

双色红外共光路辐照度测量系统设计

陈灵芝 牟 达 李全勇 胡初强

(长春理工大学现代光学测量技术实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 针对测量红外目标模拟器的辐照度值所设计的辐照度测量系统,其光学系统特点是改善辐射光束的能量分布,将能量集中到探测器上。根据双色和单色探测器的不同用途,单个双色探测器和两个单色探测器的双色红外共光路光学系统均能够满足辐照度测量系统的需求。双色探测器难以得到,但对应的光学系统结构简单,调制传递函数响应度高,实用性强;单色探测器容易得到,但对应的光学系统结构复杂,不过仍然有很好的像质,满足辐照度测量光学系统的要求。光学设计结果表明,3~5 μm 的中红外波段和 8~12 μm 的长波红外波段在两个系统中同时较好地完成了像差校正,系统畸变都很小,最大不超过 0.7%,调制传递函数曲线均接近衍射极限。

关键词 光学设计;红外系统设计;双色红外;共光路;辐照度测量

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.042202

Dual-Color Co-Aperture Infrared Optical System Design for Irradiance Measurement

Chen Lingzhi Mu Da Li Quanyong Hu Chuqiang

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Irradiance measurement system is designed for the irradiance measurement of infrared (IR) target simulator. Its optical system is featured in improving the energy distribution of irradiating light beam and focusing the energy onto the detector. According to the different usages of dual-color and single-color infrared focal plane arrays (IRFPA), co-aperture optical systems of both a dual-color IRFPA detector and two single-color IRFPA detectors can meet the irradiance measurement requirements. Dual-color detector is difficult to obtain but the structure is simple, the modulation transfer function (MTF) response is higher, and the utility is better; on the other hand, the single-color detector is easy to obtain but the structure is relatively complicated. However, the latter still has a good imaging quality and can be used in the optical system. The design result shows that the aberrations in the wave bands of mid-IR (3~5 μm) and middle IR (8~12 μm) are simultaneously adjusted in both systems. The system distortion is small, with the maximum no more than 0.7%, and the MTF approaches the diffraction limit.

Key words optical design; infrared-system design; dual-color infrared; co-aperture; irradiance measurement

OCIS codes 220.4830; 230.0040; 110.3080

1 引言

辐照度是计量辐射中基本的参数,为研究各种辐射源提供了重要依据。标准红外目标模拟器使用的辐照度值一般非常小,很难用探测器进行直接测量,而且其本身的各组成部分,如黑体辐射源和准直仪组合起来后的总体结构难以用测试结果准确得出。客观因素比如实验环境中的灰尘、污物等都会对测量的精确性造成较大的误差。辐照度的精确测量对我国的国民经济和国防科技水平有着重大的意义。本文提出一种双色红外共光路系统,在目标不充满视场的情况下,辐照度测量仪均能保证精确的辐照度测量,特别是在接收能量衰减的情况下仍能保持高精度。

收稿日期: 2011-10-12; 收到修改稿日期: 2011-10-25; 网络出版日期: 2012-01-19

作者简介: 陈灵芝(1987—),男,硕士研究生,主要从事红外光学系统设计方面的研究。E-mail: ringschan@126.com

导师简介: 牟 达(1979—),女,博士,讲师,主要从事光学设计和现代光学测试技术等方面的研究。

E-mail: md-79@126.com

2 设计要求

对红外目标模拟器辐照度测量所需要的光学系统来说,红外光学系统的作用是改善辐射光束的能量分布,将能量集中到探测器上特定面积的光敏元件上,从而提高光敏面上的信噪比,精确地测量出目标的能量大小。项目设计要求的参数如表 1 所示。

表 1 项目设计要求参数
Table 1 Parameters required by the project design

Field of view / (°)	F number	Effective entrance pupil diameter /mm	Focal length	Wave band / μm
1.72	4	100	400	3~5, 8~12

针对项目具体要求,可以看出这是一个典型的小视场、大 F 数的红外光学系统。根据公式

$$d = 2f' \tan \omega, \quad (1)$$

将 $f' = 400 \text{ mm}$, $2\omega = 1.72^\circ$ 代入后可以求出 $d = 12 \text{ mm}$ 。(1) 式中 d 为探测器有效光敏面直径, f' 为物镜的焦距, 2ω 为视场角。这样就可以确定所需要的红外探测器的有效光敏元件直径应该略大于 12 mm 。

信噪比公式为^[1]

$$R_{\text{SN}} = (W_{\text{T}\epsilon_{\text{T}}} - W_{\text{B}\epsilon_{\text{B}}}) \tau_{\text{A}} \frac{\tau_0 d'}{4F} \frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}}, \quad (2)$$

