

一种紧凑离轴反射式多波段共用光学系统

焦明印, 李元, 肖相国

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 给出了一种可用于红外热成像、激光测距(照射)及可见光电视的多波段共用离轴反射式望远光学系统, 可结合快速反射镜构成复合稳定光电系统, 具有结构紧凑、重量轻和无中心遮拦的特点, 其中的反射镜均为二次曲面或平面, 相对于常规离轴三反系统具有较好的加工和装调工艺性。

关键词: 光学设计; 反射式光学系统; 多波段共光路

中图分类号: TH74 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)12-0949-04

A Compact Off-axial Reflective Optical System for Multispectral Application

JIAO Ming-yin, LI Yuan, XIAO Xiang-guo

(Xi'an Institute of Applied Optics, xi'an 710065, China)

Abstract: An off-axial multi-spectra common optical path telescopic optical system which is able to be applied to infrared imaging, visible light TV and laser range finder(or pointer) is given. The system has advantages of compact structure, light weight and no central obstruction which can be used for compound stabilization optoelectronic system with fast steering mirror. The mirrors in this system are all conic or planar and the system is easy to be made and assembled being contrasted to normal TMA.

Key words: optical design, reflective optical system, multispectral optical system

0 引言

精确打击武器对光电系统的稳定精度或激光测距(照射)精度提出了更高的要求, 如美国雷神公司应用于全球鹰无人机的光电系统的稳定精度达到了 $3\ \mu\text{rad}$, 洛克希德·马丁公司的狙击手(Sniper)吊舱实现了 $20\ \mu\text{rad}$ 的稳定精度。这些系统均在光路中采用了快速反射镜组件。快速反射镜是压电陶瓷或音圈电机驱动的高频小行程(摆动范围)运动反射镜, 其中以压电陶瓷驱动的为多, 这类反射镜由于行程、频率及到位精度等因素的限制, 目前实用化的反射面尺寸一般不超过 $80\ \text{mm}$; 同时为提高激光照射精度, 一般希望瞄准或跟踪光学系统与激光发射系统共用一个快速反射镜。因此, 将快速反射镜放置于多波段共用望远光学系统的出瞳附近是一种常见的技术方案。共用的望远光学系统有透射和反射2种形式, 透射式的优点是装调相对简单, 缺点是在光谱较宽时, 很难实现全波段消除色差, 需要后续光学系统予以补偿, 致使其通用性变差。反射式系统不存在色差, 因此避免了透射系统的上述问题, 尤其是离轴反射式系统可在

宽波段工作且不存在中心遮拦是其最大优势, 但加工和装调难度相对较大, 且对环境温度较敏感。本文以一具体应用为例, 分析了一种离轴紧凑反射光学系统应用于红外热成像、激光测距(照射)及可见光电视共光路的可行性。

1 系统构成及像质

如前所述, 为兼顾快速反射镜尺寸限制和红外光路的冷屏蔽效率, 系统采用望远光学形式(见图1), 该系统在红外成像领域受到广泛关注^[1-3]。国外已有类似光学形式的应用, 由 Leica-Geosystems AG 公司设计、Contraves Space 公司制作了一个倍率 $10\times$, 入瞳 $135\ \text{mm}$, 视场角 $\pm 1^\circ$ 的星载激光通信离轴望远镜, 其后端集成了激光发射、接收、跟踪传感器。反射镜为具有分区主动温度控制的微晶(zerodur)玻璃。检测结果表明, 在温控条件下, 望远镜的实时波像差为 $\lambda/22\ \text{rms}$ ^[4]。将快速反射镜放置于多波段共用望远光学系统的出瞳附近, 由主、次反射镜构成望远光学系统的物镜, 第三反射镜为望远光学系统的目镜, 折转反射镜的作用是折叠光路使系统更加小巧紧凑。

