为系统的传递函数,对于该系统目前只有 $MTF_{\text{系统}}$ 未知,因此以下重点讨论 $MTF_{\text{系统}}$, $NETD$ 为噪声等效温差。

前视红外成像系统的传递函数 $MTF_{\text{系统}}$ 主要由光学传递函数 $MTF_{\text{光学}}$ 和探测器的传递函数 $MTF_{\text{探测器}}$ 的乘积确定,即

$$MTF_{\text{系统}} = MTF_{\text{光学}} \times MTF_{\text{探测器}} \quad (2)$$

$MTF_{\text{光学}}$ 由光学设计传递函数 $MTF_{\text{设计}}$ 和加工装调引起的传递函数 $MTF_{\text{加工}}$ 有关,即

$$MTF_{\text{光学}} = MTF_{\text{设计}} \times MTF_{\text{加工}} \quad (3)$$

而探测器的传递函数 $MTF_{\text{探测器}}$ 由几何传递函数 $MTF_{\text{几何}}$ 和电子学传递函数 $MTF_{\text{电子学}}$ 共同决定

$$MTF_{\text{探测器}} = MTF_{\text{电子学}} \times MTF_{\text{几何}} \quad (4)$$

探测器的几何传递函数 $MTF_{\text{几何}}$ 可由下式来表示

$$MTF_{几何} = \sin c\left(\frac{1}{2} \times \frac{u}{u_n} \times \frac{d}{p}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{u}{u_n} \times \frac{d}{p}\right)}{\frac{\pi}{2} \times \frac{u}{u_n} \times \frac{d}{p}} \quad (5)$$

其中, u 为空间频率, u_n 为 Nyquist 频率。当 $d=p$ 时, 有

$$MTF_{几何} = \sin c\left(\frac{1}{2} \times \frac{u}{u_n}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{u}{u_n}\right)}{\frac{\pi}{2} \times \frac{u}{u_n}} \quad (6)$$

当 $u = u_n$ 时, $MTF_{几何} = 0.637$ 。考虑到加工装配等因素, 一般取 $MTF_{加工} = 0.85$; $MTF_{电子}$ 为 0.95。则前视红外成像系统传递函数为

$$MTF_{系统} = MTF_{光学} \times MTF_{探测器} = MTF_{设计} \times MTF_{加工} \times MTF_{电子} \times MTF_{几何} = 0.514 MTF_{设计}$$

根据视场可知, 采用 160×120 、 384×288 、 640×480 几种规格的非制冷长波红外探测器的焦距。根据经验, 对于上述的焦距, 长波红外系统其 MTF 的设计值可达 0.2~0.8 之间。根据 $MRTD$ 的计算表达式, 计算全景头盔红外夜视仪的最小可辨温差 $MRTD$, 表 1、表 2 给出了 MTF 的设计值为 0.8、0.2 时, 采用 160×120 、 384×288 、 640×480 几种规格的非制冷长波红外探测器的 $MRTD$ 分析结果, 可知此时 3 种规格的红外探测器的 $MRTD$ 最大为 204 mk, 满足指标要求的小于 500 mk。

表 1 MTF 的设计值为 0.8 时各探测器下的 $MRTD$

	160×120 探测器		384×288 探测器		640×480 探测器	
$MTF_{设计}$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
$MTF_{系统}$	0.411	0.411	0.411	0.411	0.411	0.411
$NETD/mk$	60	60	65	65	120	120
k_2	0.3	0.7	0.3	0.7	0.3	0.7
$MRTD/mk$	43.77	102.14	47.42	110.65	87.54	204.28

表 2 MTF 的设计值为 0.2 时各探测器下的 $MRTD$

	160×120 探测器		384×288 探测器		640×480 探测器	
$MTF_{设计}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$MTF_{系统}$	0.103	0.103	0.103	0.103	0.103	0.103
$NETD/mk$	60	60	65	65	120	120
k_2	0.3	0.7	0.3	0.7	0.3	0.7
$MRTD/mk$	175.09	408.56	189.68	442.60	350.19	817.12

在像元和视场不变的情况下, 像素越少, 对应系统的焦距越小, 系统的尺寸越小。同时考虑系统 $MRTD$ 指标要求小于 400 mk, 结合表 1、表 2 中的分析

