

可见光/长波红外共聚焦窗口望远物镜设计

林青¹ 金伟其¹ 郭宏¹ 张莹昭² 李茂忠²

(¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)
²北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要 双波段/多波段融合成像技术受到普遍重视,使得双波段光学系统尤其是可见光/长波红外(VIS/LWIR)成像系统成为研究的重要方向之一。在分析反射式、折反式和折射式双波段成像系统的结构形式以及常用的折射共窗口系统的组成和特点的基础上,针对双波段系统在实际应用中的欠缺,设计了一款可用于手持式设备的VIS/LWIR共窗口折射望远系统,系统的主要技术指标为:0.6~0.8 μm (VIS), 8~12 μm (LWIR), $f'_{\text{VIS}}=47$ mm, $f'_{\text{IR}}=58$ mm, $2\omega=9.8^\circ$, $F_{\text{VIS}}=2$, $F_{\text{IR}}=1.3$ 。设计结果符合各项指标,像质在两个波段均满足使用要求。整个光学系统尺寸为51 mm×93 mm×136 mm,结构紧凑,实用性强。

关键词 光学设计;双波段系统;共窗口;共聚焦;彩色融合

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0922005

Confocal-Window Telescope Objective Design in Visible and Long-Wave Infrared

Lin Qing¹ Jin Weiqi¹ Guo Hong¹ Zhang Yingzhao² Li Maozhong²

¹Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

²North Night Vision Science and Technology Group Corporation, Kunming, Yunnan 650223, China

Abstract Dual-band and multi-band imaging techniques get more and more attention of the national military. As a key part, dual-band optical systems, especially visible light/long-wave infrared (VIS/LWIR) wide-band imaging systems, become the focus of research. The dual-band imaging systems for several major structural forms, including reflective, catadioptric and refraction forms are analysed, and the composition and characteristics of the refraction form are introduced. For the shortcomings of the dual-band system, a VIS/LWIR common-window objective lens in the refraction form used in handheld field is designed. The system's main technical indicators are: 0.6~0.8 μm (VIS), 8~12 μm (LWIR), $f'_{\text{VIS}}=47$ mm, $f'_{\text{IR}}=58$ mm, $2\omega=9.8^\circ$, $F_{\text{VIS}}=2$, $F_{\text{IR}}=1.3$. Design results meet all the indicators, and the image quality meets the requirements in both bands. The size of the entire optical system is about 51 mm×93 mm×136 mm, which is compact and practical.

Key words optical design; dual-band system; common-window; confocal; color fusion

OCIS codes 220.2740; 080.3620; 110.3080

1 引言

随着军事目标伪装与隐身技术的不断进步,传统单一波段设备所能探测到的信息减弱,目标识别率下降,已不能满足军事目标探测的需求,因此,基于双波段甚至多波段的光电成像系统成为国内外研

究的主要方向之一。可见光与热红外波段反映的目标和场景的特征信息不同,可见光图像反映景物的反射特性,场景细节丰富,但易受到天气和环境的影响;热红外图像反映景物的辐射特性,具有较好的景物热对比度,受天气影响较小,具有穿透雾、霭、雨、

收稿日期: 2012-12-02; **收到修改稿日期**: 2012-05-15

基金项目: 十二五总装重点预研项目(40405030302)资助课题。

作者简介: 林青(1987—),女,硕士研究生,主要从事光电成像技术方面的研究。E-mail: linqing2710@126.com

导师简介: 金伟其(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事夜视与红外技术、图像与视频处理、光电检测与仪器等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn

雪的优势,作用距离远,适合全天候观察目标,但场景细节较差,且与人眼的视觉习惯相差较大,影响了对目标和场景的识别^[1,2]。因此,利用可见光图像与红外热图像的互补性成为多波段成像系统的主要形式之一^[3]。

本文分析了可见光/长波红外(VIS/LWIR)双波段光学成像系统的结构特点,并结合实际应用需要,设计了一款小型化的 VIS/LWIR 共光路光学成像系统。

2 VIS/LWIR 双波段光学系统结构形式及特点

根据光学结构形式的不同,用于 VIS/LWIR 的双波段成像系统主要分为反射式、折反式和折射式^[4]。

反射系统一般采用离轴三反结构。离轴三反射系统避免了中心遮拦,不存在色差和二级光谱,可在很宽的谱段范围内成像,零件数相对较少,容易实现轻量化设计,被广泛应用在空间光学中^[5,6]。