本文针对的是采用中波红外和可见光电视跟踪目标的激光照射光电吊舱，其光学指标如下：红外波段 3.7~4.8 μm ，可见光波段 0.6~0.9 μm ，激光波长 1.06 μm ；红外视场 0.7°（水平） \times 0.52°（垂直），可见光视场 1°（水平） \times 1°（垂直），激光照射束散角 0.25 mrad；红外相对口径 F/4，可见光相对口径 F/5.6；红外探测器为 640 \times 512 制冷型，可见光探测器为 1024 \times 1024 数字型 CCD。根据入瞳直径和快速反射镜尺寸，确定望远系统倍率 4，此时快速反射镜小于 80 mm，现有技术可以实现。详细设计结果见表 1，其中主、次反射镜及第三反射镜均为二次曲面，折转反射镜为平面。设计过程参见文献[5-8]。红外及可见光波段成像质量见图 2、图 3，激光波段由于是非成像系统未给出像质。需要着重说明的是，所设计的光学系统内部有实像面，当激光能量较高时，实像面处的能量密度很高，将引起空气的电离，可采取充洁净

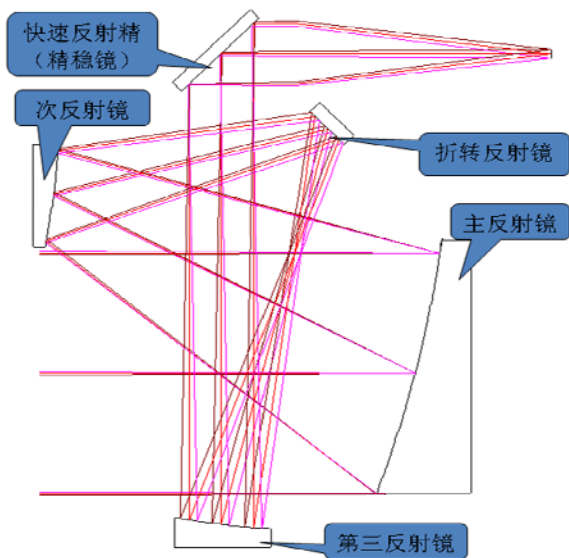


图 1 系统构成外形图
Fig.1 Optical system structure

表 1 反射镜参数	Table 1 Parameters of mirrors		
	第一 反射镜	第二 反射镜	第三 反射镜
曲率半径/mm	910（凹）	627（凸）	450（凹）
K 值	-1	-9.3	-1
面型	抛物面	双曲面	抛物面
净口径/mm	200	80	70
母镜口径/mm	650	240	180
离轴量/mm	225	80	55
焦比	0.7	1.27	1.25
间隔（距下一面） /mm	300	792	440 （距精稳镜）

惰性气体或抽真空方式解决；同时实像面要尽量远离镜面，以免对表面膜层或镜体造成损伤。

2 环境温度适应性分析

对于反射式系统而言，温度场的变化将导致反射镜面型及光学间隔的变化。假定反射镜的基底材料分别为环保 K9（热膨胀系数取 $8.3\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）和熔融石英（热膨胀系数取 $0.5\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ），镜筒及壳体分别采用不同的机械材料如铝（线膨胀系数取 $23.6\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、钛合金（线膨胀系数取 $8.8\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）及钢（线膨胀系数取 $0.56\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）等作为镜筒及壳体材料分析光机系统的环境适应性。

对于红外系统，由于采用的探测器像素尺寸为 15 μm ，在像面上对应的奈奎斯特频率为 33 c/mm。经仿真分析，中心视场奈奎斯特频率处的 MTF 在不同温度下光机系统的像质变化如表 2 所示，计算中反射镜基底材料分别取环保 K9 和熔融石英，壳体材料分别取铝合金、钛合金及钢。

对于可见光系统而言，采用的探测器像素尺寸为 5.5 μm ，在像面上对应的奈奎斯特频率为 90 c/mm。0 视场和 1.0 视场的 MTF 随温度变化曲线见图 4。

从图表中可以看出，当反射镜采用环保 K9 时，壳体材料最好采用钛合金材料；当反射镜采用熔融石英时，壳体最好采用殷钢。这是因为这 2 组材料的热膨胀系数非常接近，热稳态时反射镜和壳体膨胀量相同所致。或者为更好保证系统的环境适应性，可采用温度控制装置，此时反射镜和壳体（镜筒）材料不受限制。