数据, 因此选用 160×120 阵列的非制冷多晶硅焦平面长波红外探测器。

3 全景头盔红外夜视仪物镜设计

3.1 设计指标

光学系统的技术指标要求如下:

(1) 光谱范围: $8 \sim 12 \mu\text{m}$; (2) 焦距: 7.1 mm ; (3) $F/\#$: 2.2; (4) 视场: 38.75° ; (5) 红外探测器: 160×120 非制冷多晶硅焦平面长波红外探测器, 单个探测器像元尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$; (6) 工作温度: $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 设计结果及像质评价

根据上述光学系统的技术指标要求, 该系统为大视场光学镜头, 选择 COOKE 三片式结构作为初始结构, 利用 Code-v 光学软件进行优化设计。图 2 为全景头盔红外夜视仪物镜结构, 整个物镜结构共 4 片透镜。第一片透镜的通光口径最大, 为 $\phi 6.37 \text{ mm}$ 。光阑置于第二透镜左表面, 为了校正轴外像差, 系统使用了一个非球面。光学材料均选用常用的红外材料锗, 镜筒采用铝。物镜结构从光学系统第一面到像面的总长为 12.65 mm , 后工作距离为 3.66 mm 。第四片透镜为一块平行平板, 为非制冷红外探测器的保护窗口。

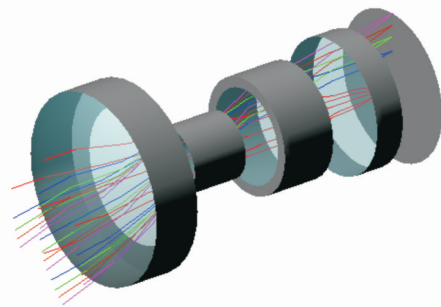


图 2 全景头盔红外夜视仪物镜结构

调制传递函数是全景红外夜视仪系统的综合评价指标, 图 3 给出了全景头盔红外夜视仪物镜结构的调制传递函数曲线。该系统采用的非制冷红外探测器像元大小是 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, 故成像系统的奈奎斯特频率为 20 lp/mm 。由图 3 可知, 奈奎斯特频率 20 lp/mm 处, 各个视场的传函值都均在 0.3 以上, 接近衍射极限, 成像质量良好。图 4 是全景头盔红外夜视仪物

镜结构的点列图,可知系统的最大RMS弥散斑直径为12.2 μm,小于红外探测器的像元尺寸25 μm,满足设计要求。图5给出了全景头盔红外夜视仪物镜结构的场曲和畸变曲线。可知最大畸变出现在全视场处,为0.88%,完全可以满足使用要求。