折反系统主要是在两反镜(如卡塞格林、马克苏托夫系统)的基础上加入校正镜,进一步提高系统的视场和 F 数,特点是视场较小(小于 5°)、 F 数较大,一般用于枪瞄等小视场系统中。

折射系统是设计、加工最为成熟的结构形式之一,可满足大视场、大相对孔径的要求,在便携式观测仪器中应用广泛。传统的 VIS/LWIR 折射系统采用双镜头平行光路的结构形式(如图 1)。由于存在一定的视差,图像融合时不仅需要同步进行双光路调焦,而且需要通过图像处理技术进行像移的实时校正,特别是 VIS/LWIR 波段的差异以及探测器阵列尺寸的不同,使得两路光学系统存在明显的差异,带来系统控制的困难及实际操作的不便。

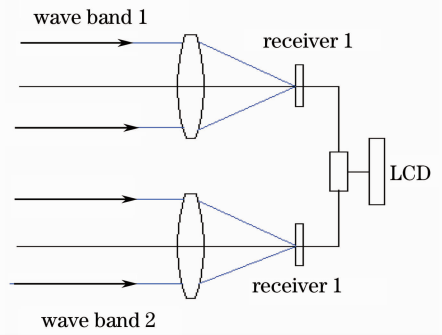


图 1 双镜头平行光路光学系统

Fig. 1 Dual-lens parallel optical axis optical system

为了消除双光路光学系统引起的视差,实现对同一目标的无视差观测,出现了双波段共光路光学系统^[7~9]。双波段共光路系统采用一个或者多个共同的光学元件,实现对同一视场的目标成像。常用的共光路系统主要分为同光路、共窗口两类。同光路系统是让两个波段的光线经过同一个光学系统成像。这种系统对材料的光谱特性要求很高,适用于双色焦平面探测器等双波段系统^[10]。

对于 VIS/LWIR 宽波段光学成像系统,能同时透过可见光和长波红外的材料较少、价格昂贵,且对于 $0.6 \sim 12 \mu\text{m}$ 宽波段的色差校正困难,系统较难在两个波段同时实现清晰成像。因此,在 VIS/LWIR 光学系统中,一般采用第二种结构形式,即共窗口成像^[9,11]。共窗口成像(如图 2)主要分为共平板窗口和共聚焦窗口两大类。图 2(a)的共平板窗口双波段光学系统主要由共用组件、可见光分系统、红外分系统三部分组成。平板窗口和分色片(BS)为共用组件,窗口没有光焦度,主要起保护作用。双波段光线透过平板窗口后,平行到达分色片,分别经透射和反射后被各波段的光学系统成像在相应的成像传感器并显示在液晶显示屏(LCD)上。图 2(b)的共聚焦窗口双波段光学系统与图 2(a)基本相同,

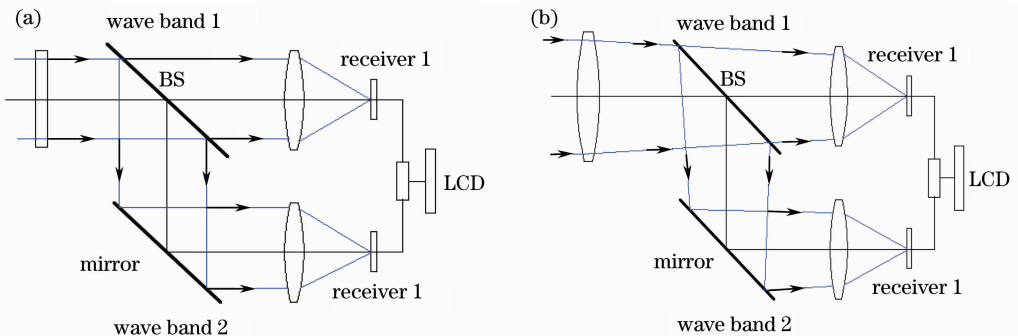


图 2 共窗口双波段成像系统。(a)平板窗口;(b)聚焦窗口

Fig. 2 Common-path dual-band imaging system. (a) Flat window; (b) focus window

区别在于聚焦窗口和分色片为共用组件,窗口有一定的光焦度,对光线有会聚作用。双波段光线透过窗口后,光线会聚于分色片。与图 2(a)类似,光线经透射和反射后,由各自的光学系统成像在相应的成像传感器上^[12]。