3 公差分析

首先进行红外及可见光波段 MTF 的公差灵敏度分析，红外波段空间频率同样取 33 c/mm（设计值 0.317），可见光波段取 90 c/mm（设计值 0.65）。表 3 为计算时指定的公差值，除二次曲面的旋转角公差设为 0.3 mrad（ $\approx 1'$ ），其余均采用软件默认值，共 33 个公差项，补偿器采用了像面的移动和旋转，共 3 个。

列出灵敏度系数绝对值 >0.001 的公差项如表 4（已略去灵敏度系数绝对值 <0.001 的公差项），绝对值 >0.01 的公差项用倾斜字体标出。

从表 4 中可以看出，主反射镜绕 Y、Z 轴旋转角和次反射镜绕 Y 轴旋转角对 MTF 影响最敏感，下降的 MTF 最大为-0.1278，位置和角度敏感度顺序为：主反射镜 $>$ 次反射镜 $>$ 折转反射镜 $>$ 第三反射镜。所以装调时应以主反射镜为基准，依次调整其它各反射镜。同样可以计算出可见光波段的公差灵敏度。与红

外波段不同的是，可见光波段最灵敏的公差项是二次曲面的 RMS 表面误差，1/20 波长的面型误差 (RMS) 可引起 MTF 由 0.65 降低至 0.51。这是由于可见光波长短，对 RMS 面型误差更敏感所致。所以系统在多波段使用时面型误差必须严格控制。

其次对表 4 所示的公差引起的 MTF 降低采用蒙

特卡洛法进行统计分析，参考标准是奈奎斯特频率下光学系统中心视场的 MTF，其中可见光波段计算时将反射镜的 RMS 表面误差提高至 0.03λ ($\lambda=546.1\text{ nm}$)，分析结果如表 5，其概率与典型空间频率 MTF 的曲线见图 5。可以看出，这样的性能在使用中是完全可以接受的。

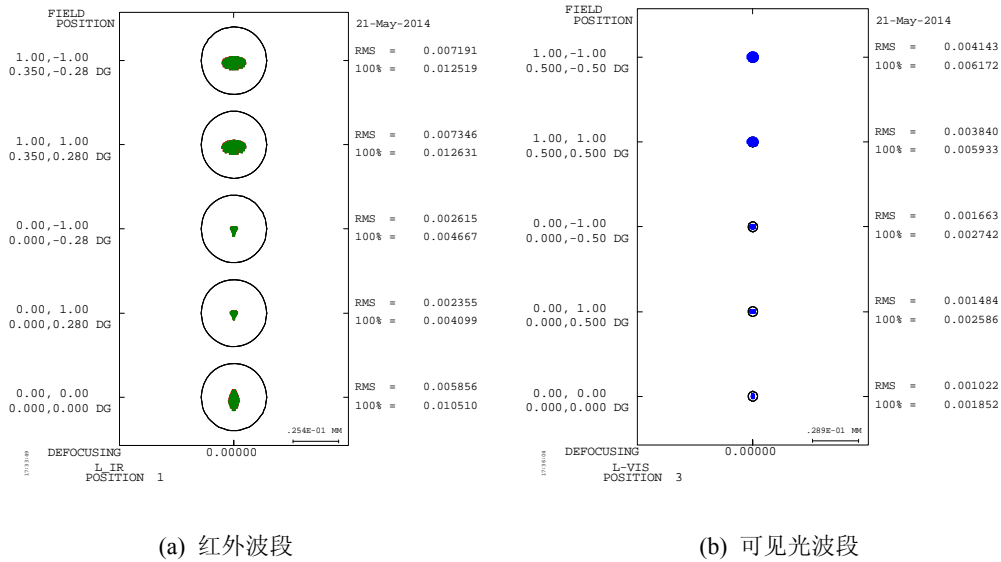


图 2 几何弥散斑 (圆圈为衍射艾里斑外轮廓) Fig.2 Spot diagrams (the circle is the Airy disk)

