文章编号:1002-2082(2010)04-0525-04

大视场大相对孔径双波段夜视R-C系统设计

蔡占恩[1,2]，刘朝晖[1]，黄　静[1,2]，牛金星[1,2]
(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所，陕西 西安 710119；
2. 中国科学院 研究生院，北京 100039)

摘　要：为了利用可见光波段和长波红外波段所蕴含的不同信息进行数据融合和实时彩色显示，设计了一种大视场的单通道双光谱R-C结构。双谱光学系统的具体结构为R-C系统加校正镜，采用主镜后分光，利用二向分光镜反射可见光波段，透射长波红外波段。全视场角和相对孔径分别为5°和1∶1.7；次镜遮拦比为1∶3；光学系统在可见光波段MTF=0.60的成像质量对应的空间频率为50 lp/mm，在长波红外波段MTF=0.30的成像质量对应的空间频率为15 lp/mm。对该系统的结构特点进行分析和讨论，给出了各种像差曲线和光学传递函数。

关键词：夜视光学系统；大视场；大相对孔径；双波段
中图分类号：TN22；TH703　　**文献标志码**：A

Dual band night vision R-C system with wide field of view and large relative aperture

CAI Zhan-en[1,2], LIU Zhao-hui[1], HUANG Jing[1,2], NIU Jin-xing[1,2]
(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;
2. Graduate University of CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: Low-level-light color night vision systems are developing from the single band to the multi-band, and information from visible band and long wave infrared (LWIR) band is used to generate fused image and color vision. A dual-band optical system is developed, which made of Ritchie-Crétien (R-C) system, correcting lens, and the beam-splitter which reflects in visible region and transmits in the long wave infrared (LWIR) region. Its full field of view and relative aperture are 50 and F/1.7 respectively, the ratio of scondary mirror's central obstruction is 1∶3, and MTF is higher than 0.60 at 50 lp/mm in the visible region, higher than 0.30 at 18 lp/mm in the LWIR region. The features of the lens are discussed. The aberration curves and MTF curves of the system are presented.

Key words: night vision optical system; wide field of view; large relative aperture; dual-band

引言

微光夜视技术研究夜天空自然微光的反射和辐射，通过带像增强管的夜视镜对夜天光照亮的微弱目标像进行增强，使微弱照度下的目标成为可见。红外热成像系统是靠目标与背景的辐射产生景物图像。它借助于对红外波段敏感的红外探测器，利用目标与周围环境之间由于温度或辐射的差异所产生的热对比度而成像，从而把人的视觉范围拓展到远红外波段。它可以在全黑下工作，既克服了主动式的易于暴露的弱点，又克服了微光仪器完全依赖于环境自然光和无光不能成像的缺点，具有穿透烟、雾、雨雪等以及识别伪装的能力。随着微光与

收稿日期：2009-11-09；　**修回日期**：2009-11-30
作者简介：蔡占恩(1985－)，男，青海省人，硕士研究生，主要从事微光夜视与红外光学系统设计方面的研究工作。
E-mail：yunpiaoxiang@163.com

红外成像技术的发展,综合和发掘微光与红外图像的特征信息,使其融合成更全面的彩色图像已发展成为一种有效的技术手段。现代军用光电侦察系统以及SAR侦察系统的工作环境相当复杂,而且光学系统绝大多数为单波段系统,在获取信息方面由于局限于单一波段,加之使用区域的不同,目标的伪装,单一波段获取的信息自然就减弱,并且由于目标本身的操作或者行为的改变导致辐射波段移动等原因,使成像系统探测不到目标或者探测准确度下降,甚至形成假信号[1],因此利用多传感器图像融合[6]技术对多源情报信息进行综合处理,将多种先进的探测和情报侦察系统进行系统集成,使其相互补充,达到功能互补、资源共享,探测和对抗性能提高,扩大目标的信息量。国外具体代表性的两家研究机构是法国电子学与应用物理学实验室和美国麻省理工学院林肯实验室。法国电子学与应用物理学实验室成功研制出在3×10^{-3} lx的微光条件下给出比单系统清晰得多的图像。该系统采用的是双镜头方案,存在视差以及为校正视差带来的一系列问题。美国MIT林肯实验室采用的是单通道双光谱融合方案,微光与红外2个图像传感器分别采集来自同一个视场的同一场景。系统中整个视场通过一个二向分光镜,可见光透过分光镜,通过一个透镜组成像在微光像增强CCD上,长波红外光学被分光镜反射,通过长波红外透镜成像在红外焦平面阵列上。本文介绍的光学系统是单通道双光谱系统,解决了双镜头光学系统的视差问题,结构紧凑、同轴度好、光轴稳定性好,为后续数据处理和实时彩色显示提供了便利,运用多面6阶高阶非球面,成功地把R-C光学系统的视场提高到5°。