对比图 2(a)和(b),两者均可消除视差,实现 VIS/LWIR 宽波段成像。图 2(a)由于窗口没有光焦度,不能通过窗口共调焦,需要分别对 VIS/LWIR 实现调焦,属于内调焦。图 2(b)窗口为聚焦透镜,可通过调节聚焦窗口实现 VIS/LWIR 的共聚焦,属于外调焦。在设计上,图 2(a)比(b)简单,但在紧凑性和系统可操作性方面图 2(a)不如图 2(b)。

3 VIS/LWIR 共窗口光学系统设计

以手持 VIS/LWIR 双波段望远镜为应用背景,选择聚焦窗口部分共光路的结构形式,进行大视场、大相对孔径的光学系统设计,以获得小型化的 VIS/LWIR 双波段光学系统。

系统采用 320×240 的 VO_x 长波非制冷红外焦平面阵列(IRFPA)组件(探测单元尺寸 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$)和标准 CCIR 模拟视频的 0.5 inch(1 inch = 25.4 cm)黑白 CCD 组件,目镜焦距 $f'_e = 18 \text{ mm}$,显示器对角线尺寸 0.44 inch。特别是考虑到非制冷焦平面探测器灵敏度的限制,将 LWIR 通道 F 数确定为 1.3。表 1 为根据总体要求和器件参数提出的光学系统主要性能指标, 2ω 表示全视场角度, f' 表示物镜的焦距, T 为工作温度。

表 1 VIS/LWIR 双波段望远物镜的主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of dual-band telescope objective in VIS/LWIR

Performance index	VIS	LWIR
Amplification factor		-3.5
Wavelength / μm	0.6~0.8	8~12
F	2	1.3
$2\omega / (^\circ)$		9.8
f' / mm	47	58
$T / ^\circ\text{C}$		-30~+60

由于系统工作波段覆盖可见光和长波红外,需要超宽波段的分色片。考虑到分色片的加工能力和材料成本,设计并研制了透可见、反红外的分色片,其分色性能为: $0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 内 45° 入射光的透射率大于 80%, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的平均反射率大于 90%。

设计的 VIS/LWIR 共光路外调焦的光学系统如图 3 所示,系统窗口是一个有光焦度的聚焦透镜,而窗口材料和光焦度的选取和设计与后续系统密切相关。

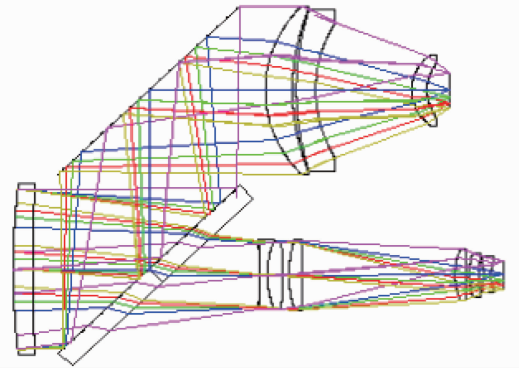


图 3 VIS/LWIR 共光路外调焦物镜系统

Fig. 3 Common-path objective in VIS/LWIR by external focusing

常用的宽波段窗口材料有 ZnSe 和宽光谱 ZnS。由于系统涉及的波段很宽,窗口在两个波段会产生很大的色差,需要选择合适的材料进行色差校正。比较 ZnSe、宽光谱 ZnS 两种材料在 $0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段内的特性参数后,最终选择 ZnSe 作为窗口透镜材料。窗口光焦度直接影响 VIS/LWIR 两个系统的设计。窗口的光焦度越小,对 VIS/LWIR 分系统光焦度的贡献越小,对像差的影响也越小,分系统设计也越简单。但过小的光焦度会导致调焦窗口移动距离过长,调焦速度缓慢,系统体积偏大;反之,窗口光焦度越大,系统体积越小,但会带来较大的像差,加大后续分系统设计的难度,且过大的光焦度会使调焦速度过快,较难保证调焦的精度。经综合分析,确定窗口焦距为 300 mm (LWIR)。可见光分系统由一片双胶合透镜和四片单透镜组成,采用多片玻璃组合进行像差校正。红外分系统选择类似库克三片式的结构形式。由于红外系统的像质易受温度变化的影响,设计时需要考虑热差的影响^[13]。鉴于系统的调焦窗口可以补偿一定的热差,为简化系统,采用光学被动式与机械主动式相结合的混合式消热差形式。