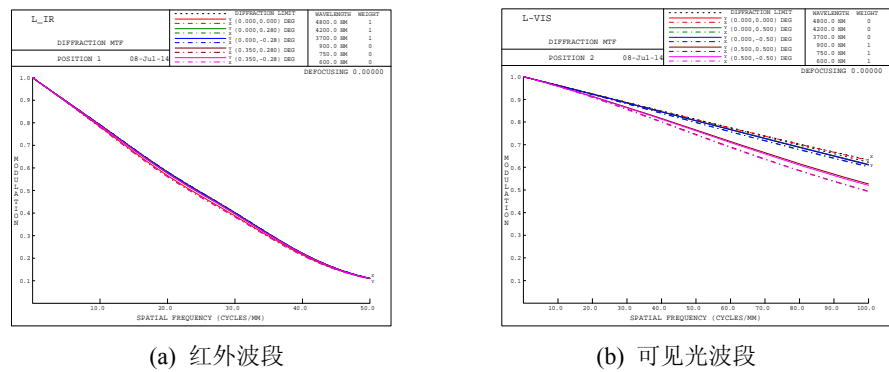


图 3 MTF 曲线 Fig.3 The curves of MTF

表 2 红外波段 MTF 随温度的变化 (空间频率 33 c/mm, 0 视场/1.0 视场)						
Table 2 Decrement of MTF with temperature in infrared band(spatial frequency 33 c/mm,0 field/1.0 field)						
壳体材料	温度					
	-40℃	-20℃	0℃	20℃	40℃	50℃
反射镜材料为环保 K9						
铝合金	0/0.001	0.006/0.01	0.056/0.006	0.319/0.327	0.009/0.04	0.014/0.02
钛合金	0.33/0.31	0.33/0.32	0.324/0.323	0.319/0.327	0.313/0.33	0.31/0.33
锈钢	0.01/0.02	0.011/0.04	0.144/0.239	0.319/0.327	0.254/0.17	0.15/0.07
反射镜材料为熔融石英						
铝合金	0/0.001	0/0.001	0.025/0.017	0.319/0.327	0.01/0.02	0.007/0.01
钛合金	0.022/0.009	0.03/0.013	0.241/0.152	0.319/0.327	0.13/0.22	0.03/0.11
锈钢	0.32/0.326	0.32/0.326	0.32/0.326	0.319/0.327	0.319/0.327	0.32/0.327