1　设计思想和过程

1.1　设计思路

传统的双波段光学系统如双通道光学系统存在图像视差问题,需要在后续的图像融合中进行图像配准,这导致图像融合电子设备增多,图像数据处理难度增大,达不到图像实时处理的要求。如果采用单通道直接分光,即先直接分光,然后各个波段独自成像,这样虽然解决了图像视差问题,但整个光学系统的体积和重量过大,不易携带。本文介绍的双波段光学系统共用R-C光学系统,解决了图像视差问题,整个系统体积较小,结构紧凑,可见光波段摄远比为0.95,长波红外波段摄远比为1。

1.2　光学系统主要性能指标

工作波段:　0.5 μm～0.8 μm;8 μm～12 μm

相对孔径:　F≤1.7

全视场:　　$2\omega=5°$

全视场畸变:<2%

光电探测器件:可见光波段采用与超二代像增强器耦合的微光CCD探测器;长波红外波段采用320×240元非制冷型焦平面阵列红外探测器,探测器单元尺寸为45 μm×45 μm;

分光镜:根据光学系统的要求,具体指标(其中T_{ave}与R_{ave}分别表示平均透射率与平均反射率,45°测量)为可见光区0.40 μm～0.80 μm,平均反射率$R_{ave}\geqslant95\%$;长波红外8 μm～12 μm,透射率$T_{ave}\geqslant90\%$。

1.3　光学系统初始结构

经典的卡塞格林系统主镜为抛物面,次镜为双曲面,仅能校正球差,只有在很小的视场范围内得到优良的像质,通常通过转动光学系统的方向来获得更大的观测范围。如果将主镜改为双曲面,则可以校正球差和慧差,视场便可以增大。但为了进一步增大视场,则还需校正场曲、像散和畸变。虽然通过复杂化校正镜可以校正慧差、像散、场曲等,但校正组太复杂,体积较大,而且校正镜的复杂程度与系统F/#也有很大关系,光学系统的F/#越小,受二向分光镜分光空间的限制,校正镜的设计难度越大,因此共轴双反射系统的视场一直小于3°。随着近年来光学制造和加工技术的飞速发展,加之高次非球面和二元光学表面加工技术已经很成熟,加工精度能够达到系统设计公差要求,制造成本越来越低,高次非球面校正像差在光学设计中得到了普遍的应用。高次非球面或二元光学表面面形系数是多个自由变量决定的,为光学系统设计提供了更多的自由度。

双波段光线从同一通光孔径入射到R-C系统,经二向分光镜分光后,在主镜后面实现可见光和长波红外分离,反射可见光波段,透射长波红外波段。分光镜是采用锗作为基片,红外透射的效率可以达到90%以上,反射的效率可以达到95%以上;次镜为一个6阶非球面,通过4片折射透镜校正可见光波段的轴外像差,其中有3面是6阶非球面;用3片锗基片锗和硒化锌(ZnSe)折射透镜校正长波红外波段像差,同时适当地改变R-C系统的结构参数,以适应双波段光谱的优化设计。

R-C 光学系统结构如图1所示,图中 α 为次镜遮拦比:$\alpha=\frac{h_2}{h_1}$; β 为次镜放大率:$\beta=\frac{b-d}{a}$; f' 为R-C 系统焦距; e_1^2 为主镜二次曲面系数; e_2^2 为次镜二次曲面系数; S_{I} 为塞德尔球差系数; S_{II} 为塞德尔慧差系数;

$$r_{01}=2f_1'=2\cdot\frac{f'}{\beta};$$

$$r_{02}=\frac{2\cdot\beta\cdot(-f_1'+b)}{\beta^2-1}=\frac{2\cdot(-f'+\beta\cdot b)}{\beta^2-1};$$

$$d=\frac{\beta f_1'-b}{\beta-1}=\frac{f'-b}{\beta-1};$$

$$\alpha=\frac{b-f'}{(\beta-1)\cdot f_1'}=\frac{\beta b-f'}{(\beta-1)\cdot f'}。$$

由 $S_{\mathrm{I}}=S_{\mathrm{II}}=0\Rightarrow e_1^2=1+\frac{2\cdot\alpha}{(1-\alpha)\cdot\beta^2}$; $e_2^2=\frac{\frac{2\beta}{1-\alpha}+(1+\beta)\cdot(1-\beta^2)}{(1+\beta)^3}$。