按照光学系统像差的瑞利判据,热差引起的系统最大波像差应该小于波长的 $1/4$,即系统允许的最大残余热差 Δl_r 应与系统焦深相同:

$$\Delta l_r \leq \pm 2\lambda F^2, \quad (1)$$

式中 λ 为入射波长。

根据红外材料的归一化热差系数-归一化色差系数(T-C)图,选择 GaSIR2-ZNS-ZNS 透镜组合消除系统的大部分热差,具体热分析数据如表 2 所示, l' 表示后截距。系统焦深为 $\pm 38 \mu\text{m}$,最大残余热差为 $53 \mu\text{m}$,其余热差均在焦深范围以内,即基本实现

表 2 红外系统热分析数据
Table 2 Thermal analysis data of infrared system

$T / ^\circ\text{C}$	20	-30	-12	6	24	42	60
l' / mm	6.064	6.117	6.098	6.079	6.060	6.041	6.028
$\Delta l' / \text{mm}$	0	0.053	0.034	0.035	-0.004	-0.023	-0.036

了消热差, 剩余的部分热差可以通过移动调焦窗口进行补偿。

经过 Zemax 软件优化, 系统在 20°C 时的像质评价函数如图 4 所示。图 4(a)、(c) 分别为可见光分系统和红外分系统的调制传递函数(MTF)曲线。其中, 可见光分系统在特征频率 64 lp/mm 处, 轴上点 MTF 大于等于 0.5, 轴外点 MTF 大于等于 0.4; 红外分系统的 MTF 基本达到衍射极限, 在特征频率 20 lp/mm 时, 轴上点 MTF 大于等于 0.55, 轴外

点 MTF 大于等于 0.5。图 4(b)、(d) 分别为可见光分系统和红外分系统的点列图。对比两个点列图, 对于同一个视场因为两个分系统的焦距不同(两个波段的探测器尺寸不同), 所以对应的像面尺寸是不相同的。分析可知, 可见光分系统点列图中各视场的均方根(RMS)值小于 $4.5 \mu\text{m}$, 红外分系统点列图中各视场的 RMS 值均小于 $18 \mu\text{m}$ 。系统像质满足技术指标和应用要求。