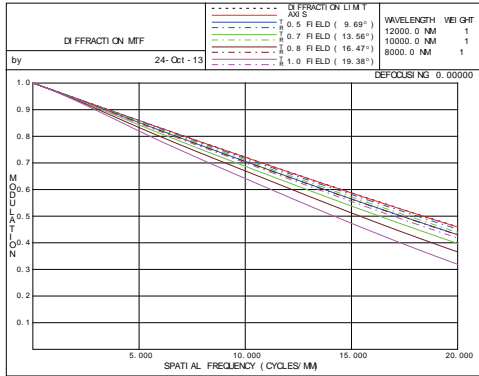


图3 物镜调制传递函数曲线

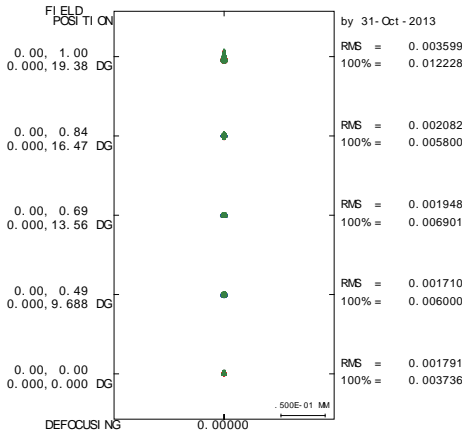


图4 物镜点列图

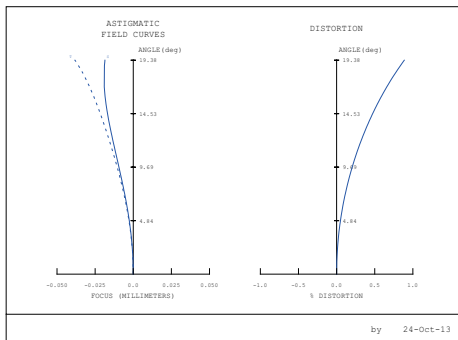


图5 物镜畸变

由于红外光学材料的折射率温度系数较大,因此随着环境温度的变化,红外光学材料的折射率、光学元件的曲率和厚度、零件间隔等都会发生变化,使

红外光学系统产生热离焦,导致系统成像质量变差。因此对于宽温度范围的红外光学系统必须进行无热化设计。常用的无热化设计方法主要有机械被动式、光学被动式、主动机电式三种方式。系统中采用主动机电式进行无热化设计,通过尾片透镜沿着光轴轴向移动来补偿温度变化产生的像面漂移。温度为-40℃、60℃时,温度调焦通过调节尾片透镜沿轴向向第二片透镜移动0.08 mm和调节尾片透镜沿轴向向探测器方向移动0.06 mm来实现。图6和图7分别给出了物镜系统在-40℃、60℃温度下的传递函数曲线,从图中可以看出,该系统-40℃、60℃温度下的MTF均在0.3以上,具有良好的成像质量。

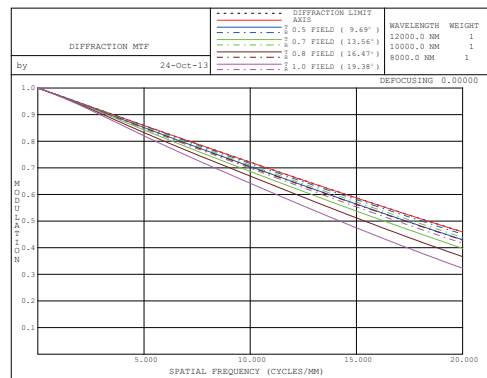


图6 温度-40℃时物镜传递函数曲线

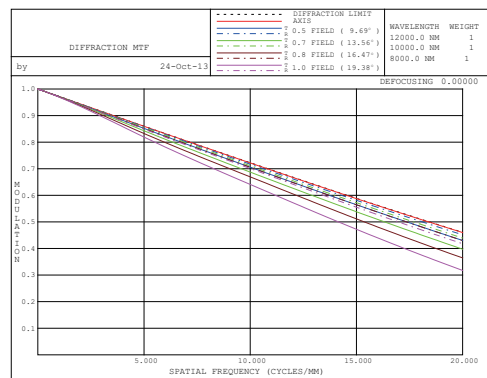


图7 温度60℃时物镜传递函数曲线

4 全景头盔红外夜视仪目镜设计

4.1 OLED显示器的选择

目标经红外物镜成像后显示在OLED微显示器上,再经红外目镜进入人眼,该系统选用目前红外夜视设备中常用的OLED微显示器,其像素为800×600像素,且亮度和对比度都可调。

4.2 红外目镜设计的考虑因素

红外目镜设计时需要考虑因素出瞳直径、出瞳距离和视场。

考虑到HMD佩戴者的因素,头盔夜视仪目镜的出瞳应与入瞳相匹配,以获得最大视场,即人眼的瞳孔应位于头盔显示光学系统的出瞳位置。当二者不完全匹配时,佩戴者在观察时部分视场内的景物将无法看到。因为人眼瞳孔的大小会随着周围观察环境光照亮暗的不同而发生变化,在高照度的情况下,出瞳直径为2~3 mm;在低照度的情况下,出瞳直径则为6~8 mm。在使用过程中因运动使瞳孔偏离头盔显示光学系统光轴而丢失视场,同时为了避免在观察过程中由于眼球转动而引入渐晕,在设计时一般头盔显示器的出瞳直径都大于人眼的瞳孔。出瞳越大,一方面可以避免丢失视场,另一方面佩戴者在观察过程中也不易感到疲劳,因此头盔夜视仪应提供尽可能大的出瞳直径。因此头盔夜视仪目镜的出瞳直径一般应不小于8 mm。