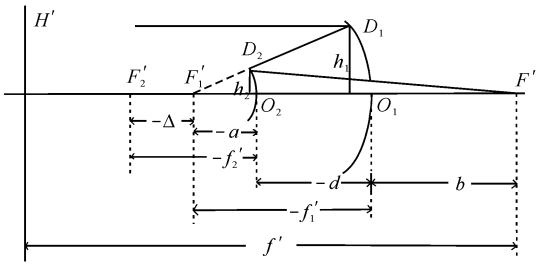

图1　R-C 光学系统结构

Fig. 1　R-C optical system configuration

1.4　系统结构优化及像质评价

在系统初始结构的基础上,利用ZEMAX 软件优化设计,2 个波段内光学系统接近衍射极限,达到了设计要求。图2 为双波段的光学系统示意图。图3 和图4 为系统调制传递函数示意图,图5 和图6 为双波段能量集中度曲线图,图7 和图8 为系统点列图。从图3 和图4 可以看出,可见光波段在空间频率50 lp/mm 处MTF≥0.68;长波红外波段在空间频率15 lp/mm处MTF≥0.35,达到衍射极限,满

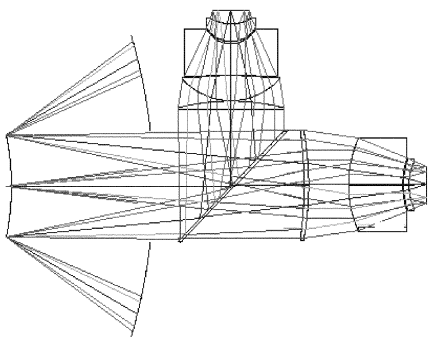

图2　双波段光学系统

Fig. 2　Optics of the dual-band system

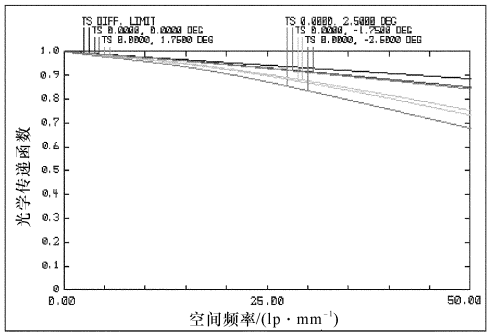

图3　可见光波段光学传递函数

Fig. 3　Optical system MTF of visible band

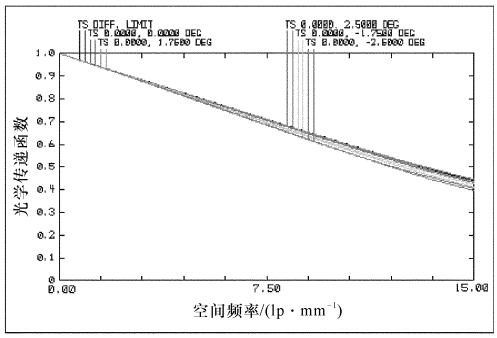

图4　长波红外波段光学传递函数

Fig. 4　Optical system MTF of LWIR

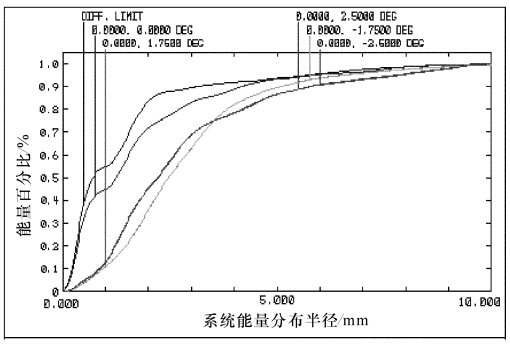

图5　可见光波段系统能量分布

Fig. 5　Encircled energy of visible band

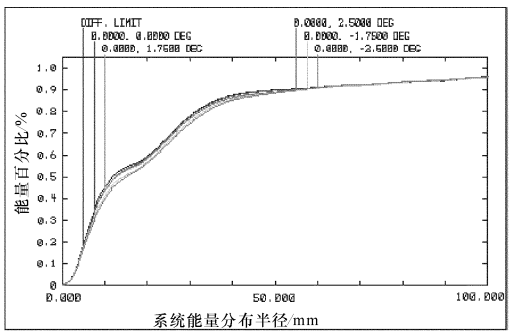

图6　长波红外波段系统能量分布

Fig. 6　Encircled energy of LWIR

足系统设计要求。从图5 和图6 中可以看出,可见光波段 80%能量的像元半径小于 5 μm,长波红外波段 80%能量的像元半径小于 45 μm;从图 7 和图 8 中可以看出,双光谱各视场光线成像光斑半径的均方根值小于 5 μm 和 19 μm,双波段光学系统 90%的能量都集中在一个像元内。