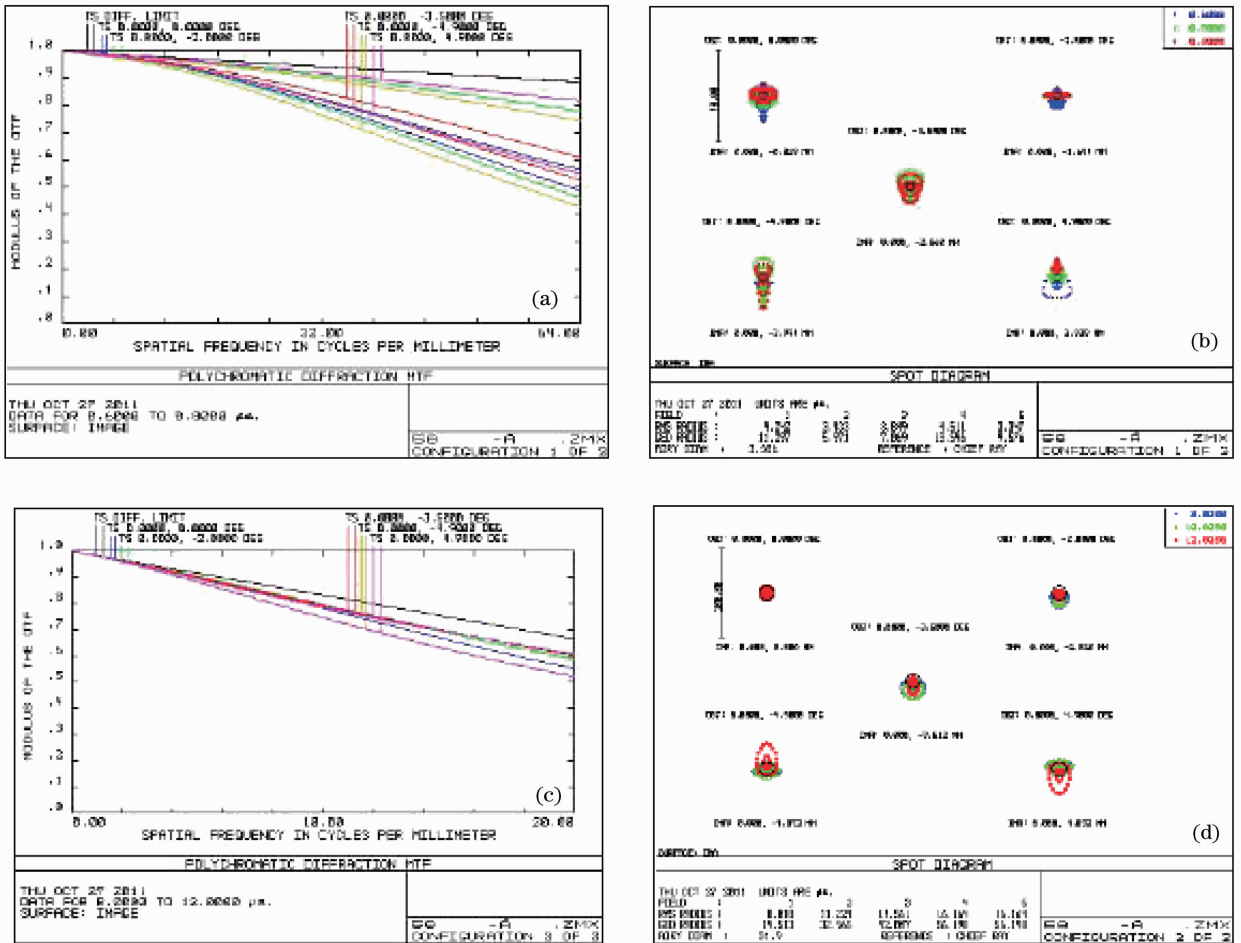


图 4 共光路外调焦系统像质评价函数。(a)可见光分系统的 MTF; (b)可见光分系统的点列图; (c)红外分系统的 MTF; (d)红外分系统的点列图

Fig. 4 Image quality evaluation function of external focusing objective. (a) MTF of visible subsystem; (b) spot diagram of visible subsystem; (c) MTF of IR subsystem; (d) spot diagram of IR subsystem

为了分析系统共聚焦窗口能否在两个波段同时实现聚焦, 以可见光调焦清楚为前提, 对红外系统的离焦量 Δ_2 进行分析。表 3 给出了在 20°C 下两个波

段的离焦量。可以看出: 红外分系统在工作距离 15 m 时的离焦量约为 $25 \mu\text{m}$, 小于红外系统的焦深 $\pm 38 \mu\text{m}$ 。表明可见光与红外两个分系统可以实现

同时聚焦,即在某一温度下,对同一物距的目标可以通过移动聚焦窗口使可见光和红外分系统同时清晰成像,并在聚焦的同时实现热补偿。

整个光学系统的尺寸为 $50\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 128\text{ mm}$,工作温度 T 范围为 $-30\text{ }^\circ\text{C} \sim +60\text{ }^\circ\text{C}$,工作距离 L 为 $15 \sim 1600\text{ m}$,窗口的最大调焦移动距离为 9 mm 。

表3 系统调焦分析(工作温度: $20\text{ }^\circ\text{C}$)

Table 3 System focusing analysis (operating temperature: $20\text{ }^\circ\text{C}$)

f'		L/m	$\Delta_2/\mu\text{m}$
f'_{IR}/mm	$f'_{\text{VIS}}/\text{mm}$		
300	270	200	1.91
300	270	100	3.82
300	270	90	4.24
300	270	80	4.77
300	270	70	5.45
300	270	60	6.36
300	270	50	7.63
300	270	40	9.54
300	270	30	12.72
300	270	20	19.08
300	270	15	25.44