式中 $W_{\text{T}\epsilon_{\text{T}}}$ 为目标信号辐射能量, $W_{\text{B}\epsilon_{\text{B}}}$ 为背景噪声能量, τ_{A} 为大气透射率, $\frac{\tau_0 d'}{4F}$ 为光学系统透过效率, $\frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}}$ 为探测器效率。从(2)式可以看出除了外界条件之外,光学系统的性能直接决定了辐照度能量的测量精度。

要找到满足设计要求的双色红外探测器比较困难,如果无法获得一个同时接收两个红外波段的双色探测器,那就需要两个探测器来接收两个红外波段,所以本文给出两种光学系统设计,分别使用单色探测器组合和双色探测器,以在不同情况下提供符合项目要求的光学系统。

3 双色探测器系统设计

3.1 系统设计

利用 Zemax 软件来设计此光学系统。对于初始结构的选择,双色探测器系统设计不需要将中波红外和长波红外在接收光路后面分光,可以选择相对简单的系统。

简单的光学系统一般分为单片式、两片式和三片式^[2]。单透镜不能消除基本像差(梯度折射率透镜除外,但加工工艺要求太高,不易实现);双胶合结构胶合面材料不好选取和控制,双分离结构虽然能够满足基本的像差优化,传递函数响应高,但这种结构对像面位移很敏感,不适合要求较高的光学系统的设计。因此,本文选定一种三片式红外系统作为初始结构进行优化设计。

项目要求光学系统改善辐射能量分布,尽量将能量集中到特定面积的光敏元件上,也就是说光学系统的像质评价标准为小的畸变和高的传递函数响应,前者能保证能量分布在特定面积上,而后者则保证将各种像差控制在合理范围之内^[3]。

在中波和长波红外波段通常采用的材料包括锗、硅、硫化锌等,在选择材料时通过不同组合来保证最好的成像质量。对于该三片式结构,选择了硫化锌-硒化锌-锗的组合,此材料组合在红外波段范围内有良好的透射率。对于 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 中波红外,光学系统的三维(3D)结构如图 1 所示。确定初始结构和像质评价标准,经过一系列优化后得到中波($3\sim 5 \mu\text{m}$)和红外波段的畸变和调制传递函数(MTF),如图 2,3 所示。

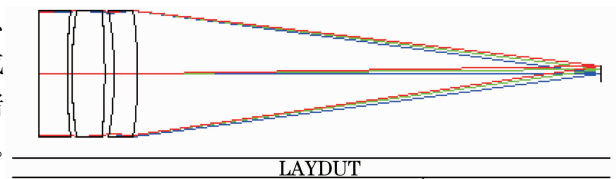
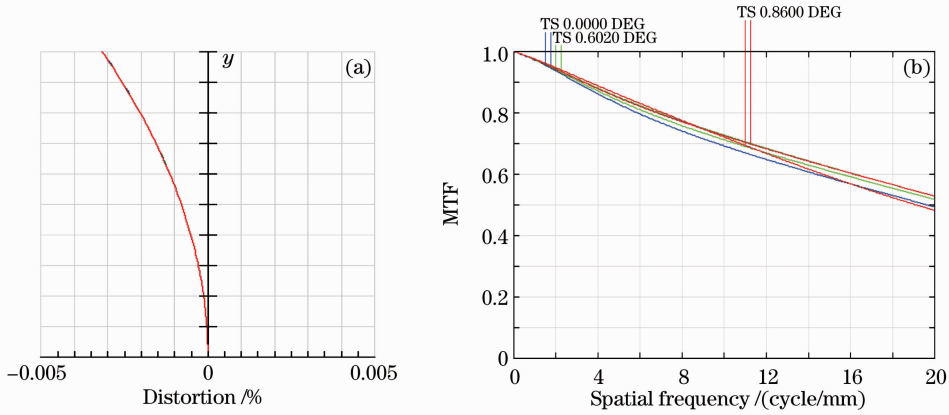
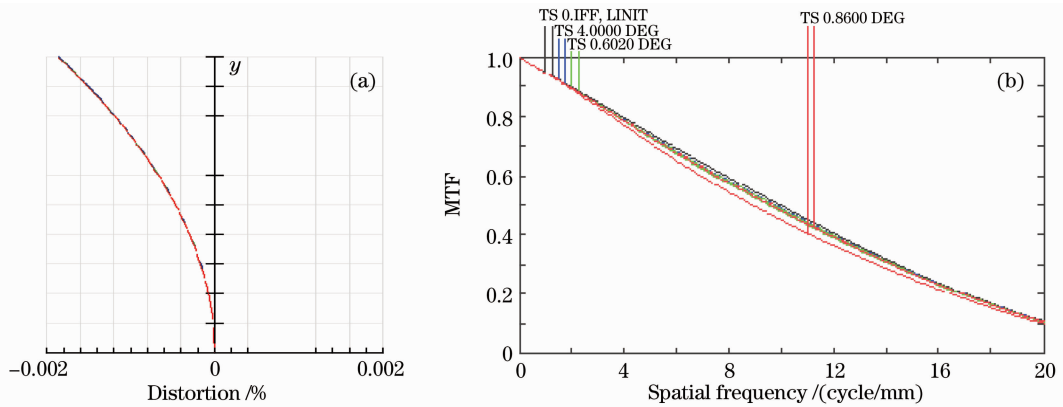