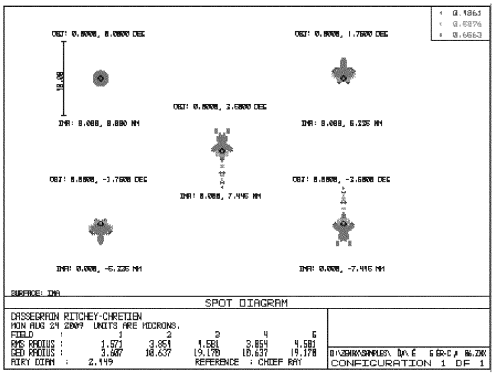

图 7　可见光波段焦平面处系统点列图

Fig. 7　Spot diagram of visible band

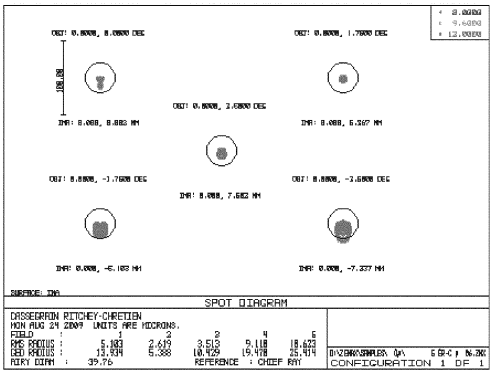

图 8　长波红外波段焦平面处系统点列图

Fig. 8　Spot diagram of LWIR

2　结论

现代光电探测技术向多光谱、多波段发展,利用多个波段传感器,融合来自于不同传感器的信息,提供实时高质量的图像显示。本文利用 6 阶高阶非球面校正高级像差,在保证成像质量的前提下,优化系统结构,成功地把 R-C 光学系统的视场提高到了 5°,解决了大视场、大相对孔径下双镜头光学系统的视差问题,结构紧凑、同轴度好、光轴稳定性好,为后续数据处理和实时彩色显示提供了便利,为可见光与长波红外双光谱融合系统和彩色微光夜视技术提供了一个强光物镜。

参考文献:

[1]　WU Xiao-fang, JIANG Yue-song, SHEN Chun-yan, et al. A hybrid optical system for broadband imaging in guidance and control[J]. SPIE, 2006, 6357. 63574D-1-63574D-7.

[2]　孙强,卢振武,王肇圻. 谐衍射/折射双波段系统设计[J]. 光子学报,2004,24(6):830-833.
SUN Qiang, LU Zhen-wu, WANG Zhao-qi. The dual band design of harmonic diffractive-refractive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(6): 830-833. (in Chinese with an English abstract)

[3]　陶茜,郭宏,王岭雪,等. 一种双通道夜视图像彩色融合系统[J]. 应用光学,2004,25(5):47-50.
TAO Qian, GUO Hong, WANG Ling-xue, et al. A dual-channel night vision color image fusion system [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(5): 47-50. (in Chinese with an English abstract)

[4]　樊学武,马臻,陈荣利,等. 红外双波段卡塞格林光学系统设计[J]. 光子学报,2003,32(4):463-465.
FAN Xue-wu, MA Zhen, CHEN Rong-li, et al. The design of Cassegrain optic system for double infrared wavebands [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 463-465. (in Chinese with an English abstract)

[5]　马韬,沈亦兵,杨国光,等. 一种反射/折射/谐衍射三波段混合成像系统设计[J]. 光学仪器,2006,28(6):59-63.
MA Tao, SHEN Yi-bing, YANG Guo-guang, et al. Optical design of atriple-waveband hybrid system [J]. Optical Instruments, 2006, 28(6): 59-63. (in Chinese with an English abstract)

[6]　倪平平. 红外与微光图像融合夜视系统设计[D]. 南京:南京理工大学,2006.
NI Ping-ping. Night vision system design of image fusion with low-light and thermal infrared [D]. Nangjing: Nangjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)

[7]　蔡炜涛. 微光和红外图像假彩色融合与处理算法研究[D]. 南京:南京理工大学,2002.
CAI Wei-tao. Analysis on theoretic algorithms and false color fusion of low-level-light and infrared image[D]. Nangjing: Nangjing University of Science and Technology, 2002. (in Chinese)