4 结 论

随着图像融合技术的不断发展,双波段甚至多波段光学系统的应用越来越广泛。双波段光学系统已由最初的双镜头形式发展到现在的反射、折反、折射等多种组合形式,而折射共光路系统已成为手持式观测仪器的发展趋势,不仅可以实现大口径、大视场成像,而且能够有效地消除视差,为后续的实时图像处理、快速观测、瞄准奠定基础。

本文采用聚焦窗口共光路双波段成像形式,通过调节窗口实现双波段的同时聚焦,且红外通道的 F 数达到 1.3,具有较大的通光能力,系统体积小、结构紧凑、操作性好,适合手持式望远镜应用。结合已有的双波段彩色融合处理算法及其硬件处理电路,VIS/LWIR 双波段彩色融合望远镜原理样机正在制作中,预期可在战场伤员救援、森林火灾预防等领域获得较好的应用。

参 考 文 献

1 Shi Shiming, Wang Lingxue, Jin Weiqi *et al.*. A dual-band color imaging system for visible and thermal IR images based on color transfer in YUV color space[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, **30**(1): 30~35

史世明,王岭雪,金伟其等.基于YUV空间色彩传递的可见光/热成像双通道彩色成像系统[J]. *兵工学报*, 2009, **30**(1): 30~35

2 Wang Lingxue, Shi Shiming, Jin Weiqi *et al.*. Color transfer and its real-time system based on a YUV space for dual-channel video images[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(3): 189~191

王岭雪,史世明,金伟其等.基于YUV空间的双通道视频图像色彩传递及实时系统[J]. *北京理工大学学报*, 2007, **27**(3): 189~191

3 Luo Yuan, Wang Lingxue, Jin Weiqi *et al.*. Developments of image processing algorithms and systems for LLL(Vis.)/IR color night vision[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(6): 337~344

骆媛,王岭雪,金伟其等.微光(可见光)/红外彩色夜视技术处理算法及系统进展[J]. *红外技术*, 2010, **32**(6): 337~344

4 Zhang Xingde, Li Ronggang, Liu Lin *et al.*. Research and development of dual-band infrared camera system[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(8): 801~804

张兴德,李荣刚,刘琳等.红外双波段成像系统的研究与发展[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(8): 801~804

5 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lü Baobin *et al.*. Design of new-style unobscured three-mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1144~1147

郭永祥,李英才,吕保斌等.一种新型无遮拦三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1144~1147

6 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683

郭永祥,李英才,梁天梅等.一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2680~2683

7 Cai Zhan'en, Liu Zhaohui, Huang Jing *et al.*. Dual band night vision R-C system with wide field of view and large relative aperture[J]. *J. Applied Optics*, 2010, **31**(4): 525~528

蔡占恩,刘朝晖,黄静等.大视场大相对孔径双波段夜视R-C系统设计[J]. *应用光学*, 2010, **31**(4): 525~528

8 Cai Zhan'en, Liu Zhaohui, Huang Jing *et al.*. Optical design for low-level-light color night vision system and its image quality evaluation[J]. *J. Applied Optics*, 2010, **31**(5): 695~700

蔡占恩,刘朝晖,黄静等.微光彩色夜视光学系统设计与像质评价[J]. *应用光学*, 2010, **31**(5): 695~700

9 Chang Jun, Liu Liping, Wang Yongtian *et al.*. Dual-band infrared optical system with large field-of-view and aperture[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, **25**(3): 170~172

常军,刘莉萍,王涌天等.大视场、大口径双波段红外非制冷光学系统[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(3): 170~172

10 Wang Haitao, Geng Anbing. Unified infrared imaging optical system of dual spectral[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(3): 489~492

王海涛,耿安兵.一体化红外双波段成像光学系统[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(3): 489~492

11 Peter S. Paicopolisa, Jonathan G. Hixsonb, Valerie A. Noseckc. Human visual performance of a dual band I2/IR sniper scope[C]. *SPIE*, 2007, **6737**: 67370N

12 Evan Zhang, James S. Zhang, Vivian W. Song *et al.*. Pixel by pixel VIS/NIR and LIR sensor fusion system[C]. *SPIE*, 2003, **4820**: 535~549

13 Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in $8 \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2089~2092

陈潇,杨建峰,马小龙等. $8 \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 折-衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2089~2092