图 1 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 光学系统三维结构图(双色探测器)

Fig. 1 3D layout of the $3\sim 5 \mu\text{m}$ optical system with dual-color detector

图 2 3~5 μm 光学系统的(a)畸变和(b) MTF(双色探测器)Fig. 2 (a) Distortion and (b) MTF of the 3~5 μm optical system (dual-color detector)图 3 8~12 μm 光学系统的(a)畸变和(b) MTF(双色探测器)Fig. 3 (a) Distortion and (b) MTF of the 8~12 μm optical system (dual-color detector)

3.2 像质评价

从图 1 可以看出 3~5 μm 中波红外系统结构简单,其总长为 459.7 mm、从图 2 可以看出,3~5 μm 畸变控制在 0.002% 以内,说明畸变非常小;而其 MTF 几乎已经达到中波红外的衍射极限,说明像差控制得很好。

图 3 中 8~12 μm 长波红外光学系统畸变同样很小,由于长波红外衍射极限比中波红外要低,其 MTF 能够接近衍射极限,说明像质良好,各个技术指标也能够达到项目的要求。

4 单色探测器系统设计

4.1 系统设计

要利用两个单色探测器来设计符合项目要求的光学系统,如果分别用两个系统来设计,结构就过于复杂,制造成本过高,不符合光学设计的基本理念。在光学系统中需要将中波红外和长波红外分为两条光路分别探测,并在同一光路中实现,选择合适的接收系统物镜至关重要。红外光学系统物镜的设计大多采用反射式物镜。因为能满足各种物理、化学和机械性能要求的红外透光材料不多,因而设计一个消色差的透镜系统比较困难。反射系统没有色差,工作波段很宽,并且对反射镜的材料要求不高,口径也可以做得比较大;但也存在不少缺点,如视场小以及体积大和中心有遮拦等。

主要的反射式物镜^[1]包括牛顿系统、卡塞格林(卡氏)系统、格氏系统、施密特系统、曼金折反射镜和包沃斯-马克苏托夫系统。与卡氏、格氏系统比较,牛顿系统的镜筒很长,重量大,这是红外装置所不希望的。而卡氏和格氏系统多了一个非球面次镜,系统为折叠式,不但镜筒短,而且利用多出的可以比牛顿系统更好地校正轴外像差。在相同的系统焦距与相对孔径的情况下,卡氏系统的次镜挡光小,镜筒更短,比格氏系统更

显优越。虽然格氏系统能成正立的像,但对红外探测器来说,瞬时视场内无需区分正倒像,所以一般考虑使用卡氏系统来作为光学系统的物镜。

本文选择利用卡氏系统^[4,5]作物镜来接收红外目标模拟器的辐射能量。选定一种卡氏系统经过主镜开口处理后得到初始结构如图 4 所示的卡氏系统。

经过卡氏系统的光中包含中波红外和长波红外,要对其进行分光处理,在分光之前要考虑是否使用一次像面。由于所用到的双色红外探测器是非制冷的,不需要考虑由于制冷原因造成的对比度降低的问题,所以不设置一次像面。分光材料的选择有很多,例如在分光镜上镀膜,能够透过中红外反射远红外,透射率和反射率要高的材料:8~12 μm 的长波段采用锗底带通滤光片;3~5 μm 的中波段采用宝石基底带通滤光片^[6,7]。也可利用镜面做反射系统而舍弃折射系统,这样系统的设计将更简单,首次系统接收辐射可以不用任何元件直接让光透过系统折射到探测器上接收,第二次利用镜面反射到另一条光路上来探测。因此选择利用两个倾斜 45° 的镜面组合来折转光路,将系统添加多重结构之后中波红外在结构中不添加任何折转光路,直接经过开口和场镜后成像在单色红外探测器光敏面上。场镜在此处的作用^[8]是控制像差,因为主镜和次镜产生的和场曲为正场曲,需要添加辅助镜片来校正。如上所述,最主要的就是控制畸变。不添加场镜时得到的像质非常差,硅+锗的组合十分有利于色差校正,降低色差和光焦度分配,而且硅对长波红外透射率非常低,适合用在这个波段,锗是对所有红外波段有良好透射率的材料,因此这个结构中选择了硅+锗+硅的三片式结构群组来尽量消除卡氏系统物镜带来的像差,如图 5 所示。