头盔夜视仪目镜的出瞳距离为人眼到系统最后一面的距离。由人眼的光学结构可知,人眼的入瞳位于角膜后大约3 mm处,眼睑和眼睫毛需要约9 mm的空间,因此可以得到HMD必须提供最小12 mm的出瞳距离。对于普通观察者,出瞳距离应至少满足12~15 mm。对于佩戴眼镜的观察者,因眼睛厚度与人眼有一定的间隔距离,因此出瞳距离应至少满足20 mm。

人眼的视场是椭圆形的,加上眼睛的转动可以获得更大的视场,人眼在观察物体时,眼球不断转动以使中央凹对准兴趣目标。头盔夜视仪光学成像系统的视场越大越好,视场越大,可以看到的信量越大,而且观察者使用过程中不易疲劳。但视场受到系统多方面因素的制约,视场越大,系统需要提供的最小出瞳直径就越大,同时使系统的体积和质量不可避免的增加,另外视场和分辨率有着不可调和的反比关系。

综合考虑各方面因素,头盔夜视仪目镜视场定为 40° 。

4.3 设计指标

红外目镜的技术指标要求如下:

- (1) 光谱范围: $8\sim 12\ \mu\text{m}$;
- (2) 出瞳直径: 8 mm;
- (3) 出瞳距离: 20 mm;
- (4) 视场: 40° ;
- (5) 工作温

度: $-40\ ^\circ\text{C}\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 。

4.4 设计结果及像质评价

根据上述光学系统的技术指标要求,该系统为大视场目镜镜头,采用三片式结构利用Code-v光学软件进行优化设计。图8为全景头盔红外夜视仪目镜结构。设计时采用方向设计,将第一面设置为系统光阑,该面同时也是目镜人眼的位置,整个目镜结构共3片透镜,第二片透镜的通光口径最大,为 $\varphi 25.36\ \text{mm}$,系统为全球面结构,光学材料均选用常用的红外材料锗,镜筒仍采用铝,系统出瞳直径为8 mm,出瞳距离为20 mm,系统总长为60 mm。图9给出了全景头盔红外夜视仪物镜结构的调制传递函数曲线。各个视场的传递函数值都接近衍射极限,成像质量良好。图10是全景头盔红外夜视仪物镜结构的像差曲线。可知系统各个视场的像差一致,像差校正较好。图11给出了全景头盔红外夜视仪物镜结构的场曲和畸变曲线。可知最大畸变为 -4.9% ,可以满足使用要求。系统中采用主动机电式进行无热化设计,通过第一片透镜(即靠近光阑的透镜)沿着光轴轴向移动来补偿温度变化产生的像面漂移。温度为 $-40\ ^\circ\text{C}$ 、 $60\ ^\circ\text{C}$ 时,温度调焦通过调节第一片透镜沿轴向向靠近光阑方向移动0.05 mm和调节第一片透镜沿轴向向远离光阑方向移动0.03 mm来实现,图6和图7分别给出了物镜系统在 $-40\ ^\circ\text{C}$ 、 $60\ ^\circ\text{C}$ 温度下的传递函数曲线。从图中可以看出,该系统 $-40\ ^\circ\text{C}$ 、 $60\ ^\circ\text{C}$ 温度下各个视场的传函值都接近衍射极限,具有良好的成像质量。