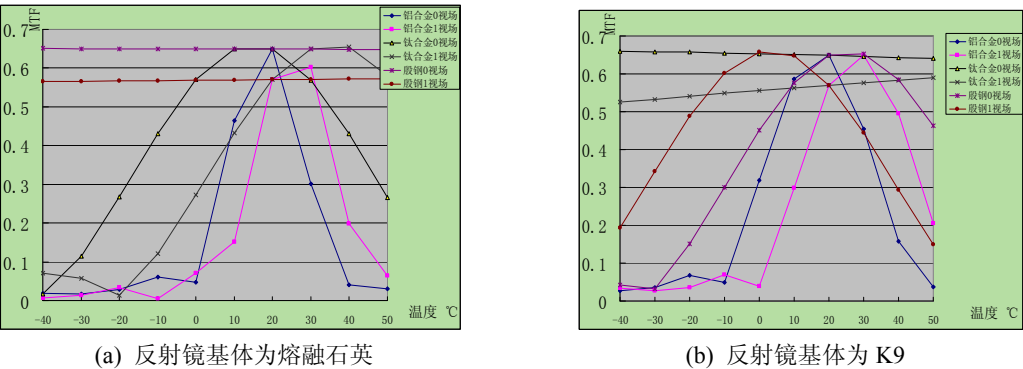


图 4 可见光波段 MTF 随温度的变化曲线

Fig.4 Curves of MTF with temperature in visible band

表 3 公差代号及取值

Table 3 Tolerance code and value		
公差代号	含义	公差值
二次曲面	DLR 曲率半径 R	0.025 mm
	DAK 二次曲面系数 K	0.001
	RSE RMS 表面误差	0.05 λ (546.1 nm)
	DLX X 方向位移	0.025 mm
	DLY Y 方向位移	0.025 mm
	DLZ Z 方向位移	0.025 mm
	DLA 绕 X 轴旋转角	0.3 mrad
	DLB 绕 Y 轴旋转角	0.3 mrad
	DLG 绕 Z 轴旋转角	0.3 mrad
平板反射镜	DLF 整体光圈 N	5
	DLZ Z 方向位移	0.025
	CYD 0°方向局部光圈 ΔN	1
	CYN 45°方向局部光圈 ΔN	1
	DLA 绕 X 轴旋转角	0.001 rad
	DLB 绕 Y 轴旋转角	0.001 rad
补偿器	DLZ 像面 Z 方向位移	
	DLA 像面绕 X 轴旋转角	
	DLB 像面绕 Y 轴旋转角	

表 4 各公差项的灵敏度

公差代号	含义	MTF 变化值	灵敏度系数
RSE S1	主反射镜表面误差 (RMS)	−0.0021	−0.002077
RSE S2	次反射镜表面误差 (RMS)	−0.0020	−0.002036
RSE S4	第三反射镜表面误差 (RMS)	−0.0022	−0.002195
DLX S1	主反射镜 X 方向位移	−0.0043	−0.004282
DLX S2	次反射镜 X 方向位移	−0.0032	−0.003150
DLA S1	主反射镜绕 X 轴旋转角	−0.0020	−0.001597
DLB S1	主反射镜绕 Y 轴旋转角	−0.1278	−0.127762
DLG S1	主反射镜绕 Z 轴旋转角	−0.0308	−0.030798
DLB S2	次反射镜绕 Y 轴旋转角	−0.0244	−0.024363
DLG S2	次反射镜绕 Z 轴旋转角	−0.0029	−0.002903
DLB S3	折转反射镜绕 Y 轴旋转角	−0.0045	−0.004530

表 5 红外及可见光波段典型空间频率 MTF 降低及其概率

Table 5 Decrement of MTF and it's probability at Nyquist frequency in infrared and visible band

概率	Δ MTF (红外波段)	Δ MTF (可见光波段)
50%	−0.0425	−0.0742
84.1%	−0.0801	−0.1086
97.7%	−0.1177	−0.1430
99.9%	−0.1553	−0.1774

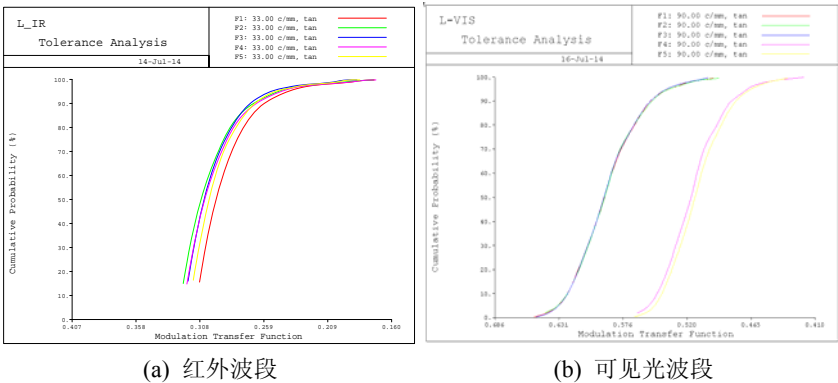


图 5 典型空间频率下 MTF 及其概率曲线

Fig.5 The curves of MTF vs. probability at Nyquist frequency

靶面大部分信息可见,但光斑内有小部分信息丢失;图5(d)相对于图5(c),靶标中心光斑最亮处的信息依旧存在,没有发生淹没现象,且其他位置部分的增强效果良好。

实验结果表明:本文的水下激光距离选通图像双平台直方图增强算法效果良好,在“对比度差”情况下,经过实时处理后,原来较难辨识的靶标轮廓、靶面部分信息都可以被分辨出来;在“照明不均匀”情况下,既可增强光斑外的区域,又可保留光斑内的细节信息,获得更多的全视场信息。