添加场镜之后要对整个系统进行优化设计。在手动修改各个面的半径和厚度值时发现主镜的二次曲面系数值对系统非常敏感,特别是对传递函数曲线。将主镜二次曲面系数值和三片场镜的半径值作为变量,主要控制有效焦距、畸变和系统总长,对系统进行优化,得到如图 6 所示的畸变值和 MTF 曲线。

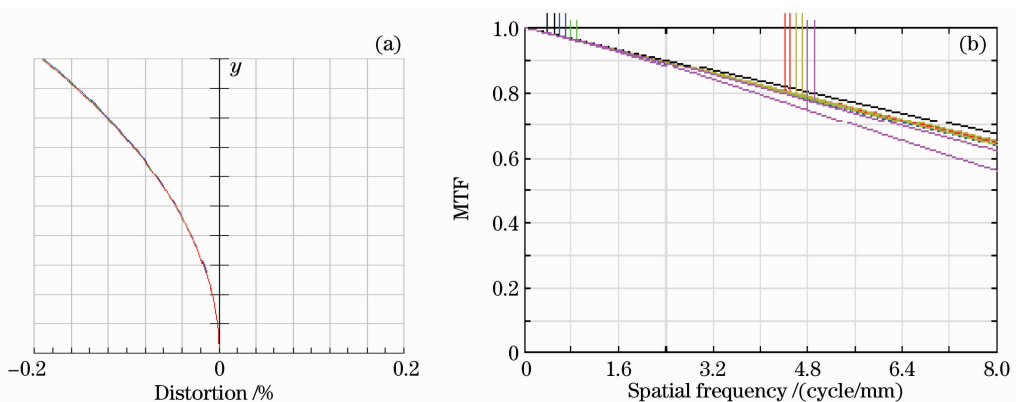


图 6 3~5 μm 光学系统的(a)畸变和(b) MTF(单色探测器)

Fig. 6 (a) Distortion and (b) MTF of the 3~5 μm optical system (two single-color detectors)

对于长波红外的光束从开口中出来之后,选择用两片镜面来进行光路折转,因为镜面的对长波红外透射率非常低,这样几乎可以将辐射能量 100% 地传输,如图 7 所示。

在探测器接收能量之前同样要对系统的像差进行控制。与中波红外一样,在成像之前要使用场镜消除像差,在考虑结构复杂性之后选择使用锗+硫化锌双分离结构来满足需求,硫化锌对长波红外透射率非常高。虽然双分离结构有一些缺点,但在该系统中不会对其做任何移动处理,所以影响很小。将整个配置做优

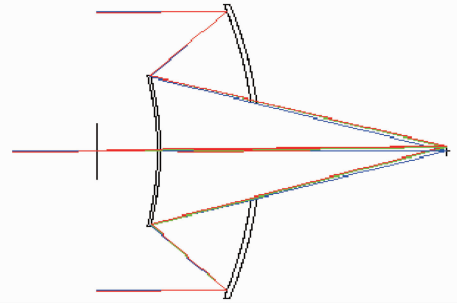


图 4 卡氏系统基本结构

Fig. 4 Basic structure of Cassegrain system

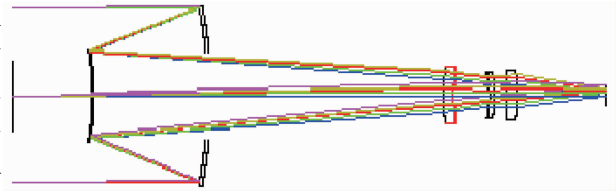


图 5 3~5 μm 三维光路结构(单色探测器)

Fig. 5 3D layout of the 3~5 μm optical system with two single-color detectors

化处理,先手动调整各个面的曲率半径、厚度及二次曲面系数值,寻找敏感面,选定主镜二次曲面系数值和两片场镜半径值,主要针对畸变和 MTF 曲线进行优化。对厚度值稍作调整,得到如图 8 所示的畸变值和 MTF 曲线。