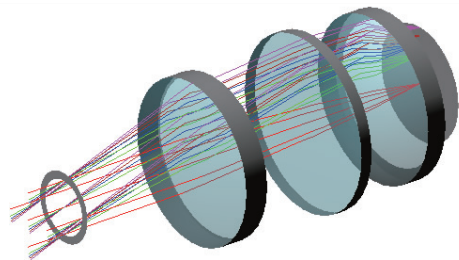


图8 全景头盔红外夜视仪目镜结构

5 结论

阐述了一种采用4路小口径红外镜头拼接实现全景成像的红外夜视仪,给出了该全景头盔式红外夜视仪的实现原理。针对系统的设计要求对红外探

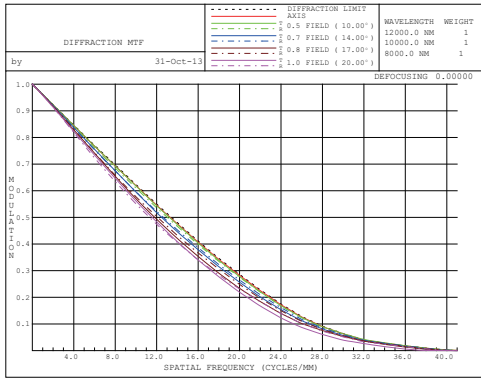


图9 目镜调制传递函数曲线

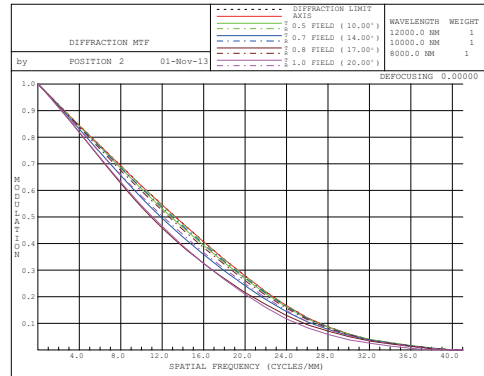


图12 温度-40℃时目镜传递函数曲线

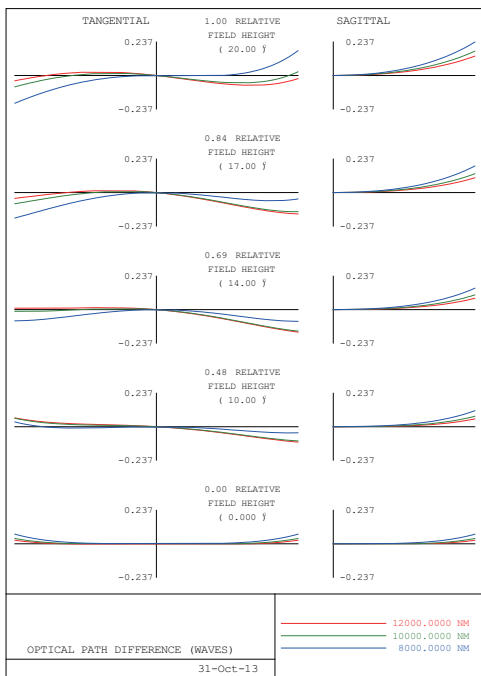


图10 目镜像差曲线

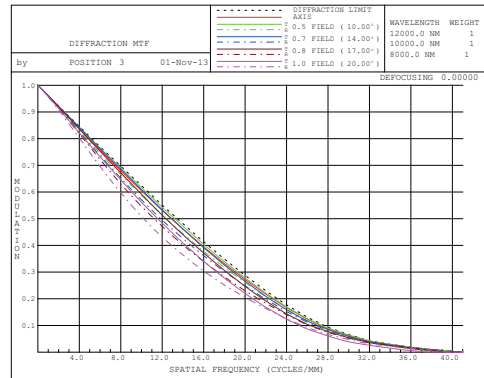


图13 温度60℃时目镜传递函数曲线

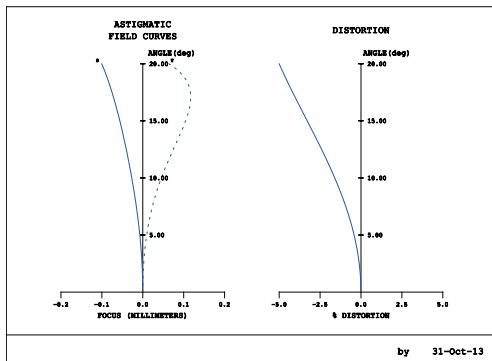


图11 目镜畸变曲线

可达 150° 的超大视场红外夜视仪成像系统设计实例。充分考虑了系统尺寸、质量、成像性能等方面的因素,分析了环境温度对超大视场红外夜视仪成像系统性能的影响。结果表明,该超大视场红外夜视仪可在-40℃~60℃环境温度下均能保持良好的成像质量。提出的拼接式全景成像方法对于大口径空间天文望远镜、大口径红外相机等领域都有一定的借鉴价值。

参考文献

- [1] 周海宪, 张蔚, 王战胜, 等. 机载微光夜视仪的研究[J]. 应用光学, 1999, 20(5): 15-20.
- [2] 李景生. 微光夜视技术及其军事应用展望[J]. 应用光学, 1997, 18(2): 1-3.
- [3] 刘华. 综合机载微光夜视镜光学系统研究[J]. 电光与控制, 2001(4): 26-30.
- [4] 胡明勇, 江庆五, 刘文清. 一种大视场、大相对孔径微光夜视光学系统的设计[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 161-165.
- [5] 王希军, 周海宪. 机载微光夜视仪折衍混合物镜的设计研究[J]. 电光与控制, 2002, 9(3): 35-39.