4 结语

本文采用帧叠加+双平台直方图均衡化实时增强算法,实现了水下激光距离选通成像的图像增强,实验证明:在采用适当的帧叠加方法有效降低距离选通图像噪声的基础上,单平台直方图均衡化的处理效果优于传统的全局直方图均衡化,而双平台直方图均衡化的处理效果又优于单平台直方图均衡化的效果。本文双平台直方图均衡化算法已成功移植到实验室研制的水下激光距离选通成像系统的FPGA控制与图像处理平台,对高性能水下选通成像设备的发展具有推进作用。

参考文献:

- [1] 金伟其,王霞,曹峰梅.水下光电成像技术与装备研究进展(下)[J]. 红外技术, 2011, 33(3): 125-132.
- [2] 石丹,李庆武,范新南.基于Contourlet变换和多尺度Retinex的水下图像增强算法[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 041001(47): 1-5.
- [3] 葛卫龙,张晓晖,韩宏伟.基于DM642的激光水下图像处理系统设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1641-1645.
- [4] 林晓春,李存志.采用AMMDFM方法对水下微光图像进行增强处理[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2006, 33(4): 543-546.
- [5] Silverman J. *Display and enhancement of infrared images*[M]. Electro-Optical Displays, New York: M.A.Karim, 1992: 585-651.
- [6] 王钰,陈钱,张保民.微光电视自适应实时帧积分处理图像增强[J]. 兵工学报, 2000, 21(3): 237-240.
- [7] 冈萨雷斯. *数字图像处理*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [8] 李力,金伟其,黄有为.一种低对比度可见光超视距成像的实时图像增强方法[J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 242-247.
- [9] Sos. S. Agaian, Blair Silver, Karen A. Panetta. Transform coefficient histogram-based image enhancement algorithms using contrast entropy [J]. *IEEE transaction on image processing*, 2007, 16(3): 741-758.
- [10] Xilinx Inc. Embedded System Tools Reference Manual[R]. http://china.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx11/est_rm.pdf.
- [11] 国际电信联盟. 国际电信联盟无线电通信部门 656-3 号建议书[J]. http://www.eet-china.com/ARTICLES/2006SEP/PDF/DTCOL_2006SEP04_AVDE_DIST_TA_01.PDF.

(上接第952页)

4 结论

针对具体应用给出了适用于多波段复合稳定的离轴反射光学系统,该系统具有结构紧凑、重量轻和无中心遮拦的特点,其中的反射镜均为二次曲面或平面,相对于常规离轴三反系统具有较好的加工和装调工艺性。合理匹配镜体和壳体材料,该系统可适应一般军用环境温度的要求,为保证可见光波段的像质,应严格控制二次曲面的面型精度。

参考文献:

- [1] Vizgaitis, J. N. Third generation infrared optics[J]. *SPIE*, 2008, 6940: 0S-1-0S-10.
- [2] Kunick, Joseph M. Multiple field of view reflective telescope: US,

6970286 B1[P]. 2004-06-23.

- [3] 李岩,张葆,洪永丰.灵巧型离轴三反光学系统设计[J]. 应用光学, 2014, 35(3): 391-394.
- [4] Bemhard B. *Advanced Optics Using Aspherical Elements*[M]. SPIE Press, 2007: 147-155.
- [5] 梁宝雯,吴晗平,王华泽.空间相机离轴三反红外光学系统设计[J]. 红外技术, 2013, 35(4): 217-222.
- [6] 姚波,袁立银,亓洪兴,等.双通道成像光谱仪共用离轴三反射光学系统的设计[J]. 红外技术, 2013, 35(7): 419-424.
- [7] 邵明东,郭疆,孙继明.离轴三反测绘相机调焦机构的设计[J]. 中国光学, 2012(4): 373-379.
- [8] 潘君骅. *光学非球面的设计、加工与检验*[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 157-167.