4.2 像质评价

从图 6 可以看出,中波红外畸变值虽然比双色探测器系统大很多,但仍在 0.2% 以内,满足设计要求;而且 MTF 曲线响应度比较高,几乎达到衍射极限。从图 8 可以看出,长波红外畸变控制得比较小,在 1% 以内;MTF 曲线接近衍射极限,各个技术指标满足项目要求。

5 结 论

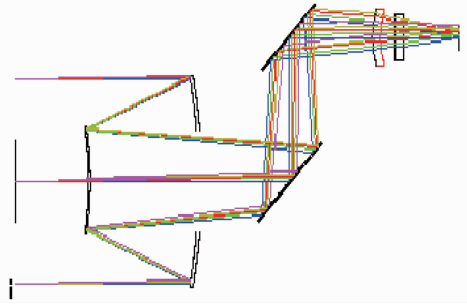


图 7 8~12 μm 三维结构图(单色探测器)
Fig. 7 3D layout of the 8~12 μm system with two single-color detectors

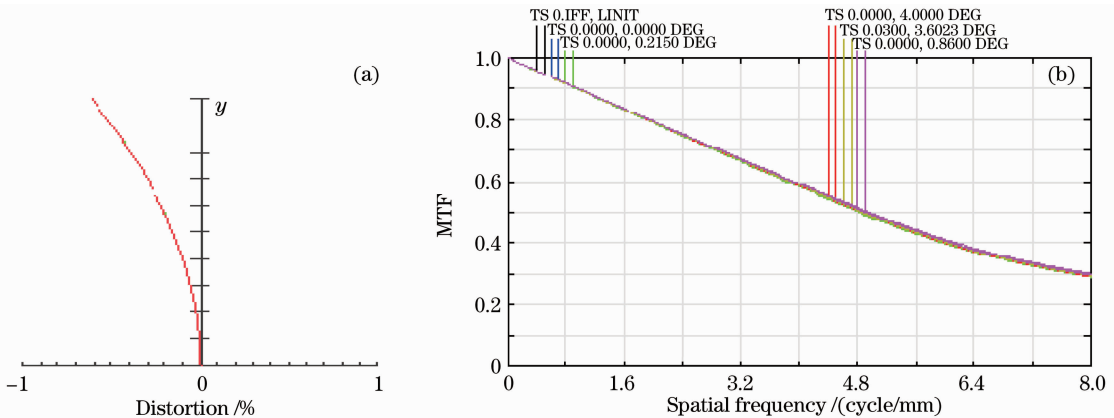


图 8 8~12 μm 光学系统的(a)畸变和(b) MTF(单色探测器)
Fig. 8 (a) Distortion and (b) MTF of the 8~12 μm optical system (two single-color detectors)

综上所述,不管是利用单色探测器还是双色探测器光学系统,红外目标模拟器的辐照度测量所需要的主要还是改善能量的分布、尽可能将能量集中到探测器光敏元件,并提高元件信噪比。本文所利用的双波段共光路系统可以很好地满足这一基本要求。

参 考 文 献

- 1 Max J. Riedl. Optical Design Fundamentals For Infrared Systems[M]. Bellingham: SPIE Press, 1995. 14
- 2 Yuan Xucang. Optical Design[M]. Beijing: Science Press, 1983. 635~644
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 635~644
- 3 He Hongxing, Zhao Jingsong, Pan Shunchen *et al.*. Common-aperture optical system for MWIR/SWIR polarization imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 932~936
何红星, 赵劲松, 潘顺臣 等. 共口径中波/短波偏振红外成像光学系统[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 932~936
- 4 M. Laikin. Lens Design (4th ed.) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2006. 219~236
- 5 Fan Xuewu, Ma Zhen, Chen Rongli *et al.*. The design of Cassegrain optic system for double infrared wavebands[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 464~465
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): 464~465
- 6 Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8~12 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2090~2092
陈 潇, 杨建峰, 马小龙 等. 8~12 μm 折-衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2090~2092
- 7 Zhang Yu, Yang Changcheng, Yang Kuntao. Design on athermal infrared diffractive/refractive hybrid optical system in 8~14 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1535~1538
张 羽, 杨长城, 杨 坤涛. 8~14 μm 波段折衍混合红外光学系统的热补偿设计[J]. 光学学报, 2010, **25**(11): 1536~1538
- 8 Liu Lin, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 675~679
刘 琳, 沈为民, 周建康 等. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 675~679