测器和其他指标进行了分析确定,给出了一个视场

(下转第48页)

- [2] 龚涵,陈浩宇.微弱光信号检测电路的设计与实现[J].机械与电子,2007(27):85-87.
- [3] 江文杰,施建华.光电技术[M].北京:科学出版社,2009.
- [4] 秉时.光敏电阻的种类、原理及工作特性[J].红外,2003(11):48.
- [5] 周红,杨卫群,沈学浩,等.光敏电阻基本特性测量实验的设计[J].物理实验,2003(11):9-11.
- [6] 王紫婷,王瑞峰,严天峰.智能液体点滴速度监控仪[J].自动化与仪器仪表,2004(5):48-50.
- [7] 全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编[M].北京:北京理工大学出版社,2003.
- [8] Dickens Roberts, Ridley Allan. Ultrasonic detection of bubbles in fluids. American Society of Mechanical Engineers, Bioengineering Division (Publication) BED, 2001,50:727-728.
- [9] Aworek A, Krupa A, Trela M. Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam flows[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2004,15(5):317-327.
- [10] 张强.随机信号分析的工程应用[M].北京:国防工业出版社,2009.

(上接第25页)

- [6] ZEMAX Development Corporation. ZEBASE Optical Design Database 6.0 [Z]. USA: ZEMAX Development Corporation, 2007:48-50.
- [7] Harvey M Spence. Eyepiece design simplification through the use of aspherics [J]. Proceedings of SPIE, USA, 2004: 592-598.
- [8] Eyepiece designs with radial and spherical polymer gradient-index optical elements [J]. Optical Engineering, 2013, 52(11): 112102 (1-8).
- [9] 萧泽新.工程光学设计(2版)[M].北京:电子工业出版社,2008:73-80.
- [10] 李士贤,李林.光学设计手册(修订版)[M].北京:北京理工大学出版社,1996:159-169.
- [11] 舒朝濂.现代光学制造技术[M].北京:国防工业出版社,2012:351-362.

(上接第31页)

- [6] 刘钧,刘欣.微光夜视仪中物镜光学系统的小型优化设计[J].应用光学,1999,29(6):519-523.
- [7] 宋波,刘钧,高明.头盔式微光夜视仪中折-衍混合物镜的设计[J].电光与控制,2008,15(2):78-82.
- [8] 张慧娟,王肇圻,卢振武.折/衍混合微光夜视头盔显示器光学系统设计[J].光学学报,2004,24(10):1393-1397.
- [9] 高明,强西林.头盔式双目微光夜视仪研制[J].西安工业大学学报,2001,21(4):300-305.
- [10] 刘钧,尚华.头盔式单目微光夜视仪中非球面物镜系统的设计[J].应用光学,2006,27(4):308-312.

(上接第42页)

- [5] 寇瑾.薄色谱法检验喷墨打印机墨水的种类[J].光谱实验室,2009,36(3):689-691.
- [6] 秦玉红.中文笔记特征因子结构分析的研究[J].科技世界,2012(5):30-31.
- [7] 高正荣.国外文件制成时间检验技术概况[J].甘肃科技,2006,22(11):166-168.
- [8] 高正荣.我国文件制成时间检验技术概况[J].甘肃科技纵横,2006,35(6):115-116.
- [9] 涂岩恺,陈庆虎,邓伟.计算机打印文档鉴别与检索[J].电子与信息学报,2011,33(2):499-508.
- [10] 李军.激光打印字迹人为热老化表现特征研究[J].河北北方学院学报,2012,28(5):86-89.
- [11] 蒋立琴,黄甦.墨粉的结构及鉴别方法研究进展[J].信息记录材料,2010,11(5):44-46.
- [12] 黄越,王冬,段佳,等.近红外光谱成像分析技术的应用进展[J].现代仪器,2011,17(5):